

На правах рукописи



Прокудин Александр Владимирович

**ТИРИСТОРНОЕ УСТРОЙСТВО ГАШЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

Специальность 05.09.12 – «Силовая электроника»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения».

Научный руководитель –

кандидат технических наук, профессор **Гольдштейн Михаил Ефимович**;
доктор технических наук, доцент **Коржов Антон Вениаминович**.

Официальные оппоненты:

Хакимьянов Марат Ильгизович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Журавлев Артем Михайлович, кандидат технических наук, инженер по работе с проектными институтами ООО «Феникс Контакт РУС».

Ведущая организация –

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Защита состоится 30 июня 2022 г., в 15:00 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 909.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на официальном сайте ЮУрГУ по адресу <https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229805/prokudin-aleksandr-vladimirovich>

Автореферат разослан « » _____ 2022 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс (+7351)267-91-23, email: grigorevma@susu.ru.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.298.05, доктор

технических наук, профессор

Григорьев Максим Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. 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. При наличии выключателя между источником электроэнергии и местом повреждения это достигается отключением этого выключателя. 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.

В соответствии с опубликованными открытыми данными Министерства энергетики РФ, 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. 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.

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 неустраняемых недостатков: недостаточная нелинейность и невозможность управления вольтамперной характеристикой, зажигание дуги в выключателе, большая длительность гашения магнитного поля. Применение полупроводниковых устройств для гашения поля генераторов свелось лишь к использованию нелинейных резисторов. В ряде публикаций 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 гашения 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. 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 др.

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 в этой области электротехники применяются реакторы с небольшой 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. 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 режимах 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 варьлируемым 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, 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 синтеза ВАХ.

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

5. Рассмотрены вопросы обеспечения устойчивости коммутации тиристорных гасящих 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:

1. 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 физическую модель тиристорного устройства гашения магнитного поля синхронного генератора, с помощью которой получены результаты экспериментальной проверки предложенных идей, 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: III 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 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 поля, и провел экспериментальные исследования. 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, пунктам 1, 2, 3, 4.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, обоснованы научная новизна и практическое значение результатов, представлены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются требования норм к системам возбуждения синхронных генераторов и устройствам гашения магнитного поля в их составе, анализируются электромагнитные процессы в цепи обмотки возбуждения при гашении магнитного поля на основе чего выработаны критерии оценки устройства гашения магнитного поля. В соответствии со сформулированными критериями выполнена оценка существующих способов гашения магнитного поля синхронных генераторов, по результатам которой делается заключение о целесообразности совершенствования способов гашения магнитного поля и введении управляемой вольтамперной характеристики гасящего элемента. С учетом результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов горения дуги в выключателе цепей возбуждения и перехода тока от возбудителя на гасящий элемент окончательно сформулирована необходимая вольтамперная характеристика устройства гашения магнитного поля (выражение

1), графически проиллюстрированная на рисунке 1. Требуемая вольтамперная характеристика должна обеспечивать два взаимоисключающих условия: 1) для минимизации времени горения дуги в выключателе цепей возбуждения напряжение на выводах обмотки ротора должно стремиться к нулю; 2) для снижения времени гашения магнитного поля генератора напряжение на выводах его обмотки возбуждения должно поддерживаться максимальным. На основе этого делается вывод об необходимости применения управляемой вольтамперной характеристики.

$$\begin{cases} U(I) = 0; 0 \leq t < t_{\text{ДУГИ}} \\ U(I) = U_{\text{fМАХ ДОП}}; t \geq t_{\text{ДУГИ}} \end{cases} \quad (1)$$

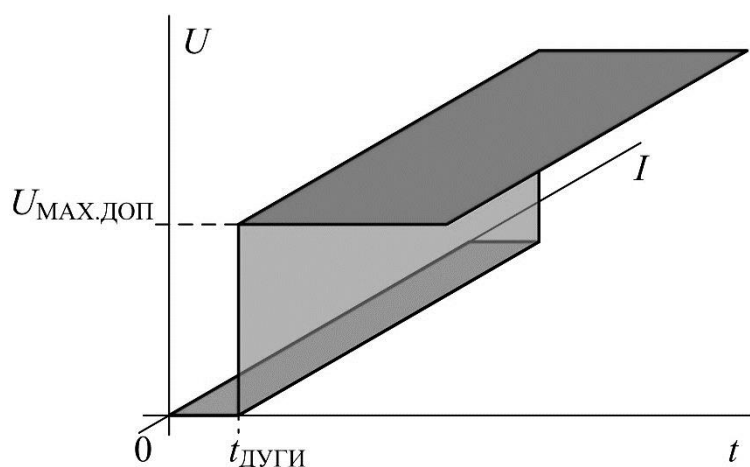


Рисунок 1 – ВАХ устройства гашения магнитного поля в осях «ток-напряжение-время»

В ходе анализа уровня развития науки и техники отмечено большое количество патентов на устройства (17 шт.), в той или иной мере реализующие принцип синтезирования и управления вольтамперной характеристикой за счет переключения линейных резисторов. Однако, в существующих публикациях недостаточно подробно рассмотрены электромагнитные процессы в таких устройствах. По результатам работы, проведенной в главе 1, поставлены задачи исследования.

Во второй главе исследуется схема (рисунок 2) тиристорного устройства гашения магнитного поля (ТУГП) в составе системы возбуждения (возбудителя А1, выключателя цепей возбуждения Q1, цепи защиты от перенапряжений R_{СС}, А2, Q2), состоящая из цепи короткозамыкателя А4 и N-шт. гасящих цепей (элементы VS_N, R_N). Схема устройства защищена патентом на полезную модель.

Работа устройства. При поступлении команды на гашение магнитного поля устройство управления А3 (рисунок 2) формирует сигналы на отключение выключателя Q1 и включение ключа короткозамыкателя А4. В момент времени начала расхождения контактов выключателя Q1 ток обмотки возбуждения $i_f(t)$ переходит из цепи возбудителя в цепь короткозамыкателя А4. После полного отключения выключателя Q1 выключается короткозамыкатель А4.

Напряжение на выводах обмотки возбуждения $u_f(t)$ быстро возрастает, что приводит к срабатыванию пороговых устройств $U_1 \dots U_N$, которые включают тиристоры $VS_1 \dots VS_N$, подключающие гасящие резисторы $R_1 \dots R_N$.

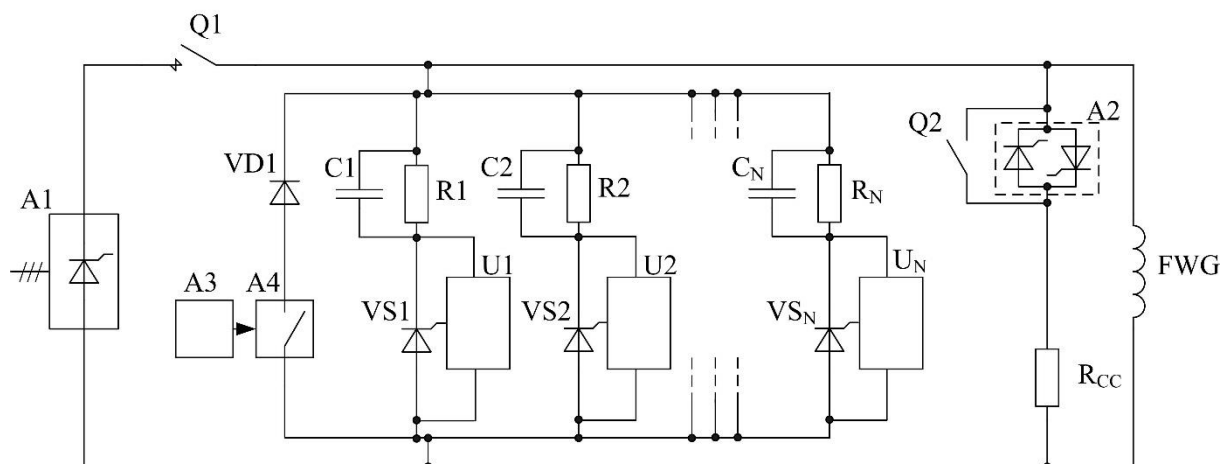


Рисунок 2 – Схема тиристорного устройства гашения магнитного поля

Количество параллельно включенных резисторов определяется из условия $u_f(t) \leq U_{f\text{МАХДОП}}$. По мере снижения тока $i_f(t)$ падает напряжение на выводах обмотки возбуждения. Для поддержания скорости гашения магнитного поля требуется поддерживать значение напряжения на выводах обмотки возбуждения. Для этого эквивалентное сопротивление гасящих цепей R_{DE} должно увеличиться. Кратковременное включение ключа короткозамыкателя А4 приводит к отключению всех тиристоров гасящих цепей. После этого снова происходит включение тиристоров, однако их число становится меньше и определяется по условию $u_f(t) \leq U_{f\text{МАХДОП}}$. Последовательное отключение параллельно включенных гасящих резисторов будет продолжаться до тех пор, пока в работе не останется последняя гасящая цепь. В дальнейшем она тоже отключается и обмотка возбуждения надежно шунтируется резистором самосинхронизации R_{CC} за счет включения выключателя Q2.

Уменьшение числа включенных параллельно гасящих резисторов $R_1 \dots R_N$ происходит при снижении величины напряжения $u_f(t)$ до значения $U_{f\text{МИН}} = U_{f\text{МАХДОП}} - \Delta U$. При этом эквивалентное сопротивление устройства R_{DE} увеличивается скачкообразно. За счет переключения линейных резисторов создается ступенчатая зависимость $R_{DE}(I)$, содержащая N -ступеней при N -числе гасящих резисторов в устройстве. Каждый интервал зависимости $R_{DE}(I)$ с постоянной величиной сопротивления называется гасящей ступенью. На интервале работы каждой гасящей ступени напряжение и ток обмотки возбуждения снижаются на коэффициент пульсаций K_{PU} . При переключении, по мере снижения тока, на следующую гасящую ступень с большим эквивалентным сопротивлением R_{DEi} проводимость ТУГП снижается на величину K_{PU} .

При анализе электромагнитных процессов в качестве характерного режима генератора принят режим двойной форсировки возбуждения на холостом ходу $I_{f0} = 2I_{f\text{НОМ}}$, характеризуемый максимальной накопленной энергией в обмотке возбуждения. По результатам анализа электромагнитных процессов получены

зависимости тока и напряжения обмотки возбуждения, представляющие собой комбинацию экспонент и выведена вольтамперная характеристика ТУГП (выражение 2). Математическая запись ВАХ (выражение 2) представляет собой сумму N -шт. вольтамперных характеристик для короткозамыкателя и каждой i -й гасящей ступени, каждая из которых умножается на логическое выражение, принимающее значение «0» или «1» в зависимости от результата выполнения записанного в нем условия. Использование переключающих логических множителей позволило компактно описать кусочно-линейную ВАХ устройства для произвольного числа интервалов работы N -гасящих ступеней и интервала работы короткозамыкателя.

$$U(I) = R_f \frac{K_{\Pi}}{K_C} \left[\sum_{i=1}^{N-1} (I_{f0} K_{PU}^{i-1} \geq I > I_{f0} K_{PU}^i)(t > t_{\text{ВЫКЛ}}) I \frac{1}{K_{PU}^{i-1}} + (I_{f0} K_{PU}^{N-1} \geq I)(t > t_{\text{ВЫКЛ}}) I \frac{1}{K_{PU}^{N-1}} + (t \leq t_{\text{ВЫКЛ}}) 0 \right]. \quad (2)$$

Свойства тиристорного устройства гашения магнитного поля, что следует из выражения 2, описывающего ВАХ, определяются числом гасящих ступеней N , коэффициентом пульсаций K_{PU} , кратностями перенапряжений K_{Π} и начального тока процесса гашения магнитного поля $K_C = I_{f\text{МАХ}}/I_{f\text{НОМ}}$, номинальным сопротивлением R_f и током $I_{f\text{НОМ}}$ обмотки возбуждения генератора. Полученная аналитическая математическая модель устройства устанавливает взаимосвязь тока и напряжения через устройство при произвольных значениях текущих (U и I) и характеристических (K_{PU} , N , K_C , K_{Π} , R_f и $I_{f\text{НОМ}}$) параметрах.

На интервале работы одной ступени среднее значение напряжения:

$$U_{\text{ср}} = U_{\text{НОМ}} K_{\Pi} \left(1 - \frac{K_{PU}}{2} \right). \quad (3)$$

Так как от ступени к ступени коэффициент пульсаций остается постоянным, то устройство обеспечивает постоянство среднего значения напряжения (выражение 3) в диапазоне токов от $K_C I_{f\text{НОМ}}$ до $K_C I_{f\text{НОМ}} K_{PU}^N$, соответствующем работе всех ступеней. Результирующая усредненная синтезированная ВАХ устройства стремится к Г-образной форме (рисунок 3). Стабильность напряжения на основном участке ВАХ оказывается намного выше чем для всех известных способов гашения магнитного поля.

Исследования, проведенные с использованием математической модели устройства, показали, что с увеличением числа гасящих ступеней расширяется горизонтальный участок ВАХ и повышается среднее значение напряжения. С целью оценки эффективности работы тиристорного устройства гашения магнитного поля получены выражения для длительности работы каждой ступени и всего процесса гашения магнитного поля. Проанализировано влияние числа гасящих ступеней N и коэффициента пульсаций K_{PU} на время гашения магнитного поля. Установлено, что увеличение числа ступеней ведет к снижению времени гашения магнитного поля. Для заданного значения числа

гасящих ступеней определено оптимальное значение коэффициента пульсаций K_{PU} .

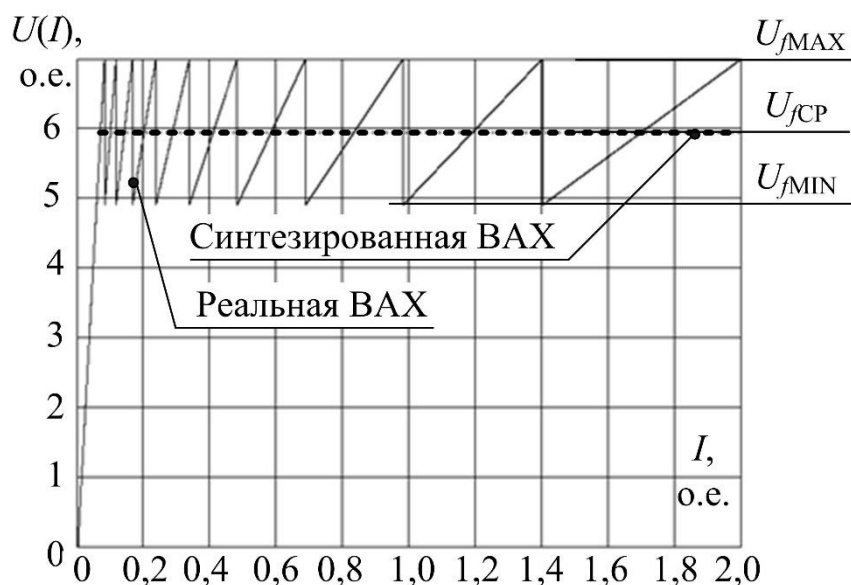


Рисунок 3 – Реальная и синтезированная усредненная ВАХ ТУГП для $N=10$, $K_{PU}=0,7$ и $t > t_{\text{ВЫКЛ}}$

С целью увеличения числа формируемых гасящих ступеней в зависимости $R_{DE}(I)$ и ВАХ для снижения времени гашения магнитного поля без усложнения устройства предложен и исследован алгоритм переключения гасящих резисторов, основанный на системе двоичного исчисления. При N -шт. гасящих резисторов число формируемых гасящих ступеней возрастает с N -шт. до 2^{N-1} шт., что существенно повышает качество синтезирования ВАХ.

Так как в некоторых режимах синхронного генератора в токе обмотки возбуждения появляется переменная составляющая, то произведено исследование работы ТУГП в таких режимах. Исследования показывают, что устройство, выполненное по первоначальной схеме, эффективно и надежно работает только если ток не переходит через нулевое значение, что характерно для режима внезапного короткого замыкания в цепи статора. Для работы в режиме асинхронного хода с потерей возбуждения предложена и обоснована модернизация схемы, заключающаяся в подключении ТУГП к обмотке возбуждения через диодный мост, приводящая к появлению у устройства вольтамперной характеристики, симметричной относительно нуля.

Выполненные исследования и полученные результаты позволили сформулировать теоретические основы, необходимые для применения ТУГП с синтезируемой ВАХ в составе систем возбуждения синхронных генераторов, оценить влияние параметров устройства на процесс гашения магнитного поля и выработать основные рекомендации по выбору их значений.

В главе 3 исследуются вопросы работы тиристорного устройства при гашении магнитного поля реальных синхронных генераторов с учетом особенностей их конструкции и режимов.

Как известно, при внезапном трехфазном коротком замыкании в цепи статора генератора ток обмотки возбуждения достигает наибольших значений

($6I_{\text{НОМ}}$) и содержит переменную составляющую 50 Гц. ТУГП должно быть рассчитано на гашение магнитного поля в этом режиме и его ВАХ расширяется до токов в $(4 \dots 6)I_{\text{НОМ}}$ за счет увеличения числа гасящих цепей.

В работе рассмотрены три подхода к определению параметров режима ТУГП при внезапном трехфазном коротком замыкании в цепи статора генератора: максимально упрощенный, по данным стандарта ANSI/IEEE C31.18; упрощенный, построенный на основе известной методики расчета режима синхронного генератора при трехфазном к.з.; точный, учитывающий особенности работы ТУГП. Показано, что максимально упрощенный подход дает наибольшую погрешность в определении амплитуды тока, а применение упрощенного подхода ведет к увеличению времени гашения, но обеспечивает запас по параметрам. Точный подход позволяет рассчитать режимы для каждой гасящей ступени и рационально выбрать параметры элементов ТУГП. Разработана методика точного расчета режима ТУГП при внезапном трехфазном к.з..

Свойства тиристорного устройства гашения магнитного поля (ВАХ), как было показано в главе 2, не зависят от постоянной времени обмотки возбуждения. Учет изменения индуктивности обмотки возбуждения при насыщении магнитной системы необходим только для расчета длительностей работы ступеней, так как полупроводниковые ключи имеют ограниченное быстродействие. Нелинейные свойства магнитной системы учитывались в виде двухступенчатой кривой зависимости индуктивности обмотки возбуждения от тока через нее. Получены выражения для определения индуктивности обмотки возбуждения при насыщении магнитной системы.

Реальный синхронный генератор представляет собой систему магнитносвязанных контуров. Демпфирующие контура, возникающие в роторе, как известно, затягивают процесс гашения магнитного поля генератора. Рассмотрение электромагнитных процессов в контуре обмотки возбуждения с использованием известной схемы замещения синхронного генератора по d -оси позволило сформировать комплекс расчетных выражений для определения параметров режима ТУГП. Известные расчетные выражения для переходных процессов в цепи обмотки возбуждения преобразованы с учетом среднестатистических соотношений между постоянными времени для турбогенераторов и ВАХ ТУГП.

Исследования зависимостей времени работы гасящих ступеней и полного времени работы ТУГП от числа ступеней N и коэффициента пульсаций K_{PU} при учете влияния демпфирующих контуров на холостом ходу турбогенератора дали следующие результаты:

1) переключение обмотки возбуждения от возбудителя на сопротивление приводит к резкому снижению тока $i_f(t)$ до значения, определяемого соотношением постоянных времени цепи обмотки возбуждения и демпфирующих контуров;

2) скорость снижения тока в первоначальный момент ограничивается только индуктивностью рассеяния обмотки возбуждения и сверхпереходной постоянной времени;

3) при средних и малых пульсациях в напряжении $u_f(t)$ ($K_{PU} > 0,625$ для турбогенераторов) наблюдается существенное сокращение времени работы гасящих цепей по сравнению со случаем изолированной обмотки возбуждения;

4) изменяя значение K_{PU} можно регулировать соотношение скоростей изменения тока на начальном и заключительном этапах гашения магнитного поля, в том числе, получить скорость больше чем в случае применения варистора в качестве гасящего элемента;

5) получены оптимальные величины коэффициента пульсаций для разного числа гасящих ступеней.

Практическая реализация исследуемого в работе принципа формирования ВАХ требует учета свойств полупроводниковых приборов, применяемых в схеме устройства. Исходя из этого рассмотрены коммутационные процессы при отключении и включении тиристоров и ключа короткозамыкателя. Выявлены проблемы с высокими скоростями нарастания напряжения на тиристорах и предложены схемотехнические решения для устранения этой проблемы. Пробный расчет емкостей конденсаторов в схеме ТУГП, предполагаемого к применению с турбогенератором Т-12-2, показал практическую реализуемость устройства на тиристорах общего назначения: минимальные значения емкостей составили 4,68...6,5 мкФ при гашении магнитного поля из режима двойной форсировки и 57,2 мкФ с учетом режима внезапного трехфазного короткого замыкания.

В соответствии с разработанным алгоритмом управления производится периодический сброс состояния гасящих цепей с целью адаптации устройства к изменяющимся параметрам режима контура обмотки возбуждения. Если параметры элементов схемы ТУГП находятся аналитически однозначно, то для определения оптимального значения частоты следования импульсов сброса состояния гасящих цепей потребовалось произвести дополнительные исследования с использованием теории вероятностей.

Показано, что минимальное время гашения магнитного поля достигается при точном совпадении импульса сброса и требуемого момента переключения гасящих ступеней. Несовпадение указанных моментов времени ведет к задержке в переключении ступеней. Величина задержки носит вероятностный характер и подчиняется функции Крампа, что не позволяет ее явно определить аналитически. По результатам исследований выявлен диапазон частот повторения импульсов сброса, при котором достигается минимальное время гашения магнитного поля.

Результаты исследований, приведенные в главе 3, позволили сформулировать теоретическую и расчетную базу, выявить нюансы работы ТУГП, доработать и уточнить рекомендации по практической реализации тиристорного устройства гашения магнитного поля для применения с реальными серийными синхронными генераторами.

Цель главы 4 – экспериментальная проверка результатов теоретических исследований, полученных в предыдущих главах, оценка достоверности математической модели и правильности методики определения параметров элементов тиристорного устройства гашения магнитного поля. Для достижения поставленной цели разработана экспериментальная установка «синхронный генератор – система возбуждения», содержащая физическую модель тиристорного устройства гашения магнитного поля. Основные элементы установки: синхронный явнополюсный генератор БМЗ-4,5/4, вращаемый двигателем постоянного тока П-42 с питанием от тиристорного преобразователя; возбудитель на основе импульсного блока питания 12 В; физическая модель тиристорного устройства гашения магнитного поля, включающая в себя 4 шт. гасящих цепи (тиристорные ключи, магазины сопротивлений и емкостей), цифровое устройство управления на микроконтроллере и транзисторный короткозамыкатель; устройство защиты от перенапряжений; имитатор варистора и измерительные приборы.

Так как для используемого синхронного генератора не удалось найти значения постоянных времени, то на основе ГОСТ 10169-77 разработана уникальная методика их экспериментального определения. Известный метод определения постоянных времени предполагает анализ зависимостей тока обмотки возбуждения и напряжения статора синхронного генератора в опытах гашения магнитного поля на активное сопротивление и короткое замыкание. Основная трудность организации опыта заключается в создании короткого замыкания в цепи обмотки возбуждения возбужденного генератора. Согласно предложенной методике к выводам обмотки возбуждения предварительно подключается силовой диод. В ходе опыта генератор возбуждается от штатной системы возбуждения током двойной форсировки и включается гашение магнитного поля. Ток обмотки возбуждения быстро переходит с возбудителя на диод. В виду малого падения напряжения на диоде, в сотни раз меньше чем номинальное напряжение возбуждения, режим контура обмотки возбуждения эквивалентен короткому замыканию в ее цепи. Такой метод проведения опыта не приводит к созданию короткого замыкания в цепи возбудителя, требует минимальных подготовительных работ и позволяет получить результаты достовернее, чем, например, при методе со снятием импульсов с тиристоров преобразователя. Методика применена в работе и по ней получены данные генератора, которые использованы в расчетах режима ТУГП.

Произведен расчет параметров элементов схемы ТУГП, определены моменты переключения ступеней и длительности их работы. Для увеличения постоянных времени электромагнитных процессов кратность перенапряжений K_{Π} ограничена 2 о.е. (26 В при напряжении возбуждения 13 В). По результатам расчета (рисунок 4а) и опыта (рисунок 4б) получены зависимости тока и напряжения обмотки возбуждения.

По результатам экспериментов отмечено:

- 1) уровень перенапряжений не превышает расчетное значение;
- 2) соблюдается требуемый порядок работы гасящих ступеней;

3) моменты переключений гасящих ступеней по току в целом соответствуют расчетным;

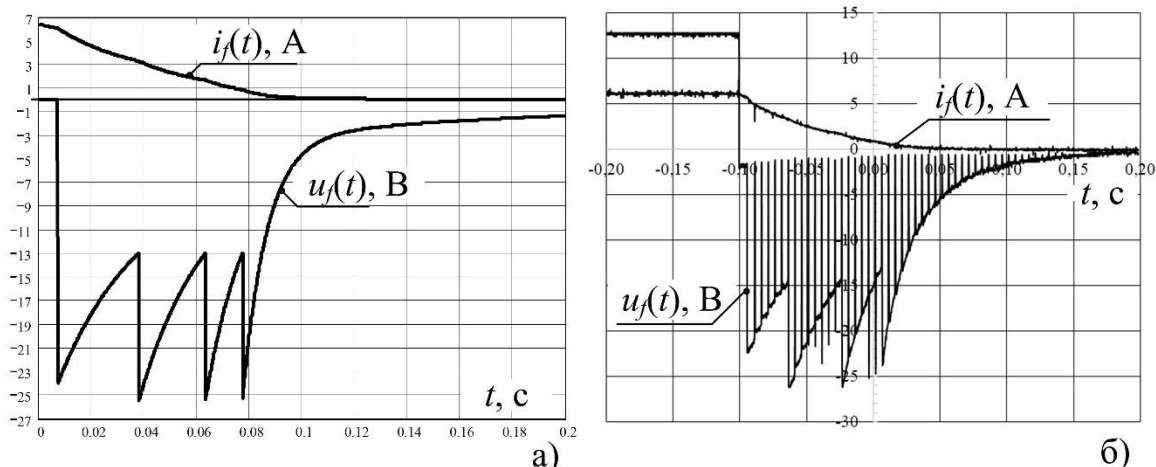


Рисунок 4 – Расчетные и экспериментальные зависимости тока и напряжения обмотки возбуждения

4) зажигание дуги в выключателе при работе ТУГП визуально не отмечается, в опытах гашения поля на варистор и резистор R_{CC} , с отключенным короткозамыкателем, дуга загорается;

5) длительности работы ступеней отличаются от расчетных как в большую, так и в меньшую стороны;

6) общее время гашения магнитного поля составило 126 мс, что больше расчетного 97,6 мс на 29,8% из-за недостаточной точности получения и применения характеристик намагничивания использованного генератора;

7) полученная зависимость времени гашения магнитного поля от периода повторения импульсов сброса подтвердила результаты, полученные в главе 3 – минимальное время получено при $T_{И}=5$ мс и незначительно увеличивается до $T_{И}=20$ мс.

Так как основной характеристикой исследуемого тиристорного устройства гашения магнитного поля является ВАХ, которая выдерживается на заданном уровне, то несоответствие времен не является недостатком данного образца устройства. ВАХ, расчетная и полученная по результатам эксперимента, приведены на рисунке 5.

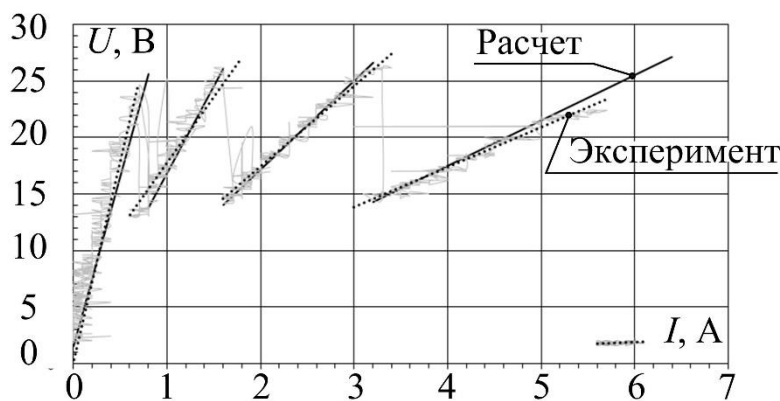


Рисунок 5 – Расчетная и экспериментальная ВАХ тиристорного устройства гашения магнитного поля с 4 шт. гасящих цепей

Сравнение опытов гашения магнитного поля на ТУГП, варистор и линейный резистор показало преимущества тиристорного устройства гашения магнитного поля (126 мс) над R_{CC} (221 мс). Гашение магнитного поля на варистор дает время гашения магнитного поля меньше (100 мс), но скорость снижения тока на большей части интервала времени мало отличается от таковой при использовании ТУГП. Предполагается, что увеличение числа гасящих ступеней позволит улучшить характеристики ТУГП по сравнению с опытом с варистором.

В целом, результаты экспериментов подтверждают расчетные данные и теоретические положения, полученные в предыдущих главах что говорит об их достоверности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной исследовательской работы получены теоретические знания, направленные на повышение эффективности процесса гашения магнитного 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. Разработана аналитическая математическая модель тиристорного устройства гашения магнитного поля с синтезируемой вольтамперной характеристикой, отличающаяся произвольным числом учитываемых гасящих ступеней, описывающая вольтамперную характеристику устройства в произвольном диапазоне токов на всем интервале процесса гашения магнитного поля от начала расхождения контактов выключателя до снижения тока обмотки возбуждения до нуля.

2. Предложен способ формирования управляемой вольтамперной характеристики гасящего элемента устройства гашения магнитного поля синхронного генератора, основанный на изменении числа параллельно включенных линейных резисторов согласно заданному алгоритму, с целью поддержания величины напряжения на выводах обмотки возбуждения для снижения времени гашения магнитного поля.

3. Исследованы электромагнитные процессы в тиристорном устройстве гашения магнитного поля с синтезируемой вольтамперной характеристикой при работе в составе контура обмотки возбуждения синхронного генератора. Проанализировано влияние настроек исследуемого устройства на его характеристики и параметры процесса гашения магнитного поля. Описаны подходы к определению оптимальных настроек устройства согласно заданным критериям.

4. В ходе исследований выявлены критические параметры режимов элементов тиристорного устройства гашения магнитного поля. На основе полученных данных предложена методика по выбору параметров элементов устройства. Даны рекомендации по его практической реализации. Рассмотрены схемные решения по повышению надежности и устойчивости работы устройства в различных режимах синхронного генератора.

5. Проработаны аспекты бездуговой коммутации цепей обмотки возбуждения синхронного генератора с применением средств силовой электроники, определены критерии блокирования дуги, предложены схемотехнические решения, проверенные экспериментально на физической модели.

6. На разработанной физической модели проверена работа, сняты и оценены характеристики тиристорного устройства гашения магнитного поля, исследовано влияние настроек системы управления на длительность процесса гашения магнитного поля. Установлено соответствие расчетных и экспериментальных параметров устройства, выполнения заданного алгоритма работы. Произведены сравнительные испытания разных способов гашения магнитного поля, показавшие преимущества тиристорного устройства гашения магнитного поля.

ПУБЛИКАЦИИ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Статьи, опубликованные в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК для публикации основных результатов на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12:

1. Прокудин, А.В. Снижение времени аварийного гашения поля синхронных машин с системами самовозбуждения [Текст] / А.В. Прокудин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2011. – Вып. 15. – №15(232). – С. 22–24. (3 с.).

2. Гольдштейн, М.Е. Снижение дуговой нагрузки на выключатели в системах самовозбуждения [Текст] / М.Е. Гольдштейн, А.В. Прокудин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18. – №37 (296). – С. 120–122. (3 с. / 2 с.).

3. Гольдштейн, М.Е. Тиристорное устройство гашения поля синхронного генератора с системой самовозбуждения [Текст] / М.Е. Гольдштейн, А.В. Прокудин // Электротехника. – 2013. – №10. – С. 41–45. (5 с. / 4 с.).

4. Прокудин, А.В. Измерение некоторых параметров синхронного генератора методом гашения поля с использованием штатных элементов систем возбуждения [Текст] / А.В. Прокудин, М.Е. Гольдштейн // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т.19, № 4. – С. 26–32. (7 с. / 6 с.).

5. Прокудин, А.В. Расширение функциональных возможностей тиристорного устройства гашения поля для интенсификации управления процессом [Текст] / А.В. Прокудин, А.В. Коржов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 48–54. (7 с. / 6 с.).

Публикации в сборниках трудов конференций:

6. **Прокудин, А.В.** Сравнительные испытания способов гашения поля синхронного генератора [Текст] / А.В. Прокудин, М.Е. Гольдштейн, А.Н. Андреев // Наука ЮУрГУ: материалы 62-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т.3. – С. 135–138. (4 с. / 3 с.)

7. **Прокудин, А.В.** Сравнительные испытания тиристорного устройства гашения поля синхронного генератора [Текст] / Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды III международной научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – Т.1 – С. 265–268 (4 с.).

8. **Прокудин, А. В.** Определение оптимального числа ступеней тиристорного устройства гашения поля синхронного генератора [Текст] / А.В. Прокудин, М.Е. Гольдштейн. // 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. (4 с. / 2 с.)

9. **Прокудин, А.В.** Управление электромагнитными процессами в цепях возбуждения синхронного генератора с тиристорным устройством гашения поля [Текст] / Наука ЮУрГУ: материалы 65-й научной конференции. Секции технических наук: в 2 т. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – Т.2 – С. 273–276. (4 с.)

10. **Прокудин, А.В.** Применение устройства с синтезированной вольтамперной характеристикой для гашения поля синхронного генератора [Текст] / Высшая школа: научные исследования. Материалы Межвузовского научного конгресса (г. Москва, 9 июля 2020 г.). – М.: Издательство Инфинити, 2020. – С. 207–216. (10 с.)

11. **Прокудин, А.В.** Применение устройств с синтезированной вольтамперной характеристикой для гашения поля синхронных генераторов [Текст] / Наука ЮУрГУ: материалы 73-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – Системные требования: РС не ниже Pentium I; ОЗУ 512 Мб; ОС Windows 2000/XP/Vista/7/8/ 10; Adobe Acrobat Reader. Загл. с экрана. – С. 258–265.

Другие публикации:

12. Гольдштейн, М.Е. Схемы цепей постоянного тока системы самовозбуждения синхронного генератора [Текст] / М.Е. Гольдштейн, Е.Я. Крекер, **А.В. Прокудин** // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2004. Вып. 5. – № 4 (33). – С. 101–105. (5 с. / 2 с.).

Патенты:

13. Патент № 191501 Российская Федерация, МПК H02P 9/12, H02P 9/30, H02H 7/06. Устройство гашения магнитного поля синхронной машины / **Прокудин А.В.**, Гольдштейн М.Е. ; заявитель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». № 2019107099 ; заявл. 12.03.2019 г.; опубл. 08.08.2019 г..

ПРОКУДИН Александр Владимирович

**ТИРИСТОРНОЕ УСТРОЙСТВО ГАШЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

Специальность 05.09.12 – «Силовая электроника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ .

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.

454080, г. Челябинск, пр. им. Ленина, 76.