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

На правах рукописи

afry

Прокудин Александр Владимирович

ТИРИСТОРНОЕ УСТРОЙСТВО ГАШЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Специальность 05.09.12 – Силовая электроника

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель кандидат технических наук, профессор Гольдштейн Михаил Ефимович доктор технических наук, доцент Коржов Антон Вениаминович

оглавление

ОГЛАВЛЕНИЕ	
ВВЕДЕНИЕ	
1. ГАШЕНИЕ ПОЛЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ:	СПОСОБЫ,
УСТРОЙСТВА СВОЙСТВА И ПРОБЛЕМЫ	
1.1 Назначение режима гашения магнитного поля	
1.2 Процесс гашения поля синхронного генератора	
1.3 Обзор распространенных способов гашения поля	
1.4 Устройства гашения поля с синтезированной ВАХ	
1.5 Проблема минимизации времени горения дуги и вольтамперная ха	арактеристика
устройства гашения поля	
1.6 Выводы	
2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ И ХАРАКТЕРИСТИК ТИР	ИСТОРНОГО
УСТРОЙСТВА ГАШЕНИЯ ПОЛЯ	
2.1.1 Схема и описание работы устройства	
2.1.2 Схема замещения ТУГП	
2.2 Общее описание электромагнитных процессов в тиристорно	м устройстве
гашения поля	
2.3 Вольтамперная характеристика ТУГП	
2.4 Влияние параметров элементов ТУГП длительность процесса гап	цения поля 70
2.4.1 Длительность работы ступеней	
2.4.2 Влияние числа ступеней и коэффициента пульсаций на длительн	юсть процесса
гашения поля	
2.5 Работа ТУГП при наличии переменной составляющей в	гоке обмотки
возбуждения	
2 6 Альтернативный алгоритм переключения гасящих цепей	

3. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТИРИСТОРНОГО УСТРОЙСТВА ГАШЕНИЯ
ПОЛЯ В НЕКОТОРЫХ РЕЖИМАХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И ВЫБОР
ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА 86
3.1 Режим внезапного трехфазного короткого замыкания
3.1.1 Параметры режима и подходы к его расчету
3.1.2 Методика расчета режима ТУГП при внезапном трехфазном коротком
замыкании
3.2 Учет некоторых особенностей конструкции синхронного генератора
3.2.1 Учет насыщения магнитной системы
3.2.2 Учет действия демпфирующих контуров 101
3.3 Исследование коммутационных процессов в тиристорном устройстве гашения
поля и управление ими 113
3.3.1 Процесс отключения тиристора 114
3.3.2 Перенапряжения в схеме тиристорного устройства гашения поля 118
3.3.3 Включение тиристоров гасящих цепей 125
3.3.4 Периодический сброс состояния силовых триггеров
3.4 Выводы
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 141
4.1 Описание и работа экспериментальной установки 141
4.1.1 Описание экспериментальной установки 141
4.1.2 Работа экспериментальной установки и ТУГП 146
4.2 Расчет параметров режима и проверка работы ТУГП 150
4.2.1 Определение параметров синхронного генератора
4.2.2 Расчет режима ТУГП 154
4.2.3 Экспериментальная проверка установки и оценка ее работы 157
4.3 Экспериментальные исследования некоторых свойств и характеристик
тиристорного устройства гашения поля161
4.3.1 Сравнительные испытания различных способов гашения поля 161
4.3.2 Экспериментальное исследование зависимости времени гашения поля от
частоты следования импульсов

4.4 Выводы	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	
ПРИЛОЖЕНИЕ А	
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	
ПРИЛОЖЕНИЕ В	

введение

Актуальность работы. На 1.10.2021 г. по данным Системного оператора Единой энергосистемы в Российской Федерации электроэнергия производилась на 880 электростанциях мощностью 5 МВт и более [1]. Общая установленная мощность электростанций в составе Единой Энергосистемы России составила 247209,26 МВт. Доля электростанций с синхронными генераторами составила 243,9 ГВт или 98,7% от общей мощности электрогенерирующих объектов. Общее количество синхронных генераторов, работающих в объединенной энергосистеме составляет тысячи штук. При таком большом объеме оборудования остро встает вопрос предотвращения аварий и минимизации ущерба от них.

Известно, что для снижения ущерба от аварии необходимо как можно быстрее прекратить протекание тока через место повреждения [2]. При наличии выключателя между источником электроэнергии и местом повреждения это достигается отключением этого выключателя [3]. В случае аварии на выводах статора генератора или в самом генераторе, где нет никаких коммутационных аппаратов, уменьшить время протекания тока через место повреждения можно только за счет прекращения выработки электроэнергии самим генератором. Быстрое уменьшение ЭДС статора генератора достигается за счет принудительного быстрого ослабления магнитного поля до нуля, называемого режимом гашения магнитного поля [4, 5].

В соответствии с опубликованными открытыми данными Министерства энергетики РФ [6], в 2016 г. из 3943 аварий на объектах генерации в 6,6% случаев происходило повреждение турбогенератора. В 2015 г., по данным этого же источника, в 13% из всех аварийных случаев на электростанциях приходилось на турбогенераторы. В 2001-2005 г.г. средняя повреждаемость турбогенераторов составила 7,81% в год или 576 шт. аварий за 5 лет [7]. В 20,5% аварий за указанный период повреждался статор турбогенератора, 16,9% повреждений статора сопровождалось возникновением междуфазного короткого замыкания. Количество прочих повреждений, требующих аварийного гашения магнитного поля

турбогенератора, составило 70 шт. за период 2001-2005 г.г.. Таким образом, в 15,6% случаях за 6 лет эксплуатации потребовалось аварийное гашение магнитного поля генератора. Так же существует экспертное мнение о том, что развитию аварии на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г. способствовало неудачное гашение магнитного поля гидрогенератора №2 [8].

Вопросы гашения поля синхронных генераторов возникли сразу с появлением первых электростанций в конце XIX века. В XX веке развитие технологий гашения поля шло по пути совершенствования специализированных коммутационных аппаратов, обладающих рядом неустранимых недостатков: недостаточная нелинейность и невозможность управления вольтамперной характеристикой, зажигание дуги в выключателе, большая длительность гашения магнитного поля [9, 10]. Применение полупроводниковых устройств для гашения поля генераторов свелось лишь к использованию нелинейных резисторов [10]. В ряде публикаций [9, 11, 12] отмечается что применение гибкого управления электромагнитными процессами, основанного на изменении вольтамперной характеристики гасящего элемента, либо создания сложной ВАХ, позволяет уменьшить время гашения магнитного поля генератора. Однако, только в XXI веке, с развитием элементной базы стало возможным реализация устройств гашения поля с управляемой вольтамперной характеристикой. Разработанное в данной работе тиристорное устройство гашение магнитного поля ликвидирует недостатки, присущие современным способам гашения магнитного поля.

Приведенные выше факты свидетельствуют об актуальности диссертационного исследования, в процессе которого изучаются вопросы формирования управляемой вольтамперной характеристики средствами силовой электроники, создание и применение тиристорных устройств гашения магнитного поля синхронных генераторов.

Степень научной разработанности проблемы. Процессы гашения магнитного поля синхронных генераторов, схемы и режимы устройств гашения магнитного поля рассматриваются в большом числе публикаций. Основными работами по этому направлению являются монографии авторов: О.Б. Брон, И.А.

6

Глебов, С.А. Ульянов, Е.Я. Казовский, А.А. Ковач, И.П. Крючков, В.А. Веников, В.С. Костелянец, Jicheng Li, М.Е. Гольдштейн и д.р.

Устройство гашения магнитного поля с управляемой характеристикой с применением устройств силовой электроники рассматривается в работе Jicheng Li. При этом автор ограничивается двумя ступенями гашения магнитного поля на основе линейных резисторов, не рассматривает процессы коммутации ступеней, блокирования дуги в коммутационном аппарате и переходе тока с возбудителя на гасящий элемент. Модель, приведенная в работе Jicheng Li, направлена больше на упрощенное описание электромагнитных процессов в контуре обмотки возбуждения синхронного генератора, чем на определение свойств и параметров самого устройства гашения магнитного поля.

Подробно вопросы бездуговой коммутации цепей постоянного тока с помощью средств силовой электроники применительно к тяговым подстанциям железнодорожного транспорта рассматриваются в работе Ю.М. Бея. Из-за того, что области небольшой В этой электротехники применяются реакторы с индуктивностью, автор не уделяет внимания гашению запасенной энергии магнитного поля. В статьях авторов Emilio Rebollo и Carlos Platero формирование двухступенчатой ВАХ устройства гашения магнитного поля средствами силовой электроники рассматривается только в вопросе бездуговой коммутации цепи обмотки возбуждения, зашунтированной нелинейным сопротивлением.

Способ формирования заданной вольтамперной характеристики устройства гашения магнитного поля синхронного генератора путем переключения линейных резисторов предложен М.Е. Гольдштейном в начале 2000-х годов и защищен патентом.

Изучение публикаций показывает, что в достаточной степени не рассмотрены вопросы: формирования многоступенчатой ВАХ гасящего элемента, выбора параметров устройства, особенностей электромагнитных процессов в цепи обмотки возбуждения при ступенчатом изменении шунтирующего сопротивления, процессов коммутации гасящих ступеней устройства гашения магнитного поля.

7

Также никто не рассматривает работу подобных устройств при наличии переменной составляющей в токе обмотки возбуждения, что требует ГОСТ.

Объект исследования – тиристорное устройство гашения магнитного поля с синтезируемой вольтамперной характеристикой для систем возбуждения синхронных генераторов.

Предмет исследования – электромагнитные процессы, схемы, режимы работы, характеристики и способы управления тиристорными устройствами гашения магнитного поля синхронного генератора.

Цель работы – развитие теории тиристорных устройств гашения магнитного поля синхронного генератора с целью уменьшения времени гашения магнитного поля и повышения надежности эксплуатации систем возбуждения синхронных генераторов.

Идея работы заключается в применении синтезируемой вольтамперной характеристики в тиристорном устройстве гашения магнитного поля синхронного генератора.

Задачи диссертации. Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Формулирование требований к вольтамперной характеристике устройства гашения магнитного поля синхронного генератора, опираясь на анализ электромагнитных процессов в цепи обмотки возбуждения синхронного генератора и ограничения, накладываемые действующими нормами.

2. Оценка на основе сформулированных критериев известных способов гашения магнитного поля синхронных генераторов, выявление достоинств и недостатков, определение путей совершенствования устройств с синтезируемой ВАХ.

3. Исследование и анализ работы тиристорного устройства гашения магнитного поля в различных режима синхронного генератора и учетом особенностей его конструкции.

4. Разработка математической модели тиристорного устройства гашения магнитного поля с целью исследования его режимов работы.

5. Исследование алгоритмов управления тиристорным устройством гашения магнитного поля.

6. Экспериментальная проверка полученных теоретических результатов.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовался аппарат линейной алгебры, математического анализа, теории вероятностей и электрических цепей, численные методы решения систем линейных уравнений, экспериментальные исследования на физической модели.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата, а также совпадением в пределах погрешности основных результатов, полученных на основе аналитических выражений, с результатами эксперимента на физической модели тиристорного устройства гашения магнитного поля.

Положения, выносимые на защиту:

1. Управляемое тиристорное устройство гашения магнитного поля синхронного генератора с синтезируемой вольтамперной характеристикой, отличающееся варьируемым числом гасящих ступеней и контролируемой вольтамперной характеристикой в произвольном диапазоне токов на всем интервале процесса гашения магнитного поля от начала расхождения контактов выключателя до снижения тока обмотки возбуждения до нуля.

2. Математическая модель тиристорного устройства гашения магнитного поля с синтезируемой вольтамперной характеристикой, учитывающая число гасящих ступеней, вид и способ формирования вольтамперной характеристики устройства, алгоритм управления и наличие переменной составляющей в токе обмотки возбуждения при коротких замыканиях в цепи статора генератора.

3. Методика выбора параметров тиристорного устройства гашения магнитного поля и его структурных элементов, обеспечивающая достижение требуемых характеристик и функциональных свойств.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Предложен новый принцип формирования управляемой вольтамперной характеристики устройства гашения магнитного поля синхронного генератора,

9

позволяющий, за счет ступенчатого изменения эквивалентного сопротивления устройства и числа параллельно включенных линейных резисторов, получить заданную ВАХ и снизить время гашения магнитного поля.

2. Получено теоретическое описание электромагнитных процессов в контуре обмотки возбуждения В различных режимах синхронного генератора, отличающееся тем, что учтена работа тиристорного устройства гашения магнитного поля, в результате чего определены режимы элементов устройства, установлено влияние параметров и настроек тиристорного устройства на динамику процесса гашения магнитного поля синхронного генератора, найдены оптимальные значения параметров устройства, обеспечивающие минимальное время гашения магнитного поля, выявлены критические параметры режима, влияющие на выбор элементов устройства.

3. Впервые применен алгоритм управления гасящими цепями устройства гашения магнитного поля, построенный на основе системы двоичного исчисления, многократно увеличивающий число формируемых ступеней в вольтамперной характеристике устройства, что повышает качество синтезирования ВАХ.

4. Проработаны вопросы бездуговой коммутации цепей возбуждения синхронного генератора с применением средств силовой электроники, определены критерии блокирования дуги, предложены схемотехнические решения, проверенные в ходе эксперимента на физической модели.

5. Рассмотрены вопросы обеспечения устойчивости коммутации тиристоров гасящий цепей и надежности работы тиристорного устройства гашения магнитного поля. В соответствии с найденными критериями получены схемные решения и расчетные выражения для определения параметров элементов устройства.

Практическая значимость:

 Разработано, теоретически и экспериментально исследовано тиристорное устройство гашения магнитного поля синхронного генератора, применение которого позволило уменьшить длительность процесса гашения магнитного поля в 3-4 раза по сравнению с устройствами, использующими непереключаемый линейный резистор. 2. Получены рекомендации по рациональному выбору параметров тиристорного устройства гашения магнитного поля и его элементов, при котором достигается минимальная длительность процесса гашения магнитного поля, обеспечивается блокирование зажигания дуги в выключателе цепей возбуждения.

3. Разработанное тиристорное устройство гашения магнитного поля может использоваться как при проектировании новых систем возбуждения синхронных генераторов, так и при реконструкции действующего оборудования.

4. Предложена и проверена экспериментально оригинальная методика безопасного проведения опыта по определению постоянных времени синхронного генератора методом гашения магнитного поля с использованием элементов штатной системы возбуждения.

Реализация и внедрение результатов:

1. В 2010 г. выполнена научно-исследовательская работа «Разработка и исследование системы возбуждения генератора с тиристорным устройством гашения магнитного поля и микропроцессорным управлением» №4932р/7318 при финансировании Фонда содействию развития малого и среднего бизнеса РФ, программа «Старт» (рег. номер 01.2.007 08038).

2. Разработана и изготовлена экспериментальная установка, содержащая модель тиристорного устройства гашения физическую магнитного поля синхронного с помощью которой генератора, получены результаты проверки идей, экспериментальной предложенных подтверждающие теоретические предположения.

Результаты работы внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ) по дисциплине «Системы возбуждения синхронных генераторов», рассмотрены и положительно оценены экспертами ПАО Фортум.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на: Ш международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Екатеринбург, октябрь 2012 г.), IV международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Новочеркасск, октябрь 2013 г.), 62-й, 65-й и 73-й научных

11

конференциях «Наука ЮУрГУ» (г. Челябинск, апрель 2010 г., апрель 2013 г., апрель 2021 г.), Межвузовском научном конгрессе (г. Москва, июль 2020 г.).

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 12 печатных работах, в том числе 5 печатных статьях в ведущих рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК РФ. Получен патент на полезную модель «Устройство гашения магнитного поля синхронной машины».

Личный вклад автора. Автором разработана математическая модель тиристорного устройства гашения магнитного поля синхронного генератора для произвольных числа гасящих ступеней и диапазона токов обмотки возбуждения. На основе разработанной модели автором получены описания и характеристики электромагнитных процессов в цепи обмотки возбуждения с тиристорным устройством гашения магнитного поля, решены вопросы устойчивой коммутации тиристорных ячеек и повышения надежности устройства. Автором проработаны вопросы блокирования зажигания дуги в выключателе цепей возбуждения и предложены технические решения. Автор самостоятельно разработал и изготовил экспериментальную установку «синхронный генератор – система возбуждения», содержащую физическую модель тиристорного устройства гашения магнитного провел экспериментальные исследования. поля, И Автором предложена оригинальная методика экспериментального определения постоянных времени синхронного генератора методом гашения магнитного поля с использованием штатной системы возбуждения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 104 наименования и 3 приложений. Работа представлена на 193 страницах машинописного текста, в том числе, 66 рисунков и 10 таблиц.

Соответствие научной специальности: исследование, проведенное в рамках диссертационной работы, соответствует формуле и области исследования, приведенным в паспорте специальности 05.09.12, в частности:

- пункту 1 паспорта специальности (Разработка научных основ создания схем и устройств силовой электроники, исследование свойств и принципов

функционирования элементов схем и устройств.) соответствуют результаты №1, 2, 4;

- пункту 2 паспорта специальности (Теоретический анализ и экспериментальные исследования процессов преобразования (выпрямления, инвертирования, импульсного, частотного и фазочастотного регулирования и т.п.) в устройствах силовой электроники с целью улучшения их технико-экономических и эксплуатационных характеристик.) соответствуют результаты № 2, 4, 5;

- пункту 3 паспорта специальности (Оптимизация преобразователей, их отдельных, функциональных узлов и элементов) соответствуют результаты № 1, 3;

- пункту 4 паспорта специальности (Математическое и схемотехническое моделирование преобразовательных устройств) соответствуют результаты № 2, 4.

1. ГАШЕНИЕ ПОЛЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ: СПОСОБЫ, УСТРОЙСТВА СВОЙСТВА И ПРОБЛЕМЫ

1.1 Назначение режима гашения магнитного поля

Система возбуждения синхронного генератора (СВ) это комплекс устройств, предназначенный для питания автоматически регулируемым выпрямленным током обмотки возбуждения синхронного генератора во всех его режимах [4, 5]. СВ является важным элементом электростанции, так как непосредственно связана с работой синхронного генератора. В процессе эксплуатации система возбуждения обеспечивает следующие режимы генератора: начальное возбуждение, холостой ход, номинальный режим при работе в сети, форсировка возбуждения, развозбуждение, гашение поля и асинхронный режим [4, 5, 13–16]. Кроме этого на систему возбуждения возложены функции защиты генератора со стороны обмотки возбуждения.

При эксплуатации синхронных генераторов возможно возникновение аварий и нештатных ситуаций, при которых требуется быстрое уменьшение ЭДС статора генератора до нуля. Предотвращение повреждения генератора или снижение ущерба от аварии возможно только при быстром гашении магнитного потока возбуждения до значения, близкого к нулю [2, 4]. Стандарт IEEE Std. 421.1 режим гашения магнитного поля определяет как «удаление возбуждения синхронной машины основным или резервным возбудителем» [17]. Таким образом, режим генератора, результатом которого является принудительное быстрое ослабление магнитного поля до нуля, называется режимом гашения магнитного поля [9]. Все системы возбуждения должны обеспечивать режим гашения поля [18]. Гашение магнитного поля генератора предусматривается в следующих случаях [18]:

- пуск защит от внутренних повреждений статора и ротора генератора, блочного трансформатора;

- недопустимая перегрузка генератора;

- переход генератора в асинхронный режим с потерей возбуждения;

- повышение напряжения статора выше допустимого в режиме холостого хода.

Т.е. режим гашения поля наступает в тех случаях когда происходит аварийное отключение генератора от сети и требуется снижение напряжения статора до нуля.

ГОСТ 21558-2018 [5] определяет режим гашения магнитного поля (*далее по тексту – гашения поля*) как «принудительное монотонное или колебательное возбуждения турбогенератора (гидрогенератора, снижение до нуля тока синхронного компенсатора)». При этом устанавливаются основные параметры процесса гашения поля: время гашения поля и полное время гашения поля. Время гашения поля определяется как интервал времени в секундах с момента поступления команды на гашение до момента прохождения тока возбуждения через ноль [4]. «Нулем» для тока возбуждения принимается величина в 3% от значения тока возбуждения холостого хода. При этом за конечное значение тока возбуждения при гашении поля принята величина, соответствующая напряжению статора, при котором происходит естественное погасание дуги. Для большинства случаев напряжение погасания дуги составляет 500 В [9]. Полное время гашения поля характеризует время снижения магнитного потока синхронной машины: интервал времени в секундах с момента подачи команды на гашение поля до момента, когда напряжение или ток статора турбогенератора (гидрогенератора, синхронного компенсатора), находящегося в режиме холостого хода или установившегося трехфазного короткого замыкания, достигнут значения, равного 110 % установившегося остаточного значения напряжения или тока статора при отсутствии тока в обмотке возбуждения [4].

К системе возбуждения, касательно обеспечения режима гашения поля, предъявляются следующие требования [4, 5]:

- система возбуждения должна иметь основное и резервное устройство гашения поля;

- основное устройство гашения поля (УГП) в составе системы возбуждения должно обеспечивать гашение поля при всех видах внутренних повреждений генератора при работе в сети с током возбуждения, не превышающим номинальное значение, а также в режиме форсировки на холостом ходу;

- система возбуждения должна обеспечивать отключение УГП при работе генератора на сеть, на холостом ходу, в режимах: асинхронном, несимметричном и неполнофазном, а также повторное включение после устранения причины отключения;

- система возбуждения средствами УГП должна обеспечивать отключение сколь угодно малого и включение любого возможного в эксплуатации тока возбуждения;

- система возбуждения должна обеспечивать гашение поля при изменении частоты статора генератора от 35 до 55 Гц для турбогенераторов, и от 40 до 80 Гц для гидрогенераторов;

- действие устройства гашения поля в составе системы возбуждения не должно зависеть от полярности тока возбуждения синхронной машины;

- во всех режимах работы системы возбуждения мгновенные значения напряжения на клеммах обмотки возбуждения не должны превышать 70% от амплитуды полного испытательного напряжения этой обмотки относительно корпуса [4]. По ГОСТ 60034-1 для большинства синхронных генераторов испытательное напряжение изоляции обмотки возбуждения составляет десятикратное номинальное значение напряжения возбуждения, но не менее 1500 В и не более 4000 В плюс двукратное номинальное напряжение возбудителя [19];

- при оперативном обслуживании система возбуждения должна обеспечивать гашение поля отключенной от сети синхронной машины таким образом, чтобы мгновенное значение напряжения на изоляции обмотки возбуждения не превышало 50% от амплитуды испытательного напряжения обмотки возбуждения [4];

- собственное время отключения УГП в составе системы возбуждения не должно превышать 0,1 с [4].

Величины времени гашения поля и полного времени гашения поля не нормируются и, с целью минимизации ущерба при аварии, должны быть минимальными. Поэтому, целью разработки устройства гашения поля является обеспечение минимального времени гашения поля. Принятые критерии оценки процесса гашения поля синхронного генератора. Момент завершения процесса гашения поля, как и время гашения поля, задается как момент времени с начала процесса гашения поля, в который ток возбуждения снизится до такой величины, при которой напряжение статора соответствует естественному погасанию дуги. В работе [9], исследующей данный вопрос, величина конечного тока определена в 1/105 от номинального значения тока возбуждения I_{fHOM} .

Момент полного завершения процесса гашения поля, как и полное время гашения поля, задается как момент времени, в который напряжение статора генератора соответствует естественному погасанию дуги. В работе [9] величина напряжения определена в 500 В или 1/105 от *U*_{СТ,НОМ}=13500 В.

Кратность напряжения при гашении поля, K_{Π} , - отношение величины максимального напряжения на выводах обмотки возбуждения при гашении поля к значению номинального напряжения возбуждения U_{fHOM} [20]. Так как нормы не допускают появление перенапряжений на изоляции обмотки возбуждения свыше 0,7 от испытательного напряжения [4, 5], то максимально допустимое значение K_{Π} для реального турбогенератора не может быть больше 7 о.е..

1.2 Процесс гашения поля синхронного генератора

Структура системы возбуждения

Система возбуждения состоит из нескольких основных узлов (рисунок 1.2.1): возбудитель A1 — источник регулируемого выпрямленного тока, быстродействующий коммутационный аппарат Q1, устройство гашения поля – A2, устройство защиты о перенапряжений – A3, обмотка возбуждения генератора FWG (ОВГ или FWG — Field Winding of Generator), устройства защиты, автоматики системы возбуждения A4 [20, 22].



Рисунок 1.2.1 – Структурная схема системы возбуждения

В различных системах возбуждения узлы Q1, A2 и A3 могут быть объединены в единое устройство – устройство гашения поля, выполняющее как функции гашения поля, так и функцию защиты обмотки возбуждения FWG от перенапряжений. В бесщеточных системах возбуждения зачастую элементы Q1 и A2 отсутствуют [22].

Схема замещения контура возбуждения

Основными элементами контура возбуждения синхронного генератора являются: возбудитель и обмотка возбуждения генератора. В схемах замещения контура возбуждения синхронного генератора обмотку возбуждения часто представляют цепью последовательно включенных активного сопротивления R_f и индуктивности L_f (рисунок 1.2.2) [20, 21–25]. При этом приняты допущения: магнитная система синхронного генератора не испытывает насыщения; отсутствует реакция статора (режим холостого хода); нет демпфирующих контуров. Возбудитель на данном этапе исследования допустимо представить источником ЭДС E_d как это сделано в [20].

Кроме возбудителя и обмотки возбуждения для рассмотрения процессов гашения поля в контур включаются коммутационные аппараты Q1, Q2 и устройство гашения поля R.



Рисунок 1.2.2 – Схема замещения контура возбуждения

Описание процесса гашения поля

Процесс гашения магнитного поля синхронного генератора направлен на вывод энергии из обмотки возбуждения генератора с целью ослабления создаваемого ею магнитного поля. Суть процесса гашения поля сводится к отключению обмотки возбуждения от источника тока возбуждения (возбудителя A1 E_d на рисунке 1.2.2) и подключения к устройству A2 (R), поглощающему энергию, накопленную в FWG.

При токе возбуждения генератора *I*_{f0} для предшествующего режима в индуктивности обмотки возбуждения *L*_f накоплена энергия:

$$W_{\rm FWG} = \frac{L_f I_{f0}^{2}}{2}.$$
 (1.2.1)

Минимальное время вывода накопленной энергии достигается при максимальной скорости данного процесса, что соответствует максимуму мощности *p*_{DE}:

....

$$\frac{\mathrm{d}W_{\mathrm{FWG}}}{\mathrm{d}t} = p_{\mathrm{DE}}(t) \to \max. \qquad (1.2.2)$$

Если выводимая из FWG мощность *p*_{DE} зависит от напряжения на обмотке возбуждения:

$$p_{\rm DE}(t) = i_f(t) \cdot u_f(t),$$
 (1.2.3)

то максимальная скорость вывода энергии из обмотки возбуждения будет достигнута при $u_f(t) \rightarrow \infty$. С учетом того, что допустимая величина напряжения на выводах ротора ограничивается электрической прочностью изоляции обмотки [4, 5, 26] на уровне, не превышающем $U_{fMAXDOR}$, условие обеспечения максимальной скорости вывода энергии окончательно записывается как:

$$u_f(t) = U_{fMAX, IO\Pi}.$$
(1.2.4)

Так как напряжение на обмотке возбуждения в процессе гашения поля определяется свойствами устройства A2 (рисунок 1.2.2), то необходимая вольтамперная характеристика этого устройства, с учетом 1.2.4, описывается выражением [27]:

$$U(I) = \text{const} = U_{fMAX}.$$
 (1.2.5)

Величина сопротивления R устройства A2 для обеспечения необходимой BAX (1.2.5) должна увеличиваться обратно пропорционально току возбуждения $i_f(t)$:

$$R(i_f) = \frac{U_{fMAX}}{i_f(t)}.$$
 (1.2.6)

Для идеального случая гашения поля, с учетом наложенных ограничений, время полного вывода энергии из обмотки возбуждения будет зависеть от величин максимально допустимого напряжения и постоянной времени обмотки возбуждения τ_f [25]:

$$t_{\rm DE} = \frac{1}{K_{\rm II} + 1} \tau_f \,. \tag{1.2.7}$$

Где $K_{\Pi}=U_{fMAX}/U_{fHOM}$ – кратность перенапряжений при гашении поля по отношению к номинальному напряжению обмотки возбуждения U_{fHOM} . Реально достижимое минимальное время гашения поля при $K_{\Pi}=5$ ожидается 0,167 τ_f [9, 25], для $K_{\Pi}=7$ – 0,125 τ_f . В результате сформулировано требование к характеристике устройства гашения поля: с целью обеспечения минимального времени гашения поля, минимизации ущерба от аварии, устройства гашения поля должны

максимально удовлетворять условиям 1.2.4 – 1.2.6. При обеспечении характеристик устройства гашения поля A2 (рисунок 1.2.2), соответствующих выражениям 1.2.4-1.2.6, ток обмотки возбуждения будет снижаться по закону, близкому к линейному [9]. Зависимости тока обмотки возбуждения $i_f(t)$ и величины сопротивления устройства гашения поля A2 приведены на рисунке 1.2.3.



Рисунок 1.2.3 – Зависимости тока обмотки возбуждения и сопротивления устройства гашения поля (*К*п=5) [25]

1.3 Обзор распространенных способов гашения поля

Цель данного параграфа: оценить существующие способы и устройства на соответствие критериям для идеального устройства гашения поля, а также показать некоторые существенные их недостатки.

Гашение поля замыканием обмотки возбуждения накоротко

В бесщеточных системах возбуждения обмотка возбуждения основного генератора питается непосредственно от вращающегося выпрямителя, подключенного к трехфазной обмотке якоря вспомогательного генератора [20, 25, 28]. В качестве примера приведена схема бесщеточной системы возбуждения генератора 1150 МВт производства General Electric (рисунок 1.3.1) [25].



Рисунок 1.3.1 – Схема вращающихся цепей бесщеточной системы возбуждения генератора 1150 МВт [24]

Гашение поля в случае бесщеточной системы возбуждения с диодным выпрямителем осуществляется путем снятия возбуждения со вспомогательного генератора (возбудителя). При этом в выпрямителе остаются открытыми диоды двух фаз и ток обмотки возбуждения основного генератора замыкается по контуру «обмотка возбуждения основного генератора – диоды – обмотка якоря вспомогательного генератора» [2]. Т.е. что приближается к замыканию выводов обмотки возбуждения основного генератора накоротко. Рассеивание энергии, накопленной в обмотке возбуждения основного генератора, происходит в активных сопротивлениях образовавшегося контура. Так как эти сопротивления имеют относительно небольшую величину, то процесс гашения поля затягивается на секунды [29–31]. Такой способ гашения поля генератора, при всех достоинствах бесщеточной системы возбуждения, нельзя считать оптимальным [32].

Гашение поля с рассеиванием запасенной энергии на линейном резисторе

Данный способ является самым старым из известных [20, 25] и самым часто применяемым способом гашения поля синхронных машин. Применение гашения поля на линейном резисторе характерно для статических систем возбуждения. Зачастую в системе возбуждения функции гашения поля и защиты от

перенапряжений реализуются с помощью одной цепи УЗП (рисунок 1.3.2), содержащей последовательно включенные разрядник и поглощающий энергию линейный резистор [9, 10, 20, 25, 33]. Схема системы самовозбуждения синхронного генератора с гашением поля на линейный резистор представлена на рисунке 1.3.2.



Рисунок 1.3.2 – Схема тиристорной системы возбуждения типа СТСТМУ-420-2300-2,5 УХЛ4 производства ООО СКБ ЭЦМ [33]

Электромагнитные процессы, протекающие при гашении поля в случае гашения поля на линейный резистор, подробно рассмотрены в большом числе работ, например в [9, 25, 27, 34]. Исследования показывают, что время гашения поля синхронного генератора соизмеримо с постоянной времени обмотки возбуждения: $0,77\tau_f$ для принятых допущений в [9] и $0,767\tau_f$ в [25], что в 4,6 раза превышает предельно достижимое минимальное время процесса гашения в $0,167\tau_f$. Кроме этого, в результате комплекса экспериментальных работ выявлен недостаток данного способа – интенсивное горение дуги в контактной системе выключателя, что приводит к преждевременному износу его контактной системы

[25, 35–37]. По этим причинам, данный способ гашения поля применяется в настоящее время для генераторов сравнительно небольшой мощности, до 63 МВт [2, 10].

Гашение поля переводом тиристорного преобразователя в режим инвертирования

Большинство систем возбуждения строится на основе тиристорного преобразователя. Тиристорный преобразователь позволяет преобразовывать постоянный ток в переменный, осуществляя тем самым вывод энергии, накопленной в обмотке возбуждения [9, 20, 25, 38]. За счет изменения угла управления тиристорами преобразователь практически мгновенно, до 0,05 с, переходит в режим инвертирования, а значит и гашения поля [30, 39, 40]. При этом, режим гашения поля не сопровождается работой силовых коммутационных аппаратов и зажиганием дуги что рассматривается как преимущество.

Несмотря на некоторые очевидные преимущества у способа гашения поля инвертированием есть недостатки:

1) Тиристорный преобразователь не работает в режиме инвертирования без напряжения в цепях переменного тока [2, 7]. Такой режим возникает при близких коротких замыканиях в цепи статора синхронного генератора, возбуждаемого системой самовозбуждения когда, как раз, необходимо как можно быстрее погасить поле.

2) Время гашения поля, несмотря на относительно стабильное напряжение на обмотке возбуждения [9, 20], получается в разы больше чем в случае идеального процесса гашения поля [9, 36]. Так как величина напряжения на шинах постоянного тока тиристорного преобразователя не может превышать амплитудное значение ЭДС источника переменного тока, то напряжение на клеммах обмотки возбуждения ограничивается этой величиной. Кроме этого, для обеспечения стабильной работы тиристорного преобразователя в режиме инвертирования угол управления тиристорами устанавливается в пределах 130...135⁰ [41]. Поэтому, если величина напряжения источника питания переменного тока выбрана исходя из

условий обеспечения кратности потолочного возбуждения 2,5 [4, 5] от номинального и минимальной мощности источника питания [42], то величина напряжения на обмотке возбуждения при гашении поля инвертированием будет ограничена значением $U_{fMAX}=2,5 U_{fHOM} \cos 135^0 = 1,76 U_{fHOM}$ [20]. По выражению 1.2.7 время гашения поля составит $0,45\tau_f$, что в 3,6 раза больше, чем можно достичь при К_П=7. Поэтому гашение поля переводом тиристорного преобразователя используется как штатный режим при плановой остановке генератора. В аварийной рассматриваемый режим допустим лля ситуации систем независимого возбуждения (статических и бесщеточных с тиристорным преобразователем) и систем самовозбуждения при сохранении напряжения на выводах статора генератора, например, при отключении возбужденного генератора от аварийной сети действием защит [43]. Для уменьшения времени гашения поля в некоторых системах возбуждения, содержащих два тиристорных преобразователя, для поля используют форсировочную тиристорную группу, гашения a ДЛЯ одногрупповых систем независимого возбуждения форсируют возбуждение возбудителя, в обоих случаях, тем самым добиваясь повышения напряжения в режиме инвертирования и снижения времени гашения поля [2].

Автоматы гашения поля

С целью снижения времени гашения поля в 50-х годах прошлого века в СССР были разработаны специализированные коммутационные аппараты с развитой дугогасительной решеткой, предназначенные для применения в цепях обмоток возбуждения мощных синхронных генераторов. Назначение этих аппаратов – разрыв контура с обмоткой возбуждения, обладающей большой индуктивностью, и обеспечение режима, близкого к идеальному процессу гашения поля [2, 9, 10, 11]. Аналогичные разработки велись за границей [25, 30, 37].

Автомат гашения поля (АГП) представляет специализированный коммутационный аппарат, предназначенный для коммутации постоянного тока в цепях обмоток возбуждения синхронных машин [9]. Схема включения АГП в цепь

обмотки возбуждения представлена на рисунке 1.3.3, осциллограммы тока и напряжения – на рисунке 1.3.4 [9].



Рисунок 1.3.3 – Схема включения АГП [9]



Рисунок 1.3.4 – Осциллограмма процесса гашения поля синхронного генератора 26,9 МВт Свирской ГЭС (1 – ток обмотки возбуждения, 2 – напряжение обмотки возбуждения, 3 – напряжение статора генератора) [9]

Как видно из осциллограмм (рисунок 1.3.4), полученных при реальном гашении поля с помощью АГП, напряжение на обмотке возбуждения остается стабильным практически на всем промежутке времени снижения тока до нуля, что в соответствует характеристикам идеального устройства гашения поля.

Однако АГП обладает своими недостатками:

1) Это сложное и дорогое электромеханическое устройство, требующее трудоемкого обслуживания [10, 11].

2) Автомат гашения поля является источником перенапряжений за счет среза тока при преждевременном погасании дуги. Поэтому для всех случаев применения АГП должна быть установлена цепь защиты обмотки возбуждения от перенапряжений [17, 44, 45]. По данным Сибтехэнерго, приведенным в [45], перенапряжения на обмотке возбуждения при гашении поля АГП могут достигать 6-10 кВ и более, что значительно превышает все допустимые нормы [26].

3) При гашении поля с малыми токами возможно повреждение автомата гашения поля, из-за чего для аппарата типа АГП-1 запрещено отключать токи возбуждения ниже 200 А [46]. При этом циркуляр [45] запрещает отключать токи возбуждения ниже тока холостого хода для генераторов 100...200 МВт. Также опыт эксплуатации автоматов гашения поля серии БНЛ-7901 показывает неспособность погасить дугу при неуправляемой форсировке возбудителя [45].

4) Так как принцип действия автоматов гашения поля основан на горении электрической дуги, то наблюдается очевидный износ контактной системы и дугогасительной решетки аппарата. Особенно сильная эрозия наблюдается при отключении возбуждения в случаях холостого хода и близкого короткого замыкания. Хотя изготовителем АГП этот недостаток не подтверждается.

В статье известных специалистов по системам возбуждения М.Л. Богачкова, В.В. Кичаева и Е.Н. Попова (ООО «НПП «Русэлпром-Электромаш», НИИ Электромаш, г. Санкт-Петербург) показано, что применение АГП не дает существенного выигрыша в снижении полного времени гашения магнитного поля синхронного генератора по сравнению с линейным резистором и варистором [11]. Аналогичное мнение высказывают специалисты ОАО «Новосибирскэнерго» [33].

Гашение поля с рассеиванием энергии на нелинейном резисторе

Этот способ гашения поля является развитием способа с рассеиванием энергии на линейном резисторе. В п. 1.2 показано, что ВАХ гасящего элемента должна иметь Г-образную форму с целью получения минимального времени гашения поля

при существующих ограничениях. Применяемые для гашения поля нелинейные резисторы вполне удовлетворяют этому требованию.

Большое количество работ и патентов говорит об актуальности применения варисторов для целей гашения поля и защиты от перенапряжений обмотки возбуждения синхронных генераторов [9, 10, 25, 37]. Причем в некоторых разработках [25, 37] варистор работает совместно с АГП, обеспечивая дополнительное гашение поля и защиту от перенапряжений, возникающих при работе автомата гашения поля. Анализ публикаций периода 1961–2000 г.г. показывает, что в Советском союзе и, позже, в Российской Федерации разработок устройств гашения поля с варисторами практически не велось в виду неудовлетворительных характеристик нелинейных элементов [9, 47, 48]. В основном, устройства гашения поля с варисторами разрабатывались за границей и в настоящее время поставляются на территорию РФ в составе систем возбуждения импортного производства.

Для гашения поля синхронных генераторов в современных системах возбуждения применяются варисторы трех типов: варисторы на основе карбида кремния SiC, металл-оксидные варисторы на основе оксида цинка ZnO и селеновые варисторы (Se) [30]. Селеновые варисторы, также называемые еще селеновыми супрессорами, лавинными диодами или стабилитронами, представляют собой мощные полупроводниковые приборы, работающие в режиме обратимого лавинного пробоя, [49]. Недостатком селеновых супрессоров являются невысокие предельные токи и энергоемкость. [50, 51]. Поэтому супрессоры применяются для защиты от импульсных перенапряжений и гашения поля синхронных машин малой мощности. Сравнение свойств нелинейных элементов, приведенное в [52] (рисунок 1.3.5), показывает, что варисторы на основе карбида кремния обладают наихудшими нелинейными характеристиками. Аналогичные результаты дает сопоставление вольтамперных характеристик из разных источников [30, 50], приведенное на рисунке 1.3.6.



Рисунок 1.3.5 – Сравнение вольт-амперных характеристик различных нелинейных

элементов [52]



Рисунок 1.3.6 – Вольтамперные характеристики варисторов на основе оксида цинка, карбида кремния и селена

Таким образом, наилучшими нелинейными характеристиками обладают варисторы на основе оксида цинка и их применение дает меньшее время гашения поля [53]. Однако, ВАХ варистора всего лишь приближается к оптимальной (рисунок 1.3.6). Варианты применения варисторов для гашения поля рассмотрены в [9, 25, 30, 37, 54, 55].

Несмотря на то, что схемы гашения поля с использованием варисторов, наряду с АГП, позволяют получить малое время снижения тока возбуждения, у этого способа отмечаются следующие недостатки:

- в процессе работы неизбежно возникает дуга в коммутационном аппарате;

- ВАХ нелинейного элемента всего лишь приближается к оптимальной и ею невозможно управлять как при изготовлении, так и при эксплуатации;

- ограниченная энергоемкость гасящих нелинейных элементов [11] и их невысокая перегрузочная способность;

- не рассматривается вопрос работы генераторов в длительных режимах асинхронного хода и самосинхронизации в случае установки варистора в цепи обмотки возбуждения;

высокая стоимость оборудования.

В связи с этим требуется простое, дешевое, надежное устройство, в полной мере реализующее оптимальную вольтамперную характеристику, которой можно управлять, и работа которого не сопровождается горением высокотоковой дуги в коммутационном аппарате.

1.4 Устройства гашения поля с синтезированной ВАХ

В п. 1.3 показано, что вольтамперные характеристики известных устройств гашения поля не полностью отвечают выражению 1.2.5. Кроме этого отмечено, что есть необходимость В управлении BAX устройства, ПО возможности, блокированию дуги в коммутационном аппарате и обеспечению асинхронной работы генератора в сети. Способ гашения поля с рассеиванием энергии на линейном резисторе является самым дешевым, обеспечивает работу генератора в асинхронном режиме, но совершенно не соответствует требованию выражения 1.2.5 в части поддержания стабильного напряжения из-за того, что сопротивление гасящего резистора остается постоянным. Радикальным способом ликвидации данного недостатка является включение в цепь обмотки возбуждения разных по

характеристикам резисторов для разных величин тока с целью поддержания напряжения и высокой скорости вывода энергии из обмотки возбуждения. За счет переключения гасящих резисторов в процессе гашения поля могут быть получены характеристики, отвечающие выражению 1.2.5 Т.е. предложено синтезировать требуемую вольтамперную характеристику из линейных участков. Вариант реализации данного принципа описан в [25] на примере устройства с двумя ступенями гашения поля. Аналогичные устройства описаны в патентах [56, 57] и статье [58]. В работе [25] способ гашения поля называется «*Stepped Linear Resistor De-excitation System*». Цепь гашения поля (рисунок 1.4.1) состоит из двух последовательно включенных резисторов R_1 и R_2 , один из которых зашунтирован выключателем Q3. Величина сопротивления резистора R_1 выбрана исходя из того, чтобы при наибольшем возможном токе возбуждения величина перенапряжений между выводами обмотки возбуждения FWG не превысила допустимое значение.



Рисунок 1.4.1 – Схема гашения поля с переключением линейных резисторов [25]

В начале процесса гашения поля, при наибольших токах обмотки возбуждения FWG (рисунок 1.4.1) ключ Q3 замкнут. Со снижением тока $i_f(t)$ падает напряжение $u_f(t)$ и, чтобы поддержать скорость снижения тока и величину напряжения ступенчато увеличивается сопротивление в цепи обмотки возбуждения путем

отключения Q3. В результате, вольтамперная характеристика гасящей цепи (R1 и R2) будет представлять кусочно-линейную функцию.

Теоретически, схема с двумя переключаемыми резисторами (рисунок 1.4.1) приводит к снижению времени гашения поля почти в два раза по сравнению с использованием одиночного линейного резистора [25]. Очевидно, что из-за того, что напряжение не поддерживается на одном уровне время гашения поля $0,38\tau_f$ больше чем в случае применения карбид-кремниевого варистора ($0,25\tau_f$) и АГП ($0,18\tau_f$) [9]. Увеличение количества ступеней приводит уменьшению колебаний напряжения и снижению времени гашения поля [25, 59].

Исследования, проведенные в [27] показывают, что аналогичных результатов можно достичь путем параллельного соединения ступеней резисторов. Причем, параллельное соединение нескольких переключаемых резисторов показало себя эффективным в случае применения варисторов вместо линейных резисторов [53]. Устройства гашения поля с большим (>2 шт.) числом ступеней и использованием линейных резисторов описаны в патентах [60–64]. Большое количество патентов в этом направлении говорит об актуальности работы.

Коллективом кафедры ЭССиСЭ ФГАОУ ВО ЮУрГУ предложен способ гашения поля, реализованный в устройстве с синтезируемой ВАХ, также основанный на переключении линейных резисторов («Способ и устройство гашения магнитного поля обмотки возбуждения синхронной машины (варианты)). Согласно описанию патента на данное изобретение [61], устройство (вариант 1) состоит из четырех основных частей (рисунок 1.4.2): выключателя 3, включенного между обмоткой возбуждения 1 и тиристорным преобразователем 2; гасящей силовой части 4; блока логики 6 и датчика напряжения 5.

В начале процесса гашения поля отключается выключатель 3 (рисунок 1.4.2). После погасания дуги в выключателе блок логики 6 включает тиристоры 10 и 11. Гасящее сопротивление будет иметь величину *R*18+(*R*19||*R*21). После снижения напряжения ниже заданного за счет действия узла принудительной коммутации (тиристор 17 и конденсатор 23) происходит выключение тиристора 10. Резистор 19

отключается и энергия рассеивается на большем по величине сопротивлении R18+R21. Таким образом, в данном варианте реализован способ гашения поля на ступенчато изменяющемся активном сопротивлении с двумя ступенями, что эквивалентно устройству, описанному на рисунке 1.4.1. Состав устройства с увеличенным числом ступеней (вариант 2), описанном в патенте [61], аналогичен первому варианту за исключением того, что гасящая часть состоит из пяти резисторов, включенных последовательно-параллельно. Устройство обеспечивает гашение поля при четырех ступенях величины гасящего сопротивления согласно описанию в патенте.



Рисунок 1.4.2 – Схема тиристорного устройства гашения поля (вариант 1) по патенту [61]

Кроме очевидного факта неработоспособности схемы устройства, выполненного по варианту 2, описанному в патенте [61], оба устройства обладают двумя существенными недостатками:

1) Тиристоры включаются сигналами блока логики. При отказе блока к обмотке возбуждения будет подключено гасящее сопротивление наибольшей величины, что приведет к появлению недопустимых перенапряжений и повреждению изоляции обмотки.

2) Ток обмотки возбуждения начинает протекать через гасящие резисторы только после полного погасания дуги в выключателе. Так как в устройстве не принято никаких мер к снижению времени горения дуги, то требуется выключатель с хорошей отключающей способностью на постоянном токе, который по стоимости сравним с АГП.

Схема и работа устройства, аналогичного варианту 2 патенту [61] также описаны в статье [65]. Анализ статьи показывает, что несмотря на неполное описание в патенте [61], устройство, выполненное по данной схеме, обеспечивает ступенчатое изменение величины гасящего сопротивления, и как результат, ускорение гашения поля по сравнению с процессом при постоянном активном сопротивлении. В следующей статье [66], в которой анализируется процесс гашения поля предложенным устройством, приведена зависимость напряжения на обмотке возбуждения при работе устройства (рисунок 1.4.2). Как отмечено в п. 1.3, для обеспечения максимально быстрого процесса гашения поля необходимо поддерживать величину напряжения на обмотке возбуждения постоянной. Анализ зависимости, приведенной на рисунке 1.4.3 показывает, что это условие выполняется не на всех ступенях. Таким образом, при разработке подобных устройств необходимо учитывать не только условие ограничения величины перенапряжений, но и стремиться обеспечивать постоянство среднего значения напряжения.



Рисунок 1.4.3 – Среднее и мгновенное напряжения на обмотке возбуждения при гашении поля устройством с четырьмя ступенями из [66]

Существенными недостатками описанного устройства, как было указано, являются: управление тиристорами от отдельного блока (блока логики в исходном патенте [61]) и последовательное соединение гасящих резисторов. Отказ блока управления, как и обрыв одного из резисторов, приводит к серьезной аварии. Устройство, лишенное этих недостатков, описано в статье [67]. Принцип гашения поля на ступенчато изменяющемся активном сопротивлении (сопротивлении с синтезируемой ВАХ) в данном устройстве сохраняется, но схемотехнически оно существенно отличается от предыдущих (рисунок 1.4.4).



Рисунок 1.4.4 – Схема тиристорного устройства гашения поля с параллельными гасящими цепями из [67]

Достоинства схемы тиристорного устройства гашения поля из [67] (рисунок 1.4.4):

1) В данном устройстве применено параллельное включение гасящих цепей, что положительно сказывается на надежности. При разрушении одного из возбуждения резисторов разрыва контура обмотки c возникновением перенапряжений, свойственно недопустимых как ЭТО ДЛЯ схемы С последовательным соединением резисторов, не будет.

2) Приняты меры к снижению времени горения дуги в выключателе 5 за счет кратковременного шунтирования обмотки возбуждения 3 ключом 7.

3) Изменен способ включения тиристоров гасящих цепей: если в предыдущем устройстве тиристоры включались импульсами управления от блока логики, то в данном устройстве включение тиристоров происходит при превышении напряжением уставки, заданной свойствами стабилитрона 22 (23, 24) в цепи управляющего электрода тиристора 8 (9, 10) (на рисунке 1.4.4 из статьи [67] перепутаны местами аноды и катоды стабилитронов). Это изменение ликвидирует возможность возникновения недопустимых перенапряжений при отказе блока логики.

4) Уменьшено число тиристоров в схеме.

Недостатки схемы тиристорного устройства гашения поля из [66]:

1) Четвертая гасящая цепь содержит диод 11 вместо тиристора. При работе тиристорного трехфазного мостового преобразователя с углами управления больше 60°, что характерно для нормальных режимов тиристорных систем самовозбуждения [20] в напряжении обмотки возбуждения появляются составляющие с отрицательным напряжением [39, 68]. Эти составляющие приведут к отпиранию диода 11 и протеканию тока через резистор 18 в длительном нормальном режиме генератора.

2) Схема содержит большое число (4 шт.) варисторов, являющихся дорогими элементами. При таком числе использованных варисторов дешевле использовать один варистор без применения переключаемых тиристорами линейных резисторов.

3) Схема содержит 4 шт. коммутационных аппарата неизвестного назначения (25, 26, 27, 28 на рисунке 1.4.4).

4) Не приняты меры к минимизации аварии при пробое транзисторного ключа и замыкании через его цепь накоротко цепей тиристорного преобразователя.

Дальнейшие работы автора в этом направлении привели к созданию устройства (рисунок 1.4.5), обладающего улучшенными характеристиками по сравнению с устройством, описанным в ранее опубликованной статье [67].

В устройстве (рисунок 1.4.5), описанном в статьях [36, 69] убраны из схемы варисторы и лишние коммутационные аппараты; применены меры к повышению стойкости к помехам за счет включения резисторов и диодов в цепи управляющих
электродов тиристоров. С целью минимизации последствий пробоя транзисторного ключа последовательно с ним установлен диод VD1. Также изменен алгоритм работы управляющего транзисторным ключом блока:

1) Измерение величины обратного напряжения на обмотке возбуждения не производится. В место этого установлен пороговый орган, выполненный на элементах R1 и DA1, предназначенный только для фиксации наличия напряжения отрицательной полярности, что говорит об успешном отключении выключателя и транзисторного ключа.



Рисунок 1.4.5 – Схема модифицированного тиристорного устройства гашения поля из статьи [69]

2) Включение транзисторного ключа в процессе гашения поля, направленное на отключение тиристоров гасящих цепей, производится не по факту снижения напряжения обмотки возбуждения ниже уставки, а периодически, независимо от величины тока и напряжения обмотки возбуждения. Это заставляет устройство адаптироваться к режиму контура обмотки возбуждения и позволяет отказаться от измерений тока и напряжения, за счет чего поддерживается заданная величина среднего напряжения на обмотке возбуждения независимо от режима генератора.

Испытания данного устройства (рисунок 1.4.5) на реальном генераторе мощностью 5,5 кВА показали правильность принятых решений [35, 36]. Для предотвращения повреждений обмотки возбуждения при проведении испытаний

третья гасящая цепь содержит диод вместо тиристора. Так как испытания носили кратковременный характер, то протекание тока через резистор 1R1 не учитывалось.

Окончательно схема и принцип действия тиристорного устройства гашения поля приведены в описании к патенту [64] (рисунок 1.4.6).



Рисунок 1.4.6 – Принципиальная электрическая схема тиристорного устройства гашения поля по патенту автора [64]

Отличие схемы устройства (рисунок 1.4.6) от предыдущей заключается в выполнении отдельной цепи защиты от перенапряжений (элементы 4,5 и 6 на рисунке 1.4.6) и оснащении всех гасящих цепей тиристорными коммутирующими элементами. Установка отдельной цепи защиты обмотки возбуждения генератора от перенапряжений регламентируется действующими нормами по устройству и эксплуатации синхронных генераторов [18, 44]. Кроме этого, при возникновении токов нерасчетных значений либо отказе типа «обрыв» одной из гасящих цепей могут возникнуть недопустимые перенапряжения, от которых должна защищать цепь защиты от перенапряжений.

Таким образом, к настоящему времени сформирована схема тиристорного устройства гашения поля, обеспечивающая быстрое гашение поля синхронного генератора, и, не содержащая дорогих и дефицитных элементов. Анализ публикаций по тиристорным устройствам гашения поля [25, 61, 65–67] показывает, что исследования проводились поверхностно и лишь с точки зрения обеспечения режима быстрого гашения поля генератора. При этом отсутствуют исследования: - режимов гашения поля тиристорным устройством с учетом характеристик и режимов реальных синхронных генераторов;

- электрических и тепловых режимов отдельных элементов тиристорного устройства гашения поля;

- алгоритмов управления устройством.

Не проработаны методики расчета параметров элементов, выбора элементов и определения характеристик устройства в целом.

1.5 Проблема минимизации времени горения дуги и вольтамперная характеристика устройства гашения поля

Работа всех устройств гашения поля начинается с отключения выключателя в цепи обмотки возбуждения синхронного генератора. Так как цепь обмотки возбуждения генератора характеризуется большой постоянной времени, то возникают трудности с гашением дуги, зажигающейся в коммутационном нелинейные аппарате. Автоматы гашения поля используют свойства электрической дуги для осуществления вывода запасенной энергии из обмотки возбуждения. В остальных же устройствах чем быстрее будет погашена дуга в выключателе, тем быстрее будет протекать процесс гашения магнитного поля. Поэтому к выключателям возбуждения предъявляются особые требования к гашению дуги постоянного тока. Кроме этого, горение дуги снижает ресурс коммутационного аппарата. Таким образом, актуально принять меры к снижению времени горения дуги или ликвидировать ее полностью.

Особенности гашения дуги в выключателях цепей возбуждения синхронных генераторов

Упрощенная схема цепей возбуждения синхронного генератора, выполненная по распространенной «схеме ХЭМЗ» [9, 46, 70], приведена на рисунке 1.5.1. Обмотка возбуждения FWG (L_f, R_f на рисунке 1.5.1) получает питание от

возбудителя E_d через выключатель Q1. При отключении выключателя Q1 обмотка возбуждения шунтируется гасящим резистором R_{DE} с помощью выключателя Q2. В качестве выключателя Q2 могут выступать как контакты выключателя Q1, так и отдельный контактор самосинхронизации КСС, обязательно [44] шунтируемый тиристорным или искровым разрядником.



Рисунок 1.5.1 – Упрощенная схема цепей возбуждения синхронного генератора по схеме ХЭМЗ [9]

При отключении выключателя Q1 в нем зажигается дуга, которая втягивается в дугогасительную решетку, где происходит ее гашение. Зависимость величины падения напряжения на дуге от времени носит сложный характер и зависит от конструкции выключателя [9, 71, 72]. Для упрощения анализа зависимость напряжения дуги от времени представляется трапецеидальной: первый интервал ($0 < t \le t_1$) соответствует процессу расхождения контактов и втягивания дуги в решетку, второй ($t_1 \le t$) – интервал устойчивого горения дуги в решетке. На первом интервале напряжение линейно возрастет, но втором оно постоянно – $u_{d}(t)$ =const [9, 71, 72]:

$$\begin{cases} 0 < t \le t_1; u_{\Pi}(t) = k_{\Pi} t \\ t_1 < t; u_{\Pi}(t) = \text{const} \end{cases}.$$
 (1.5.1)

При принятом допущении что падение напряжения на дуге $u_{\rm I}(t)=U_{\rm I}$ не изменяется в процессе гашения поля, зависимость тока в цепи обмотки

возбуждения описывается известным выражением [71] (шунтирующее сопротивление отсутствует – R_{DE}=∞):

$$i_{f}(t) = I_{f0} \left[1 - c \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_{f}}} \right) \right].$$
(1.5.2)

С учетом того, что в идеальных условиях дуга гаснет при переходе тока через ноль, время горения дуги будет зависеть от начального значения тока обмотки возбуждения I_{f0} , ее постоянной времени τ_f и кратности падения напряжения на дуге $c=U_{I\!/}E_d$ [71]:

$$t_{\text{ДУГИ}} = \tau_f \ln \frac{c}{c-1}. \tag{1.5.3}$$

Для реальных генераторов время горения дуги может составлять 0,4...1,7 с. За это время в дугогастельной системе выделяется значительная энергия, на которую она должна быть рассчитана. Например, отключение тока возбуждения холостого хода турбогенератора ТГВ-200М сопровождается выделением 282 кДж энергии, что соответствует взрыву 67 грамм тротила или боевой гранаты Ф-1. Поэтому, либо аппарат рассчитывается на такое энерговыделение, либо должны быть приняты меры к снижению времени горения дуги.

Включение шунтирующего резистора R_{DE} выключателем Q2 уменьшает ток через коммутационный аппарат:

$$i_f(t) = i_{Q1}(t) + i_{Q2}(t).$$
 (1.5.4)

Токи выключателя $i_{Q1}(t)$ и шунтирующего резистора $i_{Q2}(t)$ определяются динамическими сопротивлениями дуги и резистора R_{DE} :

$$\begin{cases} i_{Q1}(t) = -\frac{u_{\Pi}(t) - E_d}{R_{DE}} + i_f; \\ i_{Q2}(t) = -\frac{u_{\Pi}(t) - E_d}{R_{DE}}. \end{cases}$$
(1.5.5)

Если выключатель Q1 обладает хорошей отключающей способностью [71], то переход тока с выключателя на гасящий резистор произойдет до выхода зависимости (1.5.1) на горизонтальный участок. Отсюда, при $u_{\rm d}(t)=k_{\rm d}t$ (1.5.1) и том, что дуга гаснет при $i_{\rm Q1}(t)=0$, из выражения 1.5.5 определено время горения дуги:

$$t_{\rm ДУГИ} = \frac{I_{f0}R_{DE} + E_d}{k_{\rm A}}.$$
 (1.5.6)

Из анализа выражения 1.5.6 получаются следующие выводы:

- время горения дуги сильно зависит от величины шунтирующего сопротивления *R*_{DE}: чем больше это сопротивление, тем время горения дуги больше;

- минимальное время горения дуги будет при $R_{\rm DE}=0$ и определяется соотношением $E_d/k_{\rm D}$;

- перевод тиристорного преобразователя возбудителя в режим инвертирования, при котором величина *E*_d меняет знак, существенно сокращает время горения дуги;

- увеличение скорости нарастания падения напряжения на дуге, характеризуемого величиной коэффициента *k*_д, ведет к снижению времени горения дуги;

- время горения дуги не зависит от постоянной времени обмотки возбуждения (при принятом допущении о значительной величине постоянной времени τ_f обмотки возбуждения).

В случае применения выключателя с невысокой отключающей способностью или АГП зависимость падения напряжения на дуге $u_{d}(t)$ (выражение 1.5.1) выходит на горизонтальный участок $u_{d}(t)=U_{d}$. Из анализа электромагнитных процессов получена зависимость тока дуги, которая в этом случае имеет более сложный характер:

$$i_{Q1}(t) = -\left(U_{\pi} - E_{d}\right)\frac{R_{f} + R_{DE}}{R_{f}R_{DE}} + \left(I_{f0} + \frac{U_{\pi} - E_{d}}{R_{f}}\right)e^{\frac{-t}{\tau_{f}}}.$$
(1.5.7)

Интегрированием выражения 1.5.7 для *i*_{Q1}(*t*)=0 получено время горения дуги в выключателе:

$$t_{\text{ДУГИ}} = -\tau_f \ln \frac{\left(U_{\text{Д}} - E_d\right) \frac{R_f + R_{\text{DE}}}{R_f R_{\text{DE}}}}{I_{f0} + \frac{U_{\text{Д}} - E_d}{R_f}}.$$
 (1.5.8)

Если принять что шунтирующее сопротивление R_{DE} меньше максимально допустимого (1.5.9), то выражение 1.5.8 даст отрицательное значение времени горения дуги. Это означает, что при $R_{\text{DE}} < R_{\text{DE MAX}}$ погасание дуги в выключателе произойдет до выхода зависимости падения напряжения на выключателе (1.5.1) на горизонтальный участок. Максимально допустимое сопротивление шунтирующего резистора:

$$R_{\rm DEMAX} = \frac{U_{\rm A} - E_d}{I_{f0}} \,. \tag{1.5.9}$$

Из приведенного выше можно сделать заключение, что подключение линейного резистора параллельно индуктивности обмотки возбуждения в сокращает время горения дуги в выключателе и повышает его коммутационную способность. Опыт положительного применения шунтирующих резисторов в цепях постоянного тока тяговых подстанций описан в [71].

В современных системах возбуждения массово применяются варисторы как элемент устройства гашения поля. Для определения времени горения дуги в выключателе Q1 (рисунок 1.5.1) в случае варистора принята идеализированная Γ -образная BAX (п. 1.2, выражение 1.2.5): $U(I)=U_{OCT}$ при I>0. В зависимости от характеристик выключателя Q1 и варистора возможно два случая:

1) Расчетное падение напряжения на цепи «выключатель-возбудитель» $U_{Д}-E_{d}$ меньше остаточного напряжения на варисторе U_{OCT} .

В этом случае ток варистора равен нулю и процесс горения дуги описывается выражением 1.5.2. Возникновение тока в цепи варистора возможно только при срыве дуги на малых токах. Т.е. варистор в данном случае выполняет только функции защиты обмотки возбуждения от перенапряжений. Данный случай характерен для систем возбуждения с АГП.

2) Расчетное падение напряжения на цепи «выключатель-возбудитель» $U_{Д}-E_{d}$ больше остаточного напряжения на варисторе U_{OCT} .

Пока дуга не разгорелась и не втянулась в дугогасительную решетку падение напряжения на ней $u_{\rm d}(t) < U_{\rm OCT}$ и тока через варистор нет. Как только напряжение на обмотке возбуждения, равное $U_{\rm d}$ — E_d , сравняется с $U_{\rm OCT}$, в цепи варистора возникнет ток. Так как при $U_{\rm d}$ — E_d = $U_{\rm OCT}$ ток цепи выключателя $i_{\rm Q1}(t)$ станет равным нулю, то дуга в выключателе Q1 погаснет. Для принятой линейной зависимости падения напряжения на дуге от времени (1.5.1), время горения дуги в выключателе будет зависеть от соотношения характеристик аппаратов:

$$t_{\text{ДУГИ}} = \frac{U_{\text{ОСТ}} + E_d}{k_{\text{Д}}}.$$
 (1.5.10)

Т.е. стремление к уменьшению длительности процесса гашения поля за счет увеличения U_{OCT} варистора приводит к затягиванию процесса горения дуги в выключателе. Известная схема цепей обмотки возбуждения [25], в которой линейный резистор R_{DE} подключается через разрядник (искровой или тиристорный), также характеризуется затягиванием процесса горения дуги. До срабатывания разрядника ток через резистор R_{DE} (рисунок 1.5.1) отсутствует и схема ведет себя как в случае $R_{DE}=\infty$. При достижении напряжением $u_{d}(t)-E_{d}$ уставки срабатывания разрядника, он включается и ток дуги снижается. Т.е. схема, с точки зрения процессов горения дуги, ведет себя подобно схеме с варистором.

Экспериментальные исследования процессов горения и гашения дуги в выключателе цепей возбуждения.

Использованная аналитическая модель электрической дуги не учитывает ее нелинейные свойства. Так, согласно выражениям 1.5.6 и 1.5.10 при одинаковой кратности перенапряжений получается одинаковое время горения дуги, что не подтверждается практикой. Поэтому, вопрос отключения цепей обмотки возбуждения выключателем исследован экспериментально.

Для исследования процессов при отключении цепи обмотки возбуждения собрана экспериментальная установка (рисунок 1.5.2). В качестве выключателя Q1 был применен автоматический выключатель типа A63-M 25 A 380 B 50 Гц с предельной коммутационной способностью 1,8 кА при 400 В переменного тока. Обмотка возбуждения FWG имитирована обмотками 220 В трансформатора OCM-1 1 кВА, включенными последовательно (общее сопротивление по постоянному току 0,98 Ом при 20 $^{\circ}$ C). Гасящее сопротивление R_{CC} согласно [71] подключено к выводам обмотки через диод VD1 типа Д229. Варистор имитирован стабилитроном VD4 типа Д817Г с номинальным напряжением стабилизации 100 В.



Рисунок 1.5.2 – Принципиальная электрическая эксперимента

Тиристорный разрядник собран на тиристоре VS1 типа КУ201И. Уставка срабатывания, заданная стабилитроном VD2 – 100 В. Выключатели SA1...SA3 предназначены для выбора схемы шунтирующей цепи. Датчики тока TA1...TA4

предназначены для осциллографирования токов элементов схемы. Диоды VD3 и VD4 – защитные.

При проведении опыта начальный ток процесса I_{f0} был установлен 12 А. Величина сопротивления резистора R_{CC} (рисунок 1.5.2) в серии опытов изменялась ступенчато от 0 Ом до 75 Ом. Также проведены опыты с имитацией работы варистора и разрядника. В опытах фиксировались зависимости тока дуги $i_{Q1}(t)$, падения напряжения на выводах выключателя $u_{Q1}(t)$ и тока через гасящую цепь $i_{RDE}(t)$.

Опыт гашения поля на линейный резистор 5 Ом (рисунок 1.5.3а) показал, что ток резистора появляется сразу при расхождении контактов выключателя. Замена резистора на имитатор варистора (рисунок 1.5.3б) подтвердила факт затягивания процесса горения дуги в выключателе.



Рисунок 1.5.3 – Осциллограммы опытов гашения поля на линейный резистор и варистор

Проведенная серия опытов для разных значений сопротивления шунтирующего резистора (рисунок 1.5.4) показала, что минимальное время горения дуги в выключателе будет при $R_{DE}=0$ (рисунок 1.5.4а). Увеличение величины шунтирующего сопротивления (осциллограммы 1.5.46–1.5.4г) ведет к затягиванию горения дуги, что соответствует выражениям 1.5.6 и 1.5.8. Включение гасящего резистора через разрядник (рисунок 1.5.4е), как и применение варистора

ведет к длительному горению дуги. Длительности горения дуги, полученные в опытах, приведены в таблице 1.5.1



Рисунок 1.5.4 – Осциллограммы тока дуги и падения напряжения на дуге выключателя при разных гасящих цепях (масштаб по напряжению – 41,5 В/дел, по току – 7,5 А/дел)

Таблица 1.5.1

R_{DE}	0 Ом	5 Ом	15 Ом	75 Ом	Д817Г	Разрядник
<i>t</i> _{ДУГИ} , мс	0,08	1,9	2,55	3,69	4,68	4,38
$U_{\rm Q1.MAX}, {\rm B}$	16	66	83	132	112	102

Выход зависимости падения напряжения на дуге от времени $u_{Q1}(t)$ на горизонтальный участок по выражению 1.5.1 в опытах не наблюдался из-за малой постоянной времени катушки индуктивности и сравнительно высокой

коммутационной способности выключателя (1,8 кА при 400 В переменного тока при коммутируемых в опыте 12 В и 12 А).

Экспериментальные исследования подтверждают ранее теоретически обоснованные заключения:

- наблюдается затягивание горения дуги в выключателе при использовании варистора и разрядника;

- шунтирование обмотки линейным резистором приводит к сокращению времени горения дуги в выключателе;

- минимальная дуговая нагрузка на выключатель достигается при глухом шунтировании обмотки (замыкании накоротко).

Снижение дуговой нагрузки на выключатели цепей возбуждения и обоснование требуемой ВАХ

По результатам исследований существенно снизить время горения дуги можно либо путем последовательного соединения нескольких полюсов выключателя с целью увеличения $k_{\rm d}$ (1.5.1), либо шунтирования обмотки на резистор R_{DE} =0. Первый способ применяется в некоторых системах возбуждения [25, 31, 33]. Также снижению времени гашения поля, за счет снижения величины E_d возбудителя (1.5.6, 1.5.8 и 1.5.10), способствует перевод тиристорного преобразователя в режим инвертирования [33], что невозможно сделать при потери питания тиристорного преобразователя в системах самовозбуждения. Несмотря на увеличение коэффициента дуги $k_{\rm d}$ дуга окончательно не ликвидируется. Второй способ практически полностью препятствует зажиганию дуги и сокращает задержку вступления в работу гасящего элемента, что повышает эффективность устройства гашения поля. Однако этот способ требует переменной во времени ВАХ гасящего элемента.

Основываясь на требованиях к ВАХ гасящего элемента, приведенных в п. 1.2 и условии блокирования зажигания дуги в выключателе, получена требуемая вольтамперная характеристика устройства гашения поля (выражение 1.5.11), приведенная на рисунке 1.5.5.



Рисунок 1.5.5 – ВАХ устройства гашения поля в осях «ток-напряжение-время» На интервале времени горения дуги $t=0...t_{ДУГИ}$ ВАХ (рисунок 1.5.5) имеет вид U(I)=0, т.е. обмотка возбуждения защунтирована, что способствует блокированию зажигания выключателе. После гарантированного дуги В отключения вольтамперная характеристика выключателя, $t > t_{\Pi Y \Gamma H}$, меняет ВИД U(I)=const=U_{MAX.ДОП}, что необходимо для быстрого гашения поля (п. 1.2). Очевидно, что только с помощью пассивных элементов невозможно реализовать переменную во времени ВАХ (рисунок 1.5.5) и требуется устройство, построенное на элементах силовой электроники.

Способы снижения времени горения дуги, реализованные в нескольких известных разработках [27, 73–75] управляют ВАХ гасящего устройства весьма ограниченно, обеспечивая только минимальные времена горения дуги в выключателе и гашения поля генератора. Разработки, описанные в [29, 71, 76], в которых полупроводниковым коммутатором шунтируются контакты выключателя, полностью ликвидируют дугу, но также ограниченно управляют процессами в цепи обмотки возбуждения и не создают видимый разрыв цепи. Но, управление ВАХ устройства, включенного в цепь обмотки возбуждения, может применяться не только при гашения поля, но и в других режимах генератора. В частности, в изобретении [78] предложен способ симметрирования синхронного генератора в асинхронном режиме путем включения в контур возбуждения корректирующего звена с заданной частотной характеристикой, т.е. изменяемой во времени ВАХ. Это корректирующее звено можно создать только средствами силовой электроники. Вероятно, существуют и другие режимы генератора, при которых будет положительный эффект от включения в цепь обмотки возбуждения синхронного генератора устройства с управляемой во времени ВАХ.

В статье [73] рассмотрен вариант реализации частично управляемой ВАХ устройства гашения поля с целью минимизации времени горения дуги в выключателе цепи обмотки возбуждения. Созданное на кафедре ЭССиС ЮУрГУ тиристорное устройство гашения поля расширяет возможности по управлению режимом генератора за счет применения гасящего элемента с синтезируемой и управляемой ВАХ, построенного на основе силовой электроники [60]. Дальнейшая разработка устройства гашения поля [64] реализует принцип, заложенный в исходном патенте [61], но при более простой конструкции и только с целями минимизации времени горения дуги в выключателе и снижения времени гашения поля. Указанный способ создания управляемых гасящих звеньев апробирован в экспериментальной работе [35] и показал удовлетворительные результаты [36]. На основе принципа формирования ВАХ, приведенного в исходном патенте [61], другими авторами было разработано электромеханическое устройство гашения поля, описанное в патенте [62], не обладающее никакими преимуществами по сравнению с аналогичными устройствами.

Дальнейшее расширение возможностей тиристорного устройства гашения поля, выполненного по патентам [61, 64], может быть достигнуто при выполнении следующих изменений:

- гасящие звенья и цепь короткозамыкателя должны иметь двухстороннюю симметричную управляемую проводимость;

- тиристоры коммутаторов гасящих цепей по [64] должны управляться от системы управления, реализующей заданный алгоритм, как это сделано в [61].

50

Несмотря на некоторое количество публикаций по тематике снижения времени горения дуги в выключателе, анализ источников показывает, что исследования по созданию и применению в цепях обмотки возбуждения устройств с управляемой ВАХ производились лишь на самом поверхностном уровне. Тем более отсутствуют методики выбора элементов тиристорного устройства гашения поля для систем возбуждения синхронных генераторов. Известны только требования [79] и упрощенные методики выбора элементов диодных разрядных устройств цепей постоянного тока тяговых подстанций [71].

1.6 Выводы

В главе 1 проведены исследования российской и международной нормативной базы, позволившие выделить требования, предъявляемые к устройствам гашения поля синхронных генераторов и сформировать критерии оценки процесса гашения поля генератора и работы устройств, обеспечивающих этот режим.

Анализ электромагнитных процессов в контуре возбуждения идеализированной электрической машины для случая гашения поля позволил выделить ключевые параметры процесса и определить требования к устройству гашения поля.

На основе выработанных критериев обеспечения идеального процесса гашения поля произведены обзор и оценка существующих принципов и устройств гашения поля. Показано, что только два существующих способа гашения поля – автомат гашения поля (АГП) и гашение на варистор приближаются по параметрам режима к максимально эффективному. Но и эти способы обладают рядом недостатков, основными из которых являются: горение дуги в выключателе, невозможность управления вольтамперной характеристикой и работы в асинхронном режиме, а также, существенное отклонение результирующей ВАХ устройств от требуемой по критериям максимальной скорости гашения поля. Кроме этого, отмечено что значительное количество систем возбуждения

использует устройство гашения поля на линейный резистор, которое гасит магнитное поле генератора значительно дольше чем АГП.

С целью ликвидации недостатков существующих способов и устройств гашения поля предложено использовать устройство гашения поля с синтезированной управляемой вольтамперной характеристикой.

Исследование публикаций и патентов по подобным устройствам показывает, что это направление актуально и является перспективным. Однако известные устройства, построенные по принципу переключения линейных резисторов с целью формирования необходимой вольтамперной характеристики, обладают невысокой надежностью, заложенной схемотехнически.

С целью реализации принципа синтеза ВАХ в 2000-х годах на кафедре ЭССиС ФГБОУ ВО ЮУрГУ было разработано тиристорное устройство гашения поля синхронного генератора, работа которого рассмотрена в настоящей главе. По результатам анализа описания разработанного устройства установлено, что устройство реализует принцип синтеза ВАХ за счет ступенчатого изменения эквивалентного сопротивления путем переключения линейных резисторов. При этом выявлены существенные недостатки: низкая надежность, невозможность работы при наличии переменной составляющей, жесткие требования к системе управления.

Кроме этого, во всех рассмотренных устройствах не принимается никаких мер к снижению времени горения дуги в выключателе цепей возбуждения.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ И ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРНОГО УСТРОЙСТВА ГАШЕНИЯ ПОЛЯ

2.1 Схема замещения и работа тиристорного устройства гашения поля

2.1.1 Схема и описание работы устройства

Для обеспечения режима гашения поля, близкого к идеальному, было разработано тиристорное устройство гашения поля (ТУГП). Схема устройства (рисунок 2.1.1) и его принцип действия защищены патентом Российской федерации [64]. Устройство является продолжением разработок кафедры ЭССиСЭ ЮУрГУ [61].



Рисунок 2.1.1 – Схема тиристорного устройства гашения поля из патента

Тиристорное устройство гашения поля (рисунок 2.1.1) входит в состав контура возбуждения (тиристорный возбудитель A1, выключатель возбуждения Q1, обмотка возбуждения FWG, устройство защиты от перенапряжений – элементы A2, Q2 и R_{CC}) и состоит из следующих основных частей: полупроводниковый короткозамыкатель A4 с последовательно включенным диодом VD1, устройство управления A3, и *N*-число гасящих цепей, включающих в себя гасящий резистор (R1, R2,... R_N), узел принудительной коммутации (конденсаторы C1, C2 и C_N) и коммутаторы (тиристоры VS1, VS2 и VS_N), управляемые пороговыми

устройствами (U1, U2 и U_N). Как показали мои исследования [27, 36, 59, 64, 69], число гасящих цепей N может быть от 2 шт. до 10 шт. и более. Устройство работает по описанному ниже алгоритму.

1) При поступлении команды на гашение поля устройством управления A3 формируются сигналы на: перевод тиристорного преобразователя A1 в режим инвертирования, отключение выключателя возбуждения Q1 и включение короткозамыкателя A4. Обмотка возбуждения шунтируется цепью короткозамыкателя.

2) После отключения выключателя Q1 устройство управления A3 отключает короткозамыкатель A4. Напряжение в цепи обмотки возбуждения FWG начинает возрастать.

3) Первым срабатывает пороговое устройство U1 с наименьшей уставкой по напряжению. Устройство U1 сигналом включает тиристор VS1 коммутатора и обмотка возбуждения шунтируется резистором R1.

4) Если рост напряжения на шинах постоянного тока продолжается, то срабатывает пороговое устройство U2, подключающее с помощью тиристора VS2 дополнительный шунтирующий резистор R2. Тем самым результирующе сопротивление устройства гашения поля уменьшается, что приводит к снижению напряжения на обмотке возбуждения.

5) Срабатывание пороговых устройств будет продолжаться до тех пор пока, либо не включатся все тиристоры, либо числа параллельно включенных резисторов будет достаточно для ограничения величины напряжения.

6) Через некоторый заданный промежуток времени устройство управления А3 кратковременно включает короткозамыкатель А4. Это приводит к отключению всех включенных тиристоров из числа VS1...VS_N.

7) После отключения короткозамыкателя напряжение на шинах постоянного тока снова возрастает, что приводит к срабатыванию пороговых устройств и подключению резисторов $R1...R_N$ тиристорами $VS1...VS_N$. Число включенных тиристоров на данном этапе будет меньше, так как ток обмотки возбуждения со

временем снижается и заданная величина напряжения обеспечивается большим сопротивлением ТУГП.

8) Включение-отключение тиристоров будет продолжаться до окончания процесса гашения поля. На завершающем этапе гашения поля в работе будет оставаться только цепь U1-VS1-R1.

9) После гашения поля включается выключатель Q2, надежно шунтирующий обмотку возбуждения резистором самосинхронизации R_{CC}.

Таким образом, тиристорное устройство гашения поля обеспечивает:

- существенное снижение времени горения дуги в выключателе возбуждения;

- за счет переключения числа параллельно включенных резисторов обеспечивается процесс гашения поля, близкий к идеальному.

2.1.2 Схема замещения ТУГП

Для детального исследования работы тиристорного устройства гашения поля составлена схема замещения, приведенная на рисунке 2.1.2.





системы возбуждения

При составлении схемы (рисунок 2.1.2) приняты следующие допущения:

1) тиристоры VS1...VS_N коммутаторов (рисунок 2.1.1) и короткозамыкатель представлены идеальными полностью управляемыми ключами [39];

2) прямое падение напряжения на диодах принято равным нулю;

 конденсаторы исключены из схемы как элементы, непосредственно не участвующие в процессе гашения поля;

4) время горения дуги в выключателе возбуждения и его время отключения приняты равными нулю (идеальный выключатель);

5) отдельные пороговые устройства $U1...U_N$ заменены единым блоком управления MCU, обеспечивающим включение/отключение ключей коммутаторов согласно заданному алгоритму в соответствии с величиной напряжения на обмотке возбуждения. Блок управления при поступлении команды на гашение поля «START» осуществляет выдачу сигналов: на перевод возбудителя в режим инвертирования, отключение выключателя возбуждения Q1, включение выключателя Q2 и короткозамыкателя K1;

6) обмотка возбуждения генератора FWG представлена простейшей схемой замещения в виде последовательно включенных индуктивности L_f и сопротивления R_f ;

7) тиристорный разрядник A2 (рисунок 2.1.1) заменен идеальным ключом, включающимся по сигналу порогового устройства;

8) возбудитель А1 (рисунок 2.1.1) представлен Э.Д.С. Е_d.;

9) Величина сопротивления резистора самосинхронизации в соответствии с нормами [84] принята $R_{\rm CC}=5R_f$;

10) Активные и индуктивные сопротивления, активные и емкостные проводимости токоведущих частей не учитываются.

С учетом принятых допущений полученная схема замещения позволяет проанализировать режимы работы элементов устройства и подготовить основу для разработки методики выбора параметров его элементов.

2.2 Общее описание электромагнитных процессов в тиристорном устройстве гашения поля

Для анализа электромагнитных процессов в схеме тиристорного устройства гашения поля приняты следующие граничные условия:

- максимальное начальное значение тока обмотки возбуждения I_{f0} может находиться в пределах от нуля до двукратного значения номинального тока возбуждения I_{fHOM} (кратность тока $K_C = I_{fMAKC}/I_{fHOM} = 2,0$). Типичные значения тока: I_{fHOM} , $2I_{fHOM}$, $\approx 0,3I_{fHOM}$ (I_{fXX}). Для анализа в большинстве случаев принимается $K_C = 2$, так как режим двукратной форсировки на холостом ходу характеризуется максимальной энергией, накопленной в обмотке возбуждения генератора;

- максимальное амплитудное значение напряжения на вводах обмотки возбуждения U_{fMAX} не должно превышать семикратное номинальное напряжение U_{fHOM} (кратность перенапряжений $K_{\Pi}=U_{fMAKC}/U_{fHOM}=7$).

Отключение выключателя возбуждения – блокирование дуги

При поступлении команды на гашение поля в момент времени t_0 , как описано ранее, в схеме (рисунок 2.1.2) по сигналам блока управления отключается выключатель возбуждения, возбудитель переводится в режим инвертирования и включается короткозамыкатель К1. Обмотка возбуждения шунтируется и дуга в выключателе гаснет. После отключения выключателя, в момент времени t_1 короткозамыкатель К1 отключается. С учетом принятых допущений на интервале t_0-t_1 схема замещения цепей возбуждения имеет вид, приведенный на рисунке 2.2.1.

Для анализа электромагнитных процессов в схеме (рисунок 2.2.1) принято начальное значение тока обмотки возбуждения для момента времени t_0 $i_f(t_0)=I_{f00}=2I_{fHOM}$, т.е. соответствующее режиму установившейся двойной форсировки, максимальному значению, которое может создавать возбудитель с учетом работы ограничителей в его составе [4, 5].



Рисунок 2.2.1 – Схема замещения цепей возбуждения на интервале t_0 - t_1

В соответствии с II-м законом Кирхгофа для контура обмотки возбуждения (рисунок 2.2.1) выражение, описывающее процессы:

$$L_f \frac{di_f(t)}{dt} + R_f i_f(t) = 0$$
 (2.2.1)

Интегрирование выражения 2.2.1 дает зависимость тока обмотки возбуждения от времени на интервале t_0 - t_1 :

$$i_f(t) = 2I_{fHOM} \cdot e^{\frac{-t}{\tau_0}},$$

 $t_0 = 0 \le t < t_1.$
(2.2.2)

Где $\tau_0 = T_{d0} = \tau_f = L_f/R_f$ – постоянная времени обмотки возбуждения. Значение тока обмотки возбуждения перед отключением короткозамыкателя $i_f(t_1)$, равное начальному току работы первой ступени ТУГП I_{f01} , в виду большой постоянной времени T_{d0} будет незначительно отличаться от начального I_{f0} . Выражение 2.2.2 определяет ток через диод VD1 и короткозамыкатель K1 (рисунок 2.1.2) на интервале времени t_0 - t_1 .

Отключение короткозамыкателя – гашения поля

После отключения короткозамыкателя К1 (рисунок 2.1.2) контур обмотки возбуждения разрывается что приводит к появлению перенапряжений. Блок управления фиксирует появление перенапряжений и включает коммутаторы VS1...VS_N, что соответствует включению первой ступени гашения поля. Обмотка

возбуждения шунтируется параллельно включенными резисторами R1...R_N. При принятом ограничении $U_{fMAX} \leq K_{\Pi} U_{fHOM}$ результирующее сопротивление R_{DE1} параллельно включенных гасящих резисторов R1...R_N:

$$R_{DE1} = \frac{K_{\Pi}U_{f\text{HOM}}}{I_{f01}} = \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}\right]^{-1}.$$
 (2.2.3)

Схема замещения контура обмотки возбуждения для интервала времени $t_1 \le t < t_2$ представлена на рисунке 2.2.2:



Рисунок 2.2.2 – Схема замещения цепей обмотки возбуждения для интервала времени *t*₁≤*t*<*t*₂

Выражение, определяющее взаимосвязь тока и напряжений в цепи обмотки возбуждения (II закон Кирхгофа) будет учитывать параллельно включенные резисторы R1...R_N:

$$L_f \frac{di_f(t)}{dt} + R_f i_f(t) + \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}\right]^{-1} i_f(t) = 0,$$

ИЛИ

$$L_{f} \frac{di_{f}(t)}{dt} + R_{f} i_{f}(t) + R_{DE1} i_{f}(t) = 0.$$

Процесс гашения поля на интервале времени $t_1 \le t < t_2$ будет протекать уже с меньшей постоянной времени $\tau_1 = L_f / (R_{DE1} + R_f) < \tau_0$:

$$i_f(t) = I_{f01} e^{\frac{-(t-t_1)}{\tau_1}}; t_1 \le t < t_2.$$
(2.2.5)

(2.2.4)

Напряжение (по модулю) на обмотке возбуждения напрямую зависит от эквивалентного сопротивления ТУГП и снижается по экспоненциальному закону:

$$u_{f}(t) = R_{DEI}i_{f}(t) = K_{\Pi}U_{fHOM}e^{\frac{-(t-t_{1})}{\tau_{1}}},$$

$$t_{1} \le t < t_{2}.$$
(2.2.6)

Процесс гашения поля с подключенными резисторами R1...R_N будет продолжаться до момента времени t_2 . Момент времени t_2 определяется из двух условий: 1) снижение напряжения обмотки возбуждения до заданной минимальной величины $u_f(t_2) \le U_{fMIN}$ и 2) $u_f(t_2) \le K_{\Pi} U_{fHOM}$ при отключении резистора R_N коммутатором VS_N в момент t_2 :

$$i_f(t_2) \cdot R_{DE2} = K_{\Pi} U_{fHOM},$$
 (2.2.7)

где R_{DE2} – эквивалентное сопротивление ТУГП без резистора R_N :

$$R_{DE2} = \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_{N-1}}\right]^{-1}.$$
 (2.2.8)

Начальное значение тока обмотки возбуждения для интервала работы ступени №2 ТУГП $t_2-t_3 - I_{f02} = i_f(t_2)$. В интервале времени t_2-t_3 в схеме ТУГП включены $R1...R_{N-1}$, резисторы эквивалентное сопротивление которых определено выражением 2.2.8. Сопротивление меньшего числа параллельно включенных больше. резисторов получается Поэтому постоянная времени контура, включающего обмотку возбуждения, уменьшается по сравнению с постоянной для интервала t_1 - t_2 :

$$\tau_2 = \frac{L_f}{R_{DE2} + R_f}.$$
 (2.2.9)

За счет увеличения эквивалентного сопротивления ТУГП на второй ступени гашения величина напряжения на клеммах обмотки возбуждения снова увеличивается и его величина находится в пределах $U_{fMUH}...K_{\Pi}U_{fHOM}$. Момент времени t_3 будет определяться теми же условиями что и t_2 с учетом отключения уже

резистора R_{N-2} . Отключение резисторов в схеме будет продолжаться до тех пор (момент времени t_N), пока в работе не останется один резистор R1. Через некоторое время после t_N ток обмотки возбуждения снизится ниже величины, при которой возможно поддержание горения дуги в цепи статора генератора и процесс гашения поля будет окончен. В момент фактического завершения процесса гашения поля t_{N+1} включается выключатель Q2 и обмотка возбуждения шунтируется резистором самосинхронизации R_{CC} . Эквивалентное сопротивление, подключенное к выводам обмотки возбуждения для $t = t_{N+1}$ составит:

$$R_{DEN+1} = \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{CC}}\right]^{-1}.$$
 (2.2.10)

Таким образом, работа ТУГП будет состоять из интервалов работы короткозамыкателя и ступеней $N \ge 1 ... N \ge N$. На интервале работы каждой ступени ток и напряжение обмотки возбуждения снижаются по экспоненциальному закону. Так как напряжение на клеммах обмотки возбуждения на интервалах работы всех ступеней уменьшается строго от $K_{\Pi}U_{fHOM}$ до U_{fMUH} , то вводится величина, называемая коэффициентом пульсаций:

$$K_{PU} = \frac{U_{f\text{MWH}}}{K_{\Pi}U_{f\text{HOM}}}.$$
(2.2.11)

На интервале работы *i*-ступени эквивалентное сопротивление ТУГП R_{DEi} остается неизменным. Поэтому ток $i_f(t)$ на интервале работы *i*-ступени уменьшается от начального I_{f0i} до конечного значения I_{fKi} в $1/K_{PU}$ раз:

$$K_{PU} = \frac{I_{fKi}}{I_{f0i}}.$$
 (2.2.12)

Зависимость тока (2.2.13) и напряжения (2.2.14) на обмотке возбуждения от времени в диапазоне $0 \le t < \infty$ для *N*-числа гасящих цепей представляет собой комбинацию экспонент.

$$u_{f}(t) = \begin{cases} 2I_{fHOM}e^{\frac{-t}{\tau_{0}}}, t_{0} \leq t < t_{1} \\ I_{f01}e^{\frac{-(t-t_{1})}{\tau_{1}}}, t_{1} \leq t < t_{2} \\ I_{f02}e^{\frac{-(t-t_{2})}{\tau_{2}}}, t_{2} \leq t < t_{3} \\ \dots \\ I_{f0N-1}e^{\frac{-(t-t_{N-1})}{\tau_{N-1}}}, t_{N-1} \leq t < t_{N} \\ I_{f0N}e^{\frac{-(t-t_{N})}{\tau_{N-1}}}, t_{N} \leq t < t_{N+1} \\ I_{f0N}e^{\frac{-(t-t_{N-1})}{\tau_{N-1}}}, t_{N+1} \leq t \end{cases}$$

$$u_{f}(t) = \begin{cases} 0e^{\frac{-t}{\tau_{0}}}, t_{0} \leq t < t_{1} \\ K_{\Pi}U_{fHOM}e^{\frac{-(t-t_{1})}{\tau_{1}}}, t_{1} \leq t < t_{2} \\ K_{\Pi}U_{fHOM}e^{\frac{-(t-t_{N-1})}{\tau_{2}}}, t_{2} \leq t < t_{3} \\ \dots \\ K_{\Pi}U_{fHOM}e^{\frac{-(t-t_{N-1})}{\tau_{2}}}, t_{2} \leq t < t_{3} \\ \dots \end{cases}$$

$$(2.2.14)$$

$$K_{\Pi}U_{fHOM}e^{\frac{-(t-t_{N})}{\tau_{N}}}, \quad t_{N} \leq t < t_{N+1}$$

$$R_{DEN+1}I_{fN+1}e^{\frac{-(t-t_{N+1})}{\tau_{N+1}}}, \quad t_{N+1} \leq t$$

Постоянная времени на интервале работы *i*-й ступени:

$$\tau_{i} = \frac{L_{f}}{R_{DEi} + R_{f}} = \frac{L_{f}}{\frac{K_{\Pi}}{K_{C}} \frac{R_{f}}{K_{PU}^{i-1}} + R_{f}} = \frac{\tau_{f}}{\frac{3.5}{K_{PU}^{i-1}} + 1} = \frac{K_{PU}^{i-1} \tau_{f}}{K_{PU}^{i-1} + \frac{K_{\Pi}}{K_{C}}}.$$
 (2.2.15)

Анализ электромагнитных процессов показывает:

- за счет свойств схемы устройства и настроек его параметров напряжение на шинах постоянного тока на основном этапе работы ТУГП находится в пределах $K_{\Pi}U_{f\rm HOM}\dots U_{f\rm MUH}$;

- зависимости от времени тока и напряжения обмотки возбуждения представляют из себя комбинацию экспонент;

- эквивалентное сопротивление ТУГП изменяется в процессе работы ступенчато, тем самым обеспечивая поддержание напряжения на обмотке возбуждения в заданных пределах;

- при переключении резисторов, по мере снижения величины тока, наблюдается уменьшение постоянной времени контура обмотки возбуждения, что ведет к ускорению электромагнитных процессов от ступени к ступени;

- изменение величин тока и напряжения обмотки возбуждения на интервале работы одной ступени может быть задано коэффициентом пульсаций *К*_{PU}.

Для определения условий работы элементов устройства и выбора их параметров полученных данных недостаточно и требуются дополнительные исследования. Так как резистор R_{CC} непосредственно в состав ТУГП не входит и вводится в работу после завершения процесса гашения поля тиристорным устройством, то в последующем анализе он исключен.

2.3 Вольтамперная характеристика ТУГП

В главе 1 п. 1.2 описаны свойства идеального устройства гашения поля. В частности, приведены: вольтамперная характеристика УГП (1.2.5) и зависимость величины сопротивления $R_{DE}(I)$ гасящего резистора от тока обмотки возбуждения (1.2.6). Для сравнения свойств тиристорного устройства гашения поля и идеального УГП по расчетным выражениям, приведенным ранее, ниже получена и описана ВАХ ТУГП.

При работе устройства эквивалентное сопротивление *R*_{DE}, подключенное к выводам обмотки возбуждения ступенчато изменяется по закону, описываемому выражением 2.3.1:

$$R_{DE}(t) = \begin{cases} 0, \ t_{1} \leq t < t_{2} \\ [\frac{1}{R_{1}} + \frac{1}{R_{2}} + \dots + \frac{1}{R_{N}}]^{-1}, \ t_{1} \leq t < t_{2} \\ [\frac{1}{R_{1}} + \frac{1}{R_{2}} + \dots + \frac{1}{R_{N-1}}]^{-1}, \ t_{2} \leq t < t_{3} \\ \dots \\ [\frac{1}{R_{1}} + \frac{1}{R_{2}}]^{-1}, \ t_{N-1} \leq t < t_{N} \\ [\frac{1}{R_{1}} + \frac{1}{R_{2}}]^{-1}, \ t_{N-1} \leq t < t_{N} \\ R_{1}, \ t_{N} \leq t < t_{N+1} \\ [\frac{1}{R_{1}} + \frac{1}{R_{CC}}]^{-1}, \ t_{N+1} \leq t \end{cases}$$
(2.3.1)

Из выражения 2.3.1, используя законы параллельного соединения электрических цепей, легко определяются величины сопротивлений резисторов R1...R_N. Так как в основе принципа действия ТУГП лежит переключение линейных резисторов – изменение числа параллельно включенных резисторов в зависимости от суммарного тока через них, то вольтамперная характеристика устройства будет представлять собой кусочно-линейную функцию. Выражение 2.3.1, с учетом 2.2.11 и 2.2.12, может быть записано в виде:

$$R_{DE}(t) = \begin{cases} 0, \ t_{1} \leq t < t_{2} \\ \frac{K_{\Pi}R_{f}}{K_{C}K_{PU}^{0}}, \ t_{1} \leq t < t_{2} \\ \frac{K_{\Pi}R_{f}}{K_{C}K_{PU}^{1}}, \ t_{2} \leq t < t_{3} \\ \dots \\ \frac{K_{\Pi}R_{f}}{K_{C}K_{PU}^{N-2}}, \ t_{N-1} \leq t < t_{N} \\ \frac{K_{\Pi}R_{f}}{K_{C}K_{PU}^{N-1}}, \ t_{N} \leq t \end{cases}$$

$$(2.3.2)$$

Каждый из линейных участков ВАХ будет соответствовать работе одной из ступеней гашения поля. Принимая во внимание то, что в течение интервала работы одной ступени гашения ток обмотки возбуждения изменяется в $1/K_{PU}$ раз (2.2.12) и переключение гасящих резисторов коммутаторами происходит при снижении напряжения ниже величины $K_{PU}U_{fMAX} = U_{fMAX} - \Delta U$, то в соответствии с законом Ома из 2.3.2 получается выражение, описывающее синтезированную ВАХ для произвольного числа ступеней *N*:

$$U(I) = \begin{cases} I \frac{K_{\Pi}R_{f}}{K_{C}K_{PU}^{0}}, K_{C}I_{fHOM}K_{PU}^{0} \ge I > K_{C}I_{fHOM}K_{PU}^{1} \\ I \frac{K_{\Pi}R_{f}}{K_{C}K_{PU}^{1}}, K_{C}I_{fHOM}K_{PU}^{1} \ge I > K_{C}I_{fHOM}K_{PU}^{2} \\ \dots \\ I \frac{K_{\Pi}R_{f}}{K_{C}K_{PU}^{N-2}}, K_{C}I_{fHOM}K_{PU}^{N-2} \ge I > K_{C}I_{fHOM}K_{PU}^{N-1} \\ I \frac{K_{\Pi}R_{f}}{K_{C}K_{PU}^{N-1}}, K_{C}I_{fHOM}K_{PU}^{N-1} \ge I \end{cases}$$

$$(2.3.3)$$

Выражение 2.3.3 не учитывает работу короткозамыкателя в начальный момент и включение в цепь обмотки возбуждения резистора R_{CC} после завершения процесса гашения поля. В соответствии с выражением 2.3.3, ключевыми параметрами, определяющими свойства тиристорного устройства гашения поля являются: номинальный ток возбуждения I_{fHOM} , кратности тока возбуждения K_C и допустимых перенапряжений K_{Π} , коэффициент пульсаций K_{PU} и число гасящих ступеней N. Для примера, при N=3, $K_C=2$, $K_{\Pi}=7$ BAX ТУГП согласно выражению 2.3.3 имеет вид:

$$U(I) = \begin{cases} I \frac{3,5R_{f}}{1}, & 2I_{fHOM} \ge I > 2I_{fHOM} K_{PU}^{1} \\ I \frac{3,5R_{f}}{K_{PU}^{1}}, & 2I_{fHOM} K_{PU}^{1} \ge I > 2I_{fHOM} K_{PU}^{2} \\ I \frac{3,5R_{f}}{K_{PU}^{2}}, & 2I_{fHOM} K_{PU}^{2} \ge I \end{cases}$$
(2.3.4)

Вид ВАХ при N=3 и $K_{PU}=0,7$, построенной с помощью средств пакета MathCAD по выражению 2.3.4, приведен на рисунке 2.3.1.



Рисунок 2.3.1 – Вид ВАХ ТУГП для *N*=3 и *К*_{PU}=0,7 в относительных единицах



Рисунок 2.3.2 – Семейство ВАХ ТУГП в относительных единицах для различного числа ступеней гашения при *К*_{PU}=0,7 с указанием диапазонов токов, соответствующих работе каждой ступени

Для различного количества гасящих ступеней по выражению 2.3.3 могут быть получены ВАХ ТУГП при различных значениях коэффициента пульсаций K_{PU} . В частности, для N=1...20 и $K_{PU}=0,7$ в среде MathCAD построено семейство ВАХ, приведенное на рисунке 2.3.2.

При любом числе гасящих ступеней *N* и коэффициенте *K*_{PU} все ВАХ имеют два характерных диапазона токов:

- диапазон стабилизации напряжения, соответствующий токам, при которых в схеме ТУГП включено 2 и более гасящих резистора;

- диапазон падения напряжения, соответствующий малым токам при одном работающем гасящем резисторе.

С целью определения границ диапазона величин тока, соответствующего участку стабилизации напряжения, для ВАХ, описываемой выражением 2.3.3, произведено вычисление среднего значения напряжения. При расчете зависимости среднего напряжения от тока через ТУГП принято, что функция поддержания напряжения реализуется при работе всех ступеней кроме последней. Отсюда, синтезированная ВАХ будет состоять из двух участков и принимает вид:

$$U(I) = \begin{cases} U_{fHOM} K_{\Pi} \left(1 - \frac{1 - K_{PU}}{2} \right), & 2I_{fHOM} \ge I > 2I_{fHOM} K_{PU}^{N-1} \\ \frac{K_{\Pi}}{2} \frac{I \cdot R_{f}}{K_{PU}^{N-1}}, & 2I_{fHOM} K_{PU}^{N-1} \ge I \end{cases}$$
(2.3.5)

Реальная и усредненная синтезированная ВАХ, построенные по выражением 2.3.3 и 2.3.5 для *N*=10 в среде MathCAD, приведены на рисунке 2.3.3. Коэффициент нелинейности [80] усредненной ВАХ (рисунок 2.3.3) в диапазоне стабилизации напряжения стремится к бесконечности, что недостижимо ни при использовании варисторов, ни АГП.

Наращивание числа ступеней гашения поля $N \rightarrow \infty$ и снижение пульсаций $K_{PU} \rightarrow 1$ приближает вид синтезированной ВАХ (2.3.5) к идеальной $U_f(I_f) = U_{fMAX}$. На рисунке 2.3.4 для примера показаны построенные ВАХ для N=20 и $K_{PU}=0,8$.



Рисунок 2.3.3 – Реальная и синтезированная усредненная ВАХ ТУГП для N=10 и

*К*_{*PU*}=0,7 (в относительных единицах)



Рисунок 2.3.4 – Реальная и синтезированная ВАХ ТУГП для *N*=20 и *K*_{PU}=0,8 (в относительных единицах)

Увеличение числа ступеней с N=10 до N=20 и снижение коэффициента пульсаций привело к расширению диапазона токов горизонтального участка ВАХ с $(2...0,081)I_{fHOM}$ до $(2...0,029)I_{fHOM}$. При этом, среднее значение напряжения горизонтального участка увеличилось с $5,95U_{fHOM}$ до $6,3U_{fHOM}$, что в совокупности с расширением горизонтального участка ведет с снижению времени гашения поля. Дальнейшее увеличение числа ступеней $N \rightarrow \infty$ при сохранении уровня пульсаций

по выражению 2.3.5 приведет к получению синтезированной ВАХ со сплошным горизонтальным участком:

$$U(I) = U_{fCP} = U_{fHOM} K_{\Pi} \left(1 - \frac{K_{PU}}{2} \right).$$
(2.3.6)

Наличие пульсаций в напряжении на горизонтальном участке (K_{PU} <1) при конечном значении N не позволит достичь идеальной ВАХ $U(I)=U_{fMAX}$ (п. 1.2), что является недостатком исследуемого способа формирования ВАХ УГП.

Предложена компактная запись (2.3.7) кусочно-линейной функции ВАХ, описанной выражением 2.3.3, с использованием переключающих логических множителей. Множитель типа « $(t_{N-1} \le t < t_N)$ » в выражении 2.3.7 является переключающей функцией, принимающей значения 0 или 1 в зависимости от выполнения записанного условия [81]:

$$U(I) = R_{f} \frac{K_{\Pi}}{K_{C}} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N-1} (I_{f0} K_{PU}^{i-1} \ge I > I_{f0} K_{PU}^{i}) I \frac{1}{K_{PU}^{i-1}} + \\ + (I_{f0} K_{PU}^{N-1} \ge I) I \frac{1}{K_{PU}^{N-1}} \end{bmatrix}.$$
(2.3.7)

Выражение 2.3.7 должно учитывать процесс блокирования дуги и интервал времени до отключения выключателя 0...*t*_{выкл} на котором обмотка возбуждения закорочена (напряжение равно нулю):

$$U(I) = R_{f} \frac{K_{\Pi}}{K_{C}} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N-1} (I_{f0} K_{PU}^{i-1} \ge I > I_{f0} K_{PU}^{i})(t > t_{BbIKJI}) I \frac{1}{K_{PU}^{i-1}} + \\ + (I_{f0} K_{PU}^{N-1} \ge I)(t > t_{BbIKJI}) I \frac{1}{K_{PU}^{N-1}} + (0 < t \le t_{BbIKJI}) 0 \end{bmatrix}.$$
(2.3.8)

Полученная математическая модель тиристорного устройства гашения поля (выражение 2.3.8) отличается от модели, приведенной в [25] тем, что связывает ток и напряжение для произвольного числа гасящих ступеней для любого начального тока в заданном диапазоне на всем интервале процесса гашения поля от начала расхождения контактов выключателя до снижения тока обмотки возбуждения до нуля.

2.4 Влияние параметров элементов ТУГП длительность процесса гашения поля

2.4.1 Длительность работы ступеней

Начало интервала работы каждой ступени гашения ТУГП определяется моментом включения соответствующих коммутаторов VS1-VS_N и соответствует напряжению на обмотке возбуждения U_{fMAX} . Окончание интервала работы ступени соответствует моменту снижения напряжения в цепи обмотки возбуждения до заданной величины U_{fMAX} - ΔU или в $1/K_{PU}$ -раз. Моменты начала и конца работы ступени определяются из анализа электромагнитных процессов в ТУГП.

Если рассматривать обмотку возбуждения генератора только в виде линейно индуктивности, без магнитной связи с другими контурами или обмотками (рисунок 2.2.2), ее ток на интервале работы *i*-й ступени будет снижаться по экспоненте с постоянной времени τ_i (2.2.2). С учетом выражения 2.2.12, время работы одной ступени:

$$\Delta t_i = -\tau_i \ln K_{PU}. \tag{2.4.1}$$

Так как последняя ступень №*N* работает до завершения процесса гашения поля, то длительность ее работы будет зависеть не только от заданного коэффициента пульсаций, но и от конечного значения тока обмотки возбуждения:

$$\Delta t_{N} = -\tau_{N} \ln \frac{I_{fK}}{K_{C} I_{fHOM} K_{PU}^{N-1}}.$$
(2.4.2)

Общая длительность процесса гашения поля будет складываться из: времени Δt_{Q1} отключения выключателя цепей возбуждения Q1 (рисунок 2.1.1) и времени работы всех ступеней:

$$t_{DE} = \Delta t_{Q1} - \ln K_{PU} \sum_{i=1}^{N-1} \tau_i - \tau_N \ln \frac{I_{fK}}{K_C I_{fHOM} K_{PU}^{N-1}}.$$
 (2.4.3)

Постоянные времени т_{*i*} вычисляются по выражению 2.2.15 (п. 2.2).

2.4.2 Влияние числа ступеней и коэффициента пульсаций на длительность процесса гашения поля

По выражению 2.4.3 рассчитана длительность процесса гашения поля по отношению к собственной постоянной времени обмотки возбуждения t_{DE}/τ_{f0} при разных значениях коэффициента пульсаций K_{PU} и числа ступеней N. Для расчета ранее было принято $K_C=2$ и $I_{fK}=I_{fHOM}/105$, а время отключения выключателя Q1 Δt_{Q1} не учитывается. Семейство зависимостей t_{DE}/τ_{f0} от K_{PU} при различных значениях N представлено на рисунке 2.4.1.



Рисунок 2.4.1 – Взаимосвязь длительности процесса гашения *t*_{DE}/τ_f, коэффициента пульсаций *K*_{PU} и количества ступеней гашения *N*

Зависимости, аналогичные приведенным на рисунке 2.4.1, представлены в статье [59], но для кратности перенапряжений K_{Π} =10 о.е.. Зависимости, приведенные на рисунке 2.4.1, получены для K_{Π} =7 о.е.. По рисунку 2.4.1 заметно, что зависимость времени гашения от K_{PU} имеет минимум при определенном *N*-числе гасящих

ступеней. Дифференцирование выражения 2.4.3 с последующим решением численными методами полученного дифференциального уравнения относительно K_{PU} дает значения оптимального коэффициента пульсаций $K_{PUO\Pi T}$, приведенные в таблице 2.4.1. Аналитическое выражение оптимальной величины $K_{PUO\Pi T}$ из дифференциального уравнения оказывается громоздким и не имеет практической ценности.

Таблица	2.4	.1
гаолица	∠.⊤	• т

<i>N</i> , шт	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
<i>K</i> _{PUOIIT}	-	0,183	0,315	0,411	0,483	0,539	0,583	0,619	0,65	0,675	0,809
t_{DE}/τ_{f0}	1,188	0,559	0,436	0,384	0,355	0,337	0,324	0,315	0,308	0,302	0,277
t_{DE}/t_{MIN}	4,75	2,24	1,75	1,54	1,42	1,36	1,3	1,26	1,25	1,21	1,107
$t_{N=l}/t_{DE}$	1	2,12	2,72	3,09	3,34	3,5	3,66	3,76	3,81	3,91	4,29

Переход от одного гасящего сопротивления (N=1) к двум переключаемым (N=2) дает снижение времени гашения ($t_{N=1}/t_{DE}$ в таблице 2.4.1) в более чем 2 раза. Дальнейшее увеличение числа ступеней гашения поля позволяет получить время гашения. близкое к минимально возможному при заданной кратности перенапряжений (K_{Π} =7). Длительность процесса гашения поля уже при четырех ступенях гашения всего в 1,54 раза больше минимально достижимого значения по условиям перенапряжений (t_{DE}/t_{MIN} в таблице 2.4.1). Если реализовать в устройстве 40 шт. гасящих цепей, то время гашения поля будет всего на 5,6% больше минимально достижимого. Результаты исследований показывают, что увеличение числа ступеней приводит к уменьшению времени гашения поля, что противоречит утверждению в [25] о нецелесообразности применения более двух гасящих ступеней.

Минимальное время гашения поля, которое можно получить при $K_{\Pi}=7$, составляет 0,25 τ_{f0} . Значение определено по выражению 2.4.5, приведенному и обоснованному ниже, с учетом того, что гашение ведется из режима двойной
форсировки и гасящий элемент имеет идеальную нелинейную BAX *U*(*I*)=const. Для реальных устройств гашения поля, как показано в главе 1, BAX далека от идеальной и ожидается, что времена гашения поля или будут одинаковыми, или для ТУГП оно будет даже меньше за счет лучше й стабилизации напряжения.

К определению минимально достижимого времени гашения поля

В известных работах по гашению поля синхронных генераторов [9, 25] зависимость тока обмотки возбуждения для случая подключения обмотки возбуждения к источнику ЭДС (идеальный процесс, см. п. 1.2) представляется как линейная зависимость. Это, несмотря на то, что изначально в этих же источниках электромагнитные процессы в контуре обмотки возбуждения описываются дифференциальным уравнением первого порядка И зависимости экспоненциальные. Для произвольных значений кратностей тока K_C и напряжения *К*п. номинального *I*_{fHOM} и конечного *I*_{fK} тока возбуждения, результат интегрирования уравнения, приведенного в [9]:

$$i_f(t) = K_C I_{fHOM} - I_{fHOM} \left(K_C + K_{\Pi} \right) \left(1 - e^{-t/\tau_f} \right).$$
(2.4.4)

Из выражения 2.4.4 определяется время снижения тока с $K_C I_{fHOM}$ до I_{fK} :

$$t_{DE} = -\tau_f \ln \left(\frac{I_{fK} + I_{fHOM} K_{\Pi}}{I_{fHOM} (K_{\Pi} + K_C)} \right).$$
(2.4.5)

Линеаризация экспоненциальной зависимости, используемая в известных работах [9, 20, 23, 25, 70, 82], дает погрешность в определении времени гашения поля. Например, для условий $K_C=1~K_{\Pi}=5~I_{fK}=1/105$, приведенных в [9], время гашения составляет 0,167 τ_f , а по выражению 2.4.5 – 0,18 τ_f , что на 7,8% больше.

2.5 Работа ТУГП при наличии переменной составляющей в токе обмотки возбуждения

В цепи обмотки возбуждения синхронного генератора возможно появление переменной составляющей тока в двух случаях: при внезапном коротком замыкании на выводах статора и в режиме асинхронного хода (работе в сети с потерей возбуждения) [2, 70, 82]. В первом случае ток обмотки возбуждения содержит постоянную, затухающие апериодическую и периодическую составляющие. Во втором случае в контуре возбуждения протекает только переменный ток. Согласно требованиям ГОСТ устройство гашения поля должно работать во всех режимах генератора, в том числе указанных выше.

Случай №1 «переменная + постоянная составляющие»

Такой режим возникает при внезапном коротком замыкании в цепи обмотки статора. Для упрощения анализа работы ТУГП в настоящем параграфе приняты допущения:

- ток обмотки возбуждения не зависит от эквивалентного сопротивления устройства гашения поля *R*_{DE};

 ток обмотки возбуждения содержит только две затухающих составляющих – апериодическую и периодическую с частотой 50 Гц, за счет переменной составляющей не проходит через ноль;

- амплитудное значение тока не превышает 2 о.е..

Зависимость тока обмотки возбуждения от времени взята для примера и основывается на данных о режимах внезапного трехфазного короткого замыкания, приведенных в источниках [2, 69, 81]:

$$i_f(t) = 1 \cdot e^{\frac{-t}{0.5}} + 1 \cdot e^{\frac{-t}{0.1}} \cos(314t).$$
(2.5.1)

Разумеется, в случае реального генератора ток обмотки возбуждения определяется также сопротивлением ТУГП и его зависимость содержит четыре составляющих [82].

Применение зависимости тока обмотки возбуждения (2.5.1) к уравнению ВАХ ТУГП (2.3.7) с N=4, $K_{PU}=0,7$, $K_C=2$, $K_{\Pi}=7$ позволило построить в пакете Mathcad зависимость напряжения обмотки возбуждения $u_f(t)$ (рисунок 2.5.1).



Рисунок 2.5.1 – Зависимость напряжения в цепях возбуждения при наличии переменной составляющей в токе

По рисунку 2.5.1а видно что по мере затухания тока происходит переключение ступеней ТУГП, за счет чего напряжение в цепях возбуждения с одной стороны повышается, с другой стороны, ограничивается на уровне 7 о.е.. При детальном рассмотрении первых двух периодов переменной составляющей (рисунок 2.5.1б) видно, как устройство пытается поддерживать напряжение на обмотке возбуждения в пределах $7(1...K_{PU})$ о.е.: снижение тока приводит к отключению части гасящих ступеней в плоть до того, что в работе остается только первая

ступень, последующее возрастание тока снова вызывает включение гасящих цепей и напряжение ограничивается.

Таким образом, устройство адаптируется к режиму обмотки возбуждения. Т.е. алгоритм переключения гасящих цепей предполагает не только снижение тока в процессе работы ТУГП, но и его возможное возрастание. Это является преимуществом по сравнению с исходным устройством, описанным в патенте [61]. Алгоритм переключения гасящих резисторов, описанный в [61] не предполагает возможность возрастания тока обмотки возбуждения, из-за чего будут возникать опасные перенапряжения.

Случай №2 «Переменная составляющая»

При потере синхронным генератором возбуждения и работе его в сети на клеммах обмотки возбуждения появляется только переменное напряжение [2, 82]. Также такой режим контура возбуждения возникает при включении в сеть невозбужденного генератора методом самосинхронизации.

Принято допущение что ток обмотки возбуждения содержит только переменную составляющую и не зависит от сопротивления контура возбуждения. На реальном генераторе это не так, но для рассмотрения работы устройства такое допущение приемлемо. Также, в анализе работы устройства на переменном токе учитывается действие цепи защиты от перенапряжений, включающей в себя тиристорный разрядник, контактор и резистор самосинхронизации (рисунок 2.1.1), ранее исключенной из исследования процессов.

Так как тиристоры коммутаторов гасящих цепей обладают односторонней проводимостью, то одна полуволна тока обмотки возбуждения будет замыкаться через гасящие цепи, а вторая – приводить к срабатыванию тиристорного разрядника и протекать через резистор самосинхронизации. Для принятых ранее N=4, $K_{PU}=0,7$, $K_{C}=2$, $K_{\Pi}=7$ и зависимости тока $i_{f}(t)=2\sin(314t)$ на основе выражения для ВАХ ТУГП с учетом работы $R_{CC}=3,5R_{f}$ на отрицательной (для ТУГП) полуволне тока получена зависимость напряжения $u_{f}(t)$ (рисунок 2.5.2).



Рисунок 2.5.2 – Зависимость напряжения в цепях обмотки возбуждения при переменном токе

По рисунку 2.5.2а заметен недостаток исследуемой схемы ТУГП – несимметрия проводимости, что приводит к появлению постоянной составляющей в цепи обмотки возбуждения генератора, работающего в асинхронном режиме. Уменьшение тока в два раза до $i_f(t)=\sin(314t)$ (рисунок 2.5.26) приводит к еще большей несимметрии в напряжении. Для реального генератора несимметричными будут и ток, и напряжение, что чревато появлением постоянной составляющей в токе обмотки возбуждения и, как результат, сильного знакопеременного момента на роторе, что нежелательно [2]. Для синхронных двигателей такой режим при пуске вообще недопустим.

Устройство с симметричной ВАХ можно получить двумя способами:

- применение ключей с двухсторонней проводимостью;

- подключение гасящих цепей и короткозамыкателя к обмотке возбуждения через диодный мост.

Пример подключения ТУГП через диодный мост VDB приведен на рисунке 2.5.3.



Рисунок 2.5.3 – Пример реализации ТУГП с симметричной ВАХ

Что для варианта ТУГП с ключами с двухсторонней проводимостью, что для варианта включения через диодный мост есть существенный недостаток невозможность использования короткозамыкателя К1 (рисунок 2.1.1) ДЛЯ возбуждения. блокирования выключателе цепей Включение дуги В короткозамыкателя приводит к короткому замыканию в цепи постоянного тока возбудителя. Этот недостаток ликвидируется установкой дополнительной цепи короткозамыкателя К2 (рисунок 2.5.3). Короткозамыкатель К1 в составе ТУГП (рисунок 2.1.1) должен блокироваться при включенном выключателе Q1. Вольтамперная характеристика, полученная после модификации, из выражения 2.3.7 и описывается выражением 2.5.2. Графически ВАХ изображена на рисунке 2.5.4 (для *K*_{PU}=0,7 *N*=10, *K*_C=2, *K*_П=7).

$$U(I) = R_{f} \frac{K_{\Pi}}{K_{C}} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N-1} (I_{f0} K_{PU}^{i-1} \ge |I| > I_{f0} K_{PU}^{i}) I \frac{1}{K_{PU}^{i-1}} + \\ + (I_{f0} K_{PU}^{N-1} \ge |I|) I \frac{1}{K_{PU}^{N-1}} \end{bmatrix}.$$
(2.5.2)



Рисунок 2.5.4 – ВАХ ТУГП с симметричной проводимостью (в относительных единицах)

Осциллограмма напряжения в цепях обмотки возбуждения при существовании только переменной составляющей тока $i_f(t)=2\sin(314t)$ и симметричной ВАХ ТУГП приведена на рисунке 2.5.5.



Рисунок 2.5.5 – Зависимость напряжения в цепях обмотки возбуждения при переменном токе и симметричной ВАХ ТУГП

Рассмотрение работы модифицированного ТУГП показало, что устройство удовлетворительно работает при наличии переменной составляющей в токе обмотки возбуждения. За счет модификации схемы, приведенной в патенте [64] получается тиристорное устройство гашения поля с симметричной ВАХ, пригодное для работы генератора в асинхронном режиме. Также это устройство может быть применено для пуска синхронных двигателей и включения синхронных генераторов методом самосинхронизации.

2.6 Альтернативный алгоритм переключения гасящих цепей

В исследуемом устройстве, как и в его прототипе [61] при снижении тока происходит последовательное отключение гасящих цепей, за счет чего поддерживается величина напряжения на обмотке возбуждения и формируется заданная ВАХ. Соответственно, рост тока ведет к подключению дополнительных гасящих цепей с целью ограничения величины напряжения. При этом, количество гасящих ступеней в зависимости $R_{DE}(I)$ и ступеней ВАХ равно числу гасящих цепей. Ранее было показано, что увеличение числа гасящих ступеней положительно сказывается на качестве синтезируемой вольтамперной характеристики и снижает время гашения поля. Ниже предложен метод увеличения числа гасящих ступеней без увеличения количества гасящих цепей.

Эквивалентное сопротивление ТУГП R_{DE} изменяется дискретно. Поэтому для управления гасящими цепями можно применить принцип представления десятичного числа в двоичном коде. Наиболее просто изменение эквивалентного сопротивления ТУГП описывается при последовательном соединении гасящих резисторов, как это сделано в прототипе устройства [61]. Пример схемы цепей возбуждения с устройством гашения поля (N=4), построенным по такому принципу, приведен на рисунке 2.6.1.



Рисунок 2.6.1 – Схема с последовательным соединением гасящих резисторов Эквивалентное сопротивление ТУГП, выполненного по схеме 2.6.1 для *i*-й ступени:

$$R_{DEi} = R_f \frac{K_{\Pi}}{K_C} \sum_{k=1}^{N} 2^{k-1} a_k.$$
(2.6.1)

В выражении 2.6.1 a_k это значение k-го разряда двоичного числа, соответствующего десятичному значению номера ступени i или состояние соответствующего ключа Kk в схеме на рисунке 2.6.1 ($a_k=1$ – ключ Kk включен). Количество гасящих ступеней (ступеней BAX), получаемых таким способом при N-шт. гасящих резисторов равно 2^{N-1} . Изменение эквивалентного сопротивления R_{DE} составляет также 2^{N-1} раз. Например, при N=4, $K_{PU}=0,7$ для последовательного отключения резисторов сопротивление ТУГП меняется в $1/0,7^4=4,16$ раз за 4 ступени, для описанного способа управления – в 15 раз с 15 шт. ступеней (не считая $R_{DE}=0$ при всех включенных ключах K1–K4 на рисунке 2.6.1). Применение 5 шт. гасящих цепей (резисторов) дает уже 31 гасящую ступень. Увеличение числа ступеней и диапазона изменения эквивалентного сопротивления положительно сказывается и на качестве синтеза BAX, и на скорости гашения поля, что показано в п 2.4. Ранее было показано, что приемлемая BAX синтезируется уже при 10 шт. ступеней. Таким образом, устройство может содержать всего 3-4 шт. гасящих цепей.

Однако, у данной схемы есть существенный недостаток – надежность всего ТУГП определяется надежностью одного гасящего резистора. При его обрыве на изоляции обмотки возбуждения возникают недопустимые перенапряжения. Схема исследуемого в работе устройства (рисунок 2.1.2) с параллельным соединением резисторов лишена этого недостатка. Эквивалентное сопротивление ТУГП, выполненного по схеме с параллельным соединением гасящих резисторов для *i*-й ступени:

$$R_{DEi} = \left[\sum_{k=1}^{N} \frac{a_k}{2^{k-1}R}\right]^{-1},$$

$$R = R_f \frac{K_{\Pi}}{K_C} \frac{2^N - 1}{2^{N-1}}.$$
(2.6.2)

Сопротивления резисторов увеличиваются в 2 раза от цепи к цепи – R, 2R, 4R и т.д.. Устройство с параллельно включенными резисторами аналогично формирует 2^{N-1} ступеней ВАХ с изменением эквивалентного сопротивления в 2^{N-1} раз. Управление ключами VS1-VS_N (рисунок 2.1.2) осуществляется от системы управления в соответствии с заданной синтезируемой ВАХ по значению тока обмотки возбуждения. Отсюда, предъявляются жесткие требования по надежности и быстродействию как самой системе управления, так и к ключам VS1-VS_N. Если гасящие цепи в рассмотренном ранее тиристорном устройстве гашения поля подключаются к обмотке возбуждения только по сигналам индивидуальных пороговых устройств без участия системы управления, и отключаются только по сигналу сброса, то при реализации описанного алгоритма управления процессы включения/отключения будут определяться системой управления.

2.7 Выводы

1. На основе принципиальной электрической схемы тиристорного устройства гашения поля (ТУГП), приведенной в патенте [61] составлена его схема замещения. Введенные допущения и полученная схема замещения позволили произвести аналитические исследования работы устройства.

2. Рассмотрение электромагнитных процессов при работе устройства показало, что зависимости тока и напряжения обмотки возбуждения представляют

собой комбинацию экспонент. При этом весь процесс гашения поля делится на три интервала: 1) отключение выключателя и блокирование дуги в его контактной системе; 2) вывод энергии из обмотки возбуждения; завершение гашения поля и 3) включение резистора самосинхронизации. Каждый интервал характеризуется своими параметрами режима контура возбуждения и описывается соответствующими выражениями.

3. Отмечено, что на интервале интенсивного вывода энергии из обмотки возбуждения происходит переключение гасящих цепей, за счет чего формируются гасящие ступени. На интервале работы каждой гасящей ступени количество включенных гасящих цепей остается неизменным.

4. Установлено, что переключение гасящих ступеней, направленное на поддержание напряжения на обмотке возбуждения при снижении тока через нее, приводит каждый раз к уменьшению постоянной времени контура возбуждения. Получено выражение, определяющее постоянную времени контура возбуждения для произвольного момента времени в процессе гашения поля.

5. Детальное рассмотрение работы одной гасящей ступени привело к заключению, что изменения тока и напряжения на интервале работы этой ступени напрямую определяются коэффициентом пульсаций K_{PU} . Этот коэффициент связывает между собой кртаность перенапряжений K_{Π} , кратность тока K_C , номинальное напряжение U_{fHOM} и ток I_{fHOM} обмотки возбуждения генератора, число гасящих ступеней N, сопротивления гасящих ступеней R_{DEi} и постоянные времени τ_i . Т.е. коэффициент пульсаций K_{PU} является ключевым параметром, определяющим параметры устройства.

6. По результатам предыдущих исследований сформировано выражение, описывающее основные свойства тиристорного устройства гашения поля – вольтамперная характеристика (BAX):

83

$$U(I) = R_f \frac{K_{\Pi}}{K_C} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N-1} (I_{f0} K_{PU}^{i-1} \ge I > I_{f0} K_{PU}^{i}) I \frac{1}{K_{PU}^{i-1}} + \\ + (I_{f0} K_{PU}^{N-1} \ge I) I \frac{1}{K_{PU}^{N-1}} \end{bmatrix}$$

Все остальные выражения, описывающие режимы работы устройства и его элементов, являются следствием приведенной характеристики.

7. Рассмотрен принцип синтеза вольтамперной характеристики – представление гладкой ВАХ в виде кусочно-линейной зависимости. Исследовано влияние числа ступеней *N* и коэффициента пульсаций *K*_{PU} на качество синтеза ВАХ. Показано, что увеличение числа ступеней *N* с одновременным снижением пульсаций приближает синтезированную характеристику к заданной гладкой.

8. Так как устройство предназначено в первую очередь для гашения поля, то его характеристика сравнивается с ранее определенной идеальной U(I)=const. Анализ и расчеты показывают, что синтезированная ВАХ обладает большой нелинейностью, возрастающей с увеличением числа ступеней. Так как на рабочем участке ВАХ (интервале стабилизации напряжения) напряжение поддерживается на одном среднем уровне, то нелинейность ТУГП получается больше чем у существующих устройств гашения поля.

9. Произведены расчетно-аналитические исследования влияния числа гасящих ступеней N и коэффициента пульсаций K_{PU} на длительность процесса гашения поля. По результатам исследований определено оптимальное значение коэффициента пульсаций K_{PU} , при котором достигается минимальное время гашения поля t_{DE} для N шт. гасящих ступеней:

<i>N</i> , шт	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
$K_{PUO\Pi T}$	-	0,183	0,315	0,411	0,483	0,539	0,583	0,619	0,65	0,675	0,809
t_{DE}/τ_{f0}	1,188	0,559	0,436	0,384	0,355	0,337	0,324	0,315	0,308	0,302	0,277
t_{DE}/t_{MIN}	4,75	2,24	1,75	1,54	1,42	1,36	1,3	1,26	1,25	1,21	1,107

Так как в выражение ВАХ не входят индуктивности контура возбуждения, то приведенные выше соотношения справедливы для любой линейной обмотки

возбуждения с собственной постоянной времени τ_{f0} . Расчет также показал, что время гашения поля с помощью ТУГП при N=20 шт. уже практически приближается к минимально достижимому для заданных ограничений по перенапряжениям ($K_{\Pi}=7$). Это опровергает утверждения в некоторых источниках о нецелесообразности применения более двух гасящих ступеней.

10. Применение выражения ВАХ к анализу работы ТУГП в случае наличия переменной составляющей в токе выявило свойство устройства к самоадаптации к режиму контура обмотки возбуждения. Способность к самоадаптации является преимуществом данного устройства по сравнению с прототипом, разработанным ранее и описанным в патенте [61].

Также, по результатам исследования работы ТУГП в случае переменного тока предложена модификация, позволяющая реализовать элемент с симметричной синтезируемой ВАХ. Симметричное ТУГП можно использовать для пуска синхронных двигателей и включения синхронных генераторов в сеть без возбуждения методом самосинхронизации или работе на асинхронном ходу.

11. Дальнейшие исследования алгоритма переключения гасящих цепей привели к алгоритму, позволяющему при N шт. гасящих резисторов получить 2^{N-1} гасящих ступеней, что намного больше чем для первоначально исследуемого устройства. Однако, реализации такого алгоритма препятствуют некоторые технические трудности, которые могут быть устранены при продолжении работы по данной теме.

12. В процессе исследований, описанных в главе 2, подготовлен материал для разработки методики выбора параметров тиристорного устройства гашения поля и его элементов.

85

3. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТИРИСТОРНОГО УСТРОЙСТВА ГАШЕНИЯ ПОЛЯ В НЕКОТОРЫХ РЕЖИМАХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА

3.1 Режим внезапного трехфазного короткого замыкания

3.1.1 Параметры режима и подходы к его расчету

Согласно ГОСТ [4, 5] устройство гашения поля должно работать во всех режимах генератора, при всех возможных токах обмотки возбуждения. Наибольшими значениями тока в цепи обмотки возбуждения характеризуется режим внезапного трехфазного короткого замыкания. В работах [2, 70] рассмотрены электромагнитные процессы в цепи обмотки возбуждения для случая линейного сопротивления контура. Но, нигде не рассматривается случай когда сопротивление контура возбуждения изменяется ступенчато, что соответствует работе ТУГП. Целью исследования является изучение режимов и работы тиристорного устройства гашения поля, подключенного к обмотке возбуждения генератора при внезапном трехфазном коротком замыкании в цепи статора.

Возникновение внезапного трехфазного короткого замыкания на выводах статора генератора приводит к появлению в статорных обмотках сверхтоков, имеющих две составляющие: периодическую и апериодическую [83]. Эти составляющие тока к.з. создают свои магнитные потоки, которые сцепляются с обмоткой возбуждения И демпфирующими контурами В роторе [23]. Периодическая составляюшая тока статора дополнительную создает апериодическую составляющую тока обмотки возбуждения, апериодическая составляющая тока к.з. создает переменную составляющую тока в обмотке возбуждения и демпфирующих контурах [23, 70, 82, 84]. Таким образом, процесс гашения поля при внезапном коротком замыкании в цепи статора качественно отличается от аналогичных процессов при холостом ходе генератора, когда влияние токов статорных обмоток не учитывается.

Ток обмотки возбуждения при возникновении короткого замыкания представляется в виде суммы составляющих [82]:

$$i_f(t) = I_{f0} + i_f'(t) + i_f''(t) + i_{f\Pi}(t).$$
(3.1.1)

 $I_{f0}+i_{f}'(t)+i_{f}''(t)$ – свободная, переходная и сверхпереходная составляющие тока обмотки возбуждения. При отсутствии демпфирующих контуров сверхпереходная составляющая тока $i_{f}''(t)$ отсутствует [70]. Свободная составляющая I_{f0} равна току предшествующего режима. Дополнительная периодическая составляющая $i_{f\Pi}(t)$ создается апериодической составляющей токов короткого замыкания в статорной обмотке. Переходная составляющая $i_{f}'(t)$ в выражении 3.1.1 учитывает действие как демпфирующих контуров, так и периодической составляющей токов статорных обмоток.

Из выражения 3.1.1 очевидно, что при внезапном трехфазном к.з. величина $i_f(0)$ значительно превышает ток обмотки предшествующего режима I_{f0} . Этот факт показан в публикациях [23, 24, 82] и стандарте ANSI/IEEE C37.18 [85]. Данные, приведенные в указанных выше источниках, указывают, что эта величина может достигать $4I_{fHOM}$ и более, в зависимости от характеристик генератора. Это ведет к тому, что ВАХ тиристорного устройства гашения поля должна быть расширена до токов, превышающих ток двойной форсировки.

Расчет тока закороченной обмотки возбуждения при внезапном коротком замыкании в цепи статора на основе каталожных данных генератора (основные, переходные и сверхпереходные индуктивные сопротивления и постоянные времени по *dq*-осям) рассмотрен в работах [70, 82, 84]. При этом в работе [32] отмечено, что методы расчета переменной составляющей тока обмотки возбуждения по схеме замещения в *dq*-осях могут давать погрешность до +200%. Метод расчета, описанный в [32], подразумевает наличие данных об конструктивных особенностях генератора, которые, как правило, неизвестны для генераторов, длительно находящихся в эксплуатации. По крайней мере, для трех генераторов 12 и 25 МВт, для которых, при непосредственном участии автора были разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию системы возбуждения, таких

данных заказчиком предоставлено не было. Завышение величины расчетной кратности тока обмотки возбуждения *К*_C повышает конечную надежность устройства гашения поля, но и ведет к завышению стоимости оборудования.

К определению и применению величины предельной кратности тока обмотки возбуждения *К*_{*C*} предложено три подхода:

а) Максимально упрощенный. Кратность тока определяется из таблицы 5, приведенной в стандарте ANSI/IEEE C31.18 [85]. При быстродействии защит и выключателя возбуждения менее 100 мс, для которого приведены усредненные данные в указанном выше стандарте, требуется пересчет K_C в сторону увеличения. Достоинство подхода – минимальный объем расчетов и исходных данных. Недостаток – избыточный запас по току элементов ТУГП. Также, проведенные расчеты на основе каталожных данных [86] показывают, что для некоторых турбогенераторов кратность тока K_C может быть выше указанной в стандарте [85] на 15-20%.

б) Упрощенный. Амплитуда тока $K_{C}I_{HOM}$ рассчитывается по приведенной ниже методике на основе каталожных данных для замкнутой накоротко обмотки возбуждения. Полученное для значение принимается однозначно цепи короткозамыкателя и гасящих цепей ТУГП. Снижение тока за время срабатывания защит и отключения выключателя не учитывается. Достоинство подхода – более точные предельные данные при относительной простоте расчетов. Недостаток завышенный запас по параметрам элементов ТУГП. Как и в первом, так и во втором случае, из-за запаса по току, работа гасящих цепей начнется при напряжении меньше чем заданное значение $K_{\Pi}U_{fHOM}$, что приводит к некоторому увеличению времени гашения поля.

в) Точный. Процесс от момента возникновения трехфазного к.з. до завершения гашения поля разбивается на серию интервалов: 1) от момента возникновения к.з. до момента начала отключения выключателя цепей возбуждения (ток протекает через возбудитель); 2) от момента начала отключения выключателя до отключения короткозамыкателя (ток протекает через короткозамыкатель); 3) работа гасящих цепей; 4) включение R_{CC} и завершение гашения поля. На каждом интервале

88

производится расчет режима по приведенной ниже методике. Достоинства – большая точность в параметров режима, устранение избыточности в конструкции ТУГП. Недостаток – трудоемкость.

Общий подход в расчете зависимости тока обмотки возбуждения от времени при внезапном коротком замыкании основан на принципе наложения [70] и заключается в рассмотрении каждой составляющей $i_f(t)$ по отдельности, что отражено в 3.1.1. В общем виде ток обмотки возбуждения состоит из трех экспонент и затухающей периодической составляющей [70]:

$$i_{f}^{*}(t) = I_{f0}^{*} e^{\frac{-t}{T_{f}'}} + I_{f0}^{*} e^{\frac{-t}{T_{d}'}} + I_{f0}^{*} e^{\frac{-t}{T_{d}''}} - \left(I_{f0}^{*} + I_{f0}^{*}\right) e^{\frac{-t}{T_{a}}} \cos(\omega t).$$
(3.1.2)

По выражению 3.1.2 можно найти ток обмотки возбуждения в любой момент времени если сопротивление контура не изменяется, т.е. на одном интервале работы устройства. Токи в выражении (3.1.2) приведены в относительных величинах. Для определения тока обмотки возбуждения в именованных единицах, значение умножается на базисный ток *I*_{*f*Б}, определяемое исходя из тока возбуждения холостого хода генератора:

$$I_{fb} = I_{fx.x.} x_{ad}. (3.1.3)$$

3.1.2 Методика расчета режима ТУГП при внезапном трехфазном коротком замыкании

1. Определение предельной кратности тока обмотки возбуждения

Результаты расчета по данному пункту могут быть использованы для выбора коммутационной аппаратуры и токоведущих частей контура возбуждения. Также величина предельной кратности K_C используется в упрощенных подходах к выбору элементов ТУГП. Расчет ведется для начального момента времени *t*=0, но по полученному выражению может быть рассчитан ток для любого момента времени

при условии что схема контура обмотки возбуждения не изменяется, например, для момента времени начала отключения выключателя. В качестве предшествующего короткому замыканию режима взята двойная форсировка на холостом ходу, так как в этом режиме наибольшее значение ЭДС генератора и ожидаются набольшие токи обмоток.

Рассчитывается начальные значения переходной составляющей тока обмотки возбуждения находится для момента времени *t*=0 из выражения:

$$I_{f0}^{*} = U_{q0} \frac{x_d - x_d'}{x_{ad} x_d} \frac{T_{d0}}{T_d'} \frac{T_d' - T_{1d\sigma}}{T_d' - T_d''}, \qquad (3.1.4)$$

и сверхпереходной составляющей:

$$I_{f0}^{*} = U_{q0} \frac{x_d - x_d'}{x_{ad} x_d} \frac{T_{d0}}{T_d'} \frac{T_d' - T_{1d\sigma}}{T_d' - T_d''}.$$
(3.1.5)

Свободная составляющая тока обмотки возбуждения (ток предшествующего режима):

$$I_{f0}^* = \frac{2I_{fHOM}}{I_{fb}}.$$
 (3.1.6)

Для определения составляющих (3.1.4) и (3.1.5), согласно методике, изложенной в [87] производится расчет ряд дополнительных величин и параметров режима. Напряжение U_{q0} , зависящее от напряжения статора в предшествующем режиме U_0 и угла нагрузки δ_0 :

$$U_{q0} = U_0 \cos \delta_0. \tag{3.1.7}$$

В номинальном режиме напряжение на выводах статорных обмоток равно номинальному значению $U_{\Gamma}=U_{\Gamma HOM}$. Поэтому по отношению к номинальному значению в номинальном режиме:

$$U_0 = \frac{U_{\Gamma}}{U_{\Gamma \text{HOM}}} = 1. \tag{3.1.8}$$

Угол нагрузки δ_0 , угол между векторами U_0 и E_{q0} , зависит от активной мощности генератора:

$$\delta_0 = \arcsin\left[\frac{P_0}{E_{q0}U_0}x_d\right].$$
(3.1.9)

Э.Д.С. генератора в предшествующем режиме определяется как:

$$E_{q0} = \sqrt{(U_0 \cos\varphi_{\text{HOM}})^2 + (U_0 \sin\varphi_{\text{HOM}} + I_0 x_d)^2}.$$
 (3.1.10)

Где ϕ_{HOM} – угол сдвига фаз между током и напряжением статорных обмоток в номинальном режиме. Так как в номинальном режиме $I_{\Gamma}=I_{\Gamma\text{HOM}}$, то $I_0=I_{\Gamma}/I_{\Gamma\text{HOM}}=1$ о.е.. Активная мощность в номинальном режиме в относительных единицах определяется по отношению к базисной $S_{\text{Б}}=S_{\Gamma\text{HOM}}$:

$$P_0 = \frac{P_{\Gamma \text{HOM}}}{S_{\text{B}}}.$$
(3.1.11)

В режиме форсировки на холостом ходу активная мощность $P_{0\phi}=0$, а напряжение $U_{\Gamma\Phi}$ не превышает 1,4 $U_{\Gamma HOM}$ из-за насыщения магнитной системы [4, 5]. Поэтому:

$$U_{q0\Phi} = U_{0\Phi} \cos \delta_{0\Phi} = 1, 4 \cdot 1 = 1. \tag{3.1.12}$$

Без учета насыщения магнитной системы принимается $U_{q0\Phi}=2$.

Реактивности определяются по известным соотношениям для синхронных машин [23, 70]. Сопротивление продольной реакции (о.е.):

$$x_{ad} = x_d - x_{\sigma}.$$
 (3.1.13)

Из каталога: x_d – синхронное продольное сопротивление, о.е., x_{σ} – сопротивление рассеяния статора, о.е.. При коротком замыкании индуктивные сопротивления генератора изменяются. В частности, сопротивление реакции уменьшается:

$$x_{ad}' = \frac{x_{ad} x_{\sigma}}{x_d}.$$
(3.1.14)

Сопротивление рассеяния обмотки возбуждения:

$$x_{f\sigma} = \frac{x_{ad} (x_{ad}' - x_{\sigma})}{x_{ad} - x_{d}' + x_{\sigma}}.$$
 (3.1.15)

Реактивное сопротивление обмотки возбуждения в режиме холостого хода:

$$x_f = x_{ad} + x_{f\sigma}.$$
 (3.1.16)

Тоже сопротивление в режиме внезапного трехфазного короткого замыкания:

$$x_f' = x_{ad}' + x_{f\sigma}.$$
 (3.1.17)

Сопротивление рассеяния демпфирующих контуров:

$$x_{1d\sigma} = \left[\frac{1}{x_d'' - x_\sigma} - \frac{1}{x_{ad}} - \frac{1}{x_{f\sigma}}\right]^{-1}.$$
 (3.1.18)

Сопротивление демпфирующих контуров в режиме холостого хода:

$$x_{1d} = x_{ad} + x_{1d\sigma}.$$
 (3.1.19)

Тоже сопротивление при трехфазном к.з.:

$$x_{1d}' = x_{ad}' + x_{1d\sigma} \tag{3.1.20}$$

Коэффициент рассеяния между обмоткой возбуждения и демпфирующими контурами в режиме к.з.:

$$\sigma_{fkd}' = 1 - \frac{(x_{ad}')^2}{x_f' x_{1d}'}.$$
(3.1.21)

Тот же коэффициент на холостом ходу:

$$\sigma_{fkd} = 1 - \frac{(x_{ad})^2}{x_f x_{1d}}$$
(3.1.22)

Постоянная времени обмотки возбуждения на холостом ходу (для турбогенераторов) [82]:

$$T_f = T_{d0} \approx \frac{3}{4} T_{d0}'.$$
 (3.1.23)

В режиме трехфазного к.з. постоянная обмотки возбуждения времени меньше:

$$T_f' = T_{d0} \frac{x_f'}{x_f}.$$
 (3.1.24)

Аналогично уменьшается постоянная времени демпфирующих контуров. В режиме холостого хода для турбогенераторов [84]:

$$T_{1d} \approx \frac{1}{4} T_{d0}',$$
 (3.1.25)

а в режиме трехфазного к.з.:

$$T_{1d}' = T_{1d} \frac{x_{1d}'}{x_{1d}}, \qquad (3.1.26)$$

Сверхпереходная постоянная времени в режиме к.з.:

$$T_{d}'' = \frac{2}{1+q'} \frac{\sigma_{fkd}' T_{f}' T_{1d}'}{T_{f}' + T_{1d}'}.$$
(3.1.27)

Переходная постоянная времени в режиме к.з.:

$$T_{d}' = \frac{1+q'}{2} \left(T_{f}' + T_{1d}' \right). \tag{3.1.28}$$

Коэффициент q':

$$q' = \sqrt{1 - \frac{4\sigma_{fkd}' T_f' T_{1d}'}{(T_f' + T_{1d}')^2}}.$$
(3.1.29)

Постоянная времени индуктивностей рассеяния:

$$T_{1d\sigma} = T_{1d} \frac{x_{1d\sigma}}{x_{ad} + x_{1d\sigma}}.$$
 (3.1.30)

Результаты расчетов по выражениям 3.1.4–3.1.30 подставляются в 3.1.2 с учетом 3.1.3, и по выражению 3.1.2 вычисляется амплитуда и кратность тока обмотки возбуждения *K*_C.

Для упрощения расчетов интервалы времени, соответствующие временам действия защит, отключения выключателя И короткозамыкателя можно объединить в один, так как в течении этого времени обмотка возбуждения сопротивлением зашунтирована практически нулевым возбудителя или короткозамыкателя. После отключения короткозамыкателя ток переходит на гасящие ступени ТУГП. При определении кратности тока К_С для задания ВАХ следует учитывать то, что ток содержит переменную составляющую и величина тока, определенная для момента ожидаемого отключения короткозамыкателя может быть меньше амплитуды в следующий момент времени. Для упрощения допустимо брать для выбора ВАХ предельное значение *К*_C. Исходя из найденного значения *К*_C при известных числе ступеней *N* и коэффициенту пульсаций *К*_{PU} рассчитываются сопротивления гасящих ступеней И диапазоны токов, соответствующие этим ступеням.

2. Расчет режима гасящих цепей

Расчет режима гасящих цепей необходим для определения: суммарного времени гашения поля, длительностей работы каждой ступени, токов ступеней и обмотки возбуждения, тепловых интегралов этих токов. При определении предельной кратности тока обмотки возбуждения принималось что сопротивление контура возбуждения равно нулю. При включении *i*-й гасящей ступени в контур включается сопротивление R_{DEi} и постоянные времени изменяются. При к.з. на статоре и замкнутой накоротко обмотке возбуждения ее индуктивность находится из постоянной времени (3.1.24):

$$L_f' = T_f' R_f. (3.1.31)$$

Предполагая, что собственная индуктивность обмотки возбуждения не изменяется в процессе гашения поля, для *i*-й ступени гашения поля постоянная контура обмотки возбуждения (при параметрах режима, использованных ранее):

$$T_{fi}' = \frac{L_{f}'}{R_{DEi} + R_{f}} = T_{f}' \frac{K_{PU}^{i-1}}{\frac{K_{\Pi}}{K_{C}} + K_{PU}^{i-1}}.$$
(3.1.32)

Где T_f' – постоянная времени обмотки возбуждения, замкнутой накоротко. По значению постоянной времени обмотки возбуждения из выражения 3.1.32 рассчитываются остальные постоянные времени для всех ступеней. Также принято допущение что постоянная времени T_a остается неизменной.

Расчет режима на интервале работы одной ступени №*і* ведется по следующему алгоритму (вручную или с помощью программного обеспечения).

а) Рассчитать величины тока обмотки возбуждения и его составляющих (3.1.2) на момент завершения работы предыдущей ступени (короткозамыкателя). Из-за индуктивности рассеяния обмотки возбуждения величина тока мгновенно измениться не может и вступающая в работу ступень будет обтекаться тем же током, что и предыдущая, для момента времени коммутации.

б) По величине тока на момент переключения определить какая ступень вступит в работу.

в) Используя ранее определенные значения постоянных времени и начальных значений составляющих тока получить зависимость тока обмотки возбуждения от времени.

г) Решением уравнения $i_f(t) - I_{f0} K_{PU}{}^i = 0$ определить момент времени завершения работы текущей ступени. При решении уравнения численными методами следует учитывать, что из-за наличия переменной составляющей решений может быть несколько.

Для примера на рисунке 3.1.1 показана зависимость тока обмотки возбуждения турбогенератора T-12-2 при рассмотрении работы ступени №1 после отключения короткозамыкателя. По рисунку 3.1.1 видно, что условия отключения $i_f(t)=K_C I_{fHOM}K_{PU}=4,931$ о.е. (моменты t_2 , t_2 " и t_2 "") и включения (моменты t_2 ' и t_2 "") ступени №1 повторяются несколько раз. Из-за наличия переменной составляющей в токе обмотки возбуждения можно ожидать повторного включения предыдущей

ступени ТУГП. Аналогично расчет выполняется для остальных ступеней и, после завершения их работы, *R*_{CC}.



Рисунок 3.1.1 – Зависимость тока первой ступени ТУГП по результатам расчета (построено в MathCAD)

Пробный расчет режима ТУГП для турбогенератора Т-12-2 по его каталожным данным показал:

- предельная кратность K_C тока обмотки возбуждения составила 5,453, что значительно превышает ток двойной форсировки (K_C =2);

- максимальное значение тока достигается через 25 мс после возникновения трехфазного короткого замыкания;

- при принятом изначально числе ступеней N=10 шт. и максимальной (ключевой) точке BAX $2I_{fHOM}$ & $7U_{fHOM}$ число ступеней, при $K_{PU}=0,7$, должно быть увеличено до 13 шт.;

- к моменту отключения короткозамыкателя (130 мс) амплитудное значение тока уменьшается незначительно по сравнению с предельным значением;

- все время работы ТУГП из-за наличия переменной составляющей разбивается на 18 интервалов (без учета включения *R*_{CC});

общая длительность процесса гашения поля составила 0,795 с или 0,113*T*_{d0}'.
 Зависимости тока и напряжения обмотки возбуждения, полученные по результатам расчета приведены на рисунке 3.1.2.



Рисунок 3.1.2 – Зависимости тока и напряжения обмотки возбуждения при гашении поля с помощью ТУГП при трехфазном к.з. на выводах статора (в именованных единицах)

Расчет достаточно трудоемок. Поэтому предложена и опробована упрощенная методика расчета режима гасящих цепей. В известной работе по вопросам гашения поля [9] указано, что время гашения поля в режиме короткого замыкания уменьшается по сравнению с режимом холостого хода пропорционально x_d'/x_d . отношению Аналогично, пропорционально этому соотношению, уменьшаются постоянные времени генератора. Так как устройство поддерживает стабильным напряжение на обмотке возбуждения (2.3.6), то для расчета зависимости тока и времени гашения поля можно попытаться воспользоваться выражениями 2.4.4 и 2.4.5. Кратность K_C определена исходя из амплитуды тока обмотки возбуждения после отключения короткозамыкателя. Постоянная времени принимается равной T_d . Результаты пробного расчета для турбогенератора T-12-2 приведены на рисунке 3.1.3. Полное время гашения поля: по точной методике – 0,795 с, по упрощенной – 0,57 с (отклонение -28,3%). Интеграл тока на интервале работы гасящих цепей: по точной методике – 236 A²·c, по упрощенной – 282 A²·c (отклонение +19,5%). Так как силовые элементы гасящих цепей выбираются исходя, в том числе, и из теплового действия тока, то некоторое его завышение сказывается положительно на надежности устройства и применение упрощенной методики расчета режима допустимо с этой точки зрения.



Рисунок 3.1.3 – Зависимости тока обмотки возбуждения при гашении поля с помощью ТУГП при трехфазном к.з. на выводах статора, рассчитанные по точной и упрощенной методикам (в относительных единицах)

3.2 Учет некоторых особенностей конструкции синхронного генератора

3.2.1 Учет насыщения магнитной системы

Реальный синхронный генератор представляет собой вращающуюся электрическую машину с ферромагнитным магнитопроводом. В связи с этим индуктивность обмотки возбуждения L_f не будет являться постоянной величиной, как это было принято на предыдущих этапах анализа работы ТУГП.

Электромагнитные процессы в контуре, состоящем из индуктивности, сопротивления обмотки возбуждения и гасящего резистора, в соответствии с II-м законом Кирхгофа описываются выражением, которое отличается от (2.2.4) заменой способа расчета падения напряжения на индуктивности [9]:

$$\frac{d\Psi}{dt} + R_{DE}i_f(t) + R_fi_f(t) = 0.$$
 (3.2.1)

В выражении 2.2.4 падение напряжения на индуктивности определяется через произведение постоянной индуктивности на скорость измерения тока обмотки возбуждения, в выражении 3.2.1 – через скорость изменения потокосцепления $\Psi = L_f I_f$. В работе [9] эта величина названа магнитным потоком, что справедливо только при одном витке в обмотке обмотки возбуждения. Зависимость потокосцепления Ψ и магнитного потока Φ синхронной машины от тока возбуждения нелинейная [23]. Пример такой зависимости приведен в работе, исследующей процессы гашения поля генераторов [9] и представлен на рисунке 3.2.1. Взаимосвязь магнитного потока Φ и тока возбуждения называется кривой намагничивания.



Рисунок 3.2.1 – Пример кривой намагничивания и зависимости динамической индуктивности от тока возбуждения [9]

Для упрощения расчетов длительности работы гасящих ступеней (выражения 2.4.1–2.4.3) нелинейная кривая намагничивания представляется ступенчатой кривой [9, 25, 88], состоящей из двух отрезков (рисунок 3.2.1) – 0-*а* и *а-b*. При таком представлении магнитных свойств генератора процесс гашения поля анализируется при двух значениях динамической индуктивности обмотки возбуждения:

$$0 < i_{f} \leq I_{K} : L_{\alpha} = \frac{d\Psi}{dt} = \operatorname{tga},$$

$$I_{K} < i_{f} \leq 2I_{fHOM} : L_{\beta} = \frac{d\Psi}{dt} = \operatorname{tg}\beta.$$
(3.2.2)

Так как за интервал работы каждой ступени ток обмотки возбуждения снижается в K_{PU} раз, то часть ступеней будет работать при величине динамической индуктивности L_{β} , а оставшаяся – при L_{α} . Если величина тока I_K , соответствующего точке *а* кривой намагничивания (рисунок 3.2.1) попадает на интервал работы *i*-й ступени, то работа этой ступени рассматривается отдельно для двух интервалов: $I_{f0i} > i_f(t) \ge I_K$ и $I_K > i_f(t) \ge I_{f0i+1}$.

Очевидно, что уменьшение индуктивности обмотки возбуждения за счет насыщения ведет к снижению постоянных времени и уменьшению времени работы первых ступеней ТУГП. При большем числе отрезков зависимости $L(i_f)$ повышается точность, но возрастает трудоемкость расчетов. Применение гладкой аналитической кривой $L(i_f)$ приводит к необходимости решения системы нелинейных дифференциальных уравнений с переменными во времени параметрами что неудобно в инженерных расчетах.

С практической точки зрения зависимость индуктивности обмотки возбуждения (и связанных с ней единым магнитным потоком индуктивностей) от тока можно представить следующими способами:

- гладкая, аналитическая, в виде полинома *n*-го порядка. Пример получения такой зависимости из характеристики холостого хода приведен в статье [89].

- расчетно-экспериментальная, ступенчатая, показывает относительное изменение постоянной времени обмотки возбуждения при различных значениях тока. Зависимость получается из анализа результатов опыта гашения поля по методике, приведенной в ГОСТ 10169-77 [90].

Первый способ непосредственно устанавливает зависимость индуктивности от тока, второй же определяет эту зависимость косвенно через изменение постоянной времени:

$$L(I_f) = L_0 \frac{T_{d,I_f}}{T_{d0}}.$$
 (3.2.3)

Вопросы экспериментального определения параметров синхронного генератора рассматриваются далее.

3.2.2 Учет действия демпфирующих контуров

Большинство синхронных генераторов имеют в своем составе либо массивный ротор, либо ротор с успокоительной обмоткой. И в первом, и во втором случае существует минимум один короткозамкнутый контур, магнитносвязанный с обмоткой возбуждения, и находящийся с ней на одной оси *d* [91]. Любое изменение магнитного потока синхронной машины по продольной оси приводит к индуцированию токов в короткозамкнутых контурах ротора. Действие этих токов по правилу Ленца направлено на ослабление изменения магнитного потока, вызвавшего появление этих токов. В работах [9, 23–25, 34, 91, 92] показано негативное демпфирующее действие короткозамкнутых контуров на процесс гашения поля: наличие демпфирующих контуров затягивает процесс ослабления магнитного поля в синхронной машине.

Ротор гидрогенератора имеет ограниченное количество демпфирующих контуров, поддающихся расчету. Для турбогенератора, из-за наличия пазов и разной глубины проникновения тока в паз, количество контуров стремится к бесконечности [91]. Поэтому, для учета действия демпфирующих контуров на процесс гашения поля множество единичных контуров заменяется 1-4 шт. эквивалентными [23, 24, 70, 91]. Схема замещения обмотки возбуждения на роторе турбогенератора генератора для оси d, приведена на рисунке 3.2.2 [23]. Так как на холостом ходу синхронной машины по оси q магнитный поток практически отсутствует, то действие демпфирующих контуров по этой оси не учитывается [24].



Рисунок 3.2.2 – Схема замещения обмотки возбуждения турбогенератора на холостом ходу

В схеме (рисунок 3.2.2) создаются два магнитносвязанных контура: обмотки возбуждения « $r_f - L_{\sigma f} - L_{ad}$ » и эквивалентного демпфирующего контура « $r_{yd} - L_{\sigma yd} - L_{ad}$ ». Электромагнитные процессы в этих контурах при замыкании обмотки возбуждения накоротко, описываются системой уравнений [23]:

$$\begin{cases} r_{f}i_{f}(t) + L_{f}\frac{di_{f}(t)}{dt} + L_{ad}\frac{di_{yd}(t)}{dt} = 0\\ r_{yd}i_{yd}(t) + L_{yd}\frac{di_{yd}(t)}{dt} + L_{ad}\frac{di_{f}(t)}{dt} = 0 \end{cases}$$
(3.2.4)

Решение системы уравнений 3.2.4 дает выражения для двух взаимосвязанных токов [23]:

$$\begin{cases} i_{f}(t) = I_{f1}e^{\frac{-t}{T_{a0}'}} + I_{f2}e^{\frac{-t}{T_{a0}''}} \\ i_{yd}(t) = I_{y1}e^{\frac{-t}{T_{a0}'}} + I_{y2}e^{\frac{-t}{T_{a0}''}} \end{cases}$$
(3.2.5)

Переходная постоянная времени для режима холостого хода T_{d0} ' обычно присутствует в каталоге на генератор [84]. Сверхпереходная постоянная времени T_{d0} '', находятся по каталожным данным генератора:

$$T_{d0}" = T_{d}"\frac{x_{d}'}{x_{d}"}.$$
(3.2.6)

Сумма составляющих тока в цепи обмотки при t=0 равна начальному току процесса гашения поля I_{f0} , а сумма составляющих тока демпфирующего контура для начала процесса гашения поля равна нулю:

$$\begin{cases} I_{f1} + I_{f2} = I_{f0} \\ I_{y1} + I_{y2} = 0 \end{cases}$$
(3.2.7)

Начальные составляющие токов в 3.2.5 находятся из выражений [23]:

$$I_{f1} = \frac{T_{d0}}{T_{d0} + T_{yd0}} I_{f0}, \qquad (3.2.8)$$

$$I_{f2} = \frac{T_{yd0}}{T_{d0} + T_{yd0}} I_{f0}, \qquad (3.2.9)$$

$$I_{y1} = -I_{y2} = \frac{T_{yd0}}{T_{d0} + T_{yd0}} I_{f0}.$$
 (3.2.10)

Постоянные времени в формулах 3.2.8–3.2.10 для турбогенераторов имеют вполне определенные соотношения [91]:

- постоянная времени генератора по продольной оси *T*_{d0} соответствует постоянной времени обмотки возбуждения:

$$T_{d0} = T_{f0} = T_{d0}' - T_{yd0} \approx \frac{3}{4} T_{d0}'; \qquad (3.2.11)$$

- постоянная времени демпфирующего контура по продольной оси на холостом ходу генератора из выражения 3.2.11:

$$T_{yd0} = T_{d0} - T_{d0}' \approx \frac{1}{4} T_{d0}'$$
(3.2.12)

Наилучший способ получения значений постоянных времени – использование данных из паспорта и заводских испытаний генератора. Более точный расчет, но и более трудоемкий, чем по выражениям 3.2.11 и 3.2.12, требующий большого количества исходных данных, приведен в [23, 24, 91]. Упрощенное соотношение 3.2.11 между T_{yd0} и T_{d0} ' для турбогенераторов приведено и обосновано в [91] и [93].

Для явнополюсных синхронных машин таким соотношение пользоваться нельзя и требуется получение реальных значений постоянных времени. Исходя из соотношения постоянных времени (3.2.11, 3.2.12) на основе 3.2.5 получены выражения токов контуров для турбогенераторов при замыкании обмотки возбуждения накоротко:

$$\begin{cases} i_{f}(t) = I_{f0} \left[\frac{3}{4} e^{\frac{-t}{T_{d0}'}} + \frac{1}{4} e^{\frac{-t}{T_{d0}''}} \right] \\ i_{yd}(t) = \frac{I_{f0}}{4} \left[e^{\frac{-t}{T_{d0}'}} + e^{\frac{-t}{T_{d0}''}} \right] \end{cases}$$
(3.2.13)

Выражения 3.2.13 записаны для тока обмотки возбуждения, приведенного к обмотке статора. Выражение для тока обмотки возбуждения без изменений может применено при именованных единицах тока ротора ($i_{f0}=I_{f0}$) так как в первом выражении из 3.2.13 нет параметров, напрямую зависящих от числа витков обмоток и их конструкции, а также действия токов обмоток статора. Совместное применение обоих выражений из 3.2.13 в именованных единицах без учета соотношения витков и витковых коэффициентов недопустимо.

Установлено, что если в цепь обмотки возбуждения включается гасящее сопротивление, то ее постоянная времени изменяется в зависимости от коэффициента *K*_{DEi}:

$$T_{di} = \frac{L_f}{R_f + R_{DEi}} = \frac{T_{d0}}{1 + K_{DEi}} = \frac{3T_{d0}'}{4(1 + K_{DEi})}$$
(3.2.14)

Коэффициент гашения *K*_{DEi} зависит от величины сопротивления, включенного в цепь обмотки возбуждения:

$$K_{DEi} = \frac{R_{DEi}}{R_f} = \frac{K_{\Pi}}{K_C} \frac{1}{K_{PU}^{i-1}},$$
(3.2.15)

Для большинства турбогенераторов *К*_П=7 и *К*_{*C*}=2 (для режима форсировки). С учетом 3.2.11 и 3.2.12 переходная постоянная времени контура обмотки возбуждения:

$$T_{di}' = T_{di} + T_{yd0} = \frac{T_{d0}'}{4} \frac{4 + K_{DEi}}{1 + K_{DEi}} = \frac{T_{d0}'}{4} \frac{4K_C K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi}}{K_C K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi}},$$
(3.2.16)

а сверхпереходная постоянная времени [23]:

$$T_{di}'' = \frac{\sigma_{fyd} T_{di} T_{yd0}}{T_{di} + T_{yd0}}.$$
 (3.2.17)

Где σ_{fyd} – коэффициент рассеяния между обмоткой возбуждения и демпфирующими контурами, согласно [23], зависящий только от соотношения индуктивностей синхронной машины. Коэффициент определен из соотношения постоянных времени (3.2.11 и 3.2.12) и принят постоянным при разных кратностях гашения поля:

$$\sigma_{fyd} = \frac{T_{d0}"(T_{d0} + T_{yd0})}{T_{d0}T_{yd0}} = \frac{T_{d0}"T_{d0}'}{3T_{d0}"^2/16} = \frac{16T_{d0}"}{3T_{d0}'}.$$
(3.2.18)

Доля переходной составляющей тока обмотки возбуждения из 3.2.8 с учетом соотношения постоянных времени:

$$I_{f1i} = I_{f0i} \frac{4 + K_{DEi}}{5 + 2K_{DEi}} = I_{f0i} \frac{4K_C K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi}}{5K_C K_{PU}^{i-1} + 2K_{\Pi}}$$
(3.2.19)

Сверхпереходная постоянная времени при *R*_{DE}>0 из выражения 3.2.17 с подстановкой 3.2.14 и 3.2.18 для *i*-й ступени гашения ТУГП:

$$T_{di}" = \frac{4T_{d0}"}{4 + K_{DEi}} = \frac{4T_{d0}"K_C K_{PU}^{i-1}}{4K_C K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi}}$$
(3.2.20)

Доля сверхпереходной составляющей тока обмотки возбуждения из 3.2.9:

$$I_{f2i} = I_{f0i} \frac{1 + K_{DEi}}{5 + 2K_{DEi}} = I_{f0i} \frac{K_C K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi}}{5K_C K_{PU}^{i-1} + 2K_{\Pi}}$$
(3.2.21)

Первоначальное выражение 3.2.5 для тока обмотки возбуждения при $R_{DE}>0$, учитывающее соотношения постоянных времени и их изменения при введении сопротивления ТУГП в цепь обмотки ротора:

$$i_{fi}(t) = I_{f0i} \left[\frac{4 + K_{DEi}}{5 + 2K_{DEi}} e^{\frac{-4t(1 + K_{DEi})}{T_{d0}'(4 + K_{DE})}} + \frac{1 + K_{DEi}}{5 + 2K_{DEi}} e^{\frac{-t(4 + K_{DEi})}{4T_{d0}''}} \right],$$
(3.2.22)

или, выраженное через коэффициент пульсаций *К*_{PU}:

$$i_{fi}(t) = I_{f0i} \begin{bmatrix} \frac{4K_C K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi}}{5K_C K_{PU}^{i-1} + 2K_{\Pi}} e^{\frac{-4t(K_C K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi})}{T_{d_0}'(4K_C K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi})}} + \\ + \frac{K_C K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi}}{5K_C K_{PU}^{i-1} + 2K_{\Pi}} e^{\frac{-t(4K_C K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi})}{4T_{d_0}'' K_C K_{PU}^{i-1}}} \end{bmatrix}$$
(3.2.23)

Выражения 3.2.22 и 3.2.23 не позволяют явно выразить время работы ступеней ТУГП и гашения поля методами интегрирования и преобразования. Для упрощения определения времени гашения поля в некоторых источниках [9, 70, 87] исключают действие потоков рассеяния, принимая что процесс идет с постоянной времени $T_{di}+T_{vd}$:

$$i_{fi}(t) = I_{f0i} \frac{4 + K_{DE}}{5 + 2K_{DE}} e^{\frac{-4(1 + K_{DE})t}{T_{d0}'(4 + K_{DE})}}.$$
(3.2.24)



Рисунок 3.2.3 – Зависимости тока обмотки возбуждения, построенные по

выражениям 3.2.22 и 3.2.24

Для сравнения в пакете *MathCAD* по выражениям 3.2.22 и 3.2.24 построены зависимости тока обмотки возбуждения (рисунок 3.2.3) при гашении поля на постоянное сопротивление (R_{CC}), с начальным значением тока i_{f0} =1 о.е. при T_{d0} '=7,05 с, T_{d0} ''=0,188 с, K_C =2 и K_{DE} =7. Данные взяты для турбогенератора T-12-2 из справочника [86] и 3.2.6.

По зависимостям, представленным на рисунке 3.2.3, сделаны следующие выводы:

- упрощение 3.2.24 допустимо при расчете режима контура обмотки возбуждения для случая гашения поля на постоянное сопротивление R_{CC};

- после подключения к обмотке возбуждения резистора ее ток быстро снижается до значения, определяемого соотношением постоянных времени контуров – демпфирующего и обмотки возбуждения. Отсюда возникает особенность в работе ТУГП с реальным генератором: если выбран *К*_{PU}>0,6 (судя по рисунку 3.2.3), то время работы гасящих ступеней существенно сократится.

Соотношение постоянных времени T_{d0} ' и T_{d0} " для турбогенераторов, по усредненным данным, приведенным в [91], составляет 1:(0,013...0,03). Из-за этого, в первоначальный момент изменение тока обмотки возбуждения определяется ее индуктивностью рассеяния, так как его переходная составляющая изменяется в 30– 80 раз медленнее чем сверхпереходная. Поэтому, на интервале времени затухания сверхпереходной составляющей, величину переходной составляющей тока обмотки возбуждения допустимо принять постоянной. Так как при работе одной ступени ТУГП ток обмотки возбуждения снижается в K_{PU} -раз, то учет только сверхпереходной составляющей возможен при соблюдении условия (для турбогенераторов):

$$K_{PU} \ge K_{PU,MIN} = \frac{4 + K_{DE}}{5 + 2K_{DE}} = \frac{4K_C K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi}}{5K_C K_{PU}^{i-1} + 2K_{\Pi}}.$$
(3.2.25)

При несоблюдении условия 3.2.25 ток обмотки возбуждения за время работы ступени ТУГП снижается ниже начального значения переходной составляющей и требуется ее учитывать в расчете.

Минимальное значение K_{DE} будет при работе первой ступени, и с увеличением номера ступени этот коэффициент возрастает. В пределе $K_{DE} \rightarrow \infty$ величина правой части выражения (3.2.25) стремится к значению 0,5. Анализ взаимосвязи минимального значения $K_{PU, MIN}$ по выражению 3.2.25 и номера ступени ТУГП *i* при различных заложенных коэффициентах пульсаций K_{PU} и известных соотношениях постоянных времени, основанный на выражении 3.2.25, показывает, что для K_{PU} >0,625 работа гасящих цепей определяется только сверхпереходной составляющей тока обмотки возбуждения (постоянная – T_{di}), а при K_{PU} <0,5 – только переходной составляющей (выражение 3.2.24, постоянная – T_{di}). Для K_{PU} >0,625 получено выражение зависимости тока через ТУГП на *i*-й ступени:

$$i_{fi}(t) = \frac{I_{fHOM}K_C K_{PU}^{i-1}}{5K_C K_{PU}^{i-1} + 2K_{\Pi}} \begin{bmatrix} 4K_C K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi} + \\ + \left(K_C K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi}\right) e^{\frac{-t(4K_C K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi})}{4T_{d_0} "K_C K_{PU}^{i-1}}} \end{bmatrix}.$$
 (3.2.26)

Интегрированием выражения 3.2.26 найдено время работы каждой *i*-й ступени:

$$\Delta t_{i} = \frac{-4T_{d0} K_{C} K_{PU}^{i-1}}{4K_{C} K_{PU}^{i-1}} \ln \left[\frac{5K_{C} K_{PU}^{i} - 4K_{C} K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi} (2K_{PU} - 1)}{K_{C} K_{PU}^{i-1} + K_{\Pi}} \right].$$
(3.2.27)

Рассчитаны длительности работы каждой *i*-й ступени по выражению 3.2.23 (Δt_{i23}) и по выражению 3.2.26 (Δt_{i26}). Вычисления выполнены в среде *MathCAD* для процесса гашения поля с начальным значением тока $I_{f0}=2$ о.е. при $T'_{d0}=7,05$ с, $T''_{d0}=0,188$ с, $K_C=2$, $K_{\Pi}=7$ и $K_{PU}=0,7$. Результаты приведены в таблице 3.2.1. Данные взяты для турбогенератора T-12-2 из справочника [86] и 3.2.6. Для сравнения выполнен расчет длительностей работы ступеней без учета действия демпфирующих контуров Δt_{iCB} . Ступень №10 работала до момента снижения тока до 1/105 $I_{HOM}=0,0095$ о.е..

Результаты расчетов, приведенные в таблице 3.2.1, показывают, что использование упрощенного выражения 3.2.26 для определения времени работы ступени дает относительно небольшую погрешность, не превышающую при использованных данных 24%. Общее время снижения тока с 2*I*_{fHOM} до 1/105*I*_{fHOM} составило: при
<i>i</i> :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Δt_{i23} , MC	131,5	93,5	74,6	55,5	40,8	29,7	21,4	15,3	10,9	2667
Δt_{i26} , MC	161,4	115,8	83,7	60,4	43,4	31,1	22,1	15,7	11,1	2667
δ%	22,7	23,8	12,2	8,8	6,4	4,7	3,3	2,6	1,8	0
Δt_{iCB} , MC	419,1	314,3	231,6	168,3	121,1	86,4	61,3	43,4	30,6	1289

Таблица 3.2.1

Влияние величины коэффициента пульсаций *К*_{PU} на ход процесса снижения тока обмотки возбуждения с помощью ТУГП проиллюстрировано рисунком 3.2.4.



Рисунок 3.2.4 – Влияние величины коэффициента пульсаций на процесс гашения поля при учете действия демпфирующих контуров

При больших значениях K_{PU} наблюдается быстрое снижение тока на этапе работы ступеней №№1-9, а на завершающем этапе работы ступени №10 ток изменяется очень медленно. При малых значениях коэффициента пульсаций на интервале работы ступеней №№1-9 ток снижается наоборот медленно, а ступень №10 может вообще не отработать. Затягивание процесса снижения тока обмотки возбуждения при различных значениях K_{PU} происходит либо из-за того, что основная часть энергии рассеивается либо последней ступенью, либо первой. При изменении величины K_{PU} от 0,5 до 0,9 изменяются соотношения длительностей работы ступеней №№1-9 и №10. При K_{PU} =0,6 заметно (рисунок 3.2.4), что ток $i_f(t)$ изменяется по зависимости, наиболее близкой к линейной на всем интервале работы ТУГП, и с максимальной скоростью стремится к нулю, по сравнению с остальными зависимостями. Поэтому оптимальное значение K_{PU} стоит ожидать вблизи 0,6, что соответствует результатам, приведенным в п. 2.4.

Произведено сравнение работы тиристорного устройства при K_{PU} =0,675 и распространенного способа гашения поля на нелинейный резистор (без учета зажигания дуги в выключателе). Для способа с варистором использована методика расчета, приведенная в [70]. Для турбогенератора Т-12-2 при предшествующем режиме двойной форсировки (K_C =2, K_{Π} =7):

$$i_f(t) = -7 + 9e^{\frac{-t}{\tau_{\text{FAIII}}}}.$$
(3.2.28)

Постоянная времени тгаш для любого генератора [70]:

$$\tau_{\Gamma A I I I} = T_{1d0} + T_{f0} \frac{1}{K_{DE} + 1}$$
(2.2.29)

В случае ТУГП постоянная времени определятся исходя из средней величины напряжения на обмотке возбуждения в относительных единицах:

$$K_{DE} = K_{\Pi} \left[1 - \frac{K_{PU}}{2} \right].$$
(3.2.30)

Результаты расчета зависимости тока обмотки возбуждения турбогенератора T-12-2, произведенные в пакете Mathcad, приведены на рисунке 3.2.5. Расчет выполнен по выражениям 3.2.28-3.2.30 для варистора и методике, приведенной выше для ТУГП с 10 шт. ступеней.



Рисунок 3.2.5 – Зависимости тока обмотки возбуждения при гашении поля с помощью ТУГП и варистора при одинаковой кратности перенапряжений

По рисунку 3.2.5 видно, что за счет оперирования устройством только индуктивностями рассеяния ток стремительно снижается на интервале работы ступеней №№1..9. Время снижения тока в данном случае, от 2 до 0,059 о.е. (1/17 от исходного) составило 0,518 с. Для случая применения варистора в качестве гасящего элемента это время будет уже 0,657 с. Однако, время снижения тока с 2 до заданных 1/105 о.е. для ТУГП будет 3,808 с, против 0,675 с для варистора. Это обусловлено тем, что на последней 10-й ступени устройство уже не поддерживает среднее значение напряжения.

В п. 2.4 (таблица 2.4.1) проанализировано влияние величины коэффициента пульсаций на время гашения поля *t*_{DE} и найдены оптимальные значения *K*_{PU} для случая линейной индуктивности при разном числе гасящих ступеней. Аналогичный анализ произведен с учетом действия демпфирующих контуров

(таблица 3.2.2). По выражениям 3.2.28-3.2.30 при кратности перенапряжений $K_{\Pi}=7=K_{DE}$ время гашения составит 0,587 с для генератора Т-12-2. Таблица 3.2.2

Ν	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Оптимальные (минимальные) значения											
K _{PU}	-	0,167	0,305	0,411	0,475	0,485	0,49	0,487	0,513	0,552	
t_{DE}, c	16,36	11,13	9,126	7,551	6,12	4,79	3,53	2,297	1,29	0,932	
В соответствии с 3.2.31:											
K_{PU}	-	0,069	0,168	0,263	0,343	0,411	0,466	0,513	0,552	0,586	
t_{DE}, c	16,36	13,9	9,4	7,77	6,3	4,91	3,56	2,46	1,98	1,68	
$\Delta K_{PU},\%$	-	-58,7	-44,8	-36,0	-27,7	-15,4	-4,9	+5,2	+7,6	+6,1	
По таблице 2.4.1:											
K_{PU}	-	0,183	0,315	0,411	0,483	0,539	0,583	0,619	0,65	0,675	
t_{DE}, c	16,36	11,1	9,1	7,55	6,1	5,14	4,6	4,26	4,2	3,81	
$\Delta K_{PU},\%$	-	+9,6	+3,3	0	+1,6	+11,1	+19,0	+27,1	$+2\overline{6,7}$	+22,3	

На основе результатов, приведенных в таблице 3.2.2, сделано предположение что минимальное время гашения поля будет достигаться когда в диапазоне токов $(2...1/105)I_{fHOM}$ отработают все ступени снижая ток в K_{PU} -раз. Отсюда, при *N*-шт. ступеней ТУГП оптимальное значение K_{PU} :

$$K_{PUO\Pi T} = \sqrt[N]{\frac{I_{fK}}{K_{C}I_{fHOM}}}.$$
(3.2.31)

Результаты расчета времени гашения поля при *К*_{РUOПТ}, определенному по 3.2.31 также сведены в таблицу 3.2.2.

Сравнение полученных результатов расчета времени гашения поля (таблица 3.2.2) показывает, что значения K_{PU} , определенные и для линейной одиночной индуктивности (п. 2.4, таблица 2.4.1), и по выражению 3.2.31, из-за большой погрешности носят оценочный характер. С другой стороны до числа ступеней N=7 допустимо пользоваться таблицей 2.4.1, а при большем числе ступеней – выражением 3.2.31. Это справедливо для соотношения постоянных времени, характерных для турбогенераторов. Так же, по таблице 3.2.2 заметно снижение влияния индуктивности рассеяния обмотки возбуждения на длительность электромагнитных процессов при больших пульсациях напряжения, что косвенно

подтверждает упрощения, принятые в источниках [9, 70, 87] и выражении 3.2.24 для расчета случая гашения поля на постоянное сопротивление.

Исследования проведены для турбогенераторов, для гидрогенераторов коэффициент рассеяния σ_{fyd} меньше в два-три раза чем для турбогенераторов [23]. При этом постоянная времени эквивалентного демпфирующего контура T_{yd0} для явнополюсных машин также меньше в два-четыре раза. Отсюда следует, что вклад сверхпереходной составляющей тока обмотки возбуждения в общий ток будет в разы меньше и при определенных условиях действием демпфирующих контуров мощно пренебречь. Кроме этого, гидрогенераторов – изделие штучное, с индивидуальными параметрами, и к нему нельзя применять упрощения и допущения, как для серийных турбогенераторов. Поэтому, расчеты для процессов гашения поля гидрогенераторов должны проводиться по уточненным методикам. Но так как упрощенная методика расчета учитывает абсолютные значения постоянных времени машины, то ее допустимо использовать для любых типов синхронных электрических машин.

3.3 Исследование коммутационных процессов в тиристорном устройстве гашения поля и управление ими

Работа тиристорного устройства гашения поля основана на переключении числа включенных параллельно гасящих цепей (п. 2.1). В качестве основного элемента ключа гасящей цепи применяется однооперационный тиристор [64]. Для включения тиристора должно быть обеспечено формирование тока управляющего электрода. Отключение же однооперационного тиристора по управляющему электроду невозможно и тиристор отключается при снижении тока анода ниже тока удержания [39]. Структура и параметры элементов ТУГП должны обеспечивать выполнение данных требований.

3.3.1 Процесс отключения тиристора

Так как в ТУГП применены однооперационные тиристоры, то для их отключения требуется выполнение отдельной цепи принудительной коммутации. Подходы к анализу И расчету цепей принудительной коммутации однооперационных тиристоров рассмотрены в большом количестве публикаций, например [39, 94–96]. Для отключения тиристора и создания на нем отрицательного падения напряжения использовано известное техническое решение - подключение предварительно заряженного конденсатора [39, 96-98]. В схеме ТУГП коммутирующие конденсаторы подключены параллельно гасящим резисторам (п. 2.1, рисунок 2.1.1).

Предварительные исследования работы физической модели устройства, выполненного по схеме, приведенной на рисунке 2.1.1 и в патенте [64], показали некоторую неустойчивость коммутационных процессов. Поэтому были изменены цепи принудительной коммутации (устройства принудительной коммутации – УПК) с целью обеспечения надежного отключения тиристоров гасящих цепей. Измененная схема ТУГП приведена на рисунке 3.3.1 (показано только 2 шт. гасящих цепей). Основной принцип действия схемы устройства не изменился. По сравнению с исходной схемой ТУГП (рисунок 2.1.1):

- силовые тиристоры гасящих цепей VS1, VS2 и т.д. перенесены к шине «+» а гасящие резисторы R1, R2 и т.д. – к шине «–»;

- введены зарядные цепи коммутирующих конденсаторов C1, C2 и т.д. – резисторы R11, R12 и т.д., диоды VD11, VD21 и т.д.;

- введены разрядные тиристоры VS11, VS21 и т.д. коммутирующих конденсаторов C1, C2 и т.д.;

- объединены цепи управления короткозамыкателя A4 и разрядных тиристоров VS11, VS21 и т.д..



Рисунок 3.3.1 – Измененная схема ТУГП (для двух гасящих цепей)

Анализ электромагнитных процессов отключения тиристоров гасящих цепей производен в соответствии с упрощенной схемой замещения, приведенной на рисунке 3.3.2.



Рисунок 3.3.2 – Упрощенная схема замещения ТУГП

Схема на рисунке 3.3.2 получена для ТУГП с одной гасящей ступенью. Работа остальных ступеней и гасящих цепей на данном этапе анализа не учитывается.

Принято, что выключатель цепей возбуждения Q1 (рисунок 2.1.1) отключен и идет процесс гашения поля: ключ короткозамыкателя K1 отключен, ключ K2 цепи УПК (тиристор VS11 на рисунке 3.3.1) – отключен, ток обмотки возбуждения $i_f(t)$ протекает через гасящую цепь VS1-R1. В начальный момент работы ступени гашения ток обмотки возбуждения равен I_{f0} . Принято, что падение напряжения на конденсаторе к моменту отключения тиристора VS1 практически равно напряжению на обмотке возбуждения $u_{C1}(t) \approx u_f(t)$.

В заданный момент времени происходит включение ключей К1 и К2. Ток обмотки возбуждения замыкается через цепь короткозамыкателя. Для этого момента времени, в соответствии со II-м законом Кирхгофа получены выражения, описывающие процессы в схеме (рисунок 3.3.2):

$$u_{f}(t) = \Delta u_{VD1} + \Delta u_{K1},$$

$$u_{VS1}(t) = \Delta u_{VD1} + \Delta u_{K1} + \Delta u_{K2} - u_{C1}(t).$$
(3.3.1)

Если пренебречь обратным током тиристора VS1, то напряжение на конденсаторе C1 будет изменяться в соответствии с выражением:

$$u_{C1}(t) = K_{\Pi} K_{PU} U_{fHOM} e^{\frac{-t}{R_1 C_1}}.$$
(3.3.2)

Отрицательное падение напряжения на тиристоре будет поддерживаться, пока выполняется условие, полученное из 3.3.1 и 3.3.2:

$$u_{VS1}(t) = \Delta u_{VD1} + \Delta u_{K1} + \Delta u_{K2} - K_{\Pi} K_{PU} U_{fHOM} e^{\frac{-t}{R_1 C_1}} < 0.$$
(3.3.3)

Из выражения 3.3.3 определена длительность интервала времени присутствия отрицательного падения напряжения на тиристоре при известных R_1 и C_1 :

$$t_{RV} = -R_1 C_1 \ln \left(\frac{\Delta u_{VD1} + \Delta u_{K1} + \Delta u_{K2}}{K_{\Pi} K_{PU} U_{fHOM}} \right).$$
(3.3.4)

Падения напряжения на диоде VD1, ключах K1 и K2 не являются постоянными величинами и зависят от значения тока через них. Прямое падение напряжения на диоде Δu_{VD1} и полупроводниковом приборе ключей Δu_{K1} , Δu_{K2} не превышает единиц

вольт [99, 100] и может быть рассчитано по известным методикам, например изложенной в [101]. Так как величина падений напряжения (единицы вольт) в десятки-сотни раз меньше амплитуды перенапряжений $K_{\Pi}U_{fHOM}$, то допустимо принять падения напряжения на элементах VD1, K1, K2 постоянными, соответствующими падениям напряжения при максимальном токе обмотки возбуждения. Например, падение напряжения на диоде VD1 определяется из его BAX $\Delta u_{VD1}(i) = \Delta U_{VD1}(K_C I_{fHOM})$ [99]. Такое допущение приводит к незначительному уменьшению времени t_{RV} в соответствии с выражением 3.3.4. Грубая оценка изменения величины *t_{RV}* в случае турбогенератора Т-12-2 с $U_{\text{fHOM}}=230 \text{ B}$, при $K_{\Pi}=7$, $K_{PU}=0,7$ дает уменьшение времени разрядки конденсатора С1 всего на 3,3%. Точный расчет времени разрядки конденсатора t_{RV} может быть произведен численными методами интегрирования выражения 3.3.4 С подстановкой, как правило, нелинейных ВАХ элементов VD1, К1 и К2. Так как время поддержания отрицательного напряжения на тиристоре VS1 выбирается с запасом, то нет необходимости применения трудоемких расчетов. Далее величины падения напряжения на элементах VD1, K1 и K2 ($\Delta u_{VD1}(i), \Delta u_{K1}(i), \Delta u_{K2}(i)$) приняты постоянными (ΔU_{VD1} , ΔU_{K1} , ΔU_{K2}), равными максимально возможным исходя из предельной амплитуды тока обмотки возбуждения генератора.

Отрицательное падение напряжения должно непрерывно поддерживаться на интервалах времени отключения (t_g) и восстановления запирающих свойств (t_{rr}) . При заданной длительности интервала отрицательного напряжения $t_{RV} \ge t_g + t_{rr}$, определена необходимая емкость конденсатора C_1 :

$$C_{1} \geq \frac{t_{g} + t_{rr}}{-R_{1} \ln \left(\frac{\Delta u_{VD1} + \Delta u_{K1} + \Delta u_{K2}}{K_{\Pi} K_{PU} U_{fHOM}}\right)}.$$
(3.3.5)

Для *i*-й гасящей цепи емкость коммутирующего конденсатора рассчитывается аналогично:

$$C_{i} \geq \frac{t_{g} + t_{rr}}{-R_{i} \ln \left(\frac{\Delta u_{VD1} + \Delta u_{K1} + \Delta u_{K2}}{K_{\Pi} K_{PU} U_{fHOM}}\right)}.$$
(3.3.6)

С целью оценки технической реализуемости устройства произведен расчет величин емкостей коммутирующих конденсаторов ТУГП турбогенератора Т-12-2 при *К*_{PU}=0,7 и гашении поля из режима двойной форсировки. Получены значения емкостей конденсаторов в диапазоне 0,13–9,4 мкФ. Конденсаторы с таким диапазоном емкостей выпускаются промышленностью и устройство реализуемо.

3.3.2 Перенапряжения в схеме тиристорного устройства гашения поля

Пока включен ключ короткозамыкателя К1 (рисунок 3.3.2) падение напряжения на тиристоре составляет единицы вольт. После отключения ключа начинается быстрый рост напряжения. Если рассматривать только схему, приведенную на рисунке 3.3.2, то скорость нарастания напряжения на шинах постоянного тока сразу после отключения короткозамыкателя будет равна бесконечности. Это влечет за собой следующие проблемы:

 устройство управления тиристором и тиристор обладают ограниченным быстродействием; за время задержки включения тиристора напряжение возрастет до недопустимых значений (в идеале – до бесконечности), изоляция элементов схемы будет повреждена;

- высокая скорость нарастания напряжения приведет к самопроизвольному включению тиристоров [101].

Поэтому требуется рассмотрение более полной схемы замещения обмотки возбуждения (рисунок 3.2.2) и принятия мер к ограничению скорости нарастания напряжения при запертых тиристорах гасящих цепей ТУГП.

В п. 3.2 произведен анализ работы ТУГП с учетом действия демпфирующих контуров. Если принять случай идеального ротора, которому соответствует

отсутствие индуктивности рассеяния $L_{\sigma f}$ и коэффициент связи между обмоткой возбуждения и демпфирующими контурами равен единице, то выражение для тока возбуждения упрощается до вида [9]:

$$i_f(t) = I_{f0} \frac{T_{di}}{T_{di} + T_{yd0}} e^{-\frac{t}{T_{di} + T_{yd0}}}$$
(3.3.7)

При сопротивлении гасящего резистора $R_{DE} >> R_f$ постоянная времени цепи обмотки возбуждения определяется только величиной R_{DE} : $T_{di} = L_f / R_{DE}$. Напряжение на клеммах обмотки возбуждения, по закону Ома и выражению 3.3.7:

$$u_{f}(t) = R_{DE}I_{f0}\frac{T_{di}}{T_{di} + T_{yd0}}e^{-\frac{t}{T_{di} + T_{yd0}}} = \frac{I_{f0}L_{f}}{L_{f}/R_{DE}}e^{-\frac{t}{L_{f}/R_{DE}} + T_{yd0}}$$
(3.3.8)

Из выражения 3.3.8 вытекает любопытное заключение – если, при отсутствии индуктивности рассеяния, разорвать контур обмотки возбуждения ($R_{DE} \rightarrow \infty$) то напряжение в цепях обмотки возбуждения будет ограничено действием демпфирующих контуров:

$$u_f(t) = \frac{I_{f0}L_f}{T_{yd0}} e^{-\frac{t}{T_{yd0}}}$$
(3.3.9)

Например, для турбогенератора T-12-2 максимальное значение напряжения в цепях возбуждения при предшествующем режиме двойной форсировки (по 3.3.9 при t=0) составит 1380 В или 6 U_{fHOM} , что не превышает допустимые значения. Однако, при разрыве контура обмотки возбуждения действие индуктивности рассеяния $L_{\sigma f}$ (рисунок 3.2.2) ничем не ограничено и перенапряжения будут определяться переходным процессом в контуре с этой индуктивностью. Таким образом, в первую очередь необходимо учесть действие индуктивности рассеяния между обмоткой возбуждения и демпфирующими контурами.

Предложено техническое решение, позволяющее ограничить амплитуду перенапряжений и снизить скорость нарастания напряжения в цепях возбуждения

при отключении ключа короткозамыкателя. Исходя из описания работы ТУГП, приведенного в п.п. 2.1-2.3, одна из гасящих цепей (R1) работает на всем интервале процесса гашения поля. По завершению гашения поля включается резистор самосинхронизации R_{CC} . Предложено внести следующие изменения в схему ТУГП (рисунки 2.1.1 и 3.3.1):

- в цепи защиты от перенапряжений (*R*_{CC}, A2, Q2) заменить *R*_{CC} на R1 из состава гасящих цепей ТУГП;

- в ТУГП удалить гасящую цепь R1, VS1, C1, U1;

- в состав цепи защиты от перенапряжений ввести RC-цепь.

Измененная схема ТУГП и цепей возбуждения приведена на рисунке 3.3.3. В схеме введены элементы RC-цепи RS и CS, показана взаимная блокировка выключателей Q1 и Q2, которая должна быть обязательно по требованиям безопасности: обмотка возбуждения всегда должна быть зашунтирована, при размыкании контактов Q1 включается Q2. Т.е. обмотка возбуждения всегда подключена или к возбудителю, или ТУГП, или R1. За счет того, что цепь устройства защиты от перенапряжений стала выполнять функции гасящей цепи, общее количество гасящих цепей увеличилось на 1 шт.

Постоянное включение резистора R1 дает снижение уровня перенапряжений до 2*I*_{fHOM}*R*₁ при гашении поля из режима двойной форсировки:

$$U_{fMAX} = \frac{K_{\Pi} U_{fHOM}}{K_{PU}^{N-1}}.$$
 (3.3.10)

По отношению к номинальному значению напряжения обмотки возбуждения:

$$U_{fMAX}^* = \frac{K_{\Pi}}{K_{PU}^{N-1}}.$$
(3.3.11)

Для ТУГП с параметрами N=10 шт., $K_{PU}=0,7$ и $K_{\Pi}=7$ величина перенапряжений получается $173U_{fHOM}$, что очень много.



Рисунок 3.3.3 – Схема цепей возбуждения с модифицированным ТУГП

Совмещение функций гасящего резистора и резистора самосинхронизации $R_{\rm CC}$ ведет к ограничению параметров ТУГП. По нормам [45] сопротивление резистора самосинхронизации, при применении АГП, должно быть в пределах $10...20R_{f}$. Исходя из принципа действия ТУГП определена взаимосвязь между коэффициентом пульсаций K_{PU} , количеством ступеней и параметрами резистора самосинхронизации:

$$K_{PU}^{N-1} = \frac{K_{\Pi}}{(10...20)K_C}.$$
(3.3.12)

Таблица 3.3.1

<i>N</i> , шт	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_{PUO\Pi T}$	0,167	0,305	0,411	0,475	0,485	0,49	0,487	0,513	0,552
$\begin{array}{c} K_{PU10Rf} \\ (3.3.12) \end{array}$	0,35	0,592	0,705	0,769	0,811	0,839	0,861	0,877	0,89
$\frac{K_{PU20Rf}}{(3.3.12)}$	0,175	0,418	0,559	0,647	0,706	0,748	0,78	0,804	0,824

Результаты расчета минимального значения коэффициента пульсаций при $R_{CC}=10R_f K_{PU10R_f}$ и $R_{CC}=20R_f K_{PU20R_f}$ по выражению 3.3.12 и его оптимальная величиной (таблица 3.3.2) для турбогенераторов сведены в таблицу 3.3.1.

Сравнение результатов расчета коэффициентов пульсации (таблица 3.3.1) показывает, что получаемые значения К_{РU} значительно больше оптимального и время гашения поля при реализации только этого мероприятия увеличится. Поэтому требуется применение дополнительных мер к снижению величины перенапряжений. Включение параллельно резистору R1 *RC*-цепи (рисунок 3.3.3) ведет к снижению перенапряжений так как в момент отключения ключа обмотка возбуждения шунтируется короткозамыкателя дополнительным сопротивлением RS. Получено выражение, определяющее максимальную величину этого сопротивления из условия непревышения допустимого уровня перенапряжений $K_{\Pi}U_{fHOM}$:

$$K_{\Pi} U_{fHOM} \ge K_C I_{fHOM} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_s} \right)^{-1}$$
 (3.3.13)

Из выражения 3.3.13, при N шт. ступеней ТУГП, сопротивление резистора RS должно быть не более:

$$R_{S} \leq \frac{K_{\Pi} U_{fHOM}}{K_{C} I_{fHOM}} \left(1 - K_{PU}^{N-1} \right)^{-1}.$$
 (3.3.14)

Но, при величине сопротивления резистора RS, определенного по 3.3.14, после отключения короткозамыкателя напряжение скачкообразно возрастет до $K_{\Pi}U_{fHOM}$ и продолжит расти по мере зарядки конденсатора. Это недопустимо. Поэтому параметры RC-цепи должны быть выбраны таким образом, чтобы за время включения тиристоров напряжение не превысило значения $K_{\Pi}U_{fHOM}$. Так как время задержки и включения тиристоров составляет в сумме обычно не более 100 мкс, а постоянные времени обмотки возбуждения – доли секунд – секунды, то в расчетной схеме замещения, полученной для рассматриваемого интервала времени (рисунок 3.3.4), обмотка возбуждения представляется источником тока J_f [20, 39],

равного току обмотки возбуждения на момент отключения ключа короткозамыкателя К1.



Рисунок 3.3.4 – Схема замещения цепей возбуждения на интервале времени после отключения ключа короткозамыкателя

Зависимость напряжения на шинах постоянного тока после отключения ключа короткозамыкателя К1 (рис. 3.3.4) описывается выражением:

$$u_{f}(t) = U_{0RS} + \left(J_{f}R_{1} - U_{0RS}\right) \cdot \left(1 - e^{-t/\tau_{s}}\right).$$
(3.3.15)

Начальное напряжение U_{0RS} определяется сопротивлениями резисторов R1 и RS:

$$U_{0RS} = J_f \frac{R_1 R_S}{R_1 + R_S}, \qquad (3.3.16)$$

а постоянная времени процесса зависит от емкости конденсатора CS:

$$\tau_{S} = C_{S} \left(R_{1} + R_{S} \right). \tag{3.3.17}$$

Время, в течении которого напряжение в цепях возбуждения достигает значения $K_{\Pi}U_{f\rm HOM}$ (получено из 3.3.15):

$$t_{DV} = -\tau_{S} \cdot \ln \left(\frac{K_{\Pi} U_{fHOM} - J_{f} R_{1}}{U_{0RS} - J_{f} R_{1}} \right).$$
(3.3.18)

При заданном времени нарастания напряжения t_{DV} емкость конденсатора CS и сопротивление резистора RS:

$$C_{S}(R_{S} + R_{1}) = \frac{-t_{DV}}{\ln\left(\frac{K_{\Pi}U_{fHOM} - J_{f}R_{1}}{U_{0RS} - J_{f}R_{1}}\right)}.$$
(3.3.19)

Влияние цепей принудительной коммутации тиристоров (цепи зарядки коммутирующих конденсаторов VD21, R21, VD31, R31) не учитывается так как тиристоры VS2, VS3 на рассматриваемом интервале времени отключены.

Расчеты для данных турбогенератора Т-12-2 показывают:

1) при заданном времени t_{DV} =13 мкс (взято для тиристора T353-800) для гашения поля из режима двойной форсировки величина емкости варьируется в пределах 4,68...6,5 мкФ в зависимости от величины R_s . Конденсаторы с такими емкостями доступны и малогабаритны.

2) учет возможного режима трехфазного к.з. приводит к росту требуемой емкости до 57,2 мкФ;

3) минимальные значения емкости достигаются при $R_S=0$;

4) увеличение заданного времени до t_{DV} =100 мкс ведет к увеличению емкости конденсатора *CS* до 36,0...50,18 мкФ и 98,4...440,1 мкФ соответственно для режима форсировки и трехфазного к.з.. Конденсаторы с номинальной емкостью 100...500 мкФ имеют уже значительные размеры.

5) средние значения скорости нарастания напряжения 123,8 В/мкс (*t*_{DV}=13 мкс) и 16,1 В/мкс (*t*_{DV}=100 мкс) меньше предельно допустимых для T353-800 (200...1600 В/мкс);

6) Увеличение сопротивления RS ведет к увеличению U_{0RS} и увеличению требуемой емкости конденсатора CS.

Результаты, приведенные выше, говорят о том, что следует стремиться к минимальному значению сопротивления резистора RS. Однако, уменьшение сопротивления резистора RS приводит к возрастанию ударного тока через цепь короткозамыкателя при его включении. Поэтому, исходя из параметров элементов цепи короткозамыкателя должно быть выбрано минимальное значение сопротивления резистора RS. Если для турбогенератора не предусмотрен режим

самосинхронизации, то величина сопротивления резистора R1 выбирается по условию минимального времени гашения поля. В противном случае цепь самосинхронизации должна подключаться с задержкой по времени, а резистор R1 с RC-цепью – отдельным коммутационным аппаратом до первого отключения ключа короткозамыкателя. Кроме этого, на начальном интервале времени после отключения ключа короткозамыкателя скорость нарастания напряжения от 0 до U_{ORS} ограничивается только емкостью обмотки возбуждения. Из-за относительно малой величины этой емкости скорость нарастания напряжения принимает (единицы-десятки кВ/мкс). большие значения что может привести к самопроизвольному включению тиристоров гасящих цепей. Поэтому также целесообразно уменьшение величины U_{0RS} .

Следует заметить, что предложенные изменения в схеме ТУГП не отражаются на его функциональных свойствах (алгоритм переключения гасящих цепей и ВАХ), в следствие чего все результаты, полученные ранее, остаются в силе.

3.3.3 Включение тиристоров гасящих цепей

Каждая гасящая цепь представляет собой устройство с двумя устойчивыми состояниями: включено и отключено. Переход из одного состояния в другое происходит только при внешнем воздействии. В одном из устойчивых состоянии гасящая цепь может находиться достаточно долго. Поэтому, по своим функциональным свойствам гасящая цепь является триггером [96].

Узел, состоящий из однооперационного тиристора, включаемого пороговым устройством по превышению напряжением заданной уставки, является функциональным аналогом динистора. Триггерные ячейки на динисторах описаны в [102] и предназначались для создания цифровых устройств. Рассматриваемые же гасящие цепи по принципу действия являются силовыми триггерами. Пороговое устройство может быть выполнено на основе стабилитрона, как это делается для тиристорных разрядников в промышленных системах возбуждения [25]. Для упрощения, рассмотрен процесс включения тиристоров ТУГП, состоящего из четырех гасящих цепей. Принято, что начальный ток обмотки возбуждения – 2*I*_{fHOM}, соответствует всем включенным (4 шт.) гасящим цепям. С целью описания электромагнитных процессов составлена схема замещения, приведенная на рисунке 3.3.5. Тиристоры представлены идеальными ключами с односторонней проводимостью. Приняты допущения: паразитные сопротивления и индуктивности отсутствуют, время включения ключей равно нулю, время отключения тиристоров – больше длительности работы ТУГП, токи через зарядные резисторы VПК (R21, R31, рисунок 3.3.3) много меньше токов через гасящие резисторы R2, R3, R4 и на процессы не влияют.



Рисунок 3.3.5 – Упрощенная схема замещения ТУГП с 4 шт. гасящих цепей Первая цепь (R1 на рисунке 3.3.5) является неуправляемой (рисунок 3.3.3). После отключения ключа короткозамыкателя K1 зависимость напряжения на шинах постоянного тока ТУГП описывается выражением 3.3.15. Так как проводимость тиристоров в отключенном состоянии много меньше проводимости гасящих резисторов, то падение напряжения «анод-катод» равно напряжению на обмотке возбуждения. Это же напряжение прикладывается к пороговому устройству.

Отключение ключа короткозамыкателя К1 приводит к росту напряжения на шинах постоянного тока (см. п. 3.3.2). При достижении напряжением $u_f(t)$ уставки срабатывания порогового устройства гасящей цепи №2 на тиристор VS2 подается ток управления и начинается процесс его включения, который должен закончиться через t_{DV} с момента отключения К1. В момент времени t_1 , за счет включения

тиристора VS2, параллельно обмотке возбуждения подключается резистор R2, что приводит с мгновенному понижению напряжения на обмотке до величины:

$$u_{f}(t_{1+}) = \frac{R_{1}R_{2}}{R_{1} + R_{2}} \frac{U_{C}(t_{1}) + R_{S}J_{f}}{\frac{R_{1}R_{2}}{R_{1} + R_{2}} + R_{S}}.$$
(3.3.20)

Предполагается, что конденсатор CS успевает зарядиться до напряжения (из выражения 3.3.15):

$$U_{C}(t_{1}) = U_{C}(t_{DV}) = \left(J_{f}R_{1} - U_{0RS}\right) \cdot \left(1 - e^{\frac{-t_{TV}}{\tau_{s}}}\right).$$
(3.3.21)

Постоянная времени в выражениях 3.3.21 и 3.3.15 увеличивается с подключением резистора R2:

$$\tau_{S} = C_{S} \left(\frac{R_{1}R_{2}}{R_{1} + R_{2}} + R_{S} \right).$$
(3.3.22)

После подключения к выводам обмотки возбуждения резистора R2 возможно два варианта протекания переходного процесса:

1) Напряжение на конденсаторе в момент коммутации больше установившегося значения напряжения $u_f(t)$:

$$U_C(t_1) > U_{fYCT}(R1 || R2) = J_f \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

В этом случае наблюдается разрядка конденсатора CS с постоянной времени $\tau_{\rm S}$ (3.3.22), напряжение на обмотке возбуждения $u_f(t)$ падает.

2) Напряжение на конденсаторе в момент коммутации меньше установившегося значения напряжения $u_f(t)$:

$$U_C(t_1) < U_{fYCT}(R1 || R2) = J_f \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

В этом случае продолжается зарядка конденсатора CS с постоянной времени $\tau_{\rm S}$ (3.3.22), напряжение на обмотке возбуждения $u_f(t)$ растет, но медленнее чем сразу после отключения ключа K1.

Уставки срабатывания пороговых устройств

Ранее было принято, что все гасящие цепи включаются при достижении напряжением $u_f(t)$ величины $K_{\Pi}U_{fHOM}$. Так как тиристоры управляются пороговыми устройствами (п. 2.1), формирующими ток управления при достижении напряжением на шинах постоянного тока величины уставки порогового устройства, то для обеспечения включения гасящих цепей в соответствии с током $i_f(t)$ необходимо чтобы величины этих уставок были разными. Поэтому, для порогового устройства гасящей цепи №4, работающей при самых больших токах выбирается наибольшая величина уставки, а для ступени №2 – наименьшая. Несмотря на то, что гасящие цепи включаются при разных напряжениях, разница между уставками, относительно их абсолютного значения, небольшая (10...20 В на фоне 1,5-3,5 кВ [4, 5]), резисторы выбираются исходя из требований, определенных ранее и результирующая ВАХ практически не отличается от приведенной в п. 2.3.

Процесс включения тиристоров

Приблизительный вид зависимости напряжения обмотки возбуждения, иллюстрирующий процессы включения гасящих цепей, приведен на рисунке 3.3.6. В момент времени t_0 (рисунок 3.3.6а) происходит отключение ключа короткозамыкателя К1 и напряжение $u_f(t)$ практически мгновенно возрастает до U_{0RS} . На интервале времени t_0 - t_2 напряжение на выводах определяется выражением 3.3.15 – происходит зарядка конденсатора CS. Зарядка конденсатора идет с постоянной времени τ_s (3.3.17). На рисунке 3.3.6а показаны процессы при минимально допустимой постоянной времени, определенной в п. 3.3.2, на рисунке 3.3.6б – постоянная времени в разы больше минимально допустимой. При достижении напряжением величины уставки срабатывания порогового устройства №2 в момент времени t_{20} это устройство срабатывает и на управляющий электрод тиристора VS2 подается ток управления (рис. 3.3.20). Так как реальный тиристор включается только с задержкой *t*_{ВКЛ}, то напряжение на шинах постоянного тока возбуждения продолжает расти.



Рисунок 3.3.6 – Зависимость напряжения на шинах постоянного тока ТУГП для 2*I*_{fHOM} при включении гасящих ступеней: а) минимально допустимая постоянная времени цепи RS-CS-R1, б) постоянная времени значительно больше минимально допустимой

Вариант 1 – минимально допустимая постоянная времени

Развитие процессов для этого варианта проиллюстрировано на рисунке 3.3.6а. С момента подачи тока управления на управляющий электрод тиристора VS2 t_{20} до включения тиристора t_2 напряжение успевает возрасти до $K_{\Pi}U_{fHOM}$. За это время успевают сработать пороговые устройства N_{23} и N_{24} . Но так как времени на включение тиристора VS3 и VS4 не хватает, то они не включаются. После включения тиристора VS2 напряжение уменьшается до величины, определяемой выражением 3.3.20, и снова начинает возрастать, но уже медленнее. В момент времени t_{30} срабатывает пороговое устройство N_{23} и тиристор VS3 включается через $t_{BKЛ}$ в t_3 . Опять происходит «просадка» напряжения с дальнейшим его ростом.

Когда напряжение достигает величины уставки срабатывания порогового устройства \mathbb{N}_4 (момент t_{40}) включается тиристор VS4 (через $t_{BKЛ}$ в t_4) и напряжение на шинах постоянного тока начинает стремиться к значению, определяемому включенными резисторами в ТУГП.

Вариант 2 – значительная постоянная времени

Развитие процессов проиллюстрировано для этого варианта на рисунке 3.3.66. В данном случае процессы протекают проще – напряжение растет сравнительно медленно и тиристоры включаются практически сразу после срабатывания пороговых устройств.

Таким образом, наблюдается последовательное включение гасящих цепей – установление устойчивого включенного состояния. Процесс включений прекращается после установления напряжения, не превышающего $K_{\Pi}U_{fHOM}$ с учетом в различии величин уставок пороговых устройств. В случае меньших, чем $2I_{fHOM}$, начальных токах все тиристоры в схеме ТУГП уже не включаются. В момент времени t_0 наблюдается изменение напряжения с большой скоростью. При необходимости ограничения скорости изменения напряжения в этот момент времени, а также, демпфирования ВЧ-колебаний, могут быть установлены индивидуальные RC-цепи (снабберы).

3.3.4 Периодический сброс состояния силовых триггеров

После включения необходимого числа гасящих цепей ток и напряжение обмотки возбуждения снижаются по экспоненциальному закону (п. 2.2). Через некоторое время требуется уменьшить число подключенных гасящих цепей чтобы повысить напряжение на обмотке возбуждения и скорость гашения поля. Т.е. необходимо произвести сброс состояния ТУГП чтобы оно изменило (адаптировало) величину R_{DE} под новое значение тока обмотки возбуждения с целью выдерживания заданной ВАХ (п. 2.3). В патенте [64] предложено

производить периодический сброс состояния гасящих цепей (силовых триггеров) путем кратковременного включения ключа короткозамыкателя. Ниже исследуется взаимосвязь частоты сброса включенного состояния гасящих цепей, времени гашения поля турбогенератора и устойчивости работы ТУГП.

Влияние частоты повторения импульсов сброса на гашение поля

Допустим, что ТУГП поддерживает среднее значение напряжения на обмотке возбуждения на уровне U_{fCP} (2.3.6). Падение напряжения на цепи включенного короткозамыкателя равно нулю. Длительность импульса сброса триггерных ячеек (длительность интервала включенного состояния ключа короткозамыкателя) – t_{RV} (п. 3.2). Для упрощения анализа обмотка возбуждения расположена на линейном магнитопроводе и не имеет связи с демпфирующими контурами.

С изменением частоты включений короткозамыкателя изменяется соотношение длительностей работы гасящих цепей и интервалов времени с нулевым напряжением когда «разряд» обмотки возбуждения идет только на собственное сопротивление с постоянной времени T_{f0} . Если принять число ступеней стремящемся к бесконечности, то среднее значение напряжение на обмотке возбуждения будет равно U_{fMAX} при отсутствии импульсов сброса (гасящие цепи гипотетически отключаются сами по условиям, описанным ранее). С появлением импульсов сброса и росте частоты их следования f_{II} напряжение будет снижаться до тех пор, пока импульсы не перекроются ($f_{II} \ge 1/t_{RV}$):

$$U_{fCP} = U_{fMAX} (1 - t_{RV} f_{H}) = K_{\Pi} U_{fHOM} (1 - t_{RV} f_{H})$$
(3.3.23)

На основе выражения 3.3.23 делается вывод, что чем меньше частота появления импульсов сброса (включений короткозамыкателя), тем больше среднее значение напряжения на клеммах обмотки возбуждения и тем меньше время гашения поля согласно п. 1.2. Т.е., наилучший результат будет достигнут при отсутствии включений ключа короткозамыкателя. С другой стороны, для отключения тиристоров гасящих цепей необходимо производить включение ключа короткозамыкателя в строго определенные моменты времени. Несовпадение

импульсов сброса и требуемых моментов переключения гасящих цепей ведет к нарушению алгоритма формирования ВАХ. При несовпадении импульса сброса и требуемого момента переключения гасящих цепей возможно два случая: импульс появляется раньше и импульс появляется позже.

Для анализа процессов переключения гасящих ступеней ТУГП принято, что импульсы сброса поступают с периодом $T_{\rm H}$, примерно в 4 раза меньшим чем интервал времени от начала процесса работы до первого переключения ступеней t_{1-2} (рисунок 3.3.7). Процесс гашения поля начинается в момент времени t=0 с начальным током обмотки возбуждения $I_{f0}=I_{f01}$. Коэффициент пульсаций K_{PU} взят равным 0,411, как оптимальный для ТУГП с четырьмя ступенями гашения (п. 3.2.2, таблица 3.2.2). Переключение ступеней с первой на вторую ожидается при $i_f(t)=I_{f02}$, со второй на третью – при $i_f(t)=I_{f03}$.



Рисунок 3.3.7 – Зависимости тока и напряжения обмотки возбуждения при периодическом сбросе состояния гасящих ячеек ТУГП

При подаче импульса сброса (включения-отключения ключа короткозамыкателя) в момент времени t_1 переключение со ступени №1 на ступень №2 не происходит изза того, что значение тока $i_f(t)$ находится в диапазоне работы ступени №1 $I_{f01}...I_{f02}$

(рисунок 3.3.7). По такой же причине в работе останется ступень №1 при сбросе в моменты времени t_2 и t_3 . В требуемый момент времени переключения ступеней t_{1-2} импульса сброса не приходит. Он появляется с задержкой $\delta t_{\rm H}$ от момента t_{1-2} . Появление задержки приводит к тому, что переключение ступеней происходит при токе, меньшем чем заданное значение $K_{PU} \cdot I_{f01}$. Из-за этого затягивается процесс гашения поля ступенью №1, а ступень №2 начинает работать с напряжением U_{fMAX}<U_{fMAX}, что ведет к снижению среднего значения напряжения на обмотке возбуждения и увеличению длительности процесса гашения поля. Максимальное значение длительности задержки появления импульса сброса равно периоду повторения импульсов $\delta t_{\rm H}$, и может варьироваться от нуля до $T_{\rm H}$. Если для линейной обмотки возбуждения без демпфирующих контуров можно попытаться аналитически описать распределение по времени моментов переключения ступеней соответствующей функцией, то в случае реальных генераторов, особенно в случае трехфазного к.з. и качаний машины эта функция носит квазислучайный характер. Из-за этого, величина задержки б*t*^и описывается функцией Крампа, которая не имеет записи через элементарные функции [103]. Т.е. четко установить аналитически взаимосвязь между периодом повторения импульсов сброса Ти и временем гашения поля не представляется возможным. Однако, следует ожидать что максимальное значение задержки $\delta t_{\rm H}$ будет уменьшаться с ростом частоты повторения импульсов f_U, а вероятность совпадения импульса с расчетным моментом переключения ступеней – увеличиваться [104].

Для установления взаимосвязи между частотой следования импульсов сброса и временем гашения поля исследовано ТУГП, состоящее из четырех гасящих цепей, работающее совместно с турбогенератором Т-12-2. Для упрощения расчетов принято: магнитная система генератора линейная, не содержит демпфирующих контуров, постоянная времени обмотки возбуждения $T_f=T_{d0}=0,75T'_{d0}=5,29$ с. Номинальные параметры возбуждения: $I_{fHOM}=291$ А, $U_{fHOM}=230$ В. Коэффициент перенапряжений $K_{\Pi}=7$, коэффициенты пульсаций K_{PU} взяты 0,411 и 0,7, длительность импульса сброса – 500 мкс. Ток возбуждения предшествующего режима принят равным номинальному. Результаты расчета времени гашения поля в зависимости от частоты и периода следования импульсов приведены в таблице 3.3.2.

Таблица 3.3.2

K_{PU}	Время гашения t_{DE} , с, при периоде импульсов $T_{\rm H}$, мс								
	1,0	5,0	10,0	50,0	100,0	500	1000	с	
0,411	1,139	1,143	1,147	1,174	1,219	1,523	1,717	1,138	
0,7	1,416	1,418	1,420	1,432	1,463	1,606	1,776	1,416	
<i>f</i> _И , Гц	1000	200	100	20	10	2,0	1,0		

Входе исследования отмечено:

- при длительности периода повторения импульсов сброса 0,5 с работают 3 ступени из четырех, а при *T*_и=1 с – только две;

- минимальный интервал времени между переключениями ступеней Δt_{MIN} по результатам расчета (минимальное время работы ступени №3) для $f_{\text{H}} \rightarrow \infty$ составил: для $K_{PU}=0,411-86$ мс, для $K_{PU}=0,7-124$ мс;

- минимальное время гашения поля *t*_{DEMIN}, соответствующее процессу с точным совпадением моментов переключения и импульсов сброса, при напряжении *U*_{fMAX}, определяемому коэффициентом пульсаций, составило: при *K*_{PU}=0,411 – 1,138 с, при *K*_{PU}=0,7 – 1,416 с;

- при длительности периода повторения импульсов сброса 50 мс и более становится заметным нарушение работы ТУГП.

Кроме этого произведен расчет ожидаемой длительности идеального процесса гашения поля исходя только из среднего напряжения на обмотке ротора (выражение 3.3.23). Результаты расчета приведены в таблице 3.3.3. На рисунке 3.3.8, в качестве примера, на подтверждение выше сказанного, приведены зависимости тока и напряжения для случаев идеального совпадения импульсов с требуемыми моментами переключения ступеней, и при $T_{\mu}=0,1$ с.





Таблица 3.3.3

K_{PU}	Время гашения t_{DE} , с, при периоде импульсов $T_{\rm H}$, мс										
	1,0	5,0	10,0	50,0	100,0	500	1000				
0,411	1,885	1,131	1,077	1,038	1,033	1,029	1,029				
0,7	1,516	0,896	0,852	0,821	0,817	0,814	0,813				
<i>f</i> и, Гц	1000	200	100	20	10	2	1				

Данные таблиц 3.3.2 и 3.3.3 представлены на рисунке 3.3.9 в виде зависимостей времени гашения от периода повторения импульсов в полулогарифмических осях.



Рисунок 3.3.9 – Влияние периода следования импульсов сброса на время гашения поля для двух групп факторов: 1 – влияние фактора несовпадения импульсов при K_{PU} =0,7; 2 – влияние фактора несовпадения импульсов при K_{PU} =0,411; 3 – влияние фактора заполнения импульсом сброса при K_{PU} =0,411 (3.3.23); 4 – влияние фактора заполнения импульсом сброса при K_{PU} =0,7 (3.3.23)

По рисунку 3.3.9 становится очевидным что есть диапазон значений периода повторения импульсов сброса 5...100 мс, при котором достигается минимум времени гашения поля. И, если по результатам расчета моментов переключения ступеней известно минимальное время работы предпоследней ступени Δt_{MIN} , то период повторения импульсов должен быть не более $\approx 0,5$ от этого времени. В виду того, что не удалось однозначно установить требования к частоте повторения импульсов сброса аналитическими методами, этот вопрос исследован экспериментально (глава 4).

3.4 Выводы

1. Рассмотрены результаты исследований, приведенные в известных работах, посвященных переходным процессам в синхронных генераторах, стандарте ANSI/IEEE C37.18, а также пробного расчета режима контура обмотки возбуждения. Показано, что наибольшие токи через тиристорное устройство гашения поля будут протекать в случае возникновения внезапного трехфазного короткого замыкания на выводах статора генератора. Амплитуда тока может достигать 6*I*_{/HOM} и более, что необходимо учитывать при выборе параметров устройства.

2. Предложено три подхода к определению параметров режима тиристорного устройства гашения поля в случае возникновения внезапного трехфазного замыкания. Самый простой подход, использование табличных данных из стандарта ANSI/IEEE C37.18, основанных на среднестатистических параметрах генераторов, дает большую погрешность и, в некоторых случаях, его применение опасно появлением недопустимых перенапряжений. Второй подход основан на определении только предельного значения тока короткозамкнутого контура обмотки возбуждения при внезапном к.з.. Такой подход позволяет выбрать параметры ТУГП, обеспечивающие безопасный уровень перенапряжений но не рассчитать работу гасящих ступеней. Третий подход базируется на полном расчете режимов всех силовых элементов контура обмотки возбуждения на всем интервале времени гашения поля с учетом действия релейной защиты и дает наибольшую точность результатов. При этом, третий подход характеризуется большим объемом вычислений. Результатом рассмотрения режима внезапного трехфазного замыкания является заключение о том, что ВАХ ТУГП должна быть расширена до токов, соответствующих этому режиму.

3. Для точного расчета режима тиристорного устройства гашения поля при внезапном трехфазном коротком замыкании в цепи статора генератора разработана и приведена методика вычислений.

4. Анализом работ по переходным процессам в синхронных генераторах установлено, что, кроме большой амплитуды, ток контура возбуждения при внезапном трехфазном к.з. содержит переменную составляющую. Эта особенность учтена при формулировании методики расчета режима гасящих цепей. Также указано, что из-за наличия переменной составляющей опасно применение прототипа устройства, описанного в патенте [61] (вывод идентичен результатам, приведенным в главе 2).

5. В связи с тем, что синхронные генераторы изготавливаются из ферромагнитных материалов потребовалось рассмотрение влияния насыщения магнитопровода на работу ТУГП. По результатам исследований установлено, что явление насыщения магнитопровода ведет с уменьшению постоянной времени контура обмотки возбуждения, что, в свою очередь, сокращает время работы первых ступеней ТУГП. Время работы первых ступеней ТУГП может сокращаться в несколько раз по сравнению со случаем линейной магнитной системы. На основную функцию ТУГП – синтезирование ВАХ, фактор насыщения магнитной системы и изменение постоянных времени влияния не оказывает. По результатам исследований предложено два метода учета насыщения магнитной системы: применение двухступенчатой зависимости и применение непрерывной гладкой зависимости индуктивности обмоток от тока возбуждения.

6. В большом количестве работ рассматривается влияние демпфирующих контуров на процесс гашения поля синхронного генератора. Авторами показано негативное влияние на динамику процесса гашения поля при реализации известных способов гашения поля – с помощью автомата гашения поля, варистора и линейного сопротивления. Проведенные исследования работы ТУГП показали, что есть существенное влияние демпфирующих контуров на время работы гасящих ступеней – наблюдается сокращение времени работы основной части ступеней. При этом, за счет действия демпфирующих контуров длительность работы последней ступени и общее время гашения поля увеличиваются.

7. Исследование влияния величины коэффициента пульсаций на работу гасящих ступеней и время снижения тока обмотки возбуждения до минимального

заданного при учете действия демпфирующих контуров показало: а) можно найти оптимальное значение K_{PU} , обеспечивающее минимальное время снижения тока; б) оперируя значением коэффициента пульсаций можно обеспечить более быстрое снижение тока обмотки возбуждения по сравнению с применением варистора при одинаковом уровне перенапряжений, что является достоинством устройства. Сформирована методика расчета режима работы тиристорного устройства гашения поля.

8. Для всех расчетов, основанных на параметрах реальных генераторов, отмечено практическое затруднение – отсутствие полных достоверных параметров этих самих генераторов.

9. Исследованы процессы выключения и включения тиристоров гасящих ячеек. Показано, что гасящая ячейка является функциональным аналогом триггера. Установление включенного состояния ячейки происходит по сигналу от порогового устройства. Ячейка может находиться в этом состоянии практически сколько угодно долго. Сброс состояния ячеек производится подачей в схему устройства импульса сброса.

10. Предложена и обоснована необходимость введения устройств принудительной коммутации тиристоров. На основе исследований определены параметры цепей принудительной коммутации.

11. В ходе исследования показана необходимость введения групповой RCцепи, снижающей скорость нарастания напряжения после отключения ключа короткозамыкателя. Для групповой цепи, по результатам рассмотрения электромагнитных процессов, сформулированы требования к ее параметрам.

12. Предложены изменения в базовую схему устройства, повышающие надежность ее работы. Отмечено, что введенные изменения не меняют базовый принцип действия ТУГП и приведенные ранее результаты исследований остаются в силе.

13. Проанализировано влияние частоты следования импульсов сброса (включений ключа короткозамыкателя) на работу ТУГП. Результаты исследований показывают, что аналитически вывести выражение, определяющее оптимальную

частоту следования импульсов вывести сложно. Но при этом возможно определить допустимый диапазон частот следования импульсов, при котором будут обеспечены наилучшие характеристики устройства.

14. Для некоторых узлов устройства выполнен пробный выбор элементов, оценено соответствие требуемых параметров элементов с номенклатурой изделий, выпускаемых в Российской Федерации и, тем самым, показана практическая реализуемость ТУГП.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель экспериментальной исследовательской части _ подтверждение результатов исследований работы тиристорного устройства гашения поля, проведенных в главах 2 и 3, а также исследование явлений, нерассмотренных по тем или иным причинам теоретически. Для проведения экспериментальных работ «Системы В лаборатории энергетики с силовыми полупроводниковыми преобразователями» кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» изготовлен макетный образец тиристорного устройства гашения поля и создана испытательная установка.

4.1 Описание и работа экспериментальной установки

4.1.1 Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рисунок 4.1.1) состоит из макетного образца тиристорного устройства гашения поля ТУГП, электромашинного агрегата ЭМА с тиристорным источником питания ТЭП, осциллографа ОСЦ и персонального компьютера (ноутбука) РС. Электромашинный агрегат состоит из приводного двигателя постоянного тока типа П42 7,4 кВт, синхронных явнополюсных генераторов БМЗ-5,5/4 и БМЗ-4,5/4. В исследованиях использовался генератор БМЗ-4,5/4 с параметрами: 4,5 кВт 220 В 50 Гц 1500 об/мин, *I*_{лном}=11,2 А. Двигатель получает питание от тиристорного источника питания. Генератор 5,5 кВт в экспериментальных работах фактически не используется и выполняет функции маховика и тахогенератора для контроля частоты вращения.



Рисунок 4.1.1 – Общий вид экспериментальной установки в помещении лаборатории

Общий вид макетного образца ТУГП приведен на рисунке 4.1.2.



Рисунок 4.1.2 – Макетный образец тиристорного устройства гашения поля

Макетный образец состоит из:

- блока возбудителя, включающего в себя: стабилизированный импульсный источник питания постоянного тока типа S-100-12 100 Вт 12 В 8,5 А, вольтметр напряжения статора генератора, вольтамперметр напряжения и тока ротора генератора;

- магазинов сопротивлений 0...59,9 Ом, имитирующих: гасящие резисторы R1-R4 (панели H-101, H-21), резистор RS RC-цепи и резистор самосинхронизации R_{CC} (панель H-121);

- магазинов емкостей 0...64 мкФ, имитирующих коммутационные конденсаторы C2-C4 и CS (панели Л-105 и Л-106);

- блока тиристорных коммутаторов, включающего в себя: силовые тиристоры VS2-VS4 гасящих ячеек №№2-4 с пороговыми устройствами, узлы устройств принудительной коммутации этих ячеек;

- блока замыкателей, включающего в себя: транзисторный короткозамыкатель, тиристорный разрядник устройства защиты от перенапряжений с контактором самосинхронизации, имитатор варистора;

- блока питания и управления, расположенного на панели возбудителя.

Узлы установки оснащены комплектом кнопок и выключателей, позволяющих, при необходимости, включать/отключать/шунтировать элементы схемы ТУГП, а также формировать команды блоку управления. Персональный компьютер (ноутбук) служит для программирования микроконтроллера системы управления. Принципиальная электрическая схема установки приведена на рисунке 4.1.3.

С помощью выключателей SA1...SA5 можно реализовывать схемы гашения поля: на линейном резисторе R_{CC} , на варисторе, на ТУГП, как без блокировки зажигания дуги в пускателе K1 (SA3 отключен), так и с блокировкой, имитировать отказы элементов и т.д.. Резистор самосинхронизации R_{CC} и имитатор варистора (элементы VD71, VD72, VT71 и R71) позволяют ступенчато изменять параметры процесса гашения поля.




Измерения в экспериментальной установке осуществляются амперметром PA1 и вольтметром PV1, а также цифровым осциллографом, подключаемым к: датчику тока UA (токовые клещи 0...200 кГц типа CP05 10 мB/1A), обмотке возбуждения FWG через делитель напряжения, измерительному преобразователю напряжения статора, содержащему трехфазный мостовой диодный выпрямитель и делитель. Кроме этого напряжение статора генератора контролируется по вольтметру PV2. Осциллограф типа Hantek DSO-1202В имеет два канала, не имеет отдельно входа внешнего запуска и записывает осциллограммы на USB-флэш носитель в виде скриншотов экрана или массива значений в формате csv.

Макетный образец тиристорного устройства гашения поля (рисунок 4.1.3) содержит четыре гасящих цепи (ГЦ1...ГЦ4), цепь короткозамыкателя ТК, модуль цифрового управления (MCU), органы коммутации, управления и защиты. Гасящие цепи в макетном образце, как было предложено в п. 3.3, двух типов: неуправляемая цепь ГЦ1 (R1) и силовые триггеры ГЦ2...ГЦ4 (R2...R4). Неуправляемая гасящая цепь состоит из гасящего резистора R1 и RC-цепи CS-RS, отключаемая от обмотки возбуждения FWG генератора G1 контактами реле К2 только при замкнутых контактах пускателя К1 (согласно требованиям ПТЭ [44]). Цепь предназначена для: работы в качестве гасящей цепи №1, защиты от перенапряжений обмотки возбуждения генератора и снижения скорости нарастания перенапряжений.

Управляемые гасящие цепи ГЦ2...ГЦ4 – силовые триггеры содержат гасящие резисторы (R2...R4), подключаемые тиристорами VS2...VS4 (тип: BTW69-800) к выводам обмотки возбуждения. Включение тиристоров VS2...VS4 осуществляется сигналами с пороговых устройств, выполненных на основе прецизионных управляемых стабилитронов DA21...DA41 типа TL431. Уставки срабатывания пороговых устройств задаются плавно потенциометрами R22...R42, вынесенными на переднюю панель. Сброс состояния силовых триггеров производится за счет разрядки коммутирующих конденсаторов C2...C4, подключаемых тиристорами VS21...VS41 (КУ201К). Зарядка коммутирующих конденсаторов R21...R41 вынесены на переднюю панель. Для снижения коммутационных перенапряжений каждая

управляемая гасящая ячейка оснащена индивидуальной RC-цепью (R23-C21...R43-C41).

Цепь короткозамыкателя, состоящая из защитного диода VD1 и транзистора VT1 (IRF630) может быть отключена от цепей возбуждения выключателем SA3, например, в опытах без блокировки зажигания дуги в пускателе K1. Транзистор короткозамыкателя и тиристоры устройств принудительной коммутации (УПК) гасящих цепей управляются сигналами, сформированными формирователем импульсов управления по командам от MCU. В конструкцию заложена возможность независимо управлять транзистором короткозамыкателя и тиристорами УПК.

Управление пускателем К1, транзистором короткозамыкателя VT1 и коммутирующими тиристорами VS21...VS41 осуществляется цифровым модулем управления MCU, выполненным на основе микроконтроллера Atmel ATmega328P. Команды управления поступают от кнопок SB1...SB3. Для отдельного управления пускателем К1 выполнена цепь на реле К4 и кнопках SB4, SB5. Так как устройство содержит все необходимые элементы для реализации защиты от замыканий на контактных кольцах (кроме пускового органа), то введен сигнал «Пуск 33КК» от кнопки SB3.

Все узлы установки (рисунок 4.1.3) обеспечиваются питающими напряжениями 220 В 50 Гц (пускатель, блоки питания, возбудитель), +12 В (драйверы VT1, VS21...VS41), +12 В (реле) и +5 В (МСU) (на схеме не показаны).

4.1.2 Работа экспериментальной установки и ТУГП

Устройство гашения поля управляется микроконтроллером в составе блока управления MCU. Схема алгоритма работы микроконтроллера (упрощенная) приведена на рисунке 4.1.4.

Перед началом работ выключателями SA1...SA5 (рисунок 4.1.3) выбирается схема эксперимента. Подстроечными резисторами R22...R42 и магазинами

сопротивлений R1...R4 задаются параметры ВАХ ТУГП. После этого включается питание установки, запускается микроконтроллер (шаги 1 и 2 на рисунке 4.1.4) и генератор G1 выводится на номинальную частоту вращения (1500 об/мин). По «Возбуждение» (шаги 3 и 4 на рисунке 4.1.4) нажатию кнопки SB1 микроконтроллер дает сигнал на включение пускателя К1 (шаг 5) и обмотка возбуждения подключается к имитатору возбудителя PS1 через 4 шт. последовательно включенных контакта К1:1...К1:4. Генератор возбуждается. При этом, по цепи блокировки, контактами реле К2 отключается защитно-гасящая цепь с резистором R1 (рисунок 4.1.3). Запуск процесса гашения поля осуществляется нажатием кнопки SB1 «Гашение» (шаг 6). Микроконтроллер выдает сигналы на отключение пускателя К1 и включение транзистора VT1 короткозамыкателя (шаги 8 и 9). Так как быстродействие ключа короткозамыкателя намного больше чем время срабатывания промежуточного реле управления пускателем КЗ и самого пускателя, то к моменту начала расхождения контактов К1:1...К1:4 транзисторный ключ VT1 готов к включению. После расхождения контактов К1 цепь возбудителя разрывается и ток обмотки возбуждения мгновенно переходит на цепь короткозамыкателя (VT1-VD1). Также, в этот момент отключается реле К2 и обмотка возбуждения шунтируется защитно-гасящей цепью R1-CS-RS. Полное отключение пускателя К1 фиксируется замыканием н/з контакта К1:5 (шаг 10). Через 5 мс (для отстройки от дребезга контактов) после замыкания контактов К1:5 микроконтроллер отключает транзисторный ключ VT1 (шаги 11, 12). C отключением транзистора короткозамыкателя ток обмотки возбуждения перебрасывается на гасящие цепи. В зависимости от начального тока обмотки возбуждения происходит последовательные срабатывания пороговых устройств и VS2...VS4. Обмотка возбуждения включение тиристоров шунтируется резисторами. Коммутирующие параллельно включенными гасящими конденсаторы C2...C4 заряжаются через резисторы R21...R41.



Через, заданный настройками MCU, интервал времени микроконтроллер дает сигналы на включение ключа короткозамыкателя VT1 и коммутирующих тиристоров VS21...VS41 (шаги 13...16). За счет разряда конденсаторов C2...C4 тиристоры VS2...VS4 отключаются. После отключения ключа короткозамыкателя снова происходит включение необходимого числа гасящих цепей. Так повторяется много раз до предполагаемого момента завершения работы гасящих цепей №2...№4 (шаги 17, 18). Интервал между импульсами сброса и их длительность задаются в программе контроллера (шаг 15). После серии импульсов сброса, число которых задается в программе MCU, микроконтроллер делает выдержку времени, проверяет наличие сигнала «Гашение» и возвращается в исходное состояние ожидания нажатия кнопки SB1 (шаги 19...22).

Нажатие кнопки SB3 «Пуск 33КК» (шаг 7) инициирует алгоритм защиты от замыкания на контактных кольцах. Микроконтроллер дает сигналы на отключение пускателя К1 и включение транзистора короткозамыкателя VT1 (шаги 8a и 9a). Обмотка возбуждения шунтируется цепью короткозамыкателя, падение напряжения на которой меньше необходимого для горения дуги. Дуга на контактных кольцах (в установке дуга не создается) гаснет. Ток обмотки возбуждения протекает по замкнутому контуру и запасенная энергия рассеивается в сопротивлении обмотки возбуждения генератора. Через выдержу времени (шаг 10а) ключ VT1 отключается и алгоритм возвращается в начало (шаг 11а).

Для проведения опытов гашения поля на линейный резистор R_{CC} (выключатель SA5 включен) или имитатор варистора (элементы VD71, VD72, VT71 и R71) с блокировкой зажигания дуги в K1 выключателями SA2, SA11...SA41 отключаются гасящие цепи и в программе микроконтроллера устанавливается безусловный переход с шага 16 сразу на шаг 19 (пунктирная линия на рисунке 4.1.4). Выключателями SA1 или SA4 выбирается тип гасящего элемента. Для опыта с зажиганием дуги выключателем SA3 короткозамыкатель отключается от цепей обмотки возбуждения.

4.2 Расчет параметров режима и проверка работы ТУГП

4.2.1 Определение параметров синхронного генератора

Расчет параметров режима гашения поля, как показали исследования, проведенные в главах 2 и 3, выполняется с использованием характеристик возбуждаемого генератора. Для использованного в экспериментальной установке синхронного генератора типа БМЗ-4,5/4 удалось найти только номинальные мощность 4,5 кВт, напряжение статора 230 В, номинальный ток статора 11,2 А и частоту вращения ротора 1500 об/мин. Генератор синхронный трехфазный явнополюсный. Визуально ротор успокоительной обмотки не имеет. Число пар полюсов – 2.

С целью экспериментального подтверждения теоретических результатов работы потребовалось экспериментально определить следующие характеристики генератора: напряжение U_{fXX} и ток возбуждения I_{fXX} холостого хода; сопротивление обмотки возбуждения по постоянному току R_f , постоянные времени обмотки возбуждения T_{f0} , рассеяния T_{d0} " и демпфирующих контуров T_{yd0} . По снятой характеристике холостого хода установлено: ток возбуждения холостого хода I_{fxx} =7,0 А, напряжение возбуждения холостого хода U_{fxx} =12,4 В, расчетное сопротивление обмотки возбуждения при 20 °C R_f =1,75 Ом. Сопротивление кабеля между генератором и установкой – 0,22 Ом. В расчетах принято сопротивление контура возбуждения равным 1,97 Ом.

Для выполнения опытов гашения поля с целью определения постоянных времени генератора подготовлена схема, приведенная на рисунке 4.2.1. В опытах (рисунок 4.2.1) использованы элементы и узлы экспериментальной установки для исследования работы ТУГП: возбудитель PS, цепь короткозамыкателя (VD1 и TK), блок управления MCU. В схему добавлен магазин силовых стабилитронов (VD2...VD29) для имитации работы варистора с остаточным напряжением до 270 В (штатный имитатор варистора работает на 20...27 В). Параметры режима генератора фиксируются с помощью осциллографа через делитель напряжения

обмотки возбуждения (R1, R2), датчики тока возбуждения TA и напряжения статора (трехфазный мостовой выпрямитель DB1, делитель на R3, R4).



Рисунок 4.2.1 – Схема эксперимента по определению постоянных времени генератора на холостом ходу

Выполнение опытов и результаты

Постоянные времени определены по результатам опытов гашения поля в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 10169-77 [90]. Проведены опыты гашения поля генератора при коротком замыкании в цепи обмотки возбуждения и гашении поля на имитатор варистора. Опыт гашения поля на имитатор варистора (остаточное напряжение 196 В, имитирован последовательно включенными 28 шт. стабилитронами Д815Б) позволил получить значение постоянной времени демпфирующих контуров T_{yd1} =0,034 с (рисунок 4.2.2).

Опыт гашения поля при коротком замыкании в цепи обмотки возбуждения позволяет непосредственно определить переходную постоянную времени по продольной оси T_{d0} ' и рассчитать постоянную времени обмотки возбуждения T_{f0} . При проведении опыта, согласно методике из ГОСТ [90], необходимо создание короткого замыкания в цепях возбуждения генератора, что несет опасность повреждения возбудителя и требует применения токоограничивающего реостата.

Кроме этого, подготовка опыта на реальном генераторе связана с большим объемом работ. Поэтому, была разработана уникальная методика проведения опыта гашения поля с имитацией короткого замыкания в цепи обмотки возбуждения, подробно описанная в статье [68].





разработанной методики заключается В замене Суть выключателя, создающего к.з., шунтирующим диодом. Для этих целей шунтируется ключ короткозамыкателя ТК (в схеме установки на рисунке 4.1.3 выключатели SA1, SA5 - включены, SA3 - отключен). При отключении выключателя возбуждения К1 ток обмотки возбуждения практически мгновенно переходит на шунтирующий диод VD1. Падение напряжения на диоде много меньше номинального значения возбуждения генератора и полученный напряжения режим практически эквивалентен созданию металлического короткого замыкания. При этом, в цепи возбудителя опасных токов не возникает, а объем подготовительных работ сводится к подключению параллельно обмотке возбуждения дополнительного диода. По результатам опыта гашения поля на короткое замыкание (рисунок 4.2.3) получены значения постоянных времени T_{d0}'=0,406 с, T_{f0}=0,284 с. Постоянная

времени демпфирующих контуров из опыта гашения поля на к.з. $T_{yd1}=0,122$ с. Сверхпереходная постоянная времени T_{d0} "=0,051 с.



Рисунок 4.2.3 – Результаты опыта гашения поля генератора при замкнутой накоротко обмотке возбуждения

Методика определения постоянных времени расчетно-экспериментальным методом из [90] рекомендует проводить опыты для токов возбуждения, соответствующих линейному участку характеристики холостого хода. Для генератора БМЗ-4,5/4 линейный участок характеристики холостого хода соответствует токам возбуждения 0...3 А. Постоянные времени определены для этого диапазона. По результатам опыта гашения поля на варистор отмечено уменьшение постоянных времени при токе возбуждения 4...6 А в 1,33 раза, что должно быть учтено при расчете режима работы ТУГП.

Был проведен оценочный опыт внезапного трехфазного короткого замыкания обмотки статора генератора на холостом ходу. По результатам этого опыта установлено что постоянная времени $T_a \approx 0,01$ с, из-за чего проведение исследований работы ТУГП в этом режиме не целесообразно в виду быстрого

затухания переменной составляющей (п. 3.1). Амплитуда тока обмотки возбуждения при внезапном к.з. составила 61 А или 8,7*I*_{fXX}.

4.2.2 Расчет режима ТУГП

Исходные данные для расчета: ток предшествующего режима I_{f0} =6,5 A, напряжение U_{f0} =12,8 B, ток обмотки возбуждения, соответствующий завершению процесса гашения поля I_{fK} =0,3 A, кратность перенапряжений K_{Π} =2,0 о.е., количество ступеней N=4 шт., постоянные времени генератора: T_{d0} '=0,406 с, T_{f0} =0,284 с, T_{yd1} =0,122 с, T_{d0} ''=0,051 с, сопротивление обмотки возбуждения по постоянному току R_{f} =1,99 Ом. Коэффициент K_{α} =1/1,33, характеризующий изменение постоянных времени из-за насыщения. Длительность интервала блокирования дуги (по результатам оценочных экспериментов) – 7 мс, длительность импульса сброса – 300 мкс, период повторения импульсов – 5 мс.

Параметры элементов устройства

Так как соотношения постоянных времени для генератора экспериментальной установки отличаются от таковых для серийных турбогенераторов, то произведен поиск оптимального значения коэффициента пульсаций. С учетом конечного тока процесса I_{fK} =0,3 A (при меньших токах тиристоры не будут удерживаться во включенном положении) получено значение коэффициента пульсаций K_{PU} =0,51. Для поиска величины K_{PU} использованы выражения, приведенные в п. 3.2. При найденном коэффициенте пульсаций, параметров предшествующего режима и ВАХ, рассчитаны сопротивления гасящих ступеней ТУГП: R_{DE1} =4 Ом, R_{DE2} =7,84 Ом, R_{DE3} =15,38 Ом, R_{DE4} =30,15 Ом. Сопротивления резисторов гасящих цепей: R_1 = R_{DE1} =30,15 Ом, R_2 =31,4 Ом, R_3 =16,0 Ом, R_4 =8,17 Ом. Сопротивление резистора RS принято равным R_f =1,99 Ом (максимально допустимое значение по 3.3.14 – 4,6 Ом). Емкости коммутирующих конденсаторов C2–C4 рассчитаны

исходя из параметров тиристоров ВТW69-800: $t_g+t_{rr}=t_q=100$ мкс, $t_{BKJ}=2$ мкс. Сумма падений напряжения по контуру коммутации (3.3.1) принята 3 В: цепь короткозамыкателя «IRF630+KД213А» – 1 В, тиристор КУ201К – 2 В. По выражению 3.3.6, при длительности импульса сброса 300 мкс, емкости конденсаторов: $C_2=6,5$ мкФ (принято к установке 7 мкФ), $C_3=12,75$ мкФ (принято 13 мкФ), $C_4=24,9$ мкФ (принято 25 мкФ). Сопротивления зарядных резисторов устройств принудительной коммутации не рассчитывались и приняты в 10 раз больше соответствующих гасящих сопротивлений: $R_{21}=314$ Ом, $R_{31}=160$ Ом, $R_{41}=81,7$ Ом. Емкость конденсатора групповой RC-цепи рассчитана из выражения 3.3.19: $C_8=0,8$ мкФ (принято 2 мкФ).

Расчетные данные

Как указано в п. 2.3, каждая ступень работает в своем заданном интервале токов обмотки возбуждения. С учетом величины $K_{PU}=0,51$, интервалы работы гасящих ступеней: №1 – 6,4...3,264 А (включены гасящие цепи 1-2-3-4), №2 – 3,264...1,665 А (гасящие цепи 1-2-3), №3 – 1,665...0,849 А (гасящие цепи 1-2), №4 – 0,849...0,3 А (гасящая цепь 1). Переключения между ступенями должны происходить при 3,264, 1,665 и 0,849 А соответственно.

Предварительно произведен расчет без учета работы короткозамыкателя – ступени переключаются строго в момент снижения тока, определяемый коэффициентом пульсаций. Длительности работы каждой ступени: №1 – 30,9 мс, №2 – 25,3 мс, №3 – 14,1 мс, №4 – 12,0 мс. Полное время гашения поля по результатам расчета – 89,2 мс. Осциллограммы тока и напряжения обмотки возбуждения приведены на рисунке 4.2.4. Параметры ключевых точек зависимостей сведены в таблицу 4.2.1.



Рисунок 4.2.4 – Расчетные зависимости напряжения и тока обмотки возбуждения при работе ТУГП без учета импульсов сброса

Таблица 4.2.1

№ступени	1	2	3	4				
Без учета импульсов сброса								
I_{f0}, A	6,05	3,264	1,665	0,849				
I_{fK}, A	3,264	1,665	0,849	0,3				
U_{f0}, B	24,08	25,6	25,6	25,6				
$U_{f\mathrm{K}},\mathrm{B}$	12,8	12,8	12,8	-8,99				
Δti , мс	30,9	25,3	14,05	12,03				
С учетом импульсов сброса, $T_{\rm H}$ =5 мс, Δt =300 мкс								
I_{f0}, A	6,05	3,159	1,51	0,768				
I_{fK}, A	3,159	1,51	0,768	0,3				
U_{f0}, B	24,1	24,7	23,1	23,0				
$U_{f\mathrm{K}},\mathrm{B}$	12,57	11,8	12,7	9,51				
$\Delta t i$, мс	35,0	30,0	15,0	12,2				

Так как гасящие ячейки сбрасываются с интервалом 5 мс, то следует учитывать, что на интервале включенного состояния ключа короткозамыкателя напряжение на цепях возбуждения близко к нулю и гашение поля практически не идет. Кроме этого, моменты переключений ступеней привязаны к периоду следования импульсов сброса и кратны 5 мс. С учетом действия периодически включаемого короткозамыкателя получены расчетные данные, приведенные в таблице 4.2.4. Общее время гашения поля увеличилось до 97,6 мс из-за несовпадений требуемого и реального момента переключений а также 18 шт. импульсов сброса по 0,3 мс. Отмечено снижение среднего значения напряжения на клеммах обмотки возбуждения с -17,98 В до -17,09 В. Для K_{PU} =0,51 среднее значение напряжения на интервале работы первых трех ступеней должно быть - 19,07 В (без учета работы последней ступени и короткозамыкателя в начальный момент).

4.2.3 Экспериментальная проверка установки и оценка ее работы

На рисунке 4.2.5 приведены осциллограммы тока и напряжения на выводах ТУГП, полученные в ходе эксперимента, записанные осциллографом и обработанные в пакете Microsoft Excel.



Рисунок 4.2.5 – Экспериментальные осциллограммы тока и напряжения на

выводах ТУГП

Напряжение на выводах ТУГП (рисунок 4.2.5) состоит из четырех больших экспонент, что соответствует четырем гасящим ступеням. Переключение между ступенями происходит четко. В таблице 4.2.2 произведено сравнение расчетных (таблица 4.2.1) и экспериментальных данных.

№ступени	1		2		3		4	
Источник/ параметр	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
I_{f0}, A	6,05	5,7	3,159	3,3	1,51	1,6	0,768	0,7
I_{fK} , A	3,159	3,3	1,51	1,6	0,768	0,7	0,3	0,3
U_{f0}, B	24,1	22,4	24,7	26,2	23,1	26,2	23,0	23,6
$U_{f\mathrm{K}},\mathrm{B}$	12,57	14,8	11,8	14,2	12,7	13,0	9,51	12,0
Δt_i , MC	35,0	31,0	30,0	40,1	15,0	30,1	12,2	17,4
K _{PU}	0,493	0,55	0,477	0,541	0,509	0,438	0,39	0,429

Таблица 4.2.2

Падение напряжения на цепи короткозамыкателя при токе 6 А составило 2 В, ток обмотки возбуждения в предшествующем режиме – 6,0 А. Длительность работы короткозамыкателя при блокировании дуги – 6,01 мс. К моменту отключения ключа короткозамыкателя ток снизился до 5,7 А. Так как установка до проведения данного эксперимента уже находилась в работе, то температура обмотки возбуждения оказалась выше 20 °C, для которой велся расчет. Это привело к увеличению сопротивления обмотки возбуждения, и, как результат, уменьшению тока предшествующего режима. По расчету, за время работы короткозамыкателя ток снижается в 0,945 раза, по результатам эксперимента – в 0,95 раз, что соответствует данным расчета.

С учетом небольших отклонений, гасящие ступени переключаются при значениях тока, близких к расчетным (таблица 4.2.2). Это подтверждает правильность расчетов. Общее время снижения тока до 0,3 А составило 126 мс, что больше расчетного значения 97,6 мс. Также отмечено несоответствие длительности

работы ступеней в сторону увеличения. Это объясняется неточностью получения и применения характеристик намагничивания использованного генератора (зависимости постоянных времени генератора от тока обмотки возбуждения). Так как основной характеристикой исследуемого тиристорного устройства гашения поля является ВАХ, которая выдерживается на заданном уровне, то несоответствие времен не является недостатком данного образца устройства. На интервале работы 4 шт. ступеней среднее значение напряжения составило -17,5 В (расчет -17,09 В, отклонение +2,4%), на интервале первых трех ступеней, где идет стабилизация напряжения, -17,8 В (расчет -19,07 В, отклонение -6,6%). Полученные значения напряжений практически соответствуют расчетным, что тоже подтверждает заложенные в устройство параметры и приведенные ранее теоретические положения. На рисунке 4.2.6 приведены ВАХ ТУГП, полученные в результате расчета и эксперимента. Вид характеристики в целом соответствует результатам приведенных в п. 2.3. Небольшое несоответствие связано исследований. погрешностями измерений и несовершенством алгоритма аппроксимирования в пакете Excel..



Рисунок 4.2.6 – Расчетная и экспериментальная вольт-амперные характеристики тиристорного устройства гашения поля

В ходе эксперимента проверен алгоритм работы устройства. Приведенные на рисунке 4.2.7 осциллограммы токов резисторов гасящих цепей №№1...4 подтверждают выполнение описанного в п.п. 2.1–2.3 алгоритма формирования ВАХ: на всем интервале токов работает гасящая цепь №1, а гасящая цепь №4 подключается к выходу ТУГП только при самых больших расчетных токах.



Рисунок 4.2.7 – Осциллограммы токов гасящих резисторов, тока и напряжения на в цепи обмотки возбуждения

Отдельно проверено отсутствие зажигания дуги в контактной системе контактора К1 (рисунок 4.1.3). При всех операциях визуально отмечено отсутствие зажигания дуги в контактной системе. Этот факт также косвенно подтверждается наличием интервала с нулевым значением напряжения в самом начале работы

устройства (рисунок 4.2.5). Для проверки работы цепи короткозамыкателя эта цепь была отключена. Вывод из работы короткозамыкателя привел к зажиганию дугового разряда и полному блокированию переключений гасящих цепей, что соответствует описанию работы устройства и исследованиям в п. 3.3.

4.3 Экспериментальные исследования некоторых свойств и характеристик тиристорного устройства гашения поля

4.3.1 Сравнительные испытания различных способов гашения поля

Разработанная и созданная экспериментальная установка (п. 3.1) позволяет исследовать различные способы гашения поля: гашение на линейное сопротивление резистора самосинхронизации R_{CC}, гашение на нелинейное сопротивление имитатора варистора и гашение с помощью ТУГП. Осциллограммы тока обмотки возбуждения, полученные в результате опытов гашения поля по разным способам приведены на рисунке 4.3.1.



Рисунок 4.3.1 – Осциллограммы тока обмотки возбуждения при разных способах

гашения поля

По рисунку 4.3.1 видно, что разработанное устройство на интервале работы первых трех гасящих ступеней (6...0,7 A) обеспечивает такую же скорость снижения тока как и при применении имитатора варистора. Уменьшение скорости снижения тока при $i_f(t) < 1$ A обусловлено тем, что наблюдается задержка в отключении ступени №3 и на интервале работы последней ступени и уже нет стабилизации напряжения. Кроме этого, среднее напряжение на ТУГП (-17,8 B) меньше остаточного напряжения на имитаторе варистора (-20 B, рисунок 4.3.2), что ведет к снижению скорости падения тока. Распространенный в отечественных и зарубежных системах возбуждения способ гашения на линейное сопротивление R_{CC} существенно проигрывает по динамике процесса, что соответствует теории (гл. 1). По результатам эксперимента получены времена снижения тока до 0,3 A: ТУГП – 126 мс, «Варистор» – 100 мс, « R_{CC} » – 221 мс. Т.е. экспериментально исследованное устройство, при 4 шт. гасящих цепей и K_{Π} =2, обеспечивает снижение времени гашения поля в 1,75 раза по сравнению с R_{CC} при сохранении одинакового уровня перенапряжений (рисунок 4.3.2).



Рисунок 4.3.2 – Осциллограммы напряжения на обмотке возбуждения при различных способах гашения поля

Увеличение остаточного напряжения на имитаторе варистора с 20 до $K_{\Pi}U$ ном=25,6 В привело к сокращению времени снижения тока с 100 мс до 96,8 мс, хотя ожидаемое, в соответствии с изменением величины напряжения, время должно быть 84,6 мс. Факт несоответствия расчетной и полученной в ходе эксперимента длительности процесса подтверждает негативное действие демпфирующих контуров. Ожидается, что увеличение числа гасящих ступеней до 10 шт. позволит также снизить время гашения поля и приблизить параметры ТУГП к способу с варистором. Соотношение динамик процессов снижения тока возбуждения (рисунок 4.3.1) подтверждается и осциллограммами напряжения статора генератора (рисунок 4.3.3).



Рисунок 4.3.3 – Осциллограммы зависимостей напряжения статора генератора при различных способах гашения поля

Как и в случае зависимостей тока, исследование осциллограмм напряжения статора генератора (рисунок 4.3.3) указывает на хорошие характеристики ТУГП – в течении первых 100 мс процесса гашения поля, соответствующих длительности работы имитатора варистора, напряжение статора генератора снижается с одинаковой скоростью что для ТУГП, что для опыта с имитатором варистора. Таким образом, даже при 4 шт. гасящих ступенях, ТУГП не хуже имитатора

варистора, обладающего более нелинейной характеристикой чем реальные устройства.

Уменьшение пульсаций в напряжении ТУГП (установлен K_{PU} =0,8) привело к увеличению времени снижения тока до 0,3 A с 126 мс до 176 мс. Но, на интервале снижения тока до $I_{f0}K_{PU}{}^3$ =6,4·0,8³=3,26 A длительность работы имитатора варистора (32,8 мс) и первых трех ступеней ТУГП (34,8 мс) оказались практически одинаковыми (δ =5,7%), не смотря на то, что среднее напряжение на ТУГП (21,4 В) оказалось меньше чем на имитаторе варистора (25,6 В). Это качественно подтверждает теоретические результаты, полученные в п 3.2.2, заключающиеся в том, что с помощью ТУГП можно получить динамику процесса гашения поля лучше чем при применении варисторов и АГП.

4.3.2 Экспериментальное исследование зависимости времени гашения поля от частоты следования импульсов

В п. 3.3 была аналитически оценена зависимость времени снижения тока обмотки возбуждения *t*_{DE} от частоты следования импульсов. Отмечалось, что есть сложности в точном аналитическом определении этой зависимости из-за вероятностного характера. Взаимосвязь времени снижения тока обмотки Ти повторения возбуждения OT импульсов сброса периода получена экспериментально в ходе серии опытов. Результаты опытов приведены в таблице 4.3.1 и на рисунке 4.3.4.

Таблица 4.3.1

<i>Т</i> _И , мс	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0	40,0	80,0	160,0
t_{DE} , MC	181	149	126	128	133	143	187	191



Рисунок 4.3.4 – Зависимость времени гашения от периода следования импульсов По результатам теоретических исследований, приведенных в п. 3.3.3, следует ожидать минимальное время гашения при периоде повторения импульсов в диапазоне 5..100 мс. Экспериментально выявлено достижение минимального времени гашения поля при периоде повторения импульсов 5 мс, что соответствует теоретической оценке.

4.4 Выводы

1. Для проведения экспериментальных исследований создана установка, позволяющая исследовать как работу самого тиристорного устройства гашения, так и процессов гашения поля синхронного генератора в общем. Приведено описание установки, ее характеристики, электрическая схема и алгоритм работы. Разработанный комплект оборудования позволил реализовать и исследовать различные схемы ТУГП и провести сравнение с другими способами гашения поля.

2. Применение разработанной оригинальной методики проведения опытов гашения поля позволило определить некоторые параметры синхронного генератора установки. Полученные параметры генератора применены для расчета параметров элементов и режима ТУГП.

3. Экспериментальная проверка работы ТУГП показала практически полное соответствие параметров устройства результатам расчета: вольтамперная характеристика выдерживается в заданных пределах, ступени переключаются вблизи заданных значениях тока, уровень перенапряжений не превышает заданное допустимое значение. По осциллограммам проверен алгоритм управления устройством и порядок работы гасящих цепей.

4. Так как одной из проблем известных устройств гашения поля отмечено зажигание дуги в коммутационном аппарате, то в ходе экспериментов проверено успешное блокирование зажигания дуги в контактной системе. При включенных штатных узлах и алгоритме ТУГП зажигание дуги не наблюдается. Исключение из работы короткозамыкателя, либо в алгоритме управления, либо из схемы привело к зажиганию дуги в контактной системе выключателя и срыву переключения гасящих цепей, что соответствует ожидаемому.

5. В ходе эксперимента выявлено несоответствие расчету длительностей работы гасящих ступеней. Это обусловлено неточным определением и применением нелинейной характеристики намагничивания магнитной системы генератора. Данный вопрос хотя и требует отдельной проработки, но к теме исследования работы тиристорного устройства напрямую не относится.

6. В главе 3 сделана попытка теоретически установить взаимосвязь между периодом повторения импульсов сброса и длительностью процесса снижения тока обмотки возбуждения. Экспериментальные исследования этой зависимости в целом подтверждают полученные теоретические результаты.

7. В связи с тем, что в экспериментальной установке предусмотрена реализация различных способов гашения поля, то проведены сравнительные испытания способов гашения поля на имитатор варистора, линейное сопротивление и с помощью ТУГП. Несмотря на всего 4 шт. гасящих ступени ТУГП показало динамику процесса гашения поля не хуже способа с гашением на варисторе. В области малых токов, где ТУГП не обеспечивает стабилизацию напряжения, скорость снижения тока возбуждения получилась меньше, что обусловлено небольшим числом ступеней. 8. Сравнение зависимостей напряжения статора генератора от времени для опытов с ТУГП и «варистором» на интервале времени работы последнего 0...100 мс показывает отсутствие преимуществ способа гашения поля с использованием варистора в качестве гасящего элемента.

9. Опыт гашения поля на линейное сопротивление показал существенные преимущества способов гашения поля на варистор и с помощью ТУГП.

10. По результатам экспериментов разработанное тиристорное устройство гашения поля полностью выполняет заложенные функции и обеспечивает заданные характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной исследовательской работы получены теоретические знания, направленные на повышение эффективности процесса гашения поля, расширения функциональных возможностей, увеличения эксплуатационного ресурса и повышения надежности систем возбуждения синхронных генераторов. Предложенный и исследованный способ формирования синтезированной вольтамперной характеристики средствами силовой электроники может быть применен и в других электротехнических устройствах. Основные результаты диссертационного исследования:

1. Предложен новый принцип формирования управляемой вольтамперной характеристики устройства гашения магнитного поля синхронного генератора, позволяющий, за счет ступенчатого изменения эквивалентного сопротивления устройства и числа параллельно включенных линейных резисторов, получить заданную ВАХ и снизить время гашения магнитного поля.

2. Получено теоретическое описание электромагнитных процессов в контуре обмотки возбуждения В различных режимах синхронного генератора, отличающееся тем, что учтена работа тиристорного устройства гашения магнитного поля, в результате чего определены режимы элементов устройства, установлено влияние параметров и настроек тиристорного устройства на динамику процесса гашения магнитного поля синхронного генератора, найдены оптимальные значения параметров устройства, обеспечивающие минимальное время гашения магнитного поля, выявлены критические параметры режима, влияющие на выбор элементов устройства.

3. Впервые применен алгоритм управления гасящими цепями устройства гашения магнитного поля, построенный на основе системы двоичного исчисления, многократно увеличивающий число формируемых ступеней в вольтамперной характеристике устройства, что повышает качество синтезирования ВАХ.

4. Проработаны вопросы бездуговой коммутации цепей возбуждения синхронного генератора с применением средств силовой электроники, определены

168

критерии блокирования дуги, предложены схемотехнические решения, проверенные в ходе эксперимента на физической модели.

5. Рассмотрены вопросы обеспечения устойчивости коммутации тиристоров гасящий цепей и надежности работы тиристорного устройства гашения магнитного поля. В соответствии с найденными критериями получены схемные решения и расчетные выражения для определения параметров элементов устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационный обзор «Единая энергетическая система России: промежуточные итоги» (оперативные данные). Сентябрь 2021 года. – Текст: электронный // Системный оператор единой энергетической системы: [сайт]. – 2021. – URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2021/ups_review_0921.pdf (дата обращения 01.12.2021).

Коган, Ф.Л. Анормальные режимы мощных турбогенераторов / Ф.Л. Коган.
 – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 192 с. – Текст : непосредственный.

3. Рожкова, Л.Д. Электрооборудование станций и подстанций : учебник для учащихся энергетических и энергостроительных техникумов / Л.Д. Рожкова, В.С. Козулин [и др.]. – Москва : Энергия, 1975. – 705 с. – Текст : непосредственный.

4. ΓΟΟΤ 21558-2000. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Общие технические условия = Excitation system for turbogenerators, hydrogenerators and synchronous condensers : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен Постановлением Госстандарта Российской Федерации по стандартизации и метрологии от 25 июля 2002 г. №289-ст : введен взамен ГОСТ 21558-88 : дата введения 2003-07-01 / разработан Межгосударственным Техническим комитетом МТК 333 «Вращающиеся электрические AO машины», «Научноисследовательский институт электроэнергетики» (ВНИИЭ). - Москва : ИПК Издательство стандартов, 2003. - URL: https://docs.cntd.ru/document/1200030339 (дата обращения 16.08.2017). – Текст : электронный.

5. ГОСТ 21558-2018. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Общие технические условия = Excitation system for turbogenerators, hydrogenerators and synchronous condensers : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 января 2019 г. №9-ст : введен взамен ГОСТ 21558-2000 : дата введения 2019-06-01 / разработан Публичным акционерным обществом «Силовые машины — 3ТЛ

ЛМЗ. Электросила. Энергомашэкспорт» (ПАО «Силовые машины»). – Москва : Стандартинформ, 2019. – URL: https://allgosts.ru/29/160/gost_21558-2018.pdf (дата обращения 06.08.2019). – Текст : электронный.

6. Основные результаты функционирования объектов электроэнергетики в 2016 году. Итоги прохождения ОЗП 2016–2017 годов. Задачи на среднесрочную перспективу / Е.П. Грабчак, И.А. Байков, Е.А. Медведева, П.А. Дунаев ; под ред. заместителя министра энергетики Российской Федерации А.В. Черезова. – Текст: электронный // Министерство энергетики Российской Федерации. – Москва, 2017. – 104 с. – URL: https://minenergo.gov.ru/view-pdf/2065/78487 (дата обращения 28.11.2021).

7. Самородов, Ю.Н. Причины и последствия аварий и отказов турбогенераторов / Ю.Н. Самородов. – Текст : электронный // Энергия единой сети. – 2014. – №2(14). – С. 70–80. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21773359 (дата обращения 07.12.2021).

8. Коган, Ф. Л. О причинах, способствовавших выбросу агрегата в машинный зал Саяно-Шушенской ГЭС / Ф.Л. Коган. – Текст : электронный // Научно-практическая конференция «Повышение эффективности системы управления безопасностью ГЭС» : сборник материалов : часть 1 ; г. Москва, 19-20 мая 2011 г. / Разрушение гидроагрегата №2 Саяно-Шушенской ГЭС: причины и уроки. – Москва : НП «Гидроэнергетика России», 2013. – С. 253–259. – URL: http://lib.hydropower.ru/books/doc_00031387.pdf (дата обращения 19.09.2021).

9. Брон, О.Б. Автоматы гашения магнитного поля / О.Б. Брон. – Москва – Ленинград : Госэнергоиздат, 1961. – №34 – 138 с. – (Библиотека по автоматике). – Текст : непосредственный.

10. Кукушкин, Д.В. Способ гашения магнитного поля обмотки возбуждения вращающегося возбудителя / Д.В. Кукушкин. – Текст: электронный // Завалишинские чтения 18 ; Санкт-Петербург 16-20 апреля 2018 г. : сборник докладов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2018. – С. 133–137. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=36270568 (дата обращения 06.12.2021)

11. Богачков, М.Л. Сравнение способов гашения поля синхронных генераторов : [статья] / М.Л. Богачков, В.В. Кичаев, Е.Н. Попов. – Текст : электронный // Помощничек : Мои конспекты. – URL: https://mykonspekts.ru/2-107186.html (дата обращения 14.08.2021).

12. Xianming, Ch. New Alternating current De-excitation for Large Hydraulic Generators / Chen Xianming, Wang Wei, Lu Hongshui, Liu Guohua, Zhu Xiaodong. – DOI 10.1109/ICPST.2008.4745254. – Текст : электронный // 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, 12-15 Oct. 2008. – IEEE, 2009. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/4745254 (дата обращения 02.07.2019).

13. Об утверждении требований к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов и о внесении изменений в Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утвержденные приказом Минэнерго России от 19 июня 2003 г. N 229 : приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 13 февраля 2019 г. № 98 // ИПП Гарант (дата обращения 4.09.2020). – URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72160332/. Текст : электронный.

14. требований Об утверждении к обеспечению надежности электроэнергетических безопасности систем, надежности И объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем и объектов электроэнергетики» : приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 12 июля 2018 г. № 548 // Кодификация РФ (дата обращения 4.09.2020). - URL: https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minenergo-Rossii-ot-12.07.2018-N-548/. Текст : электронный.

15. Глебов, И.А. Системы возбуждения синхронных генераторов с управляемыми преобразователями / И.А. Глебов ; Институт электромеханики, Академия наук СССР. – Москва, Ленинград : издательство академии наук СССР, 1960. – 336 с. – Текст : непосредственный.

16. СТО 59012820.29.160.20.001-2012 Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов : отраслевой стандарт : издание официальное : утвержден и введен Приказом акционерного общества «Системный оператор Единой энергетической системы» от 05 сентября 2019 № 259 : дата введения 05.09.2019 / разработан акционерным обществом «Системный оператор Единой энергетической системы». – Москва: АО «Системный оператор единой энергетической системы», 2019. – 27 с. – URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto_es_aer_sa_2019.pdf. – Текст : электронный.

17. ANSI/IEEE Std. 421.1-1986. IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines введен American National Standarts Institute 1986 : разработан Switchgear Committee of the IEEE Power Engineering Society. – USA, New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1986. – Текст : непосредственный.

18. Правила устройства электроустановок: все действующие разделы и главы шестого и седьмого изданий. – Москва : ЭНАС, 2019.– 672 с. – ISBN 978-5-4248-0162-4. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/173340 (дата обращения: 10.01.2022). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

19. ГОСТ ІЕС 60034-1-2014 Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики : издание официальное : утвержден и введен Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 мая 2015 г. №402-ст : дата введения 2016-0-01 / разработан Федеральным государственным бюджетным образовательным профессионального учреждением высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭМ») Федеральным И государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации И сертификации в машиностроении» (ВНИИНМАШ). – Москва: Стандартинформ,

2015. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200120650/titles/10DIR (дата обращения 06.08.2019). – Текст : электронный.

20. Гольдштейн, М.Е. Вентильные системы возбуждения синхронных генераторов: учебное пособие / М.Е. Гольдштейн ; Южно-Уральский государственный университет. – [3-е изд., перераб.]. – Челябинск : Издательство ЮУрГУ, 2001. – 100 с. – Текст : непосредственный.

21. Xu, Q. Design of Static Self Shunt Excitation System for Giant Hydro Generator / Qipin Xu, Yixiang Shao, Qiantao Huo, Shaoxing Zhao. – DOI: 10.1109/IFEEC.2013.6687541. – Текст : электронный // NARI Technology Development Co. Ltd State Grid Electric Power Research Institute Nanjing, China. – IEEE, 2013. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/6687541 (дата обращения 12.07.2019).

22. Степанов, В.М. Анализ конструктивных схем систем возбуждения синхронных генераторов, работающих в составе единой энергосистемы / В.М. Степанов, Д.А. Карпунин. – Текст : электронный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула, 2019. – №11. – С. 27–32. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41662448 (дата обращения 06.02.2021).

23. Вольдек, А.И. Электрические машины: учебник для студентов высш. техн.
учебн. заведений / А.И. Вольдек. – [3-е изд., перераб.]. – Ленинград : Энергия, 1978.
– 832 с. – Текст : непосредственный.

24. Глебов, И.А. Системы возбуждения мощных синхронных машин / И.А. Глебов. – Ленинград : Наука. Ленинградское отделение, 1979. – 314 с. – Текст : непосредственный.

25. Li, J. Design and Application of Modern Synchronous Generator Excitation Systems / Jicheng Li. – DOI:10.1002/9781118841006. – Китай : China Electric Power Press, 2019. – ISBN:9781118841006. – Текст : электронный.

26. ГОСТ 183-74 Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия = Rotating electrical machinery. General specifications : издание официальное

: утвержден и введен Постановлением Государственного комитета стандартов

Совета Министров СССР от 27 декабря 1974 № : дата введения 1976-01-01. – Москва: Издательство стандартов, 1993. – URL: https://docs.cntd.ru/document /1200004973 (дата обращения 06.08.2019). – Текст : электронный.

27. **Прокудин, А.В.** Снижение времени аварийного гашения поля синхронных машин с системами самовозбуждения / А.В. Прокудин. – Текст : непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2011. – Вып. 15. – №15(232). – С. 22–24.

28. **Nuno, N.** Brushless excitation of synchronous generators: study of models and control optimization / Nicolau Nuno // Tecnico. – Португалия, Ulisboa, 2014. – URL: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/281870113703373/resumo.pdf. – Текст : электронный

29. **Rebollo, E.** Improved high-speed de-excitation system for brushless synchronous machines tested on a 20 MVA hydro-generator / Emilio Rebollo, Francisco R. Blanquez, Carlos A. Platero, Francisco Blazquez, Marta Redondo. – DOI : 10.1049/iet-epa.2014.0313 – Текст : электронный. // IET Electric Power Applications. – Испания, Мадрид : IET Journals, 2014. – C. 405–411. – URL: https://ietresearch.onlinelibrary .wiley.com/doi/10.1049/iet-epa.2014.0313 (дата обращения 23.02.2019).

30. Стандарт **IEEE 421.6-2017.** IEEE Recommended Practice for the Specification and Design of Field Discharge Equipment for Synchronous Machines : разработан The Energy Development and Power Generation Committee, IEEE USA : дата введения 2017-03-23. – USA, IEEE, 2017. – URL: https://www.myfreestandards.com/ieee-recommended-practice-for-the-specification-and-design-of-field-discharge-equipment.html (дата обращения 16.08.2021). – Текст : электронный.

31. Агамалов, О. Н. Бесщеточные системы возбуждения турбогенераторов ЮУ АЭС: опыт и вопросы эксплуатации / О.Н. Агамалов. – Текст : электронный // Международная научно-техническая конференция «Современные системы возбуждения для нового строительства и реконструкции электростанций. Опыт наладки и эксплуатации систем возбуждения нового поколения» : материалы МНТК 10–15 мая 2004 г., Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург : ПЭИПК Минэнерго РФ, 2004. – С. 210–222. – URL: https://777russia.ru/book/uploads /PA3HOE/Электродвигатели и генераторы/CB.pdf (дата обращения 16.08.2021).

32. Глебов, И.А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин / И.А. Глебов ; ВНИИЭлектромаш, Академия наук СССР. – Ленинград : Наука, 1988. – 332 с. – Текст : непосредственный.

33. Шевченко, В.М. Внедрение тиристорных систем возбуждения нового поколения на электростанциях ОАО «Новосибирскэнерго» / В.М. Шевченко, Н.А. Ваккер. – Текст : электронный // Первая энергосервисная компания : [сайт]. – 2005. – URL: http://www.zao-ec.ru/index.php?page=11&p=&id=1 (дата обращения 07.09.2019).

34. Гольдштейн, М.Е. Особенности гашения поля турбогенераторов с системой самовозбуждения без АГП. / М.Е. Гольдштейн, А.С. Шумилов. – Текст : непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2001. – Вып. 1 – №4(04). – С. 44–48.

35. Разработка и исследование системы возбуждения генератора с тиристорным устройством гашения поля и микропроцессорным управлением : Отчет о НИР (заключительный) : №4932р/7318 ; рег. № 01.2.007 08038 / рук. М.Е. Гольдштейн ; исполн.: А.Н. Андреев, А.В. Прокудин / ООО НПП «Электрические станции, сети и системы». – Челябинск : НПП ЭССиС, 2010 – 128 с. – Текст : непосредственный.

36. **Прокудин, А.В.** Сравнительные испытания тиристорного устройства гашения поля. – Текст : непосредственный / Электроэнергетика глазами молодежи : научные труды III международной научно-технической конференции : сборник статей. В 2 т. // УрФУ. – 2012. – Т.1 – С. 265–268.

37. **Taborda, J.** Modern technical aspects of Field Discharge equipment for excitation systems / Jose Taborda. – DOI:10.1109/ PES.2008.4596955. – Текст : электронный // Power and Energy Society General Meeting, Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. – 2008. – C. 1–8. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/4596955 (дата обращения 15.07.2019).

38. Безруких, П.П. Проверка и испытание вентильных систем возбуждения синхронных машин / П.П. Безруких, С.Н. Покровский. – Москва : Энергия, 1975. – 184 с. : ил. – Текст : непосредственный. 39. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов / Ю.С. Забродин. – Москва : Высшая школа, 1982. – 496 с. : ил. – Текст : непосредственный.

40. Системы возбуждения и регулирования мощных энергетических агрегатов
/ под редакцией В. В. Семенова ; Академия наук СССР. – Ленинград : Наука, 1979.
– 184 с. – Текст : непосредственный.

41. Глебов, И.А. Электромагнитные процессы систем возбуждения синхронных машин / И.А. Глебов ; ВНИИЭлектромаш. – Ленинград : Наука, 1987.
– 344 с. – Текст : непосредственный.

42. Прокудин, А.В. Особенности проектирования силовой части тиристорной системы самовозбуждения синхронного / А.В. Прокудин, Р.Г. Касимов. – Текст : непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2004. – Вып. 4. – №1(30). – С. 123–126.

43. **Таубес, И.Р.** Релейная защита мощных турбогенераторов / И.Р. Таубес. – Москва : Энергоиздат, 1981. – Вып. 521. – 88с. – (Библиотека электромонтера). – Текст : непосредственный.

44. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации . — Москва : ЭНАС, 2014. — 264 с. — ISBN 978-5-4248-0041-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/104554 (дата обращения: 12.01.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

45. Сборник директивных материалов по эксплуатации энергосистем : Электротехническая часть / Минэнерго СССР. [2-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 632 с. – Текст : непосредственный

46. РД 34.45.501-88. Типовая инструкция по эксплуатации генераторов на электростанциях = Model Guidelines for Operation of Generators at Electric Power Generating Stations : руководящий документ : издание официальное : утвержден и введен Главным научно-техническим управлением энергетики и электрификации 28 марта 1988 г. : дата введения 1989-01-01 / разработан Всесоюзным научно-исследовательским институтом электроэнергетики (ВНИИЭ). – Москва:

Союзтехэнерго, 1989. – 121 с. – URL: https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4294844/ 4294844721.htm (дата обращения 07.08.2020). – Текст : электронный.

47. Патент № 134373 Российская Федерация, МПК Н02Р 9/12 (2006.01). Устройство гашения поля генератора : № 2013126028/07 : заявл. 05.06.2013 : опубл. 10.11.2013 / С.В. Лопаткин, А.Г. Данилов. – URL: https://patents.google.com/patent/RU134373U1/ru (дата обращения 01.01.2022). – Текст : электронный.

48. Павлов, И.В. К вопросу о гашении магнитного поля синхронного генератора с помощью вилитового сопротивления / И.В. Павлов – Текст : непосредственный // Известия ТПИ. – Томск, 1952 г. – Т. 72 – С. 185-189.

49. **Зи, С. М.** Физика полупроводниковых приборов / С.М. Зи. — Москва : Мир, 1984. — Т. 1. — 456 с. — Текст : непосредственный.

50. Herrmann: SELEMIT – Selenium surge suppressors for all power ranges. – Текст : электронный. // Herrmann : [сайт]. – URL: http://www.herrmann-rectifier.com/selen/pdf/si-usp-1-1.pdf (дата обращения 18.12.2021).

51. DEAN technology. Surge Suppressor Assemblies. SD Series. – Текст : электронный. // DEAN technology : [сайт]. – URL: https://www.deantechnology.com /catalog/ cke/selenium/surge-suppressor-assemblies/sd (дата обращения 18.12.2021).

52. DALI Technical Sales: каталог HVCA и CKE. – Текст : электронный. // DALI Technical Sales : [сайт]. – 2007. – URL: http://www.dalitech.com/Resources/ HVCA_CKE_Catalog_2007.pdf (дата обращения 18.12.2021).

53. **Tan, Q.** Improvement of the De-excitation Methods for Large-Capacity Synchronous Generator / Qin-yue TAN, Lin JIANG, Shao-rong WANG3, J. W. SPENCER, Xiao-qing WU HE. – DOI:10.12783/dteees/epee2017/18176. – Текст : электронный // 2017 2nd International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering (EPEE 2017). – Китай, Шанхай, 2017. – С. 506–511. – URL: http://dpi-proceedings.com/index.php/dteees/article/download/18176/17682 (дата обращения 12.02.2019).

54. **Chen, X.** New De-excitation Method for Large Hydraulic Generator / Xianming Chen, Wei Wang, Hongshui Lu, Guohua Liu, Xiaodong Zhu. – DOI : 10.5370/JICEE.2011.1.2.234. – Текст : электронный. // Journal of International Council on Electrical Engineering. – Англия, Лондон : Informa UK Limited, 2011. – Vol. 1. – Issue 2. – С. 234–240. – URL: https://www.tandfonline.com/doi/abs/ 10.5370/JICEE.2011.1.2.234 (дата обращения 23.12.2021).

55. **Mutukutti, R.** Field breaker tripping options for generator static excitation systems with AC field circuit breakers - A case study / Ravi Mutukutti, David Apps, Charles Henville – DOI : 10.1109/PES.2010.5589566. – Текст : электронный. // IEEE PES General Meeting , 25-29 July 2010. – USA, Minneapolis : IEEE, 2010. – C. 1–6, – URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/5589566 (дата обращения 23.12.2021).

56. Патент № С№203840251U Китай, МПК Н02Р 9/12 (2006.01). De-excitation circuit of synchronous generator : заявл. 18.04.2014 : опубл. 17.09.2014 / Ли Чжицзюнь, Ли Мяо, Го Цзя, Гао Пин ; заявитель Хайбэйский технологический университет. – URL: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/ description?CC=CN&NR=203840251U (дата обращения 01.01.2022). – Текст : электронный.

57. Патент № С№ С№ 29107А Китай, МПК Н02Р 9/12 (2006.01). Synchronous generator de-excitation circuit : заявл. 18.04.2014 : опубл. 06.04.2016 / Ли Чжицзюнь, Ли Мяо, Го Цзя, Гао Пин ; заявитель Хайбэйский технологический университет. – URL: https://patents.google.com/patent/CN103929107A/en (дата обращения 01.01.2022). – Текст : электронный.

58. Донг, Ц. Тонкое моделирование и симуляция самошунтирующей системы статического возбуждения / Донг Цзючен, Ван Ситянь, Лю Минсин, Чжан Чэньсян. – Текст : электронный. // Electric Power Automation Equipment. – Китай, 2016. – №5. – Vol. 36. – С. 112–115,126. – URL : http://www.epae.cn/ch/reader /create_pdf.aspx?file_no=20160519&year_id=2016&quarter_id=5&falg=1 (дата обращения 01.01.2022).

59. **Прокудин, А.В.** Определение оптимального числа ступеней тиристорного устройства гашения поля синхронного генератора / А.В. Прокудин, М.Е. Гольдштейн. – Текст : непосредственный // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. IV междунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 14-18 октября

2013 г. / Министерство образования и науки РФ, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ). – Новочеркасск: Лик. – 2013. – Т.2 – С. 154–157.

60. Патент № СN104037732А Китай, МПК Н02Р 9/12 (2006.01), Н02Н 7/06 (2006.01). Метод девозбуждения на основе многоступенчатой схемы для больших генераторных установок : заявл. 06.06.2014 : опубл. 10.09.2014 / Сюй Ципинь, Ян Мин, Хуан Цянь, Сюй Цици, Сюй Ронг, Гэн Минбяо ; заявитель Nari Technology Co Ltd.. – URL: https://patents.google.com/patent/CN103929107A/en (дата обращения 01.01.2022). – Текст : электронный.

61. Патент № 2282925 Российская Федерация, МПК Н02Р 9/14 (2006.01), Н02Н 7/09 (2006.01). Способ и устройство гашения магнитного поля обмотки возбуждения синхронной машины (варианты) : № 2005111665/09 : заявл. 19.04.2005 : опубл. 27.08.2006 / Е.Я. Крекер, М.Е. Гольдштейн, А.Н. Андреев ; Государственное образовательное заявитель учреждение высшего образования "Южно-Уральский профессионального государственный 20 URL: университет". Москва: ФИПС, 2006. c. https://patents.google.com/patent/RU2282925C1/ru (дата обращения 01.01.2022). -Текст : электронный.

62. Патент № 2699044 Российская Федерация, МПК Н02Р 9/12 (2006.01), Н01Н 71/28. Контактор ускоренного гашения поля ротора синхронной машины : № 2018144751 : заявл. 15.12.2018 : опубл. 03.09.2019 / Г.Р. Кравцов. – Москва: ФИПС, 2019. – 16 с. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2699044C1_20190903 (дата обращения 01.01.2022). – Текст : электронный.

63. Патент № С№203883729U Китай, МПК Н02Р 9/12 (2006.01). Quick deexcitation structure of power generator : заявл. 20.06.2014 : опубл. 15.10.2014 / Мао Цзычжэнь, Гун Юйхун, Цзя Цзянтао, Сюй Чуньли, Ли Хехэ ; заявитель North China Power Engineering Co Ltd of China Power Engineering Consulting Group. – URL: https://patents.google.com/patent/CN203883729U/en (дата обращения 01.01.2022). – Текст : электронный.
64. Патент № 191501 Российская федерация, МПК Н02Р 9/12, Н02Р 9/30, Н02Н 7/06. Устройство гашения магнитного поля синхронной машины : № 2019107099 : заявл. 12.03.2019 : опубл. 08.08.2019 / А.В. Прокудин, М.Е. Гольдштейн ; заявитель ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ). – 9 с. Текст : непосредственный.

65. Гольдштейн, М.Е. Устройство гашения поля – выключатель с вольтамперной характеристикой, формируемой тиристорами / М.Е. Гольдштейн, Е.Я. Крекер. – Текст : непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2005. – №9 (49). – С. 24–26.

66. Гольдштейн, М.Е. Схемы цепей постоянного тока системы самовозбуждения синхронного генератора / М.Е. Гольдштейн, Е.Я. Крекер, А.В. Прокудин. – Текст : непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2004. – Вып. №5. – №4(33). – С. 101-105.

67. Крекер, Е.Я. Способ и устройство гашения поля синхронного генератора / Е.Я. Крекер, А.Н. Андреев. – Текст : непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 10. – №26. – С. 21–25.

68. **Прокудин, А.В.** Измерение некоторых параметров синхронного генератора методом гашения поля с использованием штатных элементов систем возбуждения / А.В. Прокудин, М.Е. Гольдштейн. – Текст : непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т.19. – №4. – С. 26–32

69. Гольдштейн, М.Е. Тиристорное устройство гашения поля синхронного генератора с системой самовозбуждения / М.Е. Гольдштейн, А.В. Прокудин. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2013. – №10. – С. 41–45

70. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы : учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов / С.А. Ульянов. – Москва : Энергия, 1970. – 415 с. – Текст : непосредственный.

71. Бей, Ю.М. Тяговые подстанции : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Ю.М. Бей, Р.Р. Мамошин, В.Н. Пупынин, М.Г. Шалимов. – Москва : Транспорт, 1986. – 319 с. – Текст : непосредственный.

72. Электрическая часть станций и подстанций : учебник для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков, Е.Ф. Наяшкова [и др.] ; под. ред. А.А. Васильева. – Москва : Энергия. – 608 с. – Текст : непосредственный.

73. Гольдштейн, М.Е. Снижение дуговой нагрузки на выключатели в системах самовозбуждения / М.Е. Гольдштейн, А.В. Прокудин. – Текст : непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18. – №37(296). – С. 120–122

74. Патент № 2488940 Российская федерация, МПК Н02Р 7/14 (2006.01), H02P 9/30 (2006.01), H02J 7/14 (2006.01), H02H 7/09 (2006.01). Устройство для гашения магнитного поля при отключении обмотки возбуждения синхронной машины от источника питания : № 2012113013/07 : заявл. 03.04.2012 : опубл. 27.07.2013 / В.П. Гвоздев. – 8 с. – URL : https://www.freepatent.ru/patents/2488940 (дата обращения 01.01.2022). – Текст : электронный.

75. Патент № С№204967684U Китай, МПК Н02Р 9/12 (2006.01). Degaussing switch protection device : заявл. 22.09.2015 : опубл. 13.01.2016 / Wang Dawei, Li Yujun, Wang Jinrong ; заявитель DFEM Electric Control Equipment, DEC Dongfang Electric Match Co. – URL: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails /description?CC=CN&NR=204967684U (дата обращения 01.01.2022). – Текст : электронный.

76. Патент № 2211527 Российская федерация, МПК Н02Р 9/12 (2006.01). Устройство для гашения поля электрической машины : № 2001109415/09 : заявл. 06.04.2001 : опубл. 27.08.2003 / С.Л. Иванов, В.В. Кичаев, Е.Н. Попов, Ю.Л. Преснов, А.В. Станкевич. – 4 с. – URL : https://patents.google.com/patent /RU2211527C2/ru (дата обращения 01.01.2022). – Текст : электронный.

77. **Rebollo, E.** Use of Discharge Resistor to Improve Transient De-Excitation in Brushless Synchronous Machines / Emilio Rebollo, Carlos A. Platero, David Talavera, Ricardo Granizo. – DOI : 10.3390/en12132528 – Текст : электронный. // Energies 2019. – Базель, Швейцария : MDPI, 2019. – №12, вып. 2528. – 27 с. – URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/12/13/2528 (дата обращения 03.01.2022). 78. Авторское свидетельство № 736337 СССР, МПК Н02Р 9/12, Н02Ј 3/26. Способ симметрирования синхронного генератора в асинхронном режиме : №2572831/24-07 : заявл. 25.10.1977 : опубл. 25.05.1980 / Б.З. Грамм, Н.Н. Ефименко ; заявитель Сибирский научно-исследовательский институт энергетики. – 3 с. : ил. – Текст : непосредственный

79. ГОСТ Р 55602-2013. Аппараты коммутационные для цепи заземления тяговой сети и тяговых подстанций железных дорог. Общие технические условия = Switching devices forrailway traction network and power substations earthing. General specifications : национальный стандарт : издание официальное : утвержден и введен Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 сентября 2013 г. N 906-ст : введен впервые : дата введения 2014-06-01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью "ТрансТелеКом-Бизнес". – Москва : Стандартинформ, 2014. – https://docs.cntd.ru/document/1200104645 (дата обращения 16.12.2021). – Текст : электронный.

80. **Овечкин, Ю.А.** Полупроводниковые приборы / Ю.А. Овечкин. – Москва : Высшая школа, 1979. – 279 с. – Текст : непосредственный.

81. Конев, Ф.Б. Моделирование вентильных преобразователей на вычислительных машинах / Ф.Б. Конев ; под. ред. Б.М. Гуткина // АН СССР. Итоги науки и техники. Серия «Силовая преобразовательная техника». – Москва : ВИНИТИ, 1976. – Т.1. – С. 21–33 – Текст : непосредственный.

82. Анормальные режимы работы крупных синхронных машин /
Е.Я. Казовский, Я.Б Данилевич, Э.Г. Кашарский, Г.В. Рубисов. – Ленинград :
Наука, 1968. – 429 с. – Текст : непосредственный.

83. Переходные процессы в электроэнергетических системах : учебник для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов ; под. ред. И.П. Крючкова. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2008 – 416 с. : ил. – Текст : непосредственный.

84. **Ковач, К.П.** Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – Москва–Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. – 744 с. : ил. – Текст : непосредственный.

85. Стандарт ANSI/IEEE Std. C37.18-1979. IEEE Standard Field Discharge Circuit Breakers for Rotating Electric Machinery : введен American National Standarts Institute 1979-02-15 : разработан Switchgear Committee of the IEEE Power Engineering Society. – USA, New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1979. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/573175 (дата обращения 12.12.2021). – Текст : электронный.

86. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / под ред.
И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова ; [З-е изд. перераб. и доп.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 768 с. : ил. – Текст : непосредственный.

87. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов. – Москва : Энергия, 1964. – 704 с. : ил. – Текст : непосредственный.

88. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники : электрические цепи / Л.А. Бессонов ; [9-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Высшая школа, 1996. – Ч. 2. – 638 с. : ил. – Текст : непосредственный.

89. Крылова, И. А. Модель синхронного генератора с учетом насыщения магнитной цепи в среде Matlab/Simulunk для исследования автоматических регуляторов / И.А. Крылова, Б.В. Кавалеров, Е.А. Чабанов. – Текст : электронный // Вестник ПНИПУ: Электротехника, информационные технологии, системы управления. – Пермь : ПНИПУ, 2017. – № 24. – С. 178–191. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/model-sinhronnogo-generatora-s-uchetom-nasyscheniya -magnitnoy-tsepi-v-srede-matlab-simulink-dlya-issledovaniya-avtomaticheskih (дата обращения 01.01.2021).

90. ГОСТ 10169-77. Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний = 3-phase synchronous machines. Test methods : издание официальное : утвержден и введен Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 28 января 1977 г. № 233 : дата введения 1978-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1984. – 85 с. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200012458 (дата обращения 05.01.2022). – Текст : электронный.

91. Поляк, Н.А. Современные крупные двухполюсные турбогенераторы.
Электромагнитные характеристики / Н.А. Поляк. – Москва : Энергия, 1972. – 472 с.
: ил. – Текст : непосредственный.

92. Ципинь, С. Выбор резистора размагничивания турбогенератора / Сюй Ципинь, Ян Мин, Сюй Жун. – DOI:10.7500/AEPS201204207. – Текст : электронный. // Automation of Electric Power Systems. – Китай, 2013. – №6. – Vol. 37. – С. 125–134. – URL : http://www.aeps-info.com/aeps/article/pdf/201204207 (дата обращения 01.01.2022).

93. Хуторецкий, Г.М. Проектирование турбогенераторов / Г.М. Хуторецкий, М.И. Токов, Е.В. Толвинская. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1987. – 256 с. : ил. – Текст : непосредственный.

94. Силовая электроника : примеры и расчеты / Ф. Чаки, И. Герман,
И. Ипшич [и др.]; [пер. с англ.]. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 384 с. : ил. – Текст
: непосредственный.

95. Бедфорд, Б. Теория автономных инверторов / Б. Бедфорд, Р. Хофт ; [перевод с англ. под ред. И.В. Антика]. – Москва : Энергия, 1969. – 280 с. : ил. – Текст : непосредственный.

96. Горбачев, Г.Н. Промышленная электроника : учебник для вузов /
Г.Н. Горбачев, Е.Е. Чаплыгин ; под ред. В.А. Лабунцова. – Москва :
Энергоатомиздат, 1988. – 320 с. : ил. – Текст : непосредственный.

97. Справочник по преобразовательной технике / И.М. Чиженко,
П.Д. Андриенко, А.А. Баран [и др.]; под ред. И.М. Чиженко. – Киев : Техніка, 1978.
– 447 с. : ил. – Текст : непосредственный.

98. **Карташов, Р.П.** Тиристорные преобразователи частоты с искусственной коммутацией / Р.П. Карташов, А.К. Кулиш, Э.М. Чехет. – Киев : Техніка, 1979. – 152 с. – Текст : непосредственный.

99. Зиновьев, Г.С. основы силовой электроники : учебное пособие / Г.С. Зиновьев ; [изд. 3-е, испр. и доп.]. // Серия «Учебники НГТУ». – Новосибирск
: Издательство НГТУ, 2004. – 672 с. – Текст : непосредственный.

100. **Мартыненко, В.** Новые высокомощные диоды и тиристоры для промышленности, транспорта, энергетики / В. Мартыненко, Г. Чумаков. – Текст : электронный // Силовая электроника. – 2005. – №1. – С. 8–10. – URL: https://www.power-e.ru/pdf/2005 01 8.pdf (дата обращения 13.12.2021).

101. Горохов, В.А. Физические основы применения тиристоров в импульсных схемах / В.А. Горохов, М.Б. Щедрин. – Москва : Советское радио, 1972. – 304 с. – Текст : непосредственный.

102. Гомонова, А.И. Исследование триггерной схемы на четырехслойном p-n-p-n диоде / А.И. Гомонова, Л.Н. Кулумбетова, К.Я. Сенаторов. – Текст : непосредственный // Вестник московского университета. – 1962. – №1. – С. 46-54.

103. **Press, W.** Incomplete Gamma Function and Error Function, Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing / William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery. – New York : Cambridge University Press. – ISBN 978-0-521-88068-8. – Текст : непосредственный.

104. **Кремер, Н.Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика : учебник для вузов / Н.Ш. Кремер ; [2-е изд., перераб и доп.]. – Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с. – Текст : непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Листинг программы Mathcad для расчета зависимостей тока и напряжения на выводах ТУГП с учетом действия демпфирующих контуров

Исходные данные

Kpu := 0.51 Td0s := 0.406 Td0ss := 0.051 Tyd0 := 0.122 If0 := 6.4 Tf0 := 0.284 Kp := 2 Kc := 1 Rf := 1.99 $\sigma := \frac{Td0ss \cdot (Tf0 + Tyd0)}{Tf0 \cdot Tyd0}$ Расчет постоянных для каждой ступени Ступень ТКЗ: If $0s := \frac{Tf0}{Td0s}$ If $0ss := \frac{Tyd0}{Td0s}$ $\tau 0s := \frac{Td0s}{1.33}$ $\tau 0ss := Td0ss$ Ступень ТУГП-1: k := 1 $\tau \mathbf{lf} := \frac{\mathbf{Tf0} \cdot 0.75 \mathbf{Kpu}^{\mathbf{k}-1}}{\mathbf{Kpu}^{\mathbf{k}-1} + 2} \qquad \tau \mathbf{ls} := \mathbf{Tyd0} \cdot 0.75 + \tau \mathbf{lf} \quad \tau \mathbf{lss} := \frac{\sigma \cdot \tau \mathbf{lf} \cdot \mathbf{Tyd0}}{\tau \mathbf{lf} + \mathbf{Tyd0}}$ If 01s := $\frac{\tau 1 f}{\tau 1 s}$ If 01ss := $\frac{Ty d0.0.75}{\tau 1 s}$ Ступень ТУГП-2: **k** := 2 $\tau 2f := \frac{Tf0 \operatorname{Kpu}^{k-1}}{\operatorname{Kpu}^{k-1} + 2} \qquad \qquad \tau 2s := Tyd0 + \tau 2f \qquad \tau 2ss := \frac{\sigma \cdot \tau 2f \cdot Tyd0}{\tau 2f + Tyd0}$ If $02s := \frac{\tau 2f}{\tau^2 s}$ If $02ss := \frac{Tyd0}{\tau^2 s}$ Ступень ТУГП-3: k := 3 $\tau 3f := \frac{Tf0 \, Kpu^{k-1}}{Kpu^{k-1} + 2} \qquad \qquad \tau 3s := Tyd0 + \tau 3f \qquad \tau 3ss := \frac{\sigma \cdot \tau 3f \cdot Tyd0}{\tau 3f + Tyd0}$ If $03s := \frac{\tau 3f}{\tau 3s}$ If $03ss := \frac{Tyd0}{\tau 3s}$ Ступень ТУГП-4: k := 4 $\tau 4\mathbf{f} := \frac{\mathrm{Tf0}\,\mathrm{Kpu}^{k-1}}{\mathrm{Kpu}^{k-1} + 2} \qquad \qquad \tau 4\mathbf{s} := \mathrm{Tyd0} + \tau 4\mathbf{f} \qquad \tau 4\mathbf{ss} := \frac{\mathbf{\sigma}\cdot\tau 4\mathbf{f}\cdot\mathrm{Tyd0}}{\tau 4\mathbf{f} + \mathrm{Tyd0}}$ If $04s := \frac{\tau 4f}{\tau 4s}$ If $04ss := \frac{Tyd0}{\tau Ac}$ Ступень ТУГП-1 Rde1 := _______ Kc·Kmu⁰ Rde1 = 3.98Ступень ТУГП-2 $Rde2 := \frac{Rf \cdot Kp}{Kc \cdot Kpu^1}$ Rde2 = 7.80392

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (продолжение)

Ступень ТУГП-3
$$Rde3 := \frac{Rf \cdot Kp}{Kc \cdot Kpu^2}$$
 $Rde3 = 15.30181$
Ступень ТУГП-4 $Rde4 := \frac{Rf \cdot Kp}{Kc \cdot Kpu^3}$ $Rde4 = 30.00354$

При другом числе ступеней добавить/убавить

Расчет времени работы ступеней

Ступень ТКЗ
I0 := Kc

$$t(\tau 0s, \tau 0ss, If 0s, If 0ss, I0, Kpu) := | s \leftarrow 0$$

 $i \leftarrow I0$
while $s \le 0.007$ Фиксированное время работы ТКЗ
 $| i \leftarrow I0 \cdot \left(\frac{-s}{If 0s \cdot e^{\tau 0s}} + \frac{-s}{\tau 0ss} \right)$
 $s \leftarrow s + 0.00001$

t0 := t(
$$\tau 0s, \tau 0ss, If0s, If0ss, I0, Kpu$$
)
t0 = 0.00701
I1 := I0 $\cdot \left(\frac{-t0}{t0s}, \frac{-t0}{\tau 0s} + If0ss \cdot e^{-t0}\right)$
I1 = 0.94553
I1 - 6.4 = 6.05139

Ступень ТУГП-1

11=Кс, t0=0 Если ТКЗ не учитывается

$$\begin{split} t(\tau 1s,\tau 1ss,If01s,If01ss,I1,Kpu) \coloneqq & s \leftarrow 0 \\ & i \leftarrow I1 & \text{Конечное значение тока для ступени} \\ & \text{while } i \geq Kc\cdotKpu \\ & | i \leftarrow I1 \cdot \begin{pmatrix} \frac{-s}{If01s \cdot e} & \frac{-s}{\tau 1s} \\ If01s \cdot e^{\frac{-s}{\tau 1s}} + If01ss \cdot e^{\frac{-s}{\tau 1ss}} \end{pmatrix} \\ & s \leftarrow s + 0.00001 & \text{Шаг интегрирования, c} \end{split}$$

```
t1 := t(\tau1s,\tau1ss,If01s,If01ss,I1,Kpu)
t1 = 0.03089
I2 := Kc·Kpu
I2 = 0.51
I2 ·6.4 = 3.264
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (продолжение)

Ступень ТУГП-2

$$\begin{split} t(\tau 2s,\tau 2ss,If02s,If02ss,I2,Kpu) &\coloneqq & s \leftarrow 0 \\ i \leftarrow I2 & \text{ ние тока для ступени } \\ while & i \geq Kc\cdotKpu^2 & \text{ ние тока для ступени } \\ & i \leftarrow I2 \cdot \left(\frac{-s}{If02s \cdot e^{\frac{-s}{\tau 2s}} + If02ss \cdot e^{\frac{-s}{\tau 2ss}}} \right) \\ & s \leftarrow s + 0.00001 \\ s & , , & \text{ вания, } c \end{split}$$

t2 := t(
$$\tau$$
2s, τ 2ss,If02s,If02ss,I2,Kpu)
t2 = 0.02526
I3 := Kc·Kpu²
I3 = 0.2601
I3 · 6.4 = 1.66464

Ступень ТУГП-3

$$\begin{split} t(\tau 3s,\tau 3ss,If03s,If03ss,I3,Kpu) &\coloneqq & s \leftarrow 0 \\ i \leftarrow I3 & \Rightarrow \textit{moka dng cmyneho} \\ while & i \geq Kc \cdot Kpu^3 \\ & \left| \begin{array}{c} i \leftarrow I3 \cdot \left(\frac{-s}{If03s \cdot e^{\frac{-s}{\tau 3s}} + If03ss \cdot e^{\frac{-s}{\tau 3ss}} \right) \\ s \leftarrow s + 0.00001 \end{array} \right|_{s} \end{split}$$

t3 := t(
$$\tau$$
3s, τ 3ss,If03s,If03ss,I3,Kpu) I4 := Kc·Kpu³
t3 = 0.01405 I4 = 0.13265 I4·6.4 = 0.84897

Ступень ТУГП-4

$$\begin{split} t(\tau 4s,\tau 4ss,If04s,If04ss,I4,Kpu) &\coloneqq & s \leftarrow 0 \\ i \leftarrow I4 & \text{кри} \\ \text{while } i \geq \frac{0.3}{6.4} \\ & \left| \begin{array}{c} & \left(\frac{-s}{\tau 4s} + \frac{-s}{\tau 4ss} \right) \\ s \leftarrow s + 0.00001 \\ s \end{array} \right|_{s} & \text{сикс интегрирования, c} \end{split}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (продолжение)

```
t4 := t(\tau 4s, \tau 4ss, If04s, If04ss, I4, Kpu)
     t4 = 0.01203
   Время гашения поля: t0 + t1 + t2 + t3 + t4 = 0.08924
 t0 = 0.00701 t1 = 0.03089 t2 = 0.02526 t3 = 0.01405 t4 = 0.01203
 Моменты переключения ступеней
 tsw0 := t0 tsw1 := t0 + t1 tsw2 := tsw1 + t2 tsw3 := tsw2 + t3 tsw4 := tsw3 + t4
t := 0,0.0001..5
                                                                                                                 tsw0 = 0.00701
                                                                                                                 tsw1 = 0.0379
 i0(t) := (0 \le t < tsw0) \cdot 6.4 \cdot \left[ I0 \cdot \left( \frac{-t}{\tau 0s} + If0ss \cdot e^{\frac{-t}{\tau 0s}} \right) \right]
                                                                                                                 tsw2 = 0.06316
                                                                                                                 tsw3 = 0.07721
 i1(t) := (tsw0 \le t < tsw1) \cdot 6.4 \cdot \left[ I1 \cdot \left( \frac{-|t-tsw0|}{\tau 1s} + If01ss \cdot e^{\frac{-|t-tsw0|}{\tau 1ss}} \right) \right]
                                                                                                                tsw4 = 0.08924
                                                                                                                  Kpu = 0.51
 i2(t) := (tsw1 \le t < tsw2) \cdot 6.4 \cdot \left[ I2 \cdot \left( \frac{-|t-tsw1|}{\tau 2s} + \frac{-|t-tsw1|}{\tau 2ss} - \frac{-|t-tsw1|}{\tau 2ss} \right) \right]
 i3(t) := (tsw2 \le t < tsw3) \cdot 6.4 \cdot \left[I3 \cdot \left(\frac{-|t-tsw2|}{If03s \cdot e} + \frac{-|t-tsw2|}{\tau 3s} + If03ss \cdot e}{\tau 3ss}\right)\right]
 i4(t) := (tsw3 \le t) \cdot 6.4 \cdot \left[I4 \cdot \left(\frac{-|t-tsw3|}{t4s} + \frac{-|t-tsw3|}{t4ss} + \frac{-|t-tsw3|}{t4ss}\right)\right]
 i(t) := i0(t) + i1(t) + i2(t) + i3(t) + i4(t)
u0(t) := (0 \le t < tsw0) \cdot 0
u1(t) := (tsw0 \le t < tsw1) - Rde1 \cdot i(t)
u2(t) := (tsw1 \le t < tsw2) - Rde2 \cdot i(t)
u_3(t) := (t_sw2 \le t < t_sw3) - Rde3 \cdot i(t)
                                                          u4(t) := (tsw3 \le t) - Rde4 \cdot i(t)
u(t) := u0(t) + u1(t) + u2(t) + u3(t) + u4(t)
```



t

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Г



По месту требования

	N♀	
Ha №	OT	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

О научно-практической ценности диссертационного исследования на тему: «Тиристорное устройство гашения магнитного поля синхронного генератора»

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе Прокудина А.В. «Тиристорное устройство гашения магнитного поля синхронного генератора» представляют практический интерес с точки зрения снижения времени гашения поля синхронных генераторов, возможных объемов повреждения оборудования, а также повышения надежности его эксплуатации.

Результаты работы планируется учитывать при разработке мероприятий по реконструкции существующих систем возбуждения турбогенераторов, находящихся в эксплуатации, так и в случае ввода в работу новых.

Предложенная методика проведения опыта по определению постоянных времени синхронного генератора методом гашения поля имеет практический интерес для производителей турбогенераторов, так и для эксплуатирующих организаций в случае необходимости определения вышеуказанных постоянных времени.

Заместитель технического директора по электротехническому оборудованию

А.С.Шумилов

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ФОРТУМ» Пресненская набережная, 10, этаж 15, помещение 20, Москва, 123112, тел.: +7(495)788-32-42, 788-45-88; fortum@fortum.ru; http://www.fortum.ru

ПРИЛОЖЕНИЕ В (продолжение)



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ) Политехнический институт Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

<u>29.03.2022 г.</u>

№ <u>309-30-14-7</u>

г. Челябинск

АКТ внедрения НИР в учебный процесс

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы по диссертации соискателя кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Прокудина Александра Владимировича по теме «Тиристорное устройство гашения магнитного поля синхронного генератора» используется кафедрой ЭССиСЭ в учебном процессе в дисциплине «Системы возбуждения синхронных генераторов» магистерской программы «Интеллектуальные электроэнергетические системы и сети» по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» на очном отделении Политехнического института, направления «Энергетика».

Pulsi

Заместитель директора Политехнического института по энергетическому направлению к.т.н., доцент

Зав. кафедрой ЭССиСЭ, д.т.н., профессор

А.Е. Бычков

И.М. Кирпичникова

Соискатель

А.В. Прокудин