

На правах рукописи



Карпунин Дмитрий Александрович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ
ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА ТЕПЛОВЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ).

Научный
руководитель:

Степанов Владимир Михайлович,
доктор технических наук, профессор

Официальные
оппоненты:

Бабокин Геннадий Иванович,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Энергетики и энергоэффективности горной
промышленности» ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический университет
«МИСиС»

Авдошин Вадим Сергеевич,
кандидат технических наук,
ООО «ГИПЕРГЛОБУС» г. Москва,
главный инженер

Ведущее
предприятие:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Защита диссертации состоится «7» октября 2022 г. в 12 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.108.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет» по адресу: 398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Липецкого государственного технического университета и на сайте <http://www.stu.lipetsk.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В.В. Телегин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Несоответствие эксплуатационной нагрузки, формируемой на генераторе от системы его возбуждения, её заданному значению вызывает колебательный процесс в системе «устройство возбуждения – синхронный турбогенератор», что снижает надёжность её функционирования и качество генерируемой энергии. Кроме того, исходя из практики ежегодной переиндексации тарифов и роста цены за единицу условного топлива для производства электрической энергии, а также постоянное ежегодное возрастание цены электроэнергии для собственных нужд электростанций и высокие штрафы на «Оптовом рынке электроэнергии и мощности» за неготовность генератором нести заданную нагрузку, важное значение в развитии электротехнических комплексов и систем приобретает повышение эффективности и надёжности функционирования системы возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций путём использования резервного возбудителя, который обладает как демпфирующей способностью, так и позволяет повысить надёжность и управляемость системы возбуждения синхронного турбогенератора, работающего в составе единой энергетической системы.

Цель работы заключается в повышении эффективности функционирования электротехнических систем резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций, путём обоснования рациональной структуры функциональных связей, параметров и закономерностей формирования управляющих воздействий резервной системы возбуждения, обеспечивающей непрерывный контроль качества генерируемой энергии и определяющей отказ основной системы возбуждения, и возможность гибко и с необходимым быстродействием управлять синхронным турбогенератором.

Объект исследования. Электротехническая система резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций, работающего в составе единой энергосистемы.

Предмет исследования. Переходные и установившиеся электромеханические и электромагнитные процессы, протекающие в электротехнической системе резервного возбуждения тепловых электростанций.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы электромеханики и теоретических основ электротехники, методы математической статистики, теория измерения физических величин, теория надёжности технических систем, теории подобия, имитационное моделирование и экспериментальные исследования с использованием современных компьютерных средств.

Для достижения поставленной цели сформированы и должны быть решены следующие задачи исследования:

1 Анализ конструктивных схем и режимов работы устройств в электротехнических устройствах систем резервного возбуждения синхронных турбогенераторов тепловых электростанций, работающих в составе единой энергосистемы;

2 Определение рациональной функциональной структуры связей, надёжности работы и условий эксплуатации, параметров и закономерностей формирования управления резервной системой возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций;

3 Разработка математической модели электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций на основе реактивно-вентильного генератора, используемого в качестве источника тока возбуждения, учитывающей характеристики как электромеханических, так и электромагнитных процессов;

4 Исследование математической модели электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора на основе реактивно-вентильного генератора для обоснования рациональных конструктивных и режимных параметров и её структуры;

5 Определение закономерностей формирования переходных процессов в электротехнической системе резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций;

6 Определение требуемого уровня надёжности и рациональных параметров в электротехнической системе резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций;

7 Определение структуры управления режимами работы в электротехнической системе резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций;

8 Численные и экспериментальные исследования режимов работы на основании разработанных технических решений по системе резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций.

На защиту выносятся:

1 Математическая модель электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций на основе реактивно-вентильного генератора, в комплексе учитывающая характеристики как электромеханических, так и электромагнитных процессов протекающих в ней.

2 Закономерности формирования переходных и установившихся электромеханических и электромагнитных процессов в электротехнической системе резервного возбуждения синхронного турбогенератора на основе реактивно-вентильного генератора.

3 Условия реализуемости математической модели электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора на основе реактивно-вентильного генератора в электротехнических системах возбуждения синхронных турбогенераторов тепловых электростанций.

4 Рациональные конструктивные и режимные параметры электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора на основе реактивно-вентильного генератора, обеспечивающие требуемый уровень надёжности и эффективности её функционирования.

Научная новизна заключается в определении рациональной структуры и параметров электротехнических систем резервного возбуждения синхронного турбогенератора на основе реактивно-вентильного генератора, закономерностей формирования электромеханических и электромагнитных переходных и установившихся процессов, функциональных связей элементов системы возбуждения в процессе пуска станции с «нуля», нормального режима работы, режима наличия короткого замыкания в единой энергосистеме, в режиме снижения напряжения и режиме развозбуждения, а так же управляющих воздействий для управления режимами работы синхронного турбогенератора.

Она представлена следующими результатами:

1 Установлены закономерности формирования управляющих воздействий для управления режимами работы электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций на основе реактивно-вентильного генератора;

2 Получены зависимости для определения рациональных конструктивных и режимные параметров и электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций на основе реактивно-вентильного генератора, учитывающие в комплексе закономерности формирования электромагнитных и электромеханических переходных и установившихся процессов, функциональных связей элементов системы возбуждения в процессе пуска станции с «нуля», нормального режима работы, режима наличия короткого замыкания в единой энергосистеме, в режиме снижения напряжения и режиме развозбуждения, а так же управляющих воздействий для управления режимами работы синхронного турбогенератора;

3 Разработана структура системы «устройство возбуждения – синхронный турбогенератор» для повышения эффективности резервирования возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций на основе реактивно-вентильного.

Практическое значение. Разработана методика определения рациональной структуры и параметров резервной системы возбуждения синхронного турбогенератора, работающего в составе единой энергосистемы, основанной на реактивно-вентильном генераторе, в совокупности учитывающем параметры электромагнитных и электромеханических переходных и установившихся процессов, функциональных связей элементов системы возбуждения в процессе пуска станции с «нуля», нормального режима работы, режима наличия короткого замыкания в единой энергосистеме, в режиме снижения напряжения и режиме развозбуждения, а так же управляющих воздействий для управления режимами работы синхронного турбогенератора. Доказана возможность перехода с основной системы возбуждения на резервную, основанную на реактивно-вентильном генераторе с системой управления и контроля качества генерируемой электроэнергии, без остановки синхронного турбогенератора тепловой электростанции, и возможность продолжительной работы синхронного турбогенератора на резервной системе возбуждения, до восстановления работоспособности основной или развозбуждения генератора по команде диспетчера.

Реализация результатов работы. Основные научно-практические результаты диссертационной работы используются в создании проектной документации для производства опытно-конструкторского образца на базе АО «Тулаэнергоремонт» по НИОКР договор № 1122101 «Разработка метода расчёта требуемого уровня надёжности резервирования процесса возбуждения генератора электрической энергии тепловых электростанций» для использования при модернизации существующих систем возбуждения синхронных турбогенераторов тепловых электростанций, работающий в составе единой энергетической системы России. Результаты работы использованы в учебных курсах «Переходные процессы в электроэнергетических системах», «Электромеханика», «Электрические станции и подстанции» на кафедре «Электроэнергетика» Тульского государственного университета.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях: X Региональной магистерской научной конференции, 2015 г., Тула; Международной НТК «Энергосбережение-2016», 18-19 апреля 2016 г., Москва; Международной НТК «Энергосбережение-2017», 6-7 апреля 2017 г., Москва; Международная НТК «Энергосбережение-2018», 12-13 апреля 2018 г., Москва; Международная НТК «Энергосбережение-2021», 20-21 апреля 2021 г., Москва.

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в 3 статьях, из них 2 в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 патента РФ на полезную модель.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников из 100 наименований, содержит 37 рисунков и 1 таблицу. Общий объём – 99 страниц.

Личный вклад автора. Разработаны методика определения структуры функциональных связей, математические модели электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций на основе реактивно-вентильного генератора, получены зависимости, определяющие её рациональные параметры, учитывающие в комплексе закономерности формирования электромагнитных и электромеханических переходных и установившихся процессов, установлены закономерности формирования управляющих воздействий и условия реализуемости математических моделей, обеспечивающих требуемый уровень эффективности и надёжности функционирования системы. Проведены численные и экспериментальные исследования, подтвердившие работоспособность электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций на основе реактивно-вентильного генератора и правильность теоретических исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформированы цель и задачи исследования, решению которых посвящена диссертация, излагаются подходы и методы исследования, отмечаются научная новизна, практическая значимость

работы, а также апробация, приведена структура диссертации.

В первой главе проведен анализ конструктивных схем и условий эксплуатации систем возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций, методов расчёта их параметров и надёжности, а также обоснована необходимость разработки нового технического решения по обеспечению резервирования возбуждения на основе реактивно-вентильного генератора.

Во второй главе разработана структура функциональных связей электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций на основе реактивно-вентильного генератора, которая обеспечивает эффективный контроль и управление, а также надёжное функционирование в комплексе на основе использования информационной, структурной и временной избыточности.

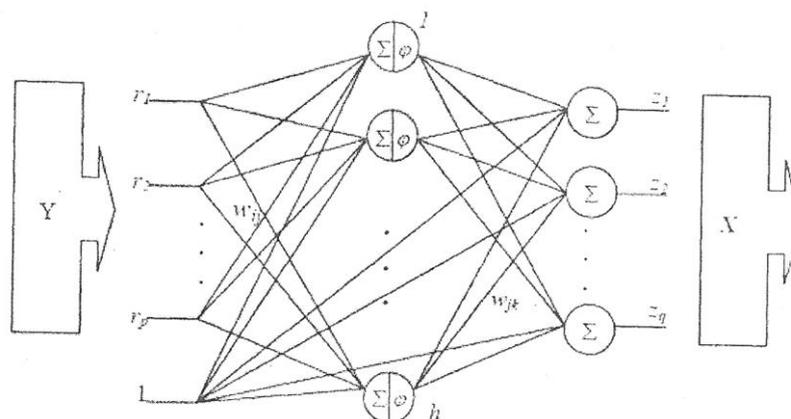


Рисунок 1 – Схема нейронной сети

Используя нейронную сеть (рисунки 1), выступающую в роли модели измеряемых и регулируемых потоков, определено формирование управляющих воздействий распределением измеряемых параметров, а также эффективность функционирования электротехнической системы резервирования возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций. При известных регулируемых параметрах на основе реакции формирования управляющих воздействий на состояние как измеряющих элементов, так и контролируемых и управляющих систем построена их цифровая модель.

В результате использования нейронной сети и соответствующего математического аппарата осуществлено моделирование режимов работы электротехнической системы резервирования возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций с помощью приложения Simulink SimPowerSystems компьютерной программы MATLAB. Это позволило построить измерительно-информационно-управляющий модуль электротехнической системы резервирования возбуждения синхронного турбогенератора (рисунки 2).

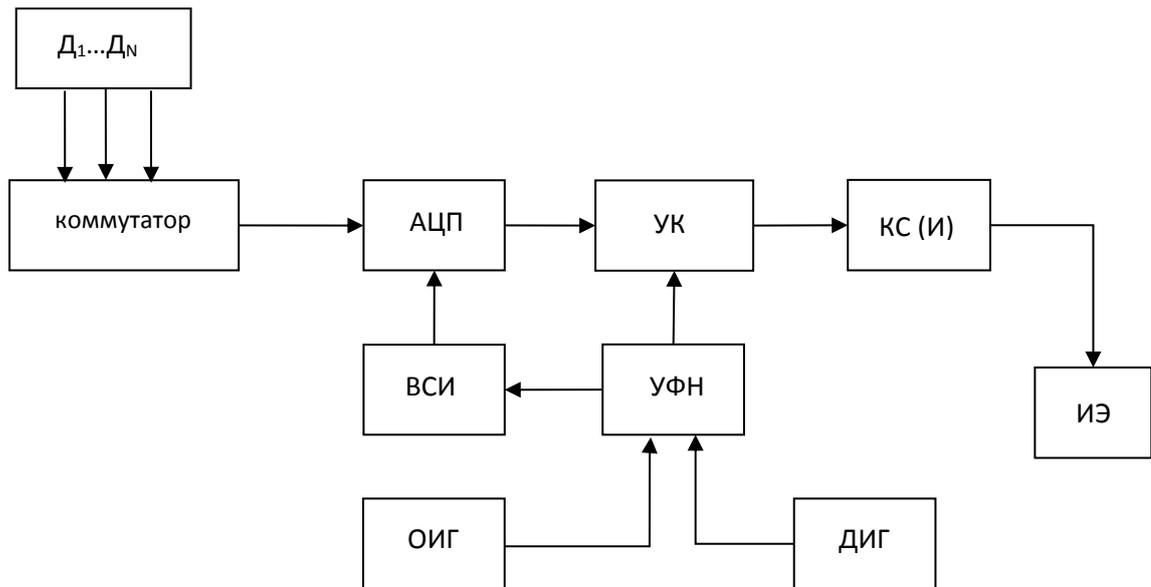


Рисунок 2 – Структура измерительно-информационно-управляющего модуля электротехнической системы резервирования возбуждения синхронного турбогенератора

Измерительно-информационный-управляющий модуль имеет следующий принцип работы: датчики контролируемых элементов электротехнической системы через коммуникатор К связаны с аналогово-цифровым преобразователем АЦП, на который для запуска подаются синхроимпульсы ВСИ, модулируемые узлом формирования напряжения УФН, который также вырабатывает необходимый ряд напряжений для работы измерительно-информационно-управляющего модуля и запитывается от основного ОИП и дополнительного ДИП источников питания. С выхода АЦП на устройство кодирования УК подается двойной последовательный код. УК преобразует двойной последовательный код с выхода АЦП в сигнал, где «0» и «1» представлены импульсами разной длительности, который по каналу связи (интерфейсу) КС уже в виде сформированных управляющих воздействий передается исполнительным элементам ИЭ для регулирования режимов работы электротехнической системы резервирования возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций.

Рациональная структура функциональных связей обеспечивает требуемый уровень эффективности функционирования электротехнической системы резервирования возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций за счёт использования реактивно-вентильного генератора, на основе которой разработана топология системы «устройство возбуждения – синхронный турбогенератор», и, определён уровень и условия реализуемости её конструкционной и функциональной надёжности.

Требуемый уровень надёжности определяет вероятность отказа, соответствующая требуемому техническому уровню.

$$q_H = \frac{q_C}{k_y}, \quad (1)$$

где q_H и q_C – вероятность отказа электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций на основе реактивно-вентильного генератора.

Коэффициент технического уровня определяется следующей зависимостью

$$k_y = \frac{1}{5} \left(\frac{V_{всс}}{V_{всн}} + \frac{V_{ннс}}{V_{нни}} + \frac{V_{увс}}{V_{увн}} + \frac{P_{рвгс}}{P_{рвгн}} + \frac{P_{стс}}{P_{стн}} \right), \quad (2)$$

где $V_{всс}$ и $V_{всн}$ – скорость возникновения сбоев в работе системы возбуждения синхронного турбогенератора в существующих системах (с) и нового технического уровня (н); $V_{ннс}$ и $V_{нни}$ – скорости формирования переходных процессов в электротехнической системе резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций на основе реактивно-вентильного генератора; $V_{увс}$ и $V_{увн}$ – скорости формирования управляющих воздействий электротехнической системе резервного возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций на основе реактивно-вентильного генератора; $P_{рвгн}$ и $P_{рвгс}$ – мощность реактивно-вентильного генератора; $P_{стн}$ и $P_{стс}$ – мощность синхронного турбогенератора.

Коэффициент запаса по конструкционному материалу необходимый для обеспечения безотказного функционирования электротехнической системы рассчитывается по формуле

$$K_H = \frac{k_{\Pi}^3}{k_m^2 k_o^2}. \quad (3)$$

При этом

$$k_{NH} = \frac{1}{\lambda_{HM}}. \quad (4)$$

Условия реализуемости конструкционной и функциональной надёжности электротехнической системы резервного возбуждения на основе параметров условиям эксплуатации её конструктивных элементов имеют вид:

$$\frac{t_{\partial_n} T_{OC}}{T_{OH}^2} \leq q_{HM}. \quad (5)$$

где T_{OC} , T_{OH} – среднее время наработки на отказ систем существующих и нового технического уровня; t_{∂_n} – допустимое время простоя.

Функциональные параметры конструктивных элементов электротехнической системы определяются на основе их соответствия условиям эксплуатации и обеспечения требуемой величины T_{OH} .

Результаты расчета приведены в таблице 1. Величина kO и K_H определяют запас по прочности и твердости конструкционного материала, которые ограничивают интенсивность износа.

Таблица 1 – Результаты расчёта

Показатель надёжности	Коммутационные элементы	Электротехнические элементы
1	2	3
q_{HM}	0,0065	0,0073
P_{HM}	0,9957	0,9892
$\lambda_{HM}, 1/ч$	0,0031	0,0029
$t_{HM}, ч$	16,96	17,88
$T_{OHM}, ч$	511,03	632
$t_{ДП}, ч$	1,64	1,84
$k_{ТИHM}$	0,971	0,983
$P_y(t)$	0,03	0,01
$k_{П}$	1,53	1,85
K_H	1,59	1,97
k_m	0,995	0,991
k_0	0,64	0,65
$t_{МП}$	284,6	256,6
k_{MM}	13	15

В третьей главе на основе проведённого моделирования рабочих режимов электротехнической системы резервирования возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций на основе реактивно-вентильного генератора с использованием нейронной сети и приложения Simulink SimPowerSystems компьютерной программы MATLAB разработана обобщённая структура системы «устройство возбуждения – синхронный турбогенератор».

Устройство резервного возбуждения синхронного генератора на основе реактивно-вентильного генератора (рисунок 3) содержит шины собственных нужд генератора 1, выход которых связан с входом электродвигателя 2, трансформатором хозяйственных нужд 3 и выходом трансформатора собственных нужд генератора 4. Выход электродвигателя 2 связан с входом реактивно-вентильного генератора 5. Выход трансформатора хозяйственных нужд 3 связан с входом выпрямителя 6, выход которого связан с входом фильтра 7, выход которого связан с входом панели управления 8 и входом генератора квадратурных токов 9. Панель управления 8 имеет двухстороннюю связь с микропроцессорной системой 10, выходы которой связаны с входами блока драйверов 11, выходы которого связаны с входами вентильного коммутатора 12 и с входом генератора квадратурных токов 9, выходы которого связаны с входами источников тока 13, 14, выходы которых связаны с входами вентильного коммутатора 12. Вентильный коммутатор имеет двухстороннюю связь с фазными обмотками 15 реактивно-вентильного генератора 5, выходы обмотки контроля 16 связаны с входом вентильного коммутатора 10, который имеет выходы связанные с входом фильтра 17, выходы которого связаны с входами компаратора 18, выходы которого связаны с входами микропроцессорной системы 10. Также, вентильный коммутатор 12

микропроцессорная система 10 на основе сигналов от панели управления 8 и заданных параметров возбуждения, питание на которую подают от трансформатора хозяйственных нужд 3 через выпрямитель 6 и фильтр 7. Определение положения ротора реактивно-вентильного электродвигателя определяет микропроцессорная система 10 на основе сформированных измерительных токов генератором квадратурных токов 9, питание на который так же подают от трансформатора хозяйственных нужд 3 через выпрямитель 6 и фильтр 7, через источники тока 13, 14 и с компаратора 18 через фильтр 17, вследствие изменения магнитного потока, а, следовательно, и ЭДС в обмотках контроля 16. На основании положения ротора микропроцессорная система 10 подаёт сигналы на замыкание силовых ключей через блоки драйверов 11 на вентильный коммутатор 12, для снятия ЭДС с фазных обмоток 15 реактивно-вентильного генератора 5 на которых магнитный поток максимален. Блок контроля качества генерируемой электроэнергии 20, подключенный через фильтр 19, определяет значения показателей качества генерируемой электроэнергии подаёт сигнал на микропроцессорную систему 10, которая путём сравнения показателей с номинальными значениями контролирует параметры тока возбуждения, подаваемого на обмотку возбуждения синхронного генератора 21. Которая создает магнитный поток в статоре синхронного генератора 22 и следовательно наводит ЭДС, используемую потребителями электроэнергии и трансформатором собственных нужд генератора 4 который подает электропитание на шины собственных нужд генератора 1.

При построении обобщённой схемы замещения системы «устройство возбуждения – синхронный турбогенератор» необходимо учитывать проведённый анализ конструктивных схем систем возбуждения генераторов тепловых электростанций, способы определения их параметров и условий надёжности функционирования. В результате получаем дифференциальное уравнение, которое связывает силу тока и падение электрического напряжения. Так как можно сделать вывод, что оно является однофазным, обобщённой схемы замещения системы имеет следующий вид:

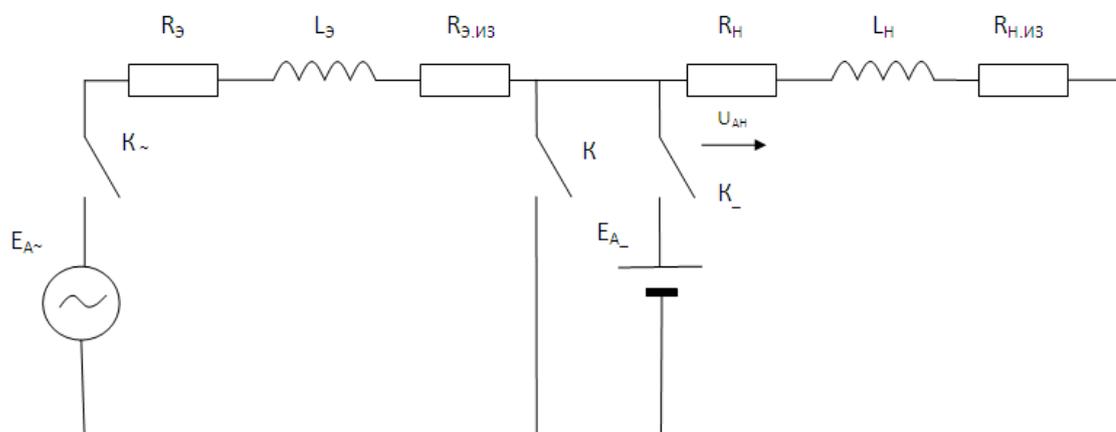


Рисунок 4 – Обобщенная однофазная эквивалентная схема замещения системы «устройство возбуждения – синхронный турбогенератор»

По полученной схеме замещения (рисунок 4) видно, что при замкнутом контакте $K\sim$ и к моменту замыкания контакта K амплитуда синусоидальной компоненты электрического тока равна

$$J_m(0) = \frac{U_m}{\sqrt{(R_k + R_n)^2 + \omega(L'_k + L'_n)^2}}, \quad (6)$$

а активное сопротивление при величине температуры 20°C соответственно

$$R_t = R_{20} e^{\alpha(t-20)}; \quad (7)$$

$$t = \frac{R_t}{R_{20} e^{\alpha}} + 20, \quad (8)$$

где R_{20} – сопротивление при 20°C , α – температурный коэффициент сопротивления; T – величина температуры.

Формула (7) позволяет сформулировать закон распределения и построить его график (рисунок 5). По пересечению функций зависимостей на данном графике можно увидеть уровень совместимости системы синхронного турбогенератора, системы собственных нужд и системы резервирования возбуждения (рисунок 3.4), где 1 – (21-25); 2 – (1, 3, 4, 6, 7) и 3 – (2, 5, 8-20). Он соответствует необходимому уровню контроля, регулирования и надёжности функционирования электротехнической системы.

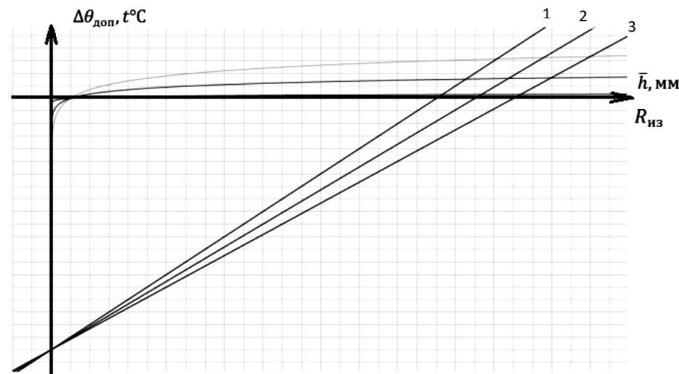


Рисунок 5 – Совместимость систем

Динамические и статические характеристики системы резервирования возбуждения турбогенератора рассмотрены на примере обобщённой имитационной модели вентильно-реактивной электрической машины.

Выбранная схема имеет следующие допущения:

- не учитывается индуктивность рассеивания;
- не учитывается зависимость активных сопротивлений фаз от температуры статора;
- не учитывается взаимоиндукция фазных обмоток;
- функциональные резисторы заменяют диоды и силовые транзисторы;
- датчик положения ротора и система автоматического управления представлены как безынерционные звенья.

Математическое описание электромеханической части системы «устройство возбуждения – синхронный турбогенератор» имеет вид:

$$\begin{aligned} M - (M_{21} - M_{13}) &= J_1 p \omega_1; \quad M_{21} - M_{c2} = J_2 p \omega_2; \quad -M_{13} - M_{c3} = J_3 p \omega_3; \\ pM_{21} &= C_{21}(\omega_1 - \omega_2); \quad pM_{13} = C_{13}(\omega_3 - \omega_1); \quad U_j = Ri_j + \frac{d\Psi_j(\theta, i_j)}{dt}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$M = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_{не}.$$

В результате имитационного моделирования вентильно-реактивной электрической машины с вентильным коммутатором, проведённого на ЭВМ в приложении Simulink SimPowerSystems компьютерной программы MATLAB, были получены данные её переходных процессов в виде осциллограммы (рисунок 6)

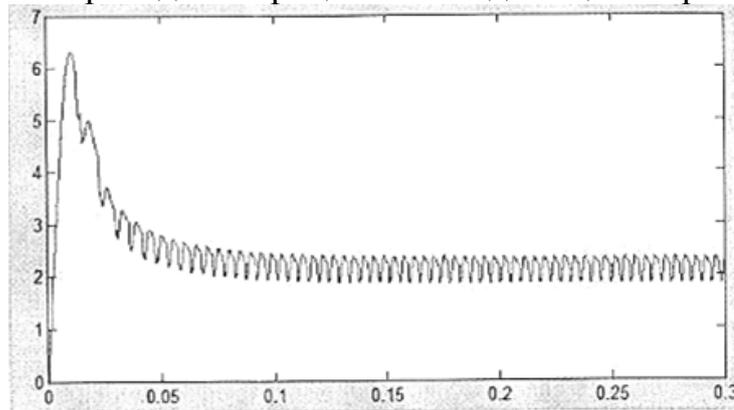


Рисунок 6

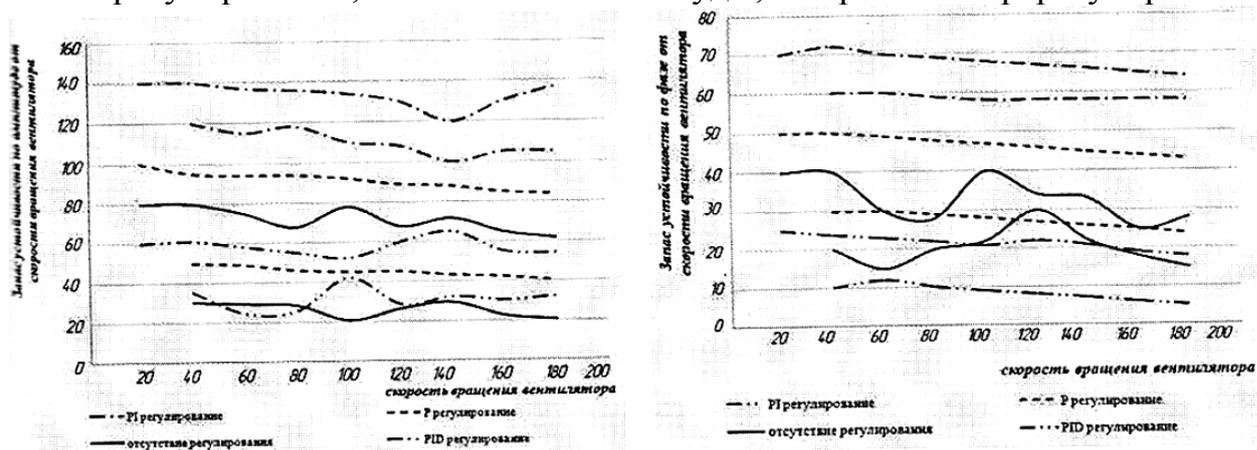
Полученные результаты имитационного моделирования позволили найти передаточные функции элементов обобщенной структуры системы «устройство возбуждения – синхронный турбогенератор»:

$$\begin{aligned} W_1(s) &= k_1, \quad W_2(s) = \frac{k_2}{T_2^2 s^2 + 1}, \quad W_3(s) = \frac{k_3}{T_3^2 s^2 + 1}, \quad W_4(s) = \frac{k_4}{T_4^2 s^2 + 1}, \\ W_5(s) &= \frac{k_5}{T_5^2 s^2 + 1}, \quad W_6(s) = \frac{k_6}{1 - T_6^2 s^2}, \quad W_7(s) = k_7, \quad W_8(s) = \frac{k_8}{T_8^2 s^2 + 1}, \\ W_9(s) &= \frac{k_9}{T_9^2 s^2 + 1}, \quad W_{10}(s) = \frac{k_{10}}{T_{10}s + 1}, \quad W_{11}(s) = \frac{k_{11}(T_{11}s + 1)}{(T_{11}s + 1)T_{11}s + k_{11}}, \\ W_{12}(s) &= \frac{k_{12}(T_{12}s + 1)}{(T_{12}s + 1)T_{12}s + k_{12}}, \quad W_{13}(s) = \frac{k_{13}}{T_{13}s^2 + 1}, \quad W_{14}(s) = \frac{k_{14}}{T_{14}s^2 + 1}, \\ W_{15}(s) &= \frac{k_{15}}{T_{15}s + 1}, \quad W_{16}(s) = \frac{k_{16}}{T_{16}s + 1}, \quad W_{17}(s) = k_{17}, \quad W_{18}(s) = \frac{k_{18}}{T_{18}s + 1}, \\ W_{19}(s) &= k_{19}, \quad W_{20}(s) = \frac{k_{20}}{T_{20}s^2 + 1}, \quad W_{21}(s) = \frac{k_{21}}{T_{21}s^2 + 1}, \quad W_{22}(s) = \frac{k_{22}}{T_{22}s^2 + 1}, \\ W_{23}(s) &= \frac{k_{23}}{T_{23}s^2 + 1}, \quad W_{24}(s) = \frac{k_{24}}{T_{24}s^2 + 1}, \quad W_{25}(s) = \frac{k_{25}(T_{25}s + 1)}{(T_{25}s + 1)T_{25}s + k_{25}}, \\ W_{\Sigma C}(s) &= k_{\Sigma C} \frac{T_{\Sigma C}s + 1}{T_{\Sigma C}s + 1}. \end{aligned} \quad (10)$$

На основании проведённого математического моделирования и полученных в результате него передаточных функций элементов обобщённой структуры определяются рациональные конструктивные и режимные параметры системы резервного возбуждения синхронного генератора. Для решения уравнений движения сформулированного математического описания системы, помимо структурного моделирования в приложении Simulink SimPowerSystems компьютерной программы MATLAB, использовано прямое решение используя метод Рунге-Кутты.

Структурное моделирование переходных процессов проводилось на основе уравнений движения и переходных функций элементов структуры в компьютерной программе MATLAB, наиболее распространённом и удобном языке для технических вычислений, который реализован методом Дормонда-Принса.

Проведена оценка качества автоматического регулирования системы для пропорционального регулятора P, пропорционально-интегрального регулятора PI и пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора PID. Выбор регулятора основан на требуемых показателях запаса устойчивости по фазе, по времени регулирования, по величине амплитуды, по времени перерегулирования.



а. запас устойчивости, разработанной системы по амплитуде

б. запас устойчивости по скорости формирования управляющих воздействий

Рисунок 7 – Результаты структурного моделирования для P, PI, PID регуляторов

На основе полученных результатов структурного моделирования по закону регулирования получается, что для автоматического регулирования разработанной системы «устройство возбуждения – синхронный турбогенератор» необходимо использовать пропорциональный регулятор P.

Проведено имитационное моделирование динамики переходных процессов разработанной системы резервирования возбуждения на основе реактивно-вентильного генератора в приложении Simulink SimPowerSystems компьютерной программы MATLAB, результаты которого изображены на рисунке 8.

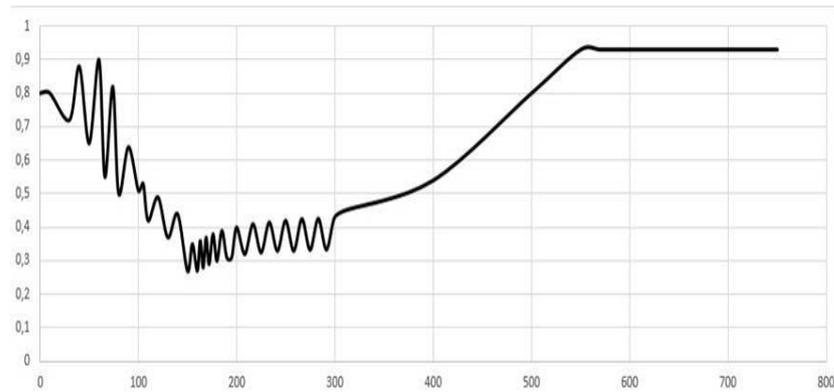


Рисунок 8

В четвёртой главе разработаны план и методика проведения экспериментальных исследований, удовлетворяющие лабораторным и производственным условиям. Проводимые испытания основаны на теории подобия физических процессов и составления критериев подобия, обеспечивающих получение требуемого уровня эффективности функционирования при интервале изменения минимальной вероятности безотказного функционирования системы P_n от 0,91 до 0,96 и числе испытаний n равном 103. Определены критерии подобия путем приведения уравнений математической модели конструктивной схемы (рисунок 3) на основе функциональных связей её элементов к безразмерному виду способом интегральных аналогов.

В соответствии с составленным планом проведения исследований для минимизации затрат требуемых ресурсов число экспериментальных испытаний n выбрано наименьшим обеспечивающим необходимый уровень эффективного безотказного функционирования электротехнической системы резервирования возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций за счёт использования функциональной избыточности, которая характеризуется коэффициентом запаса надёжности параметрической модели системы.

Для проведения планируемых испытаний подобрана подходящая аппаратура и разработан стенд для устройства резервирования возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций на основе реактивно-вентильного генератора (рисунок 9).

Стенд включает в себя: 1 – генератор квадратурных токов, формирующий измерительную электродвижущую силу, который в свою очередь представляет собой совокупность генератора квадратурных сигналов и двух линейных источников тока, выполненных на транзисторах и операционном усилителе; 2 – осциллограф; 3 – суперконденсатор системы рекуперации электрической энергии; 4 – генератор моделирования генераторного режима вентильно-реактивной электрической машины; 5 – датчики тока и напряжения; 6 – муфта с механическим тормозным устройством; 7 – вентильно-реактивная электрическая машина, с блоком коммутации; 8 – блок драйверов управления микропроцессорной системой; 9 – пульт управления генератором; 10 – микропроцессорная система управления; 11 – компьютер, осуществляющий сбор данных и формирование управляющих воздействий; 12 – вводно-распределительное устройство с блоками

питания и защитной автоматикой; 13 – частотный преобразователь для регулирования скорости вращения генератора.

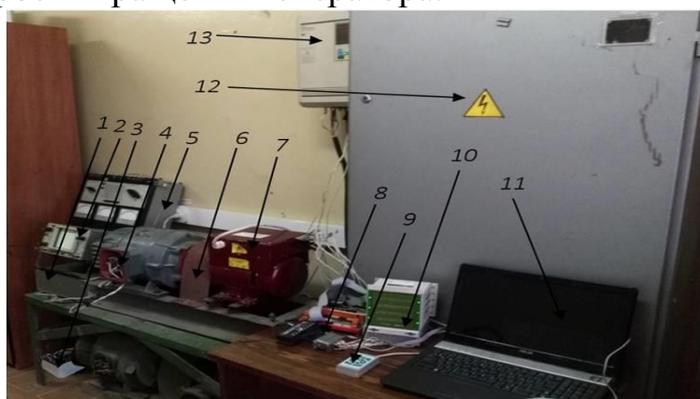
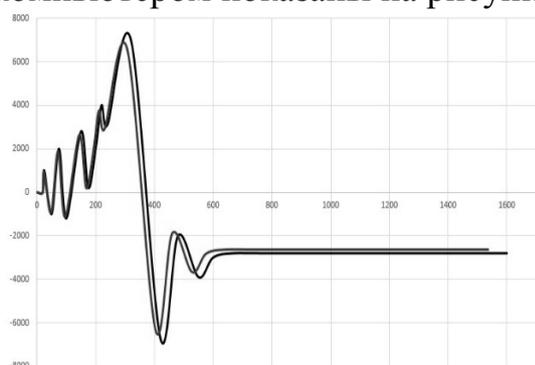


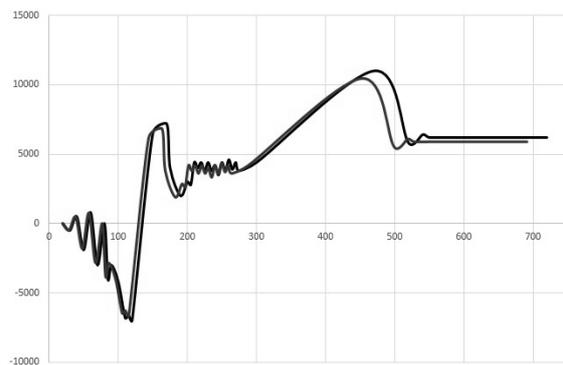
Рисунок 9 – Стенд и аппаратура экспериментальных исследований

Аппаратура, разработанная на базе компьютера, включает аналогово-цифровой преобразователь и комплект датчиков, обеспечивающих измерения мгновенных значения тока, напряжения и частоты вращения.

Результаты экспериментальных исследований, обработанных компьютером показаны на рисунке 10.



Потребление мощности реактивно-вентильного генератора



Вырабатываемая мощность реактивно-вентильного генератора

Рисунок 10 – Результаты экспериментальных исследований устройства резервирования возбуждения синхронного генератора на основе реактивно-вентильного генератора

Проанализировав полученные графические данные проведённого эксперимента приходим к заключению, что расхождение результатов теоретических и экспериментальных исследованиями составляет 10-14 %, что допустимо в инженерных расчетах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой поставлена и решена задача обоснования рациональной структуры функциональных связей, параметров и закономерностей формирования

управляющих воздействий резервной системы возбуждения, обеспечивающей непрерывный контроль качества генерируемой энергии и определяющей отказ основной системы возбуждения, и возможность гибко и с необходимым быстродействием управлять синхронным турбогенератором.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1 Повышение эффективности функционирования системы возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций можно достичь путём использования для резервирования возбуждения турбогенератора реактивно-вентильный генератор в совокупности с устройствами управления её режимами работы;

2 Установлены условия реализуемости конструкционной и функциональной надёжности системы резервирования возбуждения синхронного турбогенератора на основе реактивно-вентильного генератора;

3 Определены топология и структура функциональных связей электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора на основе реактивно-вентильного генератора;

4 В результате математического моделирования определены закономерности формирования управляющих воздействий и условия реализуемости для расчёта контролируемых параметров электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора на основе реактивно-вентильного генератора;

5 Определен уровень функциональной надёжности электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора на основе реактивно-вентильного генератора используя коэффициент нового технического уровня, учитывающий эффективность работы электротехнической системы;

6 Определены показатели надёжности электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора на основе реактивно-вентильного генератора;

7 Получены условия реализуемости надёжности, определяемые свойствами и условиями работы конструкционных материалов электротехнической системы резервного возбуждения синхронного турбогенератора на основе реактивно-вентильного генератора, и соответствием их функциональных параметров условиям эксплуатации;

8 Разработана структура системы «устройство возбуждения – синхронный турбогенератор» для резервирования возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций;

9 Разработана обобщенная структурная схема системы «устройство возбуждения – синхронный турбогенератор», и, установлены передаточные функции для её элементов;

10 Проведено имитационное математическое моделирование обобщенной структуры системы «устройство возбуждения – синхронный турбогенератор» для резервирования возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций;

11 Определены рациональные конструктивные и режимные параметры системы «устройство возбуждения – синхронный турбогенератор» для резервирования возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций;

12 На основе оценки запаса устойчивости и качества регулирования как наиболее эффективный для управление режимами работы системы «устройство возбуждения – синхронный турбогенератор» выбран пропорциональный регулятор P;

13 Разработаны план и методика проведения экспериментальных исследований устройства резервирования возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций за счёт использования реактивно-вентильного генератора, на основе которых подобрана подходящая аппаратура;

14 Проведено физическое моделирование системы резервирования возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций за счёт использования реактивно-вентильного генератора на основе теории подобия физических процессов и установленных его рациональных конструктивных и режимных параметров;

15 Разработан стенд для устройства резервирования возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций на основе реактивно-вентильного генератора, на котором проведены экспериментальные исследования, подтверждающие правильность разработанного нового технического решения и его эффективность, достигшую 20-25%;

16 Проведена проверка адекватности результатов теоретических исследований устройства резервирования возбуждения синхронного турбогенератора тепловых электростанций на основе реактивно-вентильного генератора путём их сравнения с результатами экспериментальных исследований, которая показала, что относительная погрешность не превышает 14%.

Публикации по теме диссертации:

1. Степанов В.М., Авдошин В.С., Карпунин Д.А. Устройство возбуждения генератора и контроля качества генерируемой электрической энергии вентильно-реактивным генератором: Патент на изобретение № 2690673 приоритет от 15.10.2018г. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 05.06.2019г.

2. Степанов В.М., Карпунин Д.А. Устройство резервного возбуждения синхронного генератора на основе реактивно-вентильного генератора Патент на изобретение 2759560 С1 от 15.11.2021.

3. Степанов В.М., Карпунин Д.А. Цифровые системы возбуждения синхронных генераторов, работающих в составе единой энергосистемы В сборнике: Энергетика будущего - цифровая трансформация. Сборник трудов II всероссийской научно-практической конференции. Липецк, 2021. С. 176-181.

4. Степанов В.М., Карпунин Д.А. Устройство резервного возбуждения синхронного турбогенератора на основе реактивно-вентильного генератора

/Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 6. С. 326-330.

5. Степанов В.М., Карпунин Д.А. Анализ конструктивных схем систем возбуждения синхронных генераторов, работающих в составе единой энергосистемы/Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 11. С. 27-32.