Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

На правах рукописи

ФИЛИМОНОВ Никита Юрьевич

Разработка и применение методики белого шума для настройки автоматических регуляторов возбуждения и верификации моделей энергосистем

Направление подготовки 13.06.01 – Электро- и теплотехника

Код и наименование

Направленность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

Код и наименование

Научный доклад

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: аспирант
Филимонов Никита Юрьевич
Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Юрганов Алексей Анатольевич

Санкт-Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе электроэнергетических систем Института энергетики федерального автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/зав. кафедрой:	Зверев Сергей Геннадьевич кандидат технических наук, доцент Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)
Научный руководитель:	Юрганов Алексей Анатольевич доктор технических наук, профессор Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)
Рецензент:	Сорокин Евгений Владимирович кандидат технических наук, доцент Акционерное общество «Научно-технический центр Единой энергетической системы Противоаварийное управление» (АО «НТЦ ЕЭС Противоаварийное управление»)

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте библиотеки по адресу: https://elib.spbstu.ru/

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Электроэнергетическая система (ЭЭС) является сложнейшим объектом, общее функционирование которого зависит от множества факторов и взаимного влияния друг на друга различных элементов. На энергосистему регулярно воздействуют как внутренние, так и внешние факторы, которые могут привести к нарушению её нормальной работы. Способность системы сопротивляться воздействующим факторам и переходить в квазистационарное состояние называют устойчивостью энергосистемы. Одним из ключевых факторов, определяющим надёжность работы ЭЭС является обеспечение устойчивости параллельной работы синхронных генераторов электростанций. При этом существенное влияние на устойчивость оказывает правильность работы систем возбуждения. От правильности работы систем возбуждения и автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) синхронных генераторов зависит качество выдаваемой электрической энергии, осуществление надёжной параллельной работы генератора с энергосистемой и другими генераторами электрической станции, обеспечение условий статической и динамической устойчивости. Современные системы управления и регулирования возбуждения выполняются на цифровой аппаратной базе. Вновь вводимые и модернизированные системы должны удовлетворять требованиям ГОСТ 21588-2018 «Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов» [7], а их автоматические регуляторы должны пройти обязательную сертификацию в соответствии с требованиями [15, 23, 26]. Модернизация может подразумевать как полную замену системы возбуждения, так и замену в части управления и регулирования с сохранением силовой части. После модернизации системы возбуждения необходимо выбрать оптимальную настройку АРВ, так как за время

эксплуатации могли измениться схемно-режимные условия прилегающей энергосистемы.

Правильная настройка каналов АРВ приводит к улучшению характеристик статической и динамической устойчивости параллельной работы, а также способствует эффективному демпфированию послеаварийных качаний в энергосистеме в диапазоне частот электромеханических колебаний от 0,1 до 2 Гц. Данный диапазон частот охватывает как медленные межсистемные колебания, так и более быстрые внутрисистемные колебания. Правильность настройки АРВ и эффективность каналов его регулирования, особенно каналов стабилизации, лучше всего наблюдается при серьёзных возмущениях в ЭЭС, которые приводят к возникновению электромеханических колебаний. Такими воздействиями являются короткие замыкания, набросы и сбросы нагрузки, обрывы и отключения линии. На практике при работе генератора в энергосистеме проведение таких испытаний запрещено по условиям обеспечения надёжности электроснабжения потребителей. Поэтому в настоящее время для настройки регуляторов используются несколько подходов:

1. Настройка некоторых каналов регулирования при работе генератора на холостом ходу. Выбор коэффициентов усиления остальных каналов при работе в сети осуществляется исходя из результатов опытов небольших возмущений или по опыту предыдущей эксплуатации.

2. Составление физических или математических моделей энергосистемы различной степени детализации и их последующий анализ.

Использование первого подхода может дать недостоверные результаты по ряду причин, но часто именно этот метод используется организациями, осуществляющими пусконаладочные работы на электрических станциях. Во-первых, в случае настройки АРВ при работе генератора на холостом ходу объектом регулирования является генератор, а при работе в сети объект регулирования - генератор, работающий в энергосистеме. Это принципиально разные объекты регулирования с различными

динамическими характеристиками. Выбор настроек коэффициентов по опыту эксплуатации также недостаточно корректен, так как структура энергосистемы претерпевает различные изменения, которые связаны с изменением топологии схем или изменением мощностей генерации и потребления. Коэффициенты, подобранные таким образом могут привести к недоиспользованию возможностей АРВ по обеспечению устойчивости, либо к снижению уровня устойчивости и ухудшению качества регулирования.

Использование второго подхода ограничено тем, что данные о структуре энергосистемы доступны только сетевым компаниям или диспетчерским центрам, которые непосредственно не участвуют в процессе пусконаладочных работ. К тому же, создание физических моделей, их обслуживание и эксплуатация требуют существенных материальных затрат. Использование математических моделей требует наличия мощных ЭВМ и использование специализированных программ, таких как Eurostag, PSS/E, RUSTab, Mustang. Одной из основных проблем такого подхода является то, что на этапе пусконаладочных работ невозможно наблюдать эффективность введения каналов стабилизации по стандартным программам испытаний, поэтому каналы регулятора, играющие существенную роль в обеспечении устойчивости энергосистемы, оказываются непроверенными. Эффективность их работы будет видна только в процессе эксплуатации или при аварии после получения данных с регистраторов аварийных событий.

Благодаря появлению и внедрению цифровой техники существенно расширились возможности анализа работы, сбора информации, самодиагностики, отображения элементов системы и различных измерений. Несмотря на это, структура системы автоматического регулирования и алгоритм регулятора сохранились такими же, как в предыдущих поколениях развития элементной базы [27]. В данный момент ведётся активная работа по разработке новых структур и принципов АРВ и стабилизаторов, основывающихся на традиционных детерминированных структурах с использованием классических передаточных функций [9, 10], нечёткой

логики [24, 25], нейро-нечётких моделей [1]. При использовании новых типов АРВ, им будут также присущи проблемы проверки эффективности настройки на реальном объекте.

Степень разработанности

При настройках с использованием физических моделей, цифро-аналоговых физических комплексов существует возможность сравнения переходных процессов при различных видах серьёзных возмущений в различных схемно-режимных ситуациях. Критерием оптимальной настройки в таких случаях является обеспечение устойчивости энергосистемы при всех нормативных воздействиях [18]. При настройках с использованием математических моделей помимо сравнения переходных процессов при различных видах серьёзных возмущений в разных схемно-режимных ситуациях добавляется возможность использования математического аппарата для предварительной оптимизации. Одними из известных методов является получение областей устойчивости в различных координатах с помощью критерия устойчивости Гурвица в осях Pgen и Qgen [11], метода D-разбиения в осях K_{0f} и K_{1f} [28], корневого анализа [2]. Ещё одним методом является математическое получение и сравнения частотных характеристик путём воздействия единичной импульсной дельта-функции Дирака [8]. Воздействие с помощью дельта-функции Дирака является серьёзным возмущением для энергосистемы и может быть выполнено только при математических исследованиях. Настройка АРВ в данной работе основывается на сравнении частотных характеристик, полученных на реальном объекте без серьёзного воздействия на энергосистему при нахождении её в квазистационарном состоянии при подаче белого шума на обмотку возбуждения.

Цели и задачи научной работы

Целью работы является разработка и внедрение метода белого шума для настройки АРВ сильного действия и верификации моделей энергосистем.

Задачами работы являются:

1. Анализ современных методов настройки АРВ сильного действия;
2. Реализация метода получения частотных характеристик на реальном генерирующем оборудовании, физических, математических моделях и обоснование критерия оптимальной настойки АРВ сильного действия;
3. Анализ специфики применения предложенного метода для настройки систем возбуждения различных типов;
4. Исследование эффективности метода на математических моделях в различных схемно-режимных ситуациях в одночастотной и многочастотной схемах;
5. Исследование эффективности метода на физических моделях и реальных генерирующих объектах.

Научная новизна

1. Разработана методика настройки АРВ путём сравнения частотных характеристик, полученных на реальном генерирующем объекте;
2. Сформулированы требования к параметрам белого шума, времени и частоты дискретизации сигналов для получения частотных характеристик;
3. Разработаны, составлены и исследованы математические и физические модели ЭЭС: простейшая схема электропередачи, четырёхмашинная тестовая схема, схема ОДУ Урала;
4. Даны рекомендации по выбору способов и средств улучшения динамических характеристик бесщёточных систем возбуждения;
5. Указана специфика применения методики настройки АРВ для различных типов систем возбуждения.

Практическая значимость работы

1. По результатам моделирования энергосистем была разработана и проверена методика, позволяющая осуществлять настройку АРВ непосредственно на реальном генерирующем объекте;
2. В программном обеспечении «REM-test», предназначенном для сервисного обслуживания регулятора АРВ-РЭМ700, разработан и добавлен программный модуль, позволяющий генерировать белый шум и получать частотные характеристики;
3. Отмечена специфика применения методики по снятию частотных характеристик для бесщёточных и высокочастотных систем возбуждения;
4. В программном обеспечении «REM-test», предназначенном для сервисного обслуживания регулятора АРВ-РЭМ700, добавлена функция для проведения испытаний по определению эквивалентной постоянной времени бесщёточного возбудителя, охваченного жёсткой обратной связью;
5. Проведены системные испытания на реальных генерирующих объектах с различными системами возбуждения.

Методы исследования

В работе использовались методы теории электрических машин, математического и физического моделирования ЭЭС, теории автоматического регулирования, численных методов решения дифференциальных уравнений, теории цифровой обработки сигналов. Математическое моделирование было выполнено в среде «Matlab&Simulink». Физическое моделирование выполнено на цифроаналоговом физическом комплексе АО «НТЦ ЕЭС» и на электродинамической модели ООО «НПП «Русэлпром-Электромаш». Системные испытания на реальных объектах были проведены на турбогенераторах Белоярской и Запорожской АЭС.

Защищаемые научные положения

1. Метод получения частотных характеристик генераторов, работающих в энергосистеме, с помощью подачи белого шума на обмотку возбуждения, обоснование вида и параметров шума;
2. Выбор способов и средств улучшения динамических характеристик бесщёточных и высокочастотных систем возбуждения;
3. Выявленные закономерности и критерий настройки коэффициентов усиления АРВ-СД в зависимости от количества частот электромеханических колебаний и их величины;
4. Обоснование необходимости и безопасности подобных испытаний на любом генерирующем оборудовании любой мощности в процессе пусконаладочных работ и планово-предупредительных ремонтов оборудования для настройки, проверки эффективности каналов АРВ и верификации моделей ЭЭС.

Степень достоверности

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации, подтверждена результатами расчётов на персональном компьютере, исследованиями на физических моделях и системными испытаниями на реальных генерирующих объектах.

Апробация результатов работы

Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, EECE – 2018. (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018);
2. IEEE Conference Of Russian Young Researchers In Electrical And Electronic Engineering (2020 ElConRus) (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2020).

Личный вклад автора

Определение и обоснование характеристик шума, подаваемого на обмотку возбуждения генератора. Обработка сигналов режимных параметров для получения частотной характеристики. Реализация алгоритма сглаживания частотной характеристики для большей её наглядности. Составление технического задания на разработку программного обеспечения для получения частотных характеристик. Составление технического задания на разработку программного обеспечения для определения эквивалентной постоянной времени бесщёточного возбудителя, охваченного жёсткой обратной связью. Разработка и исследование цифровых и физических моделей схем ЭЭС и проверка методики настройки. Разработка рабочих программ испытаний и непосредственное участие в пусконаладочных и сервисных работах на электростанциях с целью проверки методики.

Публикации

По теме диссертации в соавторстве опубликовано 9 печатных работ, из них 4 – в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены обоснование актуальности выбранной темы исследования, степень её разработанности, цели и задачи научной работы, научная новизна, практическая значимость работы, методы исследования, защищаемые научные положения, степень достоверности, апробация результатов работы, публикации и личный вклад автора.

В первой главе дано описание обобщённого АРВ сильного действия отечественного производства. Отмечено влияние параметров системы на результирующую частоту электромеханических колебаний. Представлена структурная схема автоматического регулятора возбуждения сильного действия со значениями постоянных времени по умолчанию, а также частотные характеристики всех каналов регулирования. Указаны основные принципы стабилизации на примере двухмашинной схемы энергосистемы. Отмечено, что демпфирование внутреннего угла осуществляет канал по производной тока ротора. Демпфирование составляющей внешнего угла осуществляют каналы по частоте и производной частоты напряжения статора генератора.

Во второй главе представлено описание испытательного сигнала, параметров записи и обработки осциллограмм для получения частотных характеристик. Необходимо, чтобы спектр шума был равномерным как минимум в диапазоне частот от 0,1 до 5 Гц, а при величинах, больших 5 Гц амплитуда начинала бы снижаться до нуля. Создание шума с частотами, превышающими 15 Гц, крайне нежелательно, так как появляется опасность резонанса на критических частотах вращения вала агрегата. При возникновении резонанса частоты источника шума с критической частотой вала происходит возрастание амплитуды электромагнитного момента генератора при неизменном вращающем моменте турбины. В результате возникают крутильные колебания вала агрегата [32]. Опасное сечение, по которому может произойти разрушение вала в зависимости от конструкции, числа цилиндров и конфигурации агрегата может находиться в различных

его частях. Опасным сечением является такое сечение, которому соответствует нулевое значение углового перемещения. На рисунке 1, показано примерное расположение опасного сечения в зависимости от наличия или отсутствия возбудителя на общем валопроводе. Если агрегат имеет отдельный возбудитель, находящийся на одном валу с турбогенератором, то опасное сечение находится на участке вала между генератором и возбудителем. Этот участок имеет меньший диаметр, чем остальной валопровод, поэтому возникновение крутильных колебаний приводит к быстрому разрушению вала на нём [32]. Если генератор не имеет возбудителя, то опасное сечение находится в районе муфты, соединяющей генератор и турбину. В этом случае разрушение может происходить не сразу, а только после превышения предела усталостной прочности. Возможность работы в таких режимах должна быть обоснована дополнительными механическими расчётами.

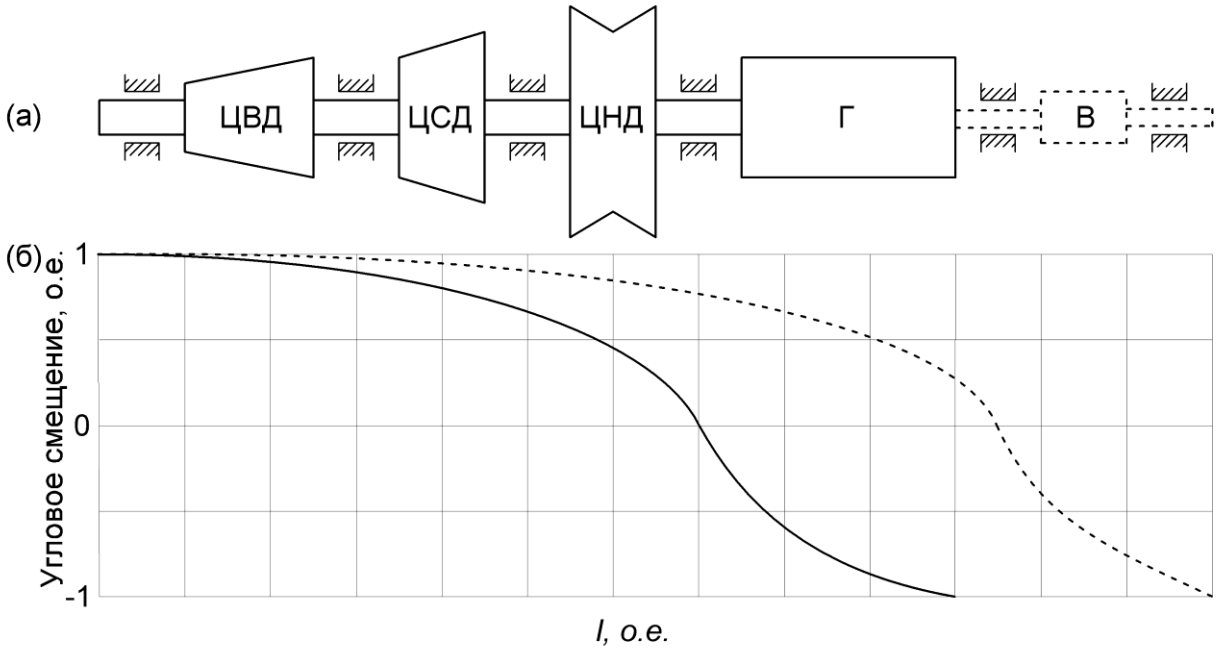

Рисунок 1 – Опасное сечение. а) валопровод агрегата, б) зависимость углового перемещения сечения от длины: сплошная линия – при отсутствии возбудителя на валу, штриховая – при наличии возбудителя на валу.

На рисунке 2 изображена ориентировочная зависимость первой критической частоты вращения $f_{кр1}$ и второй критической частоты вращения

вала $f_{кр2}$ от соотношения длины активной части ротора к его диаметру λ_2 (l_2/D_2) [29]. Для турбогенераторов нормального исполнения отношение λ_2 колеблется от 2,5 до 6, что по рисунку 2 соответствует диапазону частот от 15 до 35 Гц. С учётом отстройки от возможных резонансных частот необходимо ограничить спектр шума частотой 15 Гц.

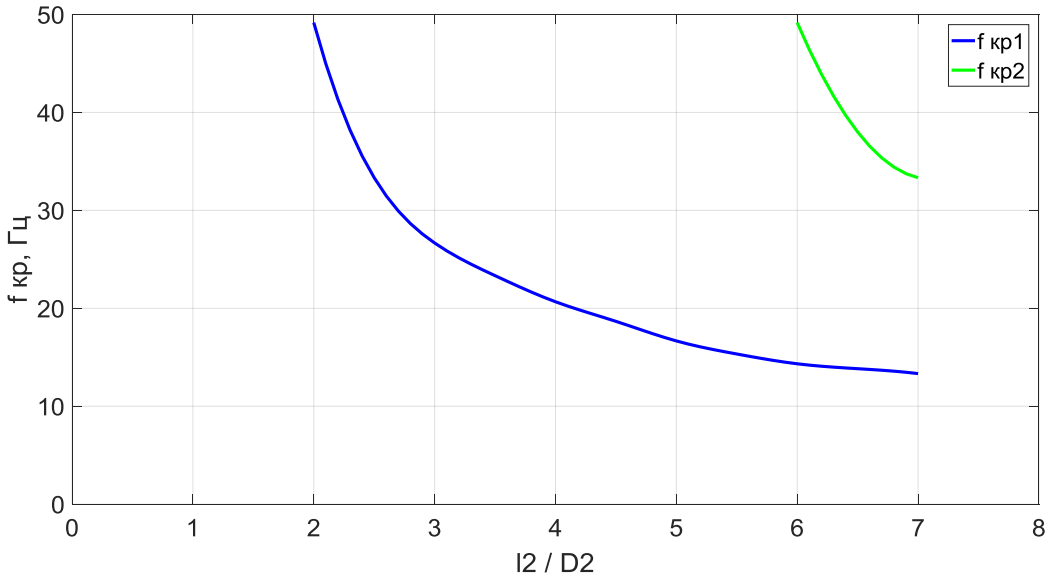

Рисунок 2 – Ориентировочная зависимость первой и второй критических частот вала от соотношения длины ротора к его диаметру

Амплитуда сигнала шума должна быть выбрана таким образом, чтобы генератор находился в линейном режиме регулирования и имел достаточное воздействие на прилегающую энергосистему.

Снятие частотных характеристик производится в режимах работы генератора с номинальной загрузкой по активной мощности при различных значениях реактивной мощности. Значение тока возбуждения не должно превышать номинального значения 1 е.т.р. Различные типы систем возбуждения могут иметь разные потолочные значения по напряжению возбуждения генератора. Минимальное значение потолочного значения для современных генераторов отечественного производства 2 е.в.н., нижнее ограничение при этом – от 1,4 до 1,7 в зависимости от максимального угла при инвертировании. Для того, чтобы корректно снять частотную характеристику необходимо, чтобы напряжение возбуждения генератора не

попадало в области вступления ограничителей как сверху, так и снизу. В противном случае спектр подаваемого шума будет искажён, он станет неравномерным, математическое ожидание шума перестанет быть нулевым, а режим не будет квазистационарным, что повлечёт изменение режима работы синхронного генератора.

Величины максимальных отклонений шума за длительный промежуток времени в зависимости от величины среднеквадратичного отклонения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Максимальные отклонения при различных среднеквадратичных отклонениях шума

Среднеквадратичное отклонение, е.в.н.	0,5	0,4	0,3	0,2
Максимальное отклонение за длительный промежуток времени (1 час), е.в.н.	1,265	1,012	0,759	0,506

На рисунке 3 представлены варианты подаваемого шума, а на рисунке 4 – частотные спектры в зависимости от величины заданного среднеквадратичного отклонения.

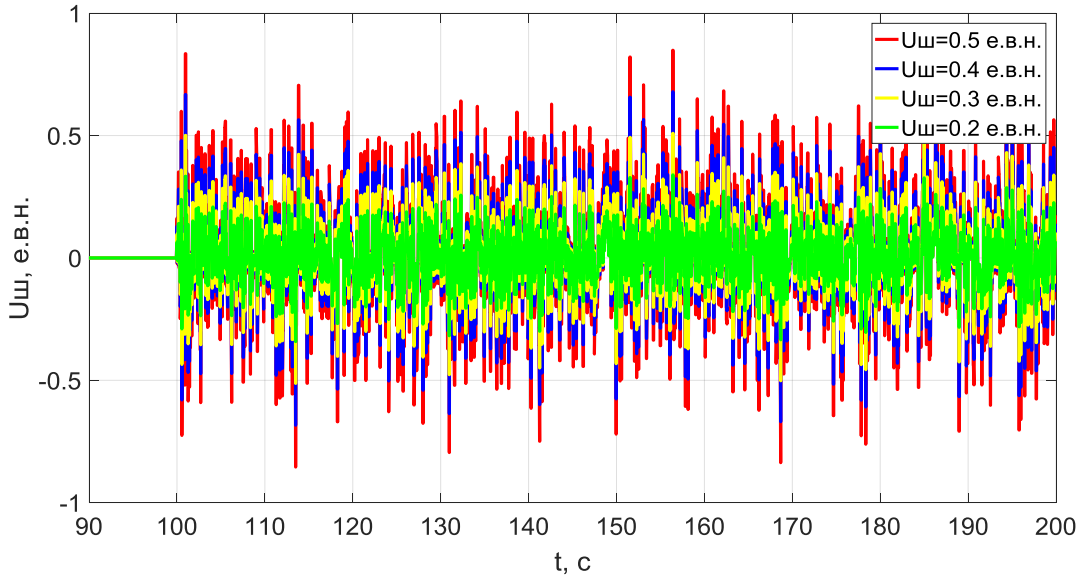

Рисунок 3 – Шум, подаваемый на обмотку возбуждения, в зависимости от величины среднеквадратичного отклонения

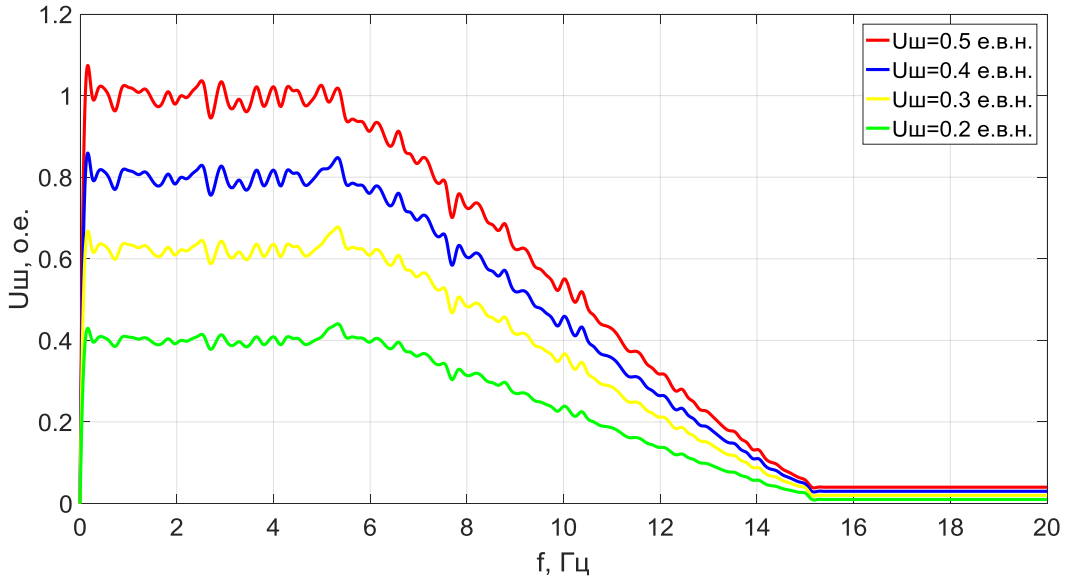

Рисунок 4 – Спектр шума, подаваемого на обмотку возбуждения, в зависимости от величины среднеквадратичного отклонения

В соответствии с таблицей 1 при величине среднеквадратичного отклонения 0,4 е.в.н. амплитуда шума за 1 час наблюдения не превышает 1,012 е.в.н., поэтому регулятор в режиме подачи шума при параметрах, близких к номинальному режиму не будет входить в ограничения «сверху» и «снизу» даже при потолочном значении 2 е.в.н., что является оптимальным вариантом. При значении 0,5 е.в.н. амплитуда шума достигает значений, при

которых регулятор достигает значений ограничений по напряжению возбуждения при потолочном значении 2 е.в.н. Отметим, что допустимая величина амплитуды шума определяется предельными значениями напряжения возбуждения.

Для получения частотных характеристик используется быстрое преобразование Фурье (БПФ). Когда входные данные представлены как функции времени, БПФ разбивает данные на частотные составляющие. Использование БПФ снижает вычислительные затраты по сравнению с прямой реализацией преобразования.

Считается, что синусоиду можно с достаточной точностью отобразить при числе точек на период, порядка 20 и больше [30]. Самая высокая интересующая частота колебаний накладывает ограничение на частоту дискретизации. В данном случае, такой частотой является 10 Гц. Низкочастотные колебания на частоте 0,1 Гц при всех частотах дискретизации, указанных в таблице 2, имеют достаточно точное отображение. Слишком высокая частота дискретизации приводит к необоснованному увеличению вычислительной способности регуляторов, хотя для современных микропроцессорных систем данная проблема зачастую уходит на второй план. На основании вышеизложенного, рекомендуемые частоты дискретизации для записи осциллограмм – выше 250 Гц. Частота дискретизации, с которой будет осуществляться осцилографирование в дальнейших исследованиях будет принята равной 250 Гц.

При использовании алгоритма БПФ возможно осуществить ускоренное вычисление дискретного преобразования Фурье с вычислительной сложностью $O(nlog(n))$, что существенно лучше вычислительной сложности дискретного преобразования Фурье $O(n^2)$. Для осуществления БПФ необходимо, чтобы число точек разложения являлось степенями 2. При ранее выбранной частоте дискретизации и времени выборки степень числа «2» задаёт основные параметры разложения, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры разложения входных данных

Степень числа «2» (2^N)	9	10	11	12
Количество точек преобразования, шт	512	1024	2048	4096
Шаг спектра по частоте при выбранной частоте дискретизации 250 Гц	0,488	0,2441	0,122	0,061
Минимальное время записи для БПФ, с	2,048	4,096	8,192	16,384

Основным показателем, по которому необходимо выбирать степень числа «2» и количество точек разложения является шаг спектра по частоте при выбранной частоте дискретизации 250 Гц. Достаточным шагом частоты является значение порядка 0,1 Гц. В связи с этим, во всех дальнейших исследованиях будет использовано разложение БПФ по $2^{11} = 2048$ точкам, что обеспечивает шаг спектра по частоте 0,122 Гц.

Рассмотрим реакцию основных выходных параметров генератора при воздействии шума с разным среднеквадратичным отклонением. Каждый график будет представлен отдельно для наглядного отображения уровня колебаний выходных параметров. На рисунке 5 изображены напряжения статора синхронного генератора, а на рисунке 6 – активные мощности синхронного генератора при подаче шума на обмотку возбуждения при различных величинах среднеквадратичного отклонения шума.

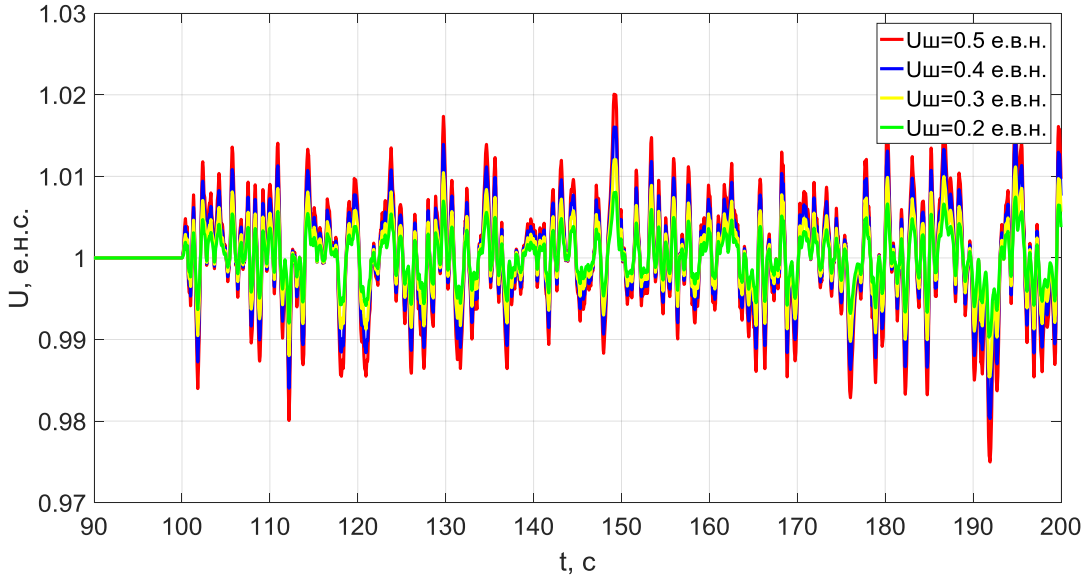

Рисунок 5 – Изменение напряжения статора генератора в режиме шума

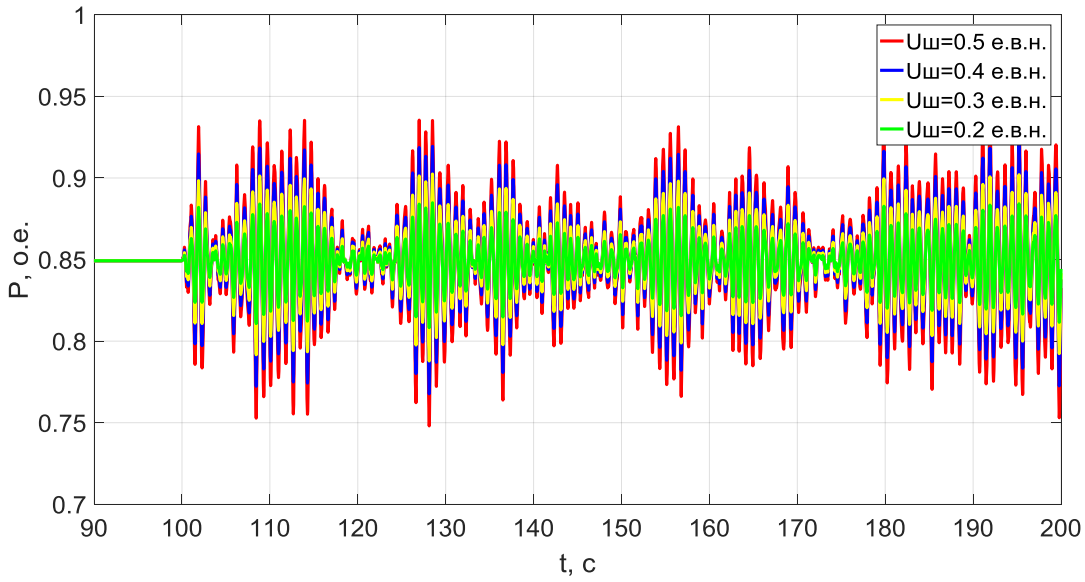

Рисунок 6 – Изменение активной мощности генератора в режиме шума

Из представленных рисунков 5, 6 видно, что основные параметры генератора изменяются в допустимых пределах и несущественно влияют на режим работы генератора.

Для сравнения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и фазо-частотных характеристик (ФЧХ) при различных схемно-режимных ситуациях, настройках регуляторов возбуждения и системных стабилизаторов необходимо получить несколько частотных характеристик и нанести их на один график.

На рисунке 7 изображены АЧХ, полученные после применения алгоритма БПФ к активной мощности генератора. Для избежание случайных воздействий во время снятия частотных характеристик рекомендуется выполнять усреднение не менее, чем на 10 интервалах.

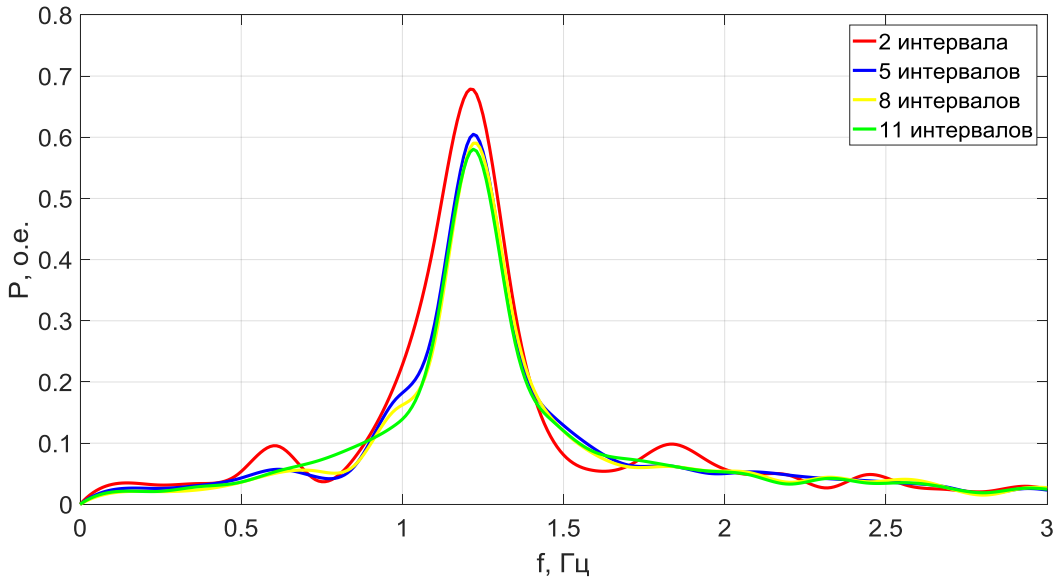

Рисунок 7 – АЧХ со сглаживанием при различном количестве интервалов усреднения по активной мощности

Частотные характеристики имеет тесную связь с возникающими электромеханическими переходными процессами в энергосистемах. При переходных процессах в выходных параметрах генераторов наблюдаются частоты колебаний, соответствующие резонансным пикам АЧХ. Большему пику, соответствует большая амплитуда колебаний и худшее затухание на данной частоте. Главным критерием эффективной настройки регулятора возбуждения и системного стабилизатора является наименьшая величина одного или нескольких резонансных пиков. При наличии нескольких частот электромеханических колебаний в энергосистеме необходимо стремиться к эффективному демпфированию всех частот, что соответствует снижению амплитуд всех резонансных пиков АЧХ.

В третьей главе представлены способы и средства улучшения динамических характеристик бесщёточных систем возбуждения (БСВ).

Структурная схема БСВ изображена на рисунке 8.

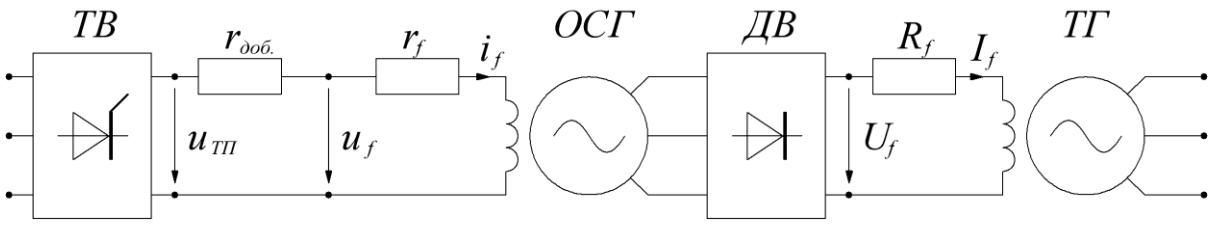

Рисунок 8 – Структурная схема БСВ

БСВ из-за использования обращённого синхронного генератора (ОСГ), обладающего своими постоянными времени и реакцией якоря при изменении нагрузки имеют существенный недостаток – динамические характеристики, ухудшающие регулирование. Наличие инерционного элемента в обратной связи АРВ оказывает значительное влияние на протекание переходных процессов, на уровень устойчивости энергосистемы и качество регулирования. Улучшение динамических характеристик является одной из важнейших задач при проектировании и вводе в работу БСВ.

При наложении шума на выходной сигнал АРВ в БСВ колебания возникают в напряжении возбуждения ОСГ. Для того, чтобы получить отклик турбогенератора в энергосистеме необходимо, чтобы колебания возникли и в напряжении возбуждения турбогенератора. Для этого необходимо увеличить величину среднеквадратичного отклонения шума по сравнению со статическими тиристорными системами возбуждения, при этом предварительно должны быть улучшены динамические характеристики БСВ.

Для улучшения динамических характеристик БСВ принимают ряд мер:

1. Установка активного добавочного сопротивления последовательно в обмотку возбуждения ОСГ;
2. Увеличение значения кратности форсировки напряжения возбуждения ОСГ;
3. Реализация жёсткой отрицательной обратной связи (ЖОС) по напряжению возбуждения основного генератора или по току возбуждения ОСГ.

Указанные методы улучшают динамические характеристики БСВ, но в специализированной литературе по разработке [5, 6], проектированию [4], вводе в работу [16] и эксплуатации БСВ [17] нет чёткого описания выбора тех или иных мер и не даются рекомендации по их выбору. Из-за недостатка или отсутствия структурированной информации по данному вопросу часто можно наблюдать использование одного и того же типового решения для БСВ, имеющих в своём составе генераторы и возбудители с существенно различающимися паспортными данными.

Важнейшими динамическими характеристиками БСВ, определяющими характер регулирующего воздействия, являются быстродействие и величины частотных искажений по амплитуде и фазе. Несмотря на зависимость перечисленных динамических характеристик от ряда одинаковых параметров, их следует разделить ввиду некоторых важных отличий.

В ГОСТе на системы возбуждения [7] указаны требования к быстродействию. Согласно ГОСТ, БСВ является быстродействующей, если выполнены следующие требования:

1. Увеличение напряжения возбуждения основного генератора от номинального напряжения до 95% потолочного значения происходит за время, меньшее, чем 0,12 с.;
2. Снижение напряжения возбуждения основного генератора от потолочного значения до 3% напряжения возбуждения холостого хода происходит за время меньшее, чем 0,3 с.

Выполнение перечисленных требований по быстродействию необходимо определять при формировании АРВ углов зажигания тиристоров возбудителя, соответствующих полной форсировке или расфорсировке, то есть при работе АРВ в нелинейных режимах, в которых наличие, тип и величина ЖОС не оказывает никакого влияния на динамику переходных процессов.

Факторами, оказывающими наибольшее влияние на быстродействие, являются:

1. Величина потолочного значения напряжения возбуждения ОСГ;
2. Переходная постоянная времени ОСГ, нагруженного на обмотку возбуждения главного генератора с учётом добавочного сопротивления.

В отличие от быстродействия, понятие частотного искажения не закреплено ни в каких действующих нормативных документах, но само явление частотных искажений по амплитуде и фазе оказывает значительное влияние на работу регулятора в линейном диапазоне регулирования до ограничений «сверху» и «снизу», что было отмечено в более ранних исследованиях [3, 19, 31]. ОСГ вносит искажения по фазе и по амплитуде в регулирующий сигнал, создаёт дополнительное запаздывание. Для компенсации частотных искажений реализуют ЖОС, охватывающую ОСГ. Возможны варианты организации ЖОС по току возбуждения ОСГ или по напряжению возбуждения главного генератора при наличии измерительных щёток на роторе. Правильным выбором величины ЖОС можно снизить эквивалентную постоянную времени ОСГ и добиться отсутствия частотных искажений в диапазоне частот электромеханических колебаний. Отсутствие частотных искажений в диапазоне до 3 Гц позволяет регулятору воздействовать на напряжение возбуждения генератора в нужной фазе и с определённым коэффициентом усиления.

Факторами, оказывающими наибольшее влияние на частотные искажения, являются:

1. Величина ЖОС по току возбуждения ОСГ или по напряжению возбуждения главного генератора;
2. Переходная постоянная времени ОСГ, нагруженного на обмотку возбуждения главного генератора, с учётом добавочного сопротивления.

В управляющем сигнале АРВ и, следовательно, в напряжении возбуждения помимо основной составляющей всегда присутствуют высокочастотные пульсации в диапазоне частот, как правило, выше 5 Гц. Их появление обусловлено особенностями измерений, фильтрации и

выбранными методами обработки сигналов. На рисунке 9 изображена реализация жёсткой отрицательной обратной связи в БСВ с указанием сигналов. Также на рисунке 9 указаны сигналы, состоящие из основных составляющих и добавочных значений пульсаций, обозначенными дополнительным символом «дельта».

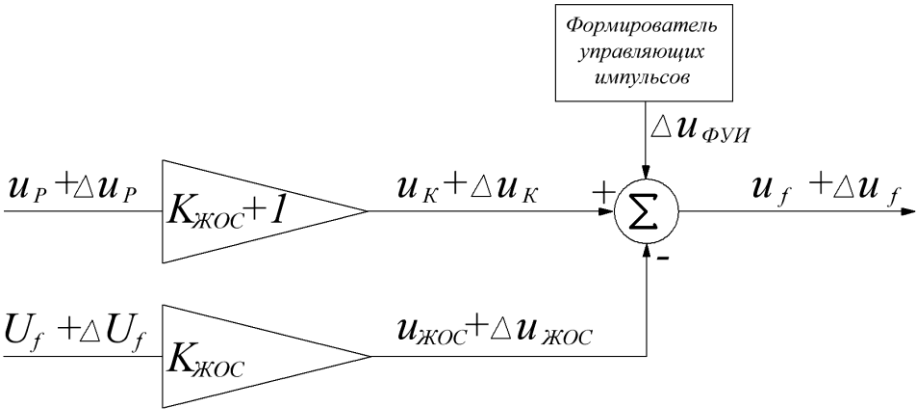

Рисунок 9 – Реализация жёсткой отрицательной обратной связи в БСВ

Пульсации рассмотрим по модулю, что представлено в формуле 1:

$$\Delta u_f = \left|\Delta u_{REG} \cdot (K_{ЖОС} + 1)\right| + \left|\Delta U_f \cdot K_{ЖОС}\right| + \left|-\Delta\alpha \cdot \sqrt{u_{f\max}{}^2 - u_{f0}{}^2}\right| = \quad (1)$$

$$= \Delta u_{REG} \cdot (K_{ЖОС} + 1) + \Delta U_f \cdot K_{ЖОС} + \Delta\alpha \cdot \sqrt{u_{f\max}{}^2 - u_{f0}{}^2}$$

где u_f– отклонение напряжения возбуждения ОСГ;

$\Delta\alpha$– отклонение угла зажигания тиристора от значения, заданного регулятором.

u_{fmax}– максимальное (потолочное) значение напряжения возбуждения ОСГ;

Δu_{REG}– пульсации регулятора по каналам напряжения статора и стабилизации;

$K_{ЖОС}$– коэффициент усиления ЖОС;

ΔU_f– пульсации напряжения возбуждения главного генератора;

Пульсации Δu_{REG}, ΔU_f, $\Delta\alpha$ имеют ненулевое значение. Согласно выражению 1, при одинаковых значениях Δu_{REG}, ΔU_f, $\Delta\alpha$ пульсация напряжения возбуждения ОСГ Δu_f увеличивается при:

1. Увеличении коэффициента усиления ЖОС $K_{ЖОС}$;

2. Увеличении потолочных значений напряжения возбуждения ОСГ u_{fmax} и u_{fmin};
3. Уменьшении величины напряжения возбуждения ОСГ в рассматриваемом установившемся режиме работы тиристорного преобразователя u_{f0}.

В результате, наименьшие пульсации напряжения возбуждения ОСГ будут при меньших коэффициентах усиления ЖОС, меньших значениях потолочных напряжений возбуждения ОСГ и при работе тиристорного преобразователя в установившемся режиме работы с меньшими углами зажигания тиристора.

Пульсации напряжения возбуждения ОСГ или главного генератора сами по своей сути не являются опасными, так как динамика регулирования определяется средним значением напряжения возбуждения, а обмотка возбуждения имеет запаздывание, определяемое собственной постоянной времени. Однако, при определённом значении амплитуды пульсаций напряжения возбуждения происходит появление пульсаций в токе возбуждения, что вызывает появление пульсаций всех выходных параметров генератора (напряжение и ток статора генератора, активная и реактивная мощность, электромагнитный момент).

На рисунке 10 изображены высокочастотные пульсации напряжения возбуждения ОСГ и их появление в токе возбуждения ОСГ при увеличении коэффициента ЖОС. Графики получены при натурных испытаниях турбогенератора ТВВ-1000 с бесщёточным возбудителем БВД-4600 на АЭС с реакторами ВВЭР-1000.

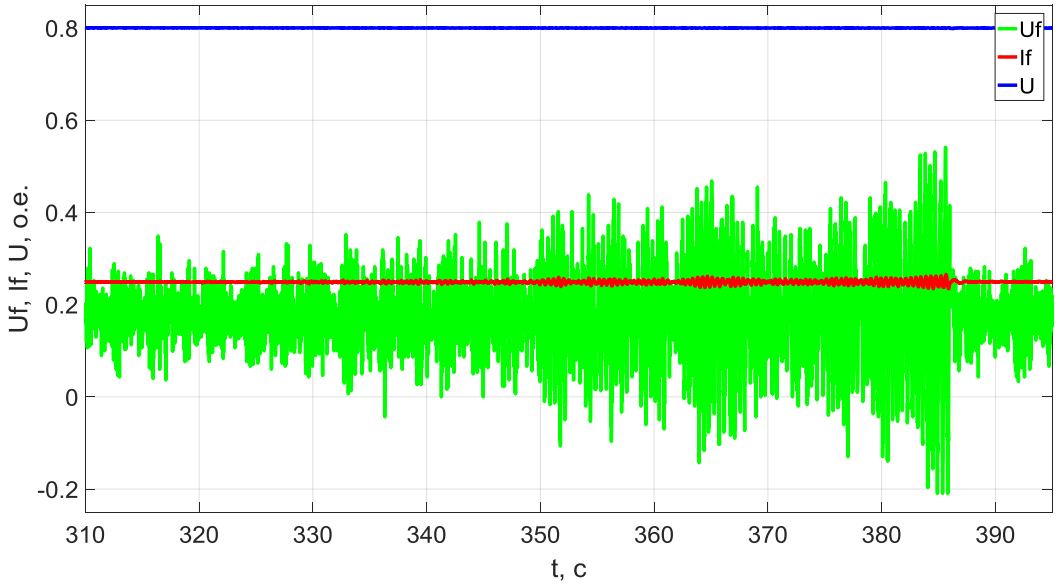

Рисунок 10 – Высокочастотные пульсации при увеличении коэффициента ЖОС в режиме холостого хода турброгенератора

Пульсации напряжения возбуждения ОСГ увеличиваются при увеличении кратности форсировки возбуждения возбудителя и при увеличении коэффициента усиления ЖОС. В результате, для получения меньших пульсаций напряжения возбуждения необходимо:

1. Обеспечить отсутствие частотных искажений в рабочем диапазоне частот электромеханических колебаний минимальными значениями коэффициента усиления ЖОС;
2. Обеспечить достижение быстродействия в соответствии со стандартом на систему возбуждения минимальными значениями кратности форсировки возбуждения ОСГ.

В качестве примера выполним выбор необходимых параметров для улучшения динамических характеристик бесщёточного возбудителя БВД-4600-1500, работающего с генератором ТВВ-1000 [13].

На рисунке 11 изображены зависимости напряжения возбуждения главного генератора при форсировке от номинального значения до потолочного, а на рисунке 12 при расфорисровке от потолочного значения до минимального с различными кратностями форсировки возбуждения ОСГ при

установке добавочного резистора в обмотке возбуждения ОСГ, равного 0,3 Ом.

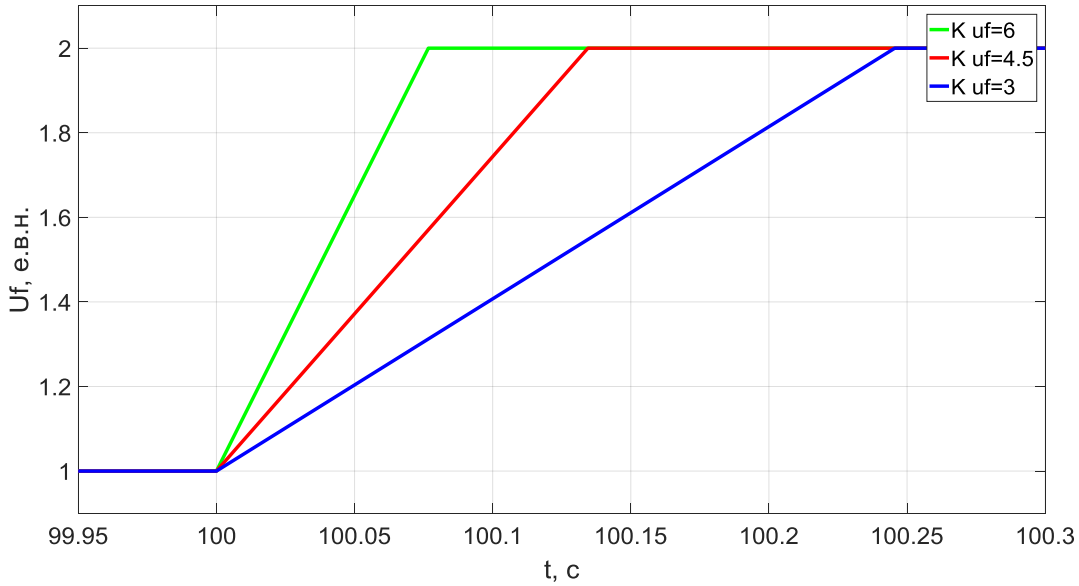

Рисунок 11 – Напряжения возбуждения главного генератора при форсировке от номинального значения до потолочного с различными кратностями форсировки возбуждения ОСГ с добавочным резистором 0,3 Ом

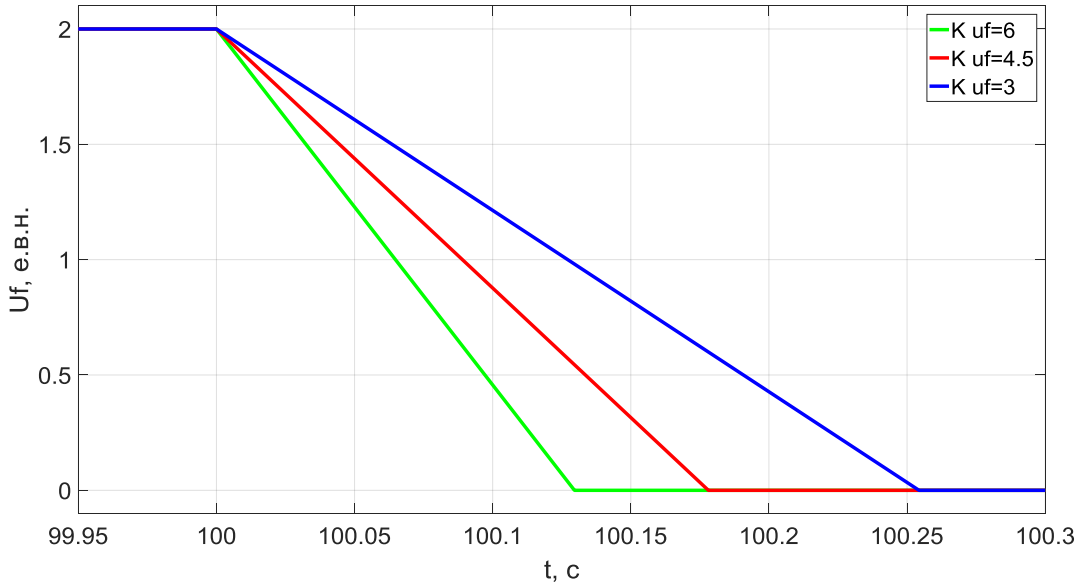

Рисунок 12 – Напряжения возбуждения главного генератора при расфорсировке от потолочного значения до минимального с различными кратностями форсировки возбуждения ОСГ с добавочным резистором 0,3 Ом

На рисунках 13 и 14 изображены логарифмические частотные характеристики ОСГ при различных коэффициентах ЖОС при установке

добавочного резистора в обмотке возбуждения ОСГ, равного 0,3 Ом. На графики нанесены частотные характеристики апериодического звена первого порядка с постоянной времени 0,054 с., что соответствует модели статической тиристорной системы возбуждения.

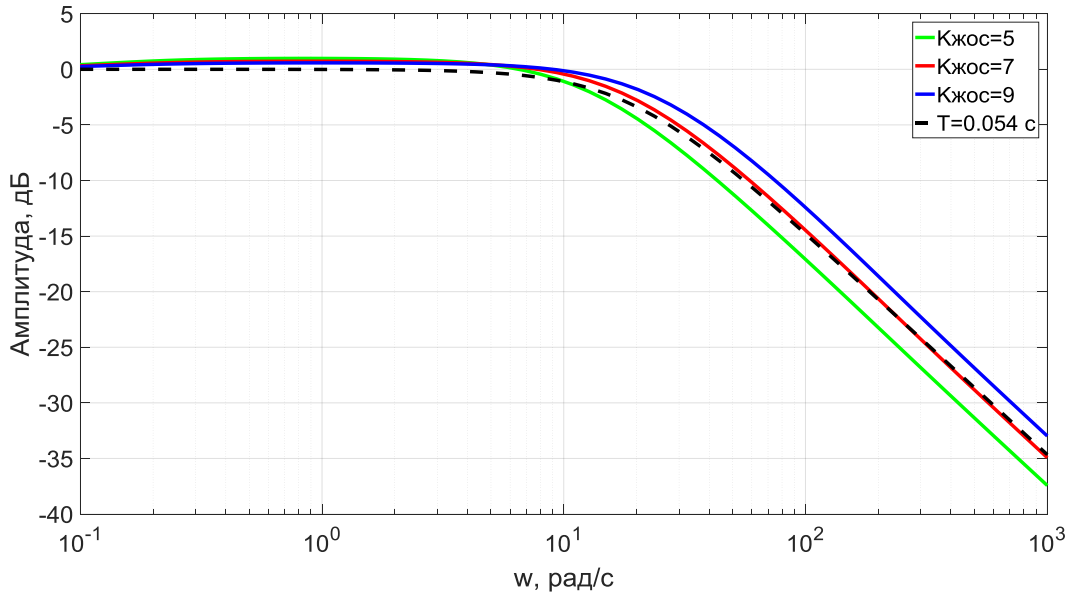

Рисунок 13 – Логарифмические амплитудочастотные характеристики ОСГ с добавочным резистором 0,3 Ом при различных ЖОС: 1 – ЖОС 5, 2 – ЖОС 7, 3 – ЖОС 9, 4 – апериодическое звено первого порядка с постоянной времени 0,054 с.

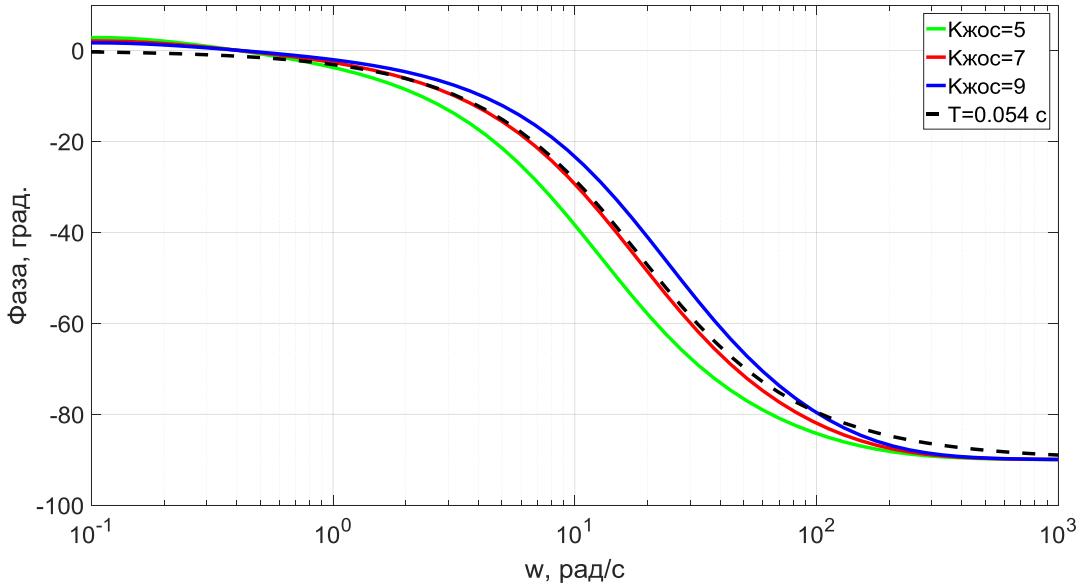

Рисунок 14 – Логарифмические фазочастотные характеристики ОСГ с добавочным резистором 0,3 Ом при различных кратностях ЖОС: *1* – ЖОС 5, *2* – ЖОС 7, *3* – ЖОС 9, *4* – апериодическое звено первого порядка с постоянной времени 0,054 с.

Согласно рисункам 11 и 12 минимальным значением кратности форсировки возбуждения ОСГ для соответствия требованиям по быстродействию является 4,5. Согласно рисункам 13 и 14 минимальным значением коэффициента ЖОС, при котором отсутствуют частотные искажения в диапазоне частот до 3 Гц является значение 7. Добавочная рассеиваемая мощность на резисторе в номинальном режиме работы равна 11,4 кВт. Величина напряжения на вторичной обмотке преобразовательного трансформатора 200 В, мощность трансформатора 55 кВА. Значения минимальной кратности форсировки возбуждения ОСГ и коэффициента усиления ЖОС ниже 10, поэтому при такой конфигурации силового оборудования и настроечных параметров в напряжении возбуждения ОСГ уровень высокочастотных пульсаций будет приемлемым.

Минимальная кратность форсировки ОСГ для обеспечения требований быстродействия и минимальный коэффициента ЖОС, при котором отсутствует частотное искажение в рабочем диапазоне до 3 Гц, были найдены при различных значениях добавочного сопротивления. Результаты сравнения полученных параметров бесщёточного возбудителя БВД-4600-

1500 при различных значениях добавочного сопротивления, установленного последовательно в обмотке возбуждения ОСГ, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение динамических характеристик бесщёточного возбудителя БВД-4600-1500 при различных значениях добавочного сопротивления в обмотке возбуждения ОСГ

Характеристика	Единицы измерения	Величина добавочного резистора, Ом			
		0	0,1	0,3	0,5
Результирующая переходная постоянная времени ОСГ	с	1,8	1,22	0,71	0,5
Минимальный коэффициент усиления ЖОС, при котором частотные искажения отсутствуют в диапазоне до 3 Гц	-	18	3	7	5
Минимальная кратность форсировки возбуждения ОСГ по напряжению для выполнения требований по быстродействию	-	9,5	7	4,5	3,5
Мощность, рассеиваемая на добавочном резисторе при номинальном режиме работы	кВт	0	3,8	11,4	19,0

В четвёртой главе показаны результаты цифрового моделирования в простейшей эквивалентной схеме электропередачи и в четырёхмашинной схеме для исследования устойчивости энергосистемы, часто рассматриваемой в работах зарубежных авторов [34].

На рисунке 15 изображена схема «Машина-линия-шины бесконечной мощности» с генератором ТГВ-200-2МУ3

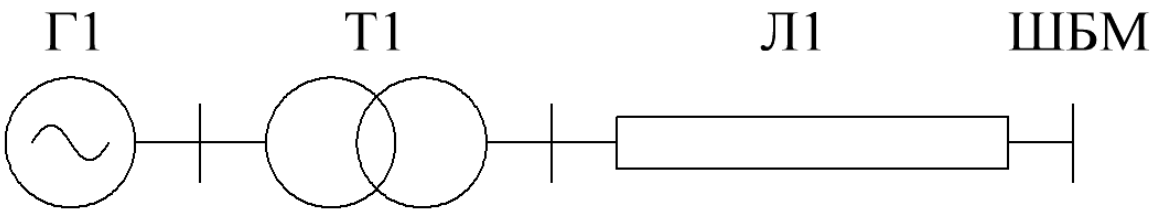

Рисунок 15 – Схема электропередачи «Машина линия-шины бесконечной мощности»

АЧХ при различных значениях коэффициента усиления пропорционального канала регулирования напряжения представлены на рисунке 16. В прилегающей энергосистеме наблюдается одна частота электромеханических колебаний 1,2 Гц. Увеличение коэффициента усиления пропорционального канала способствует увеличению амплитуды колебаний на этой частоте, поэтому целесообразно снижать пропорциональный коэффициент усиления. Чрезмерное снижение коэффициента усиления пропорционального канала приводит к медленному регулированию, что негативно сказывается в некоторых режимах работы. По опыту эксплуатации применение коэффициентов пропорционального канала ниже 10 е.в.н./е.н.с. нежелательно, поэтому в данном случае такое значение является оптимальным.

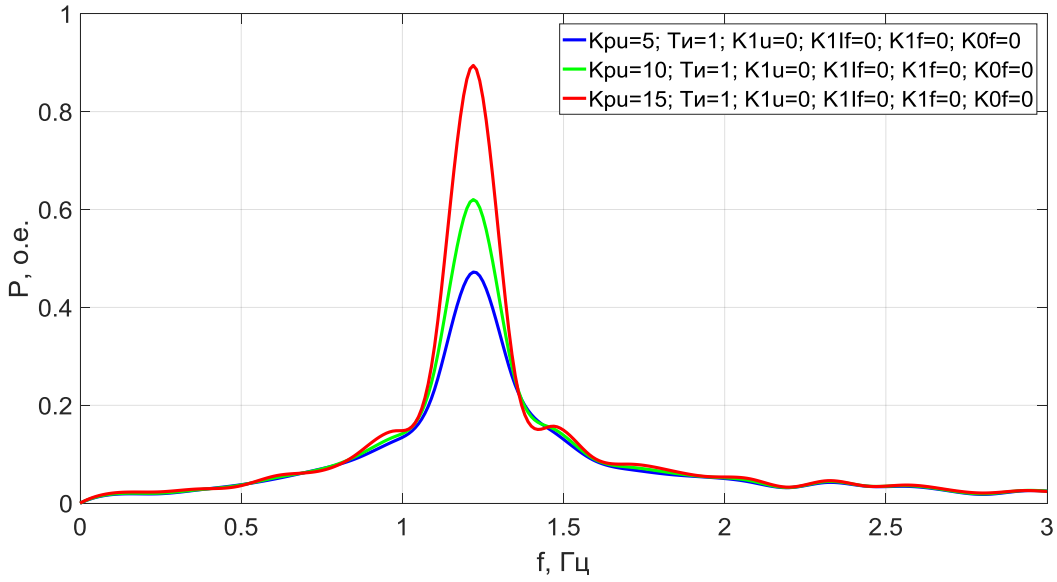

Рисунок 16 – АЧХ при выборе коэффициента усиления пропорционального канала K_{pu}.

АЧХ при различных значениях коэффициента усиления канала по производной тока ротора представлены на рисунке 17. Увеличение коэффициента усиления канала по этому каналу способствует снижению амплитуды колебаний на частоте 1,2 Гц, поэтому целесообразно увеличивать данный коэффициент усиления, но при значениях коэффициента больше 2 е.в.н./е.т.р./с. снижение амплитуды становится незначительным, к тому же возрастает уровень высокочастотных пульсаций в напряжении возбуждения, поэтому данный коэффициент принят, равным 2 е.в.н./е.т.р./с.

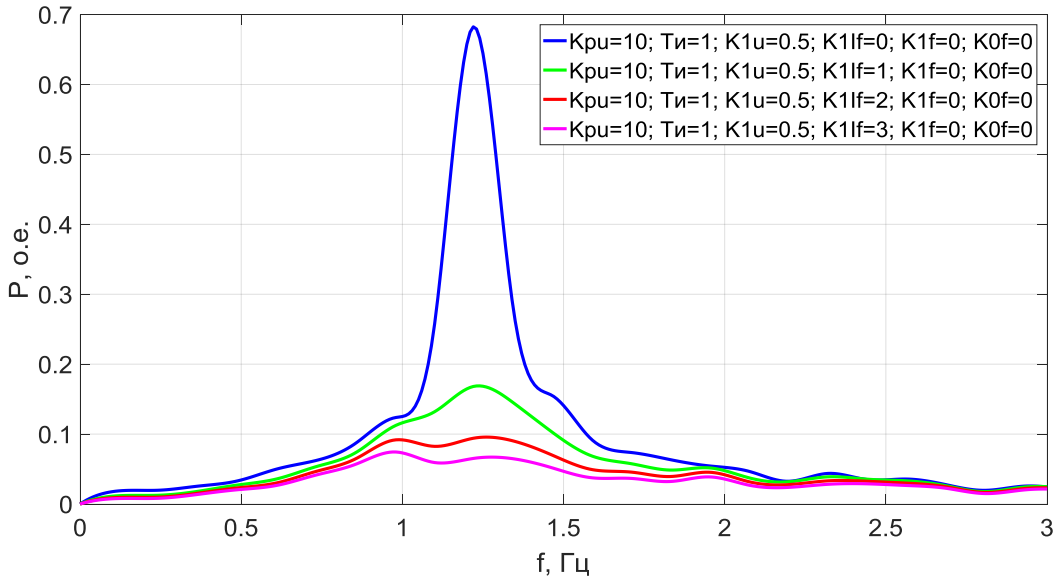

Рисунок 17 – АЧХ при выборе коэффициента усиления канала по производной тока ротора K_{1If}.

На рисунке 18 изображено сравнение частотных характеристик генератора при выведенных и введённых каналах системной стабилизации с окончательной настройкой. Наблюдается существенное снижение резонансного пика на частоте 1,2 Гц и его небольшое перемещение в область высоких частот при введении стабилизатора.

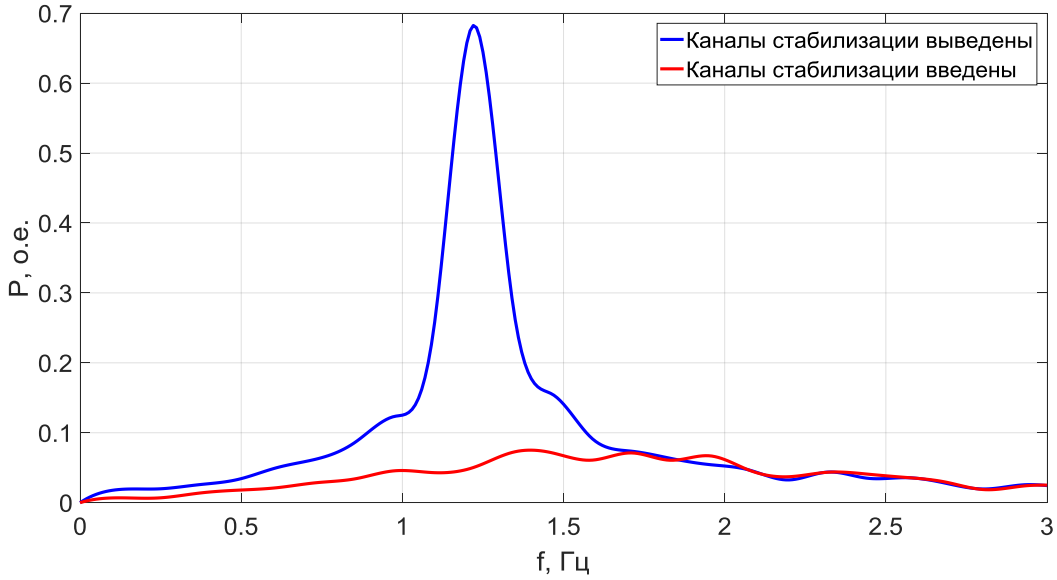

Рисунок 18 – АЧХ при выведенных и введённых каналах системной стабилизации. Коэффициенты ПИД-регулятора: K_{pu} = 10 е.в.н./е.н., T_i = 1 с., K_{1u} = 0.5 е.в.н./е.н./с. Коэффициенты каналов стабилизации: K_{1f} = 2 е.в.н./е.т.р./с., K_{0f} = 0 е.в.н./Гц, K_{1f} = 2 е.в.н./Гц/с.

На рисунке 19 изображена реакция роторных параметров генератора, а на рисунке 20 – реакция выходных статорных параметров генератора в режиме подачи белого шума на обмотку возбуждения. До момента времени 100 с. генератор работает в установившемся режиме при выдаче в сеть номинальной активной мощности, после 100 с. на обмотку начинает подаваться шум.

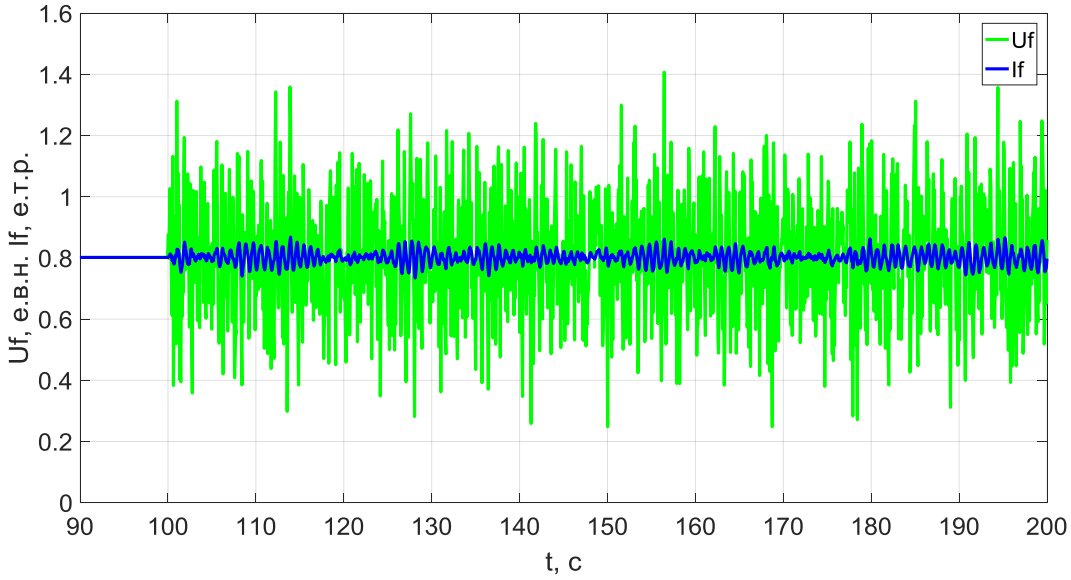

Рисунок 19 – Реакция роторных параметров генератора в режиме подачи шума на обмотку возбуждения при выведенных каналах системной стабилизации

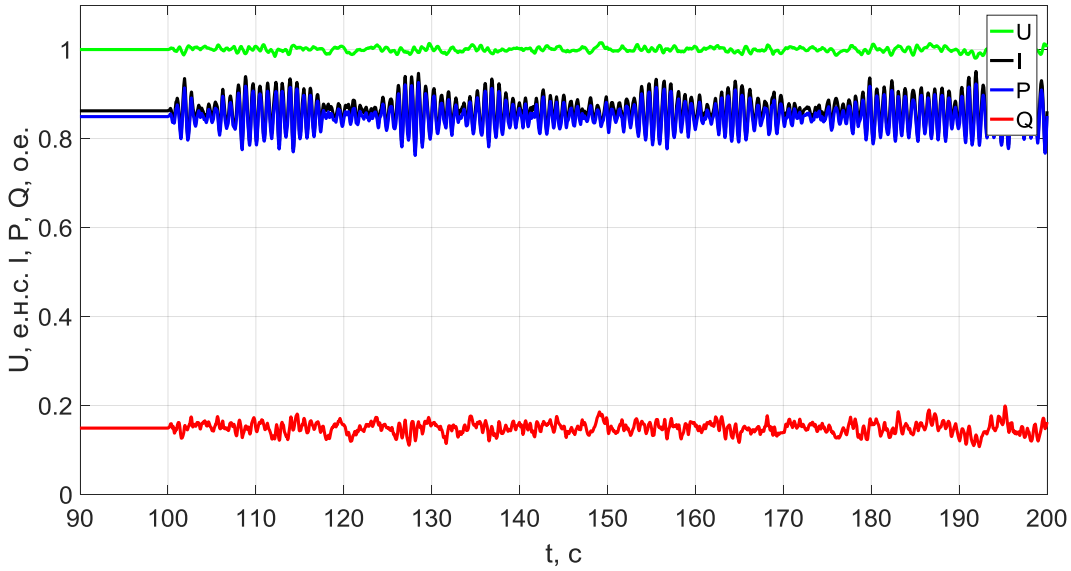

Рисунок 20 - Реакция статорных параметров генератора в режиме подачи шума на обмотку возбуждения при выведенных каналах системной стабилизации

Отметим, что величину отклонения наблюдаемых параметров можно регулировать изменением величины среднеквадратичного отклонения шума. При значениях отклонения параметров более 10 % для активной мощности, реактивной мощности, тока статора, тока возбуждения и при отклонениях более 2% для напряжения статора рекомендуется снизить уровень подаваемого шума.

Тип турбины рассматриваемого генератора – К-200-130. Турбина К-200-130 является конденсационной мощностью на 200 МВт и на 3000 об/мин. Она состоит из 3 цилиндров: высокого давления (ЦВД), среднего давления (ЦСД), низкого давления (ЦНД). Распределение полезной мощности по цилиндрам турбины на валу в номинальном режиме работы по активной мощности находится в следующих соотношениях: ЦВД – 62 МВт, ЦСД – 91 МВт и на валу ЦНД – 51 МВТ [33]. Роторы всех цилиндров и генератора соединены между собой полугибкими муфтами.

Для определения резонансных частот вала в математической модели необходимо осуществить моделирование многомассовой линии валопровода турбины [14]. После составления модели агрегата и энергосистемы необходимо получить собственные значения математической модели путём её предварительной линеаризации и выбора собственных значений, относящиеся к интересующим частотам колебаний. В таблице 4 приведены собственные значения модели, относящиеся к генератору, работающему в энергосистеме, и турбине.

Таблица 4 – Собственные значения модели агрегата и энергосистемы

Пара собственных значений	Частота, Гц	Принадлежность
-0.059 + 162.7i -0.059 - 162.7i	25,8	Турбина
-0.058 + 178.3i -0.058 - 178.3i	28,4	
-0.062 + 188.1i -0.062 - 188.1i	29,9	
-0.28 + 7.51i -0.28 - 7.51i	1,2	Энергосистема

Для ротора рассматриваемого турбоагрегата критические частоты лежат в диапазоне от 25 до 30 Гц. На рисунке 21 представлены колебания моментов цилиндров при подаче шума на обмотку возбуждения.

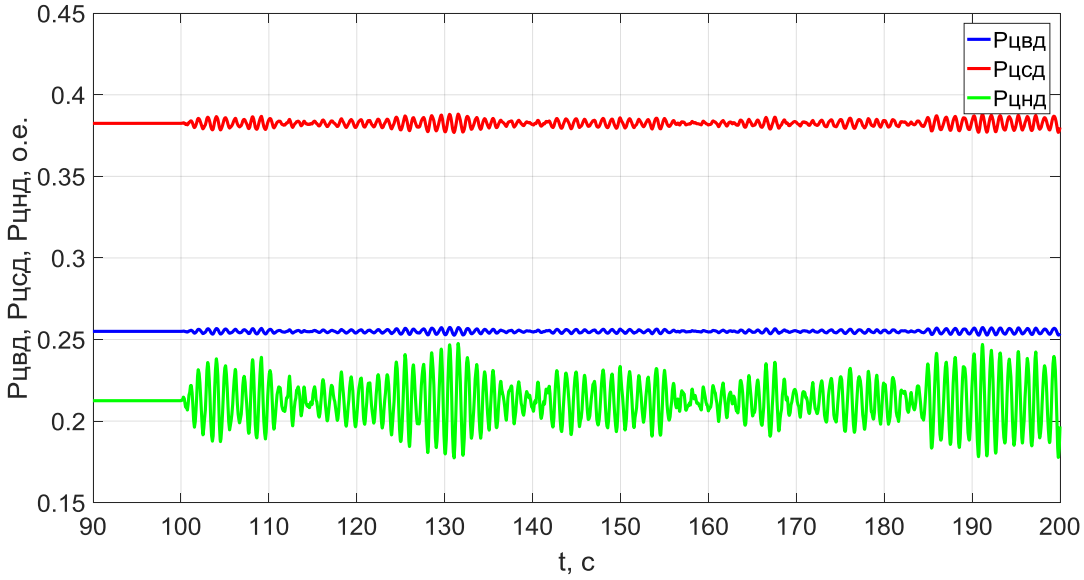

Рисунок 21 - Реакция цилиндров турбины турбоагрегата в режиме подачи шума на обмотку возбуждения при выведенных каналах системной стабилизации

Наибольшие колебания момента наблюдаются на ЦНД, чуть меньшие – на ЦСД, минимальные – на ЦВД, что обусловлено конструкцией валопровода агрегата и близостью ЦНД к генератору. При пульсациях на обмотке возбуждения минимальные колебания момента возникают на более удалённом от генератора цилиндре, которым в данном случае является ЦВД.

На рисунках 22, 23 изображены переходные процессы при двухфазном коротком замыкании за блочным трансформатором длительностью 0,2 с. при введённых и выведенных каналах стабилизации.

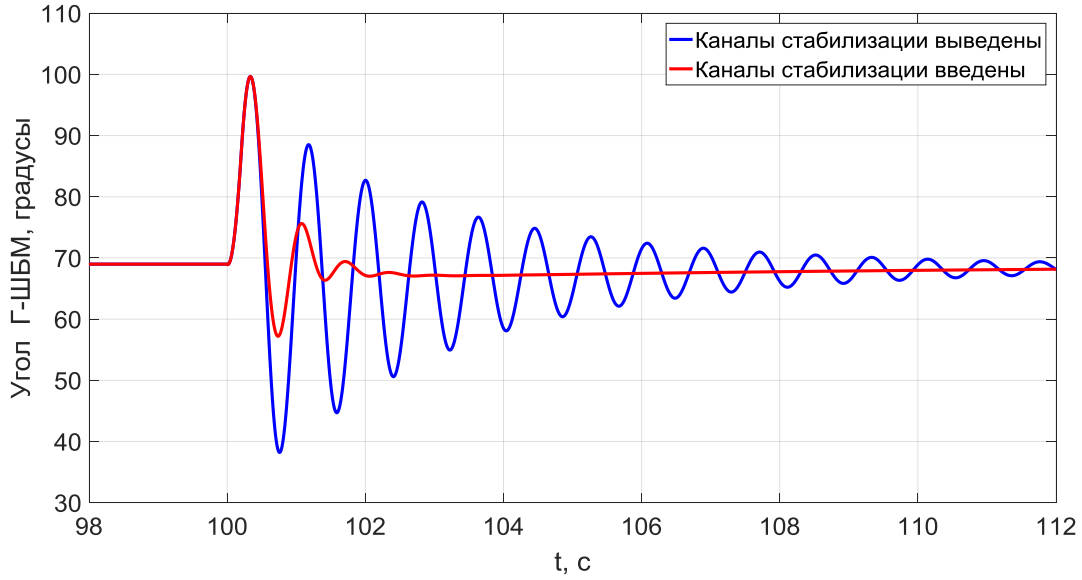

Рисунок 22 – Полный угол при двухфазном коротком замыкании за блочным трансформатором длительностью 0,2 с. при выведенных и введённых каналах стабилизации

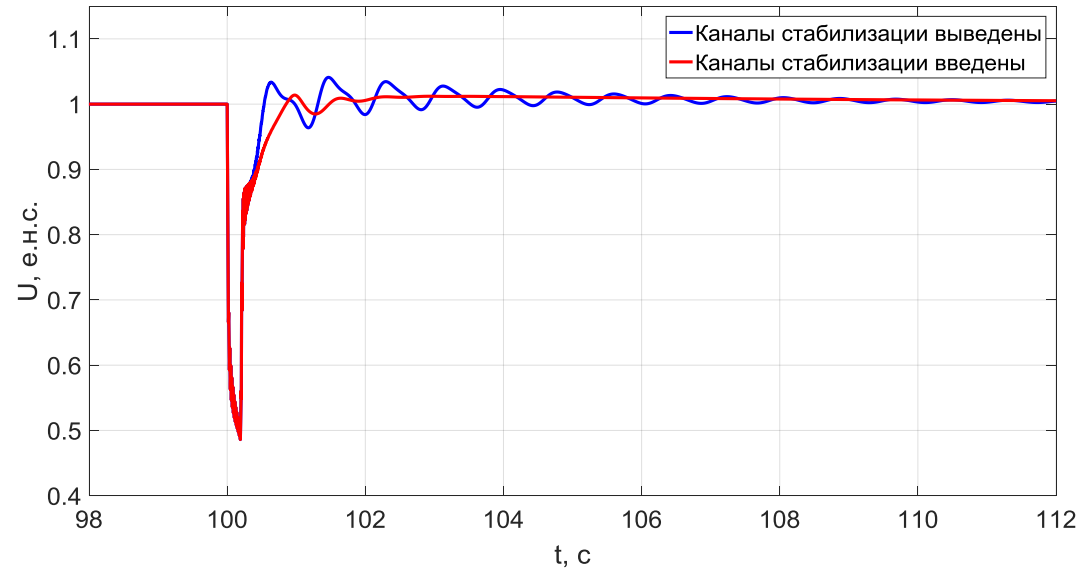

Рисунок 23 – Напряжение статора при двухфазном коротком замыкании за блочным трансформатором длительностью 0,2 с. при выведенных и введённых каналах стабилизации

Сравнение переходных процессов при коротком замыкании наглядно демонстрирует, что снижение амплитуды частотных характеристик приводит к снижению колебательности и лучшему затуханию послеаварийных качаний. Таким образом, применение методики позволило выбрать

настройку АРВ, обеспечившую существенное улучшение динамических свойств ЭЭС при малых и больших возмущениях режима.

В программе Matlab&Simulink была составлена четырёхмашинная тестовая схема [34, 35], изображённая на рисунке 24.

Принципиальной особенностью рассматриваемой схемы является её многочастотность. Наблюдаются частоты 0,6 и 1,2 Гц. Частота 0,6 Гц является межсистемной частотой между двумя энергообъединениями. Частота 1,2 Гц является внутрисистемной локальной частотой как для первого, так и для второго энергообъединений.

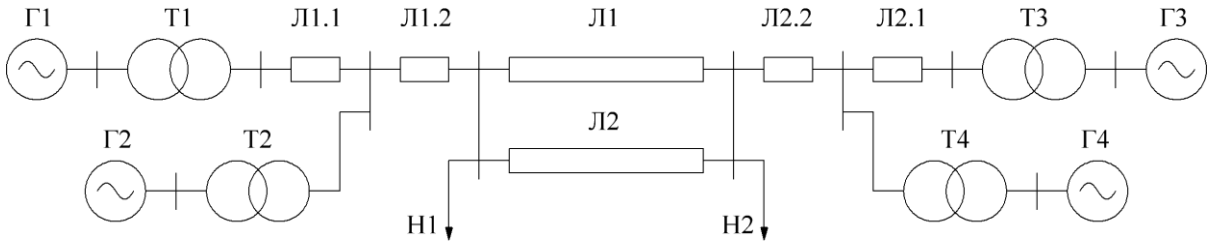

Рисунок 24 – Четырёхмашинная схема для исследования устойчивости энергосистемы

На рисунке 25 приведено сравнение частотных характеристик генератора при выведенных и введённых каналах системной стабилизации в четырёхмашинной схеме. Наблюдается существенное снижение резонансных пиков на характерных частотах при введении каналов стабилизции.

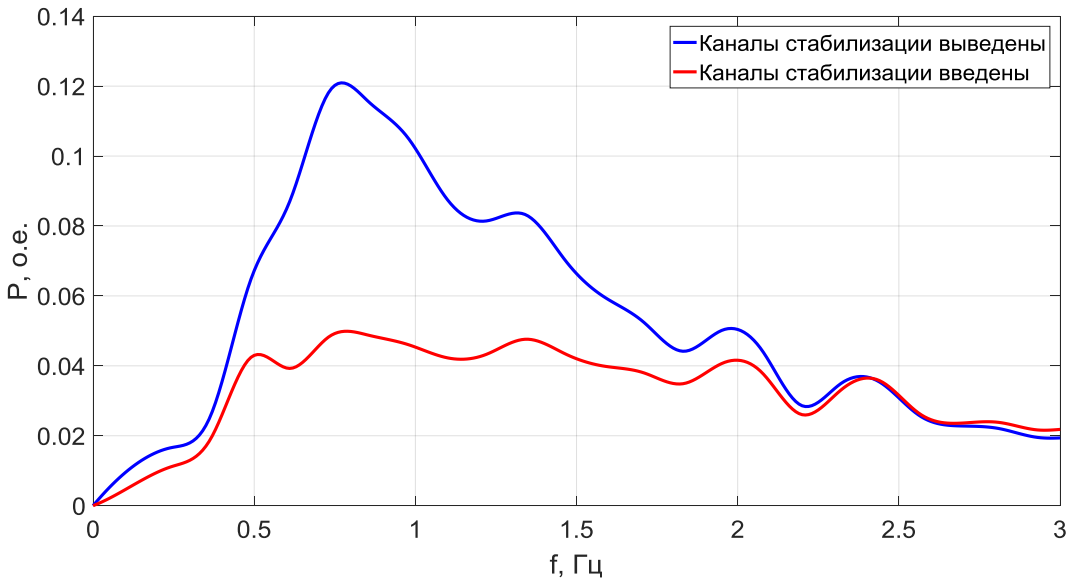

Рисунок 25 – АЧХ при выведенных и введённых каналах системной стабилизации в четырёхмашинной схеме. Коэффициенты ПИД-регулятора: K_{pu} = 30 е.в.н./е.н., T_i = 1 с., K_{1u} = 0.5 е.в.н./е.н./с. Коэффициенты каналов стабилизации: K_{1If} =3 е.в.н./е.т.р./с., K_{0f} = 3 е.в.н./Гц, K_{1f} = 3 е.в.н./Гц/с.

Поскольку выбор настройки АРВ проводился линейными методами, то есть для маловозмущенных режимов, целесообразно проверить эффективность полученных результатов при больших возмущениях. На рисунках 26, 27 изображены переходные процессы при проходящем двухфазном коротком замыкании в середине одной линии с её последующим отключением через 0,1 с. при введённых каналах стабилизации.

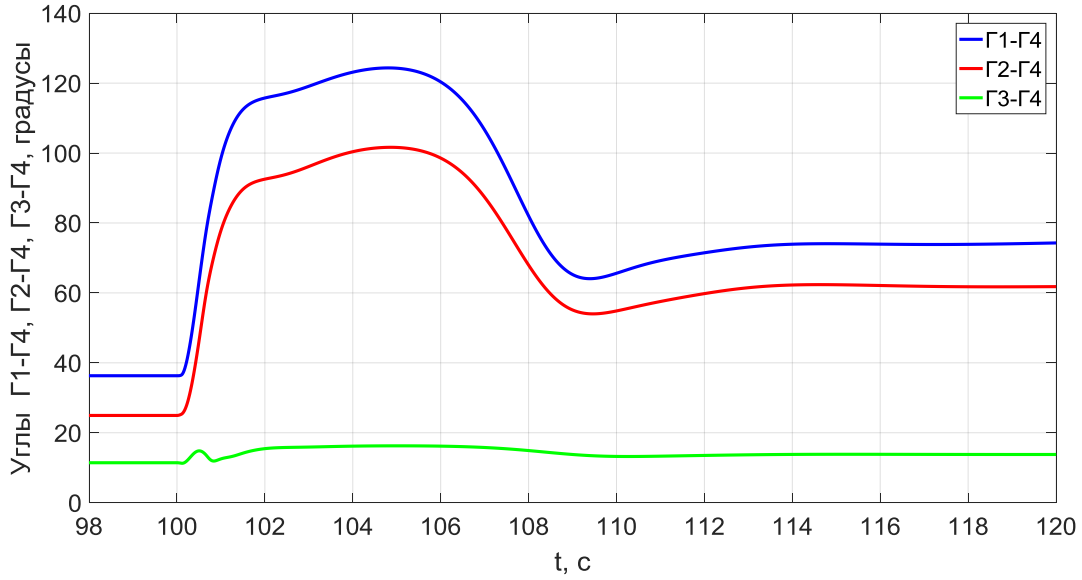

Рисунок 26 – Взаимные углы при двухфазном коротком замыкании в середине одной линии с её последующим отключением через 0,1 с. при введённых каналах стабилизации

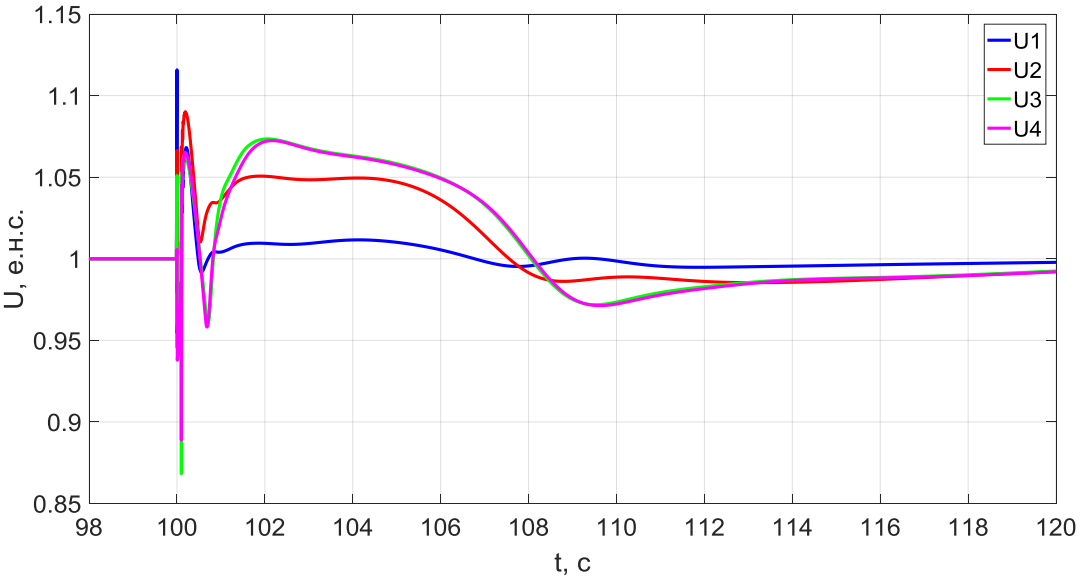

Рисунок 27 – Напряжения статоров генераторов при двухфазном коротком замыкании в середине одной линии с её последующим отключением через 0,1 с. при введённых каналах стабилизации

На рисунках 28, 29 изображены переходные процессы при проходящем двухфазном коротком замыкании в середине одной линии с её последующим отключением через 0,1 с. при выведенных каналах стабилизации.

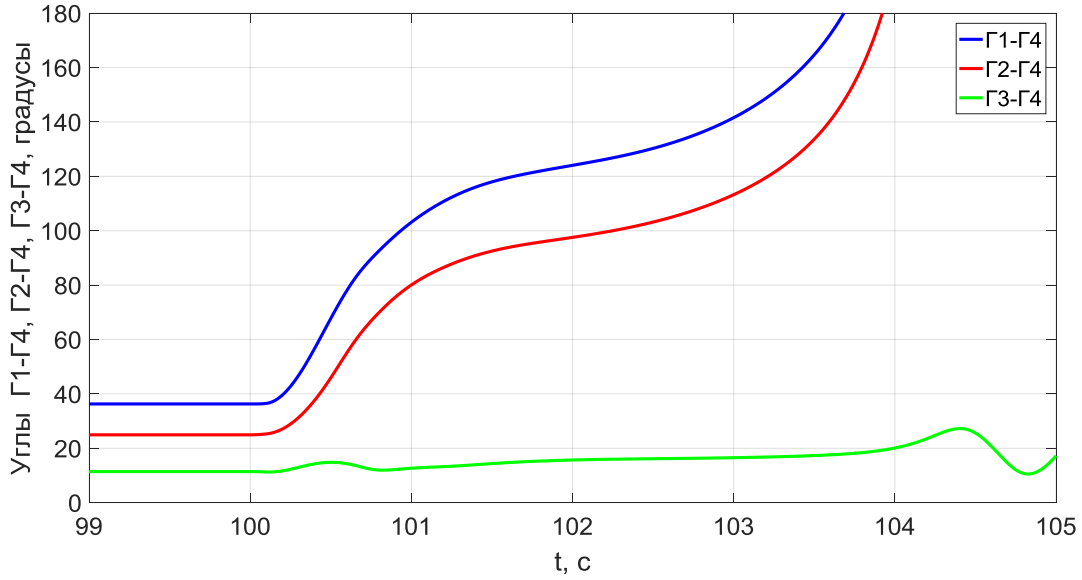

Рисунок 28 – Взаимные углы при двухфазном коротком замыкании в середине одной линии с её последующим отключением через 0,1 с. при выведенных каналах стабилизации

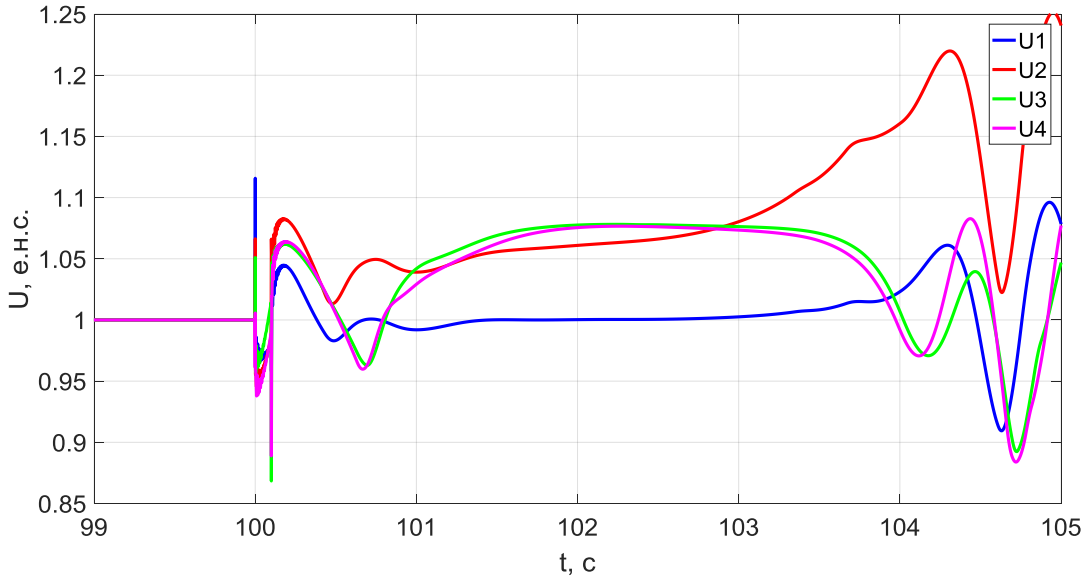

Рисунок 29 – Напряжения статоров генераторов при двухфазном коротком замыкании в середине одной линии с её последующим отключением через 0,1 с. при выведенных каналах стабилизации

Предложенный метод оптимизации настройки каналов АРВ на базе частотных характеристик обеспечивает существенное повышение качества переходных процессов как при малых, так и при больших возмущениях.

В пятой главе показана проверка методики на физической модели и на реальном объекте. Она была осуществлена с использованием

автоматического регулятора возбуждения АРВ-РЭМ700 производства ООО «НПП «Русэлпром-Электромаш» (г. Санкт-Петербург).

Регулятор соответствует требованиям стандарта АО «СО ЕЭС» к АРВ [26]. В нём реализован алгоритм стабилизации сильного действия. Функции для определения частотных характеристик были реализованы не в самом регуляторе, а в комплекте для его сервисного обслуживания и наладки, входящего в комплект поставки оборудования. В данный комплект входят кабели для сопряжения с регулятором, преобразователи цифровых интерфейсов, ноутбук со специальным программным обеспечением. При пусконаладочных работах и сервисном обслуживании используется ПО «REM-test», являющееся собственной разработкой производителя регулятора.

В состав ПО «REM-test» был добавлен программный модуль, позволяющий выполнить генерацию тестового воздействия «белый шум» и получить частотные характеристики. Шум складывается с выходным воздействием регулятора перед переведением управляющего сигнала в угол управления тиристорами. Внешний вид оболочки ПО «REM-test» с функцией снятия частотных характеристик показан на рисунке 30.

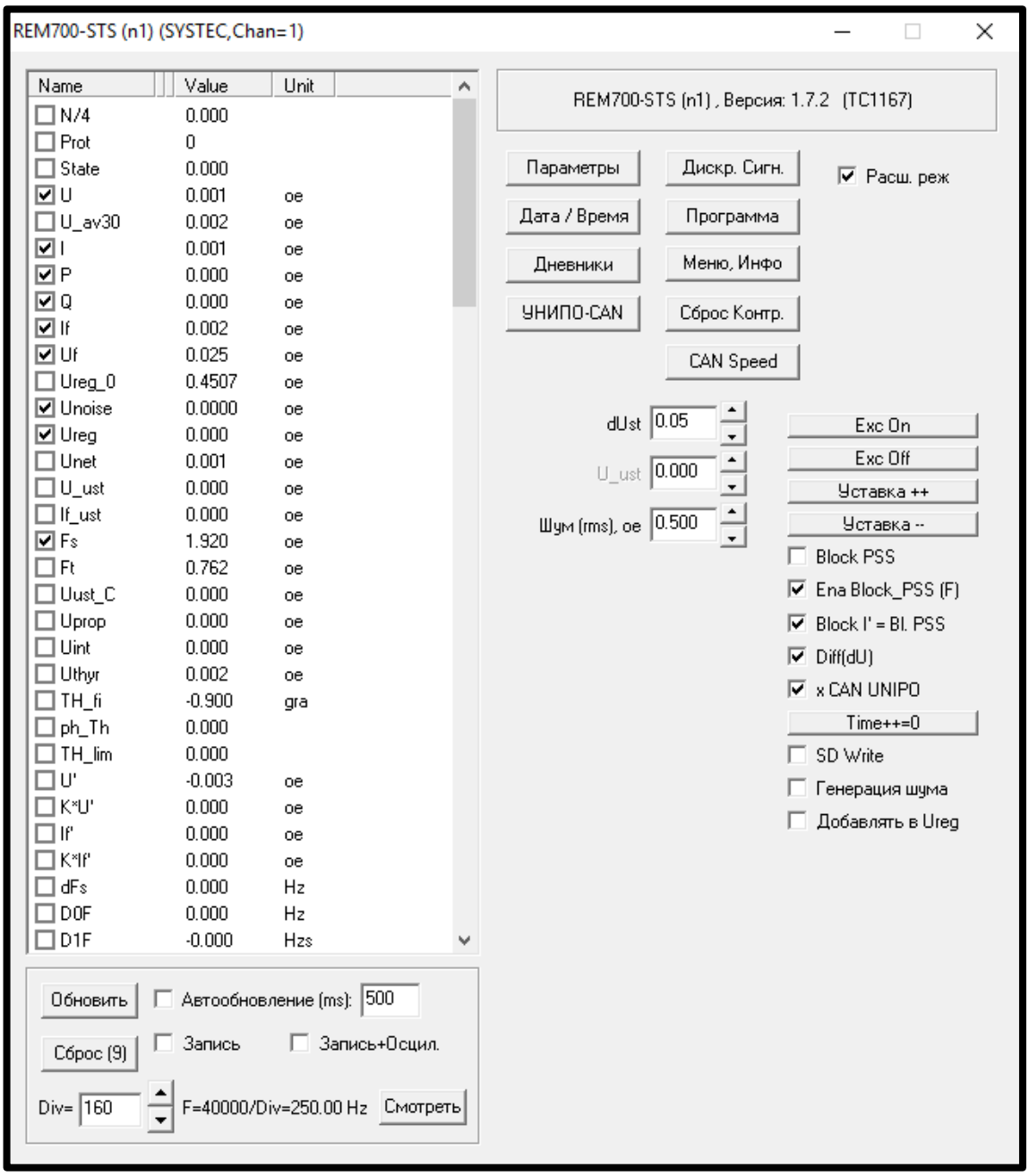

Рисунок 30 – Внешний вид окна ПО «REM-test» при подключении к регулятору

В современных регуляторах и программах для их обслуживания, как правило, предусмотрена сервисная функция «Разомкнутый контур», использующаяся при проведении пусконаладочных работ и позволяющая в ручном режиме выставить угол зажигания тиристоров или величину напряжения возбуждения. Эта функция позволяет изменять угол зажигания или напряжение возбуждения как плавно, так и скачкообразно, при этом все звенья и передаточные функции основного контура регулирования игнорируются. В ПО «REM-test» была добавлена функция разомкнутого

контура с работающими звеньями, относящимися к обратной связи для оценки влияния коэффициента усиления ЖОС и фильтра ЖОС на частотные искажения ОСГ, охваченного обратной связью. Благодаря данной функции можно найти эквивалентную постоянную времени ОСГ с учётом ЖОС. Ранее было отмечено, что при увеличении коэффициента ЖОС частотные характеристики ОСГ, охваченного обратной связью, приближаются по виду к частотным характеристикам апериодического звена первого порядка, характеризуемого постоянной времени, которую можно считать единственной для всего рассматриваемого объекта, что допустимо при инженерных расчётах и верификации модели при пусконаладочных работах на объекте. Благодаря реализации режимов разомкнутого контура с действующей обратной связью возможно осуществить эксперимент ступенчатого изменения регулирующего воздействия на входе эквивалентного объекта в соответствии с рисунком 31. По напряжению возбуждения главного генератора U_f, можно найти эквивалентную постоянную времени $T_{экв}$.

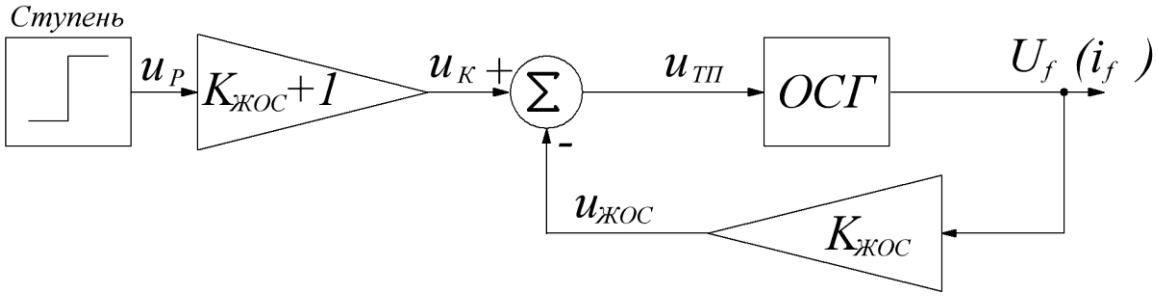

Рисунок 31 – Структурная схема работающих каналов регулятора в режиме разомкнутого контура с обратной связью при нахождении эквивалентной постоянной времени.

На рисунке 32 изображено напряжение возбуждения основного генератора и нахождение эквивалентной постоянной времени при ступенчатом изменении регулирующего воздействия в режиме разомкнутого контура с действующей обратной связью по напряжению возбуждения основного генератора.

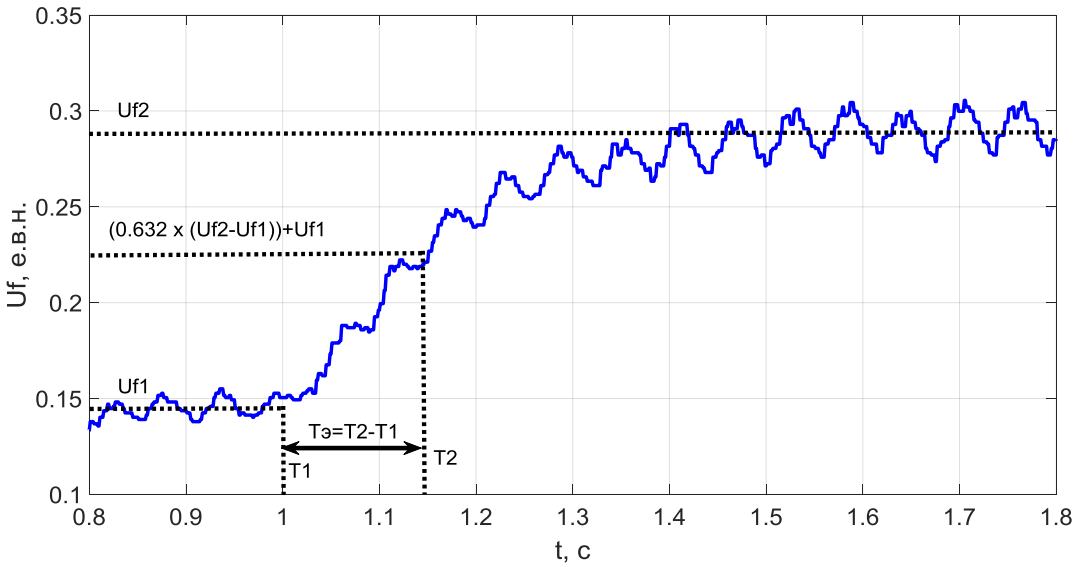

Рисунок 32 – Напряжение возбуждения основного генератора при ступенчатом изменении регулирующего воздействия с введённой обратной связью по напряжению возбуждения главного генератора.

Выбор способов и средств улучшения динамических характеристик БСВ был осуществлен на электродинамической модели для турбогенератора ТВВ-1000-2, работающего с возбудителем БВД-4600-1500. Испытания проводились в схеме, изображённой на рисунке 33.

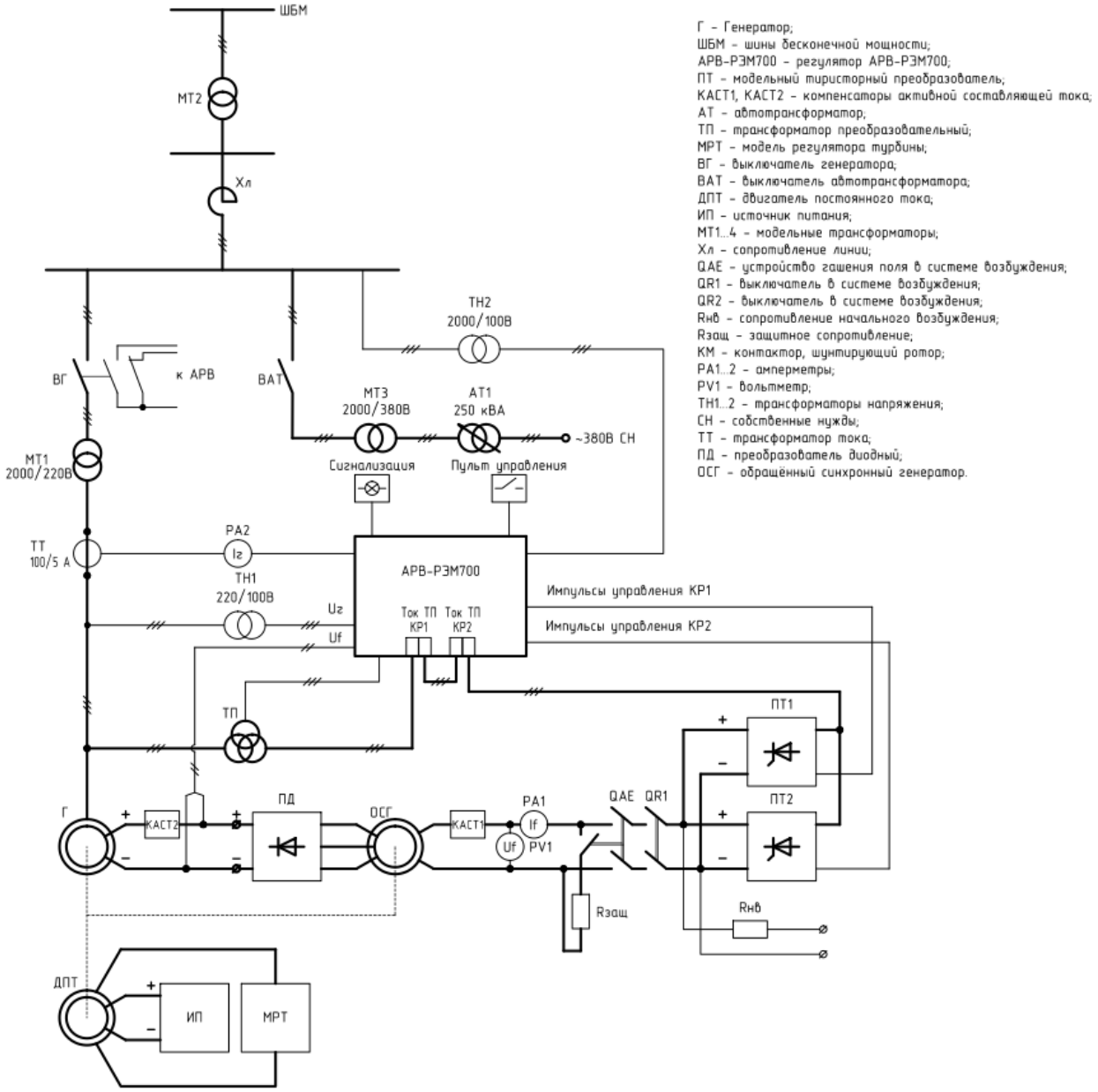

Рисунок 33 – Схема электродинамической модели для испытаний турбогенератора ТВВ-1000-2, работающего с возбудителем БВД-4600-1500.

Для выбора ЖОС силовой преобразовательный трансформатор был подключён по независимой схеме, генератор находился на холостом ходу. В таких условиях были проведены опыты по определению эквивалентных постоянных времени с помощью подачи ступенчатого воздействия в режиме разомкнутого контура с введённой ЖОС.

На рисунке 34 показаны напряжения возбуждения основного генератора при подаче ступенчатого воздействия на регулятор при введённых обратных связях по напряжению возбуждения при различных

коэффициентах ЖОС. Видно, что увеличение коэффициента ЖОС ускоряет переходный процесс и снижает эквивалентную постоянную времени ОСГ, охваченного обратной связью.

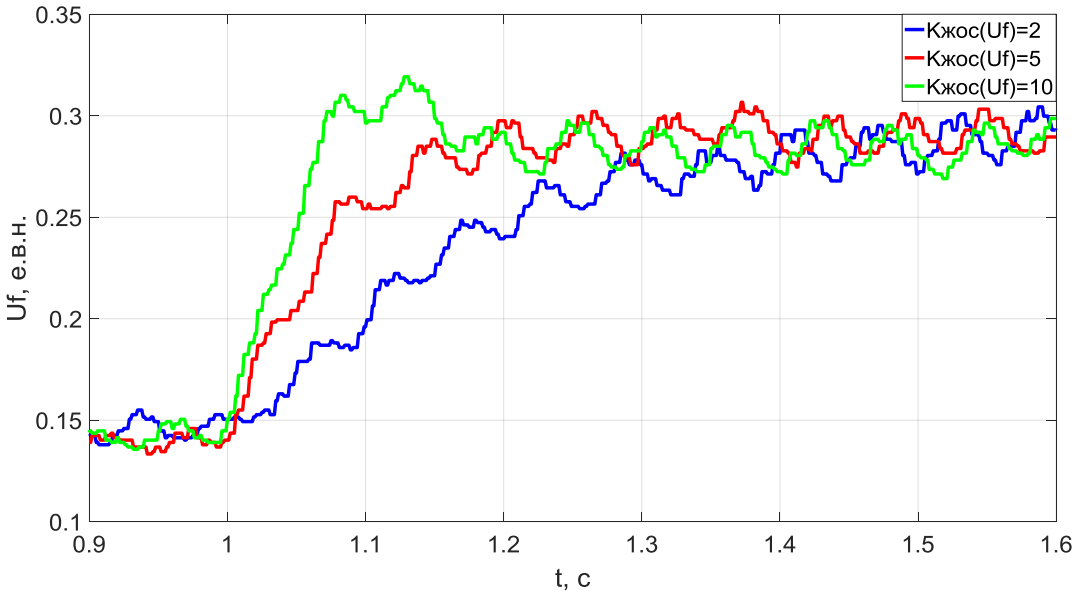

Рисунок 34 – Сравнение эффективности ЖОС по напряжению возбуждения при различных коэффициентах ЖОС

В таблице 5 приведены обобщённые сравнительные характеристики эффективности ЖОС.

Таблица 5 – Сравнительные характеристики эффективности ЖОС при различных её типах и коэффициентах усиления

Коэффициент ЖОС	Тип ЖОС	Эквивалентная постоянная времени, с	Диапазон условного отсутствия частотных искажений до, Гц
2	U_f	0,12	1,3
	i_f	0,12	1,3
5	U_f	0,062	2,6
	i_f	0,081	2,0
10	U_f	0,044	3,6
	i_f	0,051	3,2

На рисунке 35 изображены частотные характеристики генератора с БСВ, работающего в энергосистеме, при различных значениях ЖОС с введёнными каналами стабилизации.

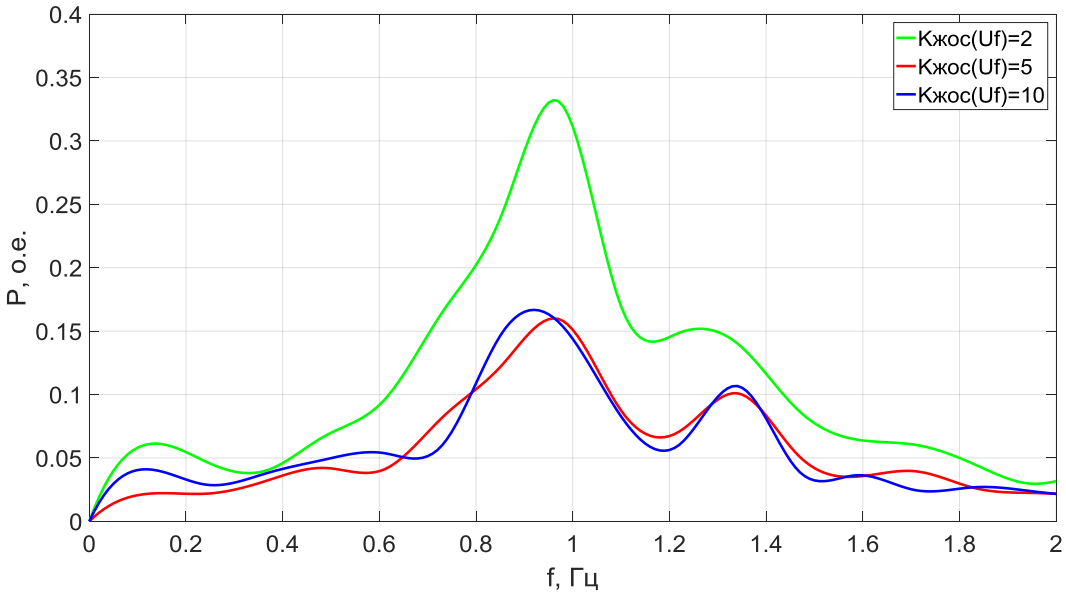

Рисунок 35 – Сравнение эффективности ЖОС по напряжению возбуждения при различных коэффициентах ЖОС с введёнными каналами стабилизации

По рисунку 35 наблюдается снижение колебательности при увеличении коэффициента ЖОС до значения 5. Дальнейшее увеличение кратности ЖОС не приводит к какому-либо снижению амплитуды частотной характеристики. Отметим, что дальнейшее увеличение ЖОС будет способствовать увеличению уровня высокочастотных пульсаций в напряжении возбуждения ОСГ, что отмечалось ранее.

В рамках работ по выбору настроечных параметров автоматических регуляторов возбуждения АРВ-РЭМ700 ТГ4, ТГ5, ТГ6 блока №3 Белоярской АЭС [20, 21, 22] и проверки их эффективности на цифро-аналоговом физическом комплексе были получены частотные характеристики энергосистемы путём подачи шума со стороны АРВ турбогенератора ТГ-5 Белоярской АЭС.

Снятие частотных характеристик было выполнено в схеме физической модели ОЭС Урала для испытаний регуляторов возбуждения АРВ-РЭМ700, изображенной на рисунке 36.

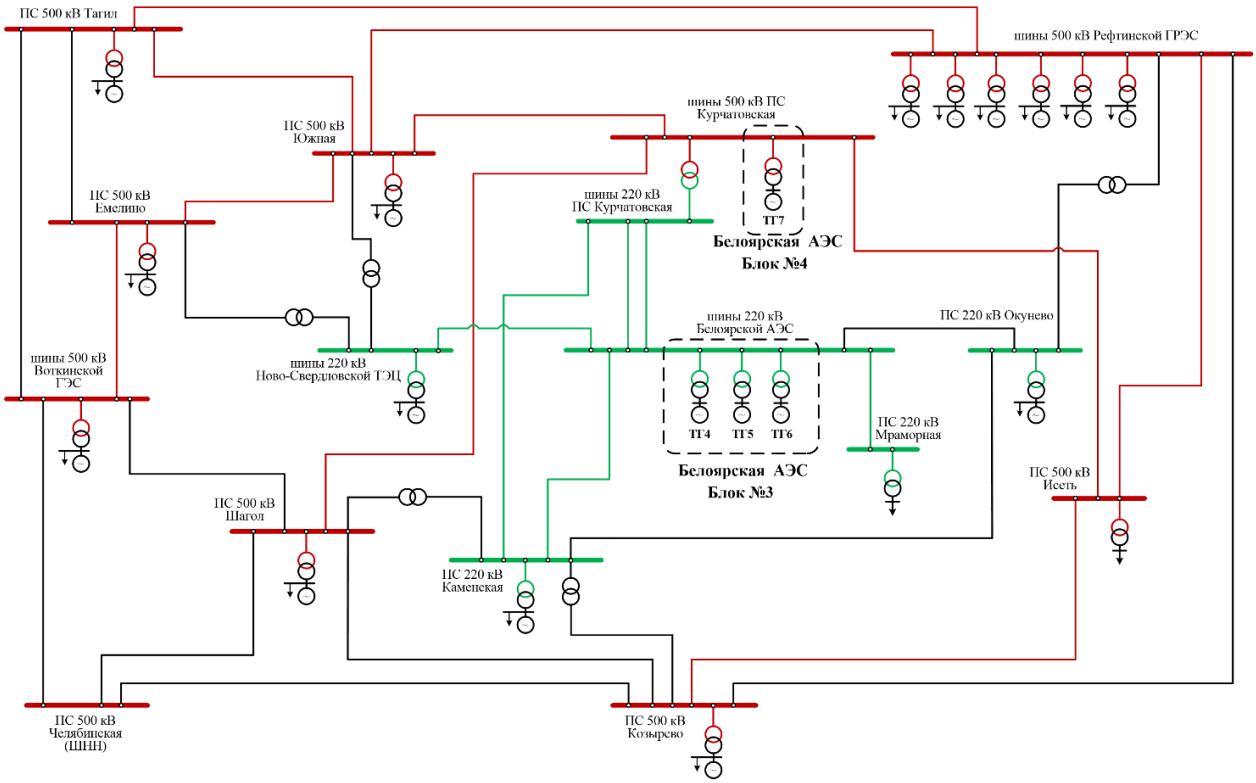

Рисунок 36 – Схема физической модели испытаний ОЭС Урала для испытаний регуляторов возбуждения АРВ-РЭМ700 ТГ4, ТГ5, ТГ6 блока № 3 Белоярской АЭС

Необходимость проведения испытаний регулятора была вызвана мероприятиями по модернизации генерирующего оборудования блока №3 Белоярской АЭС на турбогенераторах ТГ-4, ТГ-5 и ТГ-6. При модернизации была осуществлена замена старого автоматического регулятора возбуждения на современный микропроцессорный регулятор АРВ-РЭМ700 с сохранением существующей силовой части.

Результаты предварительных настроек, испытаний и корректировок регулятора изложены в отчётах [20, 21, 22].

Анализ частотных характеристик показал, что в ОЭС Урала присутствует только одна характерная резонансная частота порядка 1,5 Гц.

Для проверки методики на реальном объекте использовалась такая же последовательность действий, как и на цифро-аналоговом физическом комплексе АО «НТЦ ЕЭС». На рисунке 37 показана реакция генератора ТВВ-220 ТГ-5 блока № 3 Белоярской АЭС при подаче шума на обмотку возбуждения. До 79 с. на обмотку возбуждения подавался шум, после 79 с. шум был отключён, генератор перешёл в установившийся режим работы.

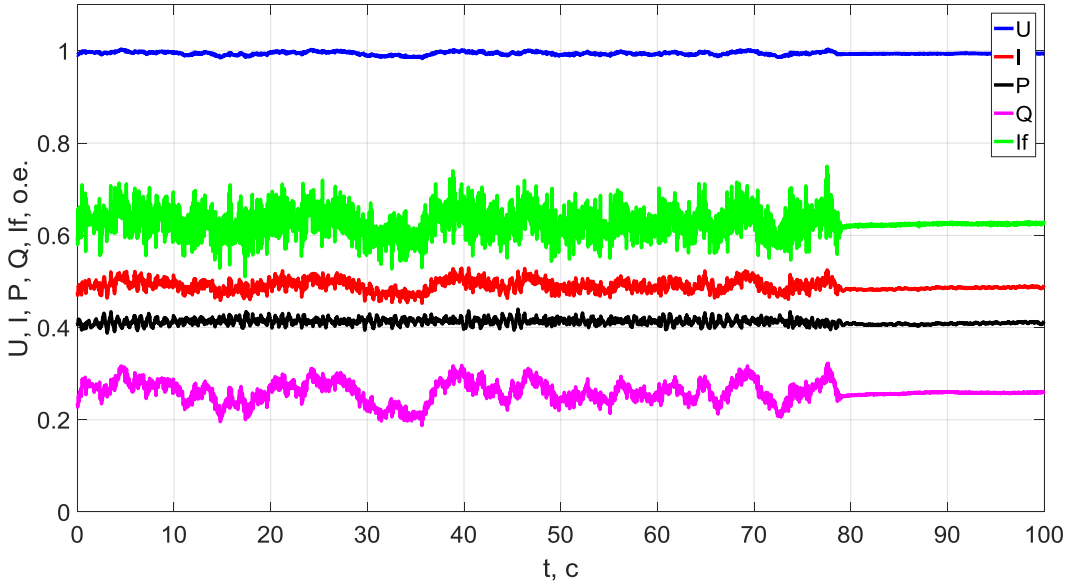

Рисунок 37 – Реакция генератора ТГВ-200 ТГ-5 блока № 3 Белоярской АЭС при подаче шума на обмотку возбуждения

Частотные характеристики с выведенными и введёнными каналами стабилизации при мощности 200 МВт показаны на рисунке 38. АЧХ и ФЧХ

генератора при мощности 200 МВт по частоте напряжения статора показаны на рисунке 39.

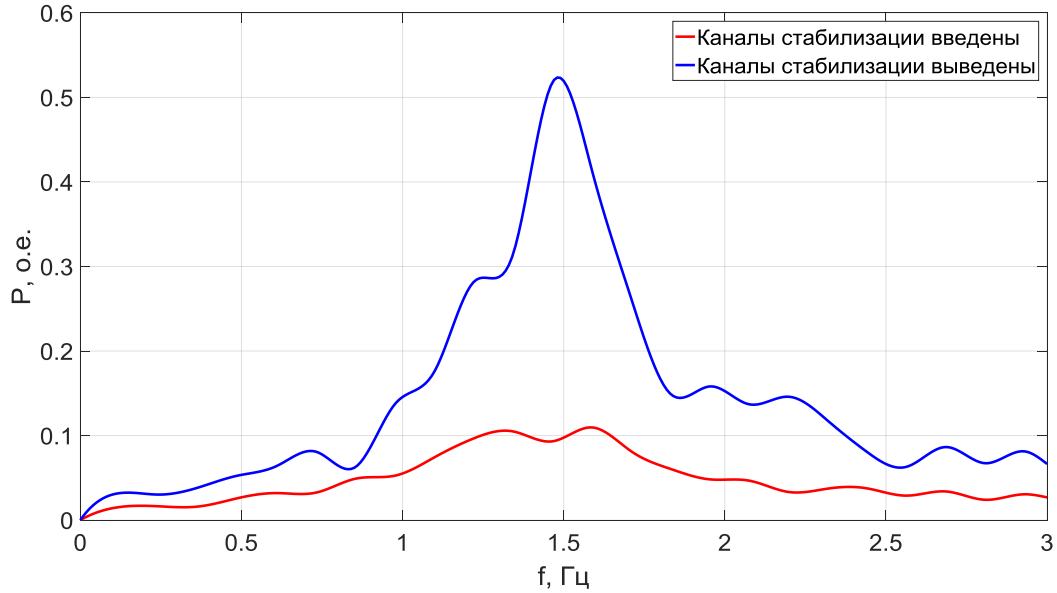

Рисунок 38 – АЧХ генератора ТГ-5 блока № 3 Белоярской АЭС с выведенными и введёнными каналами стабилизации при мощности 200 МВт

В процессе снятия частотных характеристик при разных уровнях мощности не происходило срабатывания защит, противоаварийной автоматики, предупредительной сигнализации, генератор не вступал в режимы ограничений. Все отклонения параметров генератора в режиме шума не превышали допустимых значений, что говорит о безопасности предложенного метода.

АЧХ и ФЧХ, изображённые на рисунке 39, получены на цифровой модели с помощью ПВК «EUROSTAG», на цифро-аналоговом комплексе АО «НТЦ ЕЭС» и на реальном генераторе Белоярской АЭС. Показана достаточно высокая сходимость результатов и возможность применения метода для верификации цифровых и физических моделей энергосистем [12].

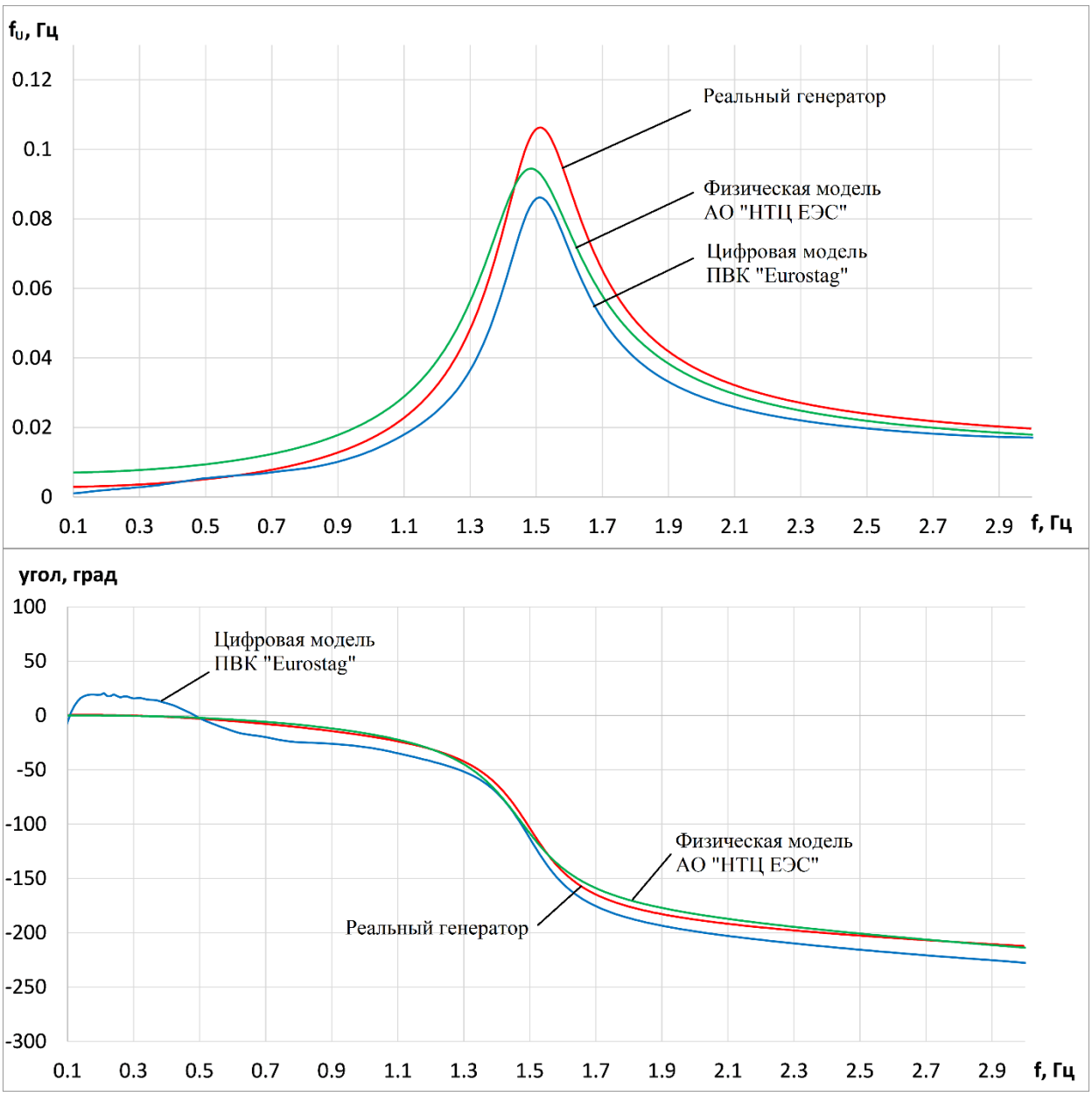

Рисунок 39 – АЧХ и ФЧХ генератора ТГ-5 блока № 3 Белоярской АЭС, полученные на цифровой модели, физической модели и на реальном объекте

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализов существующих методов настройки выявлена необходимость разработки метода, позволяющего осуществлять настройку регулятора на реальном объекте в конкретной схемно-режимной ситуации;
2. Даны рекомендации по выбору параметров частотного спектра белого шума для осуществления безопасного воздействия на генерирующий агрегат и снятия частотных характеристик, дана методика по выбору коэффициентов усиления АРВ-СД на основании сравнения амплитуд резонансных частот при различных настройках;
3. Отмечена и исследована специфика применения метода на генераторах с бесщёточными и высокочастотными модернизированными системами возбуждения, отмечена необходимость предварительного улучшения динамических характеристик систем возбуждения косвенного действия;
4. Выявлены факторы, влияющие на возникновения высокочастотных пульсаций в напряжении возбуждения основного генератора или в напряжении возбуждения возбудителя;
5. Функции для снятия частотных характеристик энергосистемы и для выбора средств улучшения динамических характеристик БСВ реализованы в программном обеспечении регулятора АРВ-РЭМ700 и наладочных программах;
6. Проведены системные испытания по снятию частотных характеристик на турбогенераторах ТГ-4, 5, 6 блока №3 Белоярской АЭС и на блоке № 1 Запорожской АЭС, выполнена верификация цифровой и физической модели Белоярской АЭС и прилегающей к ней энергосистемы ОДУ Урала;
7. Проверены способы улучшения динамических характеристик для БСВ турбогенератора ТВВ-1000, работающего с БВД-4600-1500, показано влияние динамических характеристик БСВ на колебательность энергосистемы с введёнными и выведенными каналами стабилизации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ, В КОТОРЫХ ОТРАЖЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи, опубликованные в изданиях ВАК:

1. Комков А. Л., Попов Е. Н., Филимонов Н. Ю., Юрганов А. А., Бурмистров А. А. Реализация системных функций АРВ сильного действия синхронных генераторов // Электрические станции. – 2019. – № 2. – С. 33 – 36.

2. Комков А. Л., Вишняков А. А., Филимонов Н. Ю., Юрганов А. А., Бикбаев И. М., Прохоров К. В. Определение частотных характеристик энергосистемы при проведении пусконаладочных работ на системе возбуждения турбогенератора ТГ5 Белоярской АЭС // Электрические станции. – 2019. – № 10. – С. 14 – 20.

3. Филимонов Н. Ю., Юрганов А. А. Метод выбора параметров и настройки автоматических регуляторов возбуждения // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2019. – № 2 (81). – С. 43 – 52.

4. Комков А. Л., Филимонов Н. Ю., Юрганов А. А. Способы и средства улучшения динамических характеристик бесщёточных систем возбуждения // Электрические станции. – 2020. – № 5. – С. 40 – 46.

Статьи, опубликованные в других изданиях:

1. Комков А. Л., Попов Е. Н., Филимонов Н. Ю., Юрганов А. А., Бурмистров А. А. Особенности алгоритма реализации системных функций в российских автоматических регуляторах возбуждения сильного действия // Территория НЕФТЕГАЗ. – 2018. – № 9. – С. 92 – 94.

2. Nikita Filimonov, Alexey Yurganov. Obtaining the frequency characteristics of a generator, operating in a power system for tuning channels of stabilization of an automatic excitation controller // MATEC Web of Conferences, 245 – 2018, 07018, pp. 1 – 4.

3. A. L. Komkov, E. N. Popov, N. Yu. Filimonov, A. A. Yurganov, A. A. Burmistrov. Implementation of the ARV system functions of the strong action of

synchronous generators // Power Technology and Engineering. Volume 53, September 2019, Issue 3, pp. 356 – 359.

4. N. Yu. Filimonov, A. A. Yurganov. Determination of frequency characteristics during commissioning of the synchronous generator excitation system // Proceedings of the 2020 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2020. – pp. 1219 – 1221;

5. A. L. Komkov, A. A. Vishnyakov, N. Yu. Filimonov, A. A. Yurganov, I. M. Bikbaev, and K. V. Prokhorov. Determination of the frequency characteristics of the power system during commissioning on the excitation system of the TG5 turbogenerator of Beloyarsk NPP // Power Technology and Engineering. Volume 53, March 2020, Issue 6, pp. 765 – 771.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев, А.Н. Проектирование адаптивных автоматических регуляторов возбуждения мощных синхронных генераторов методами нейро-нечеткой идентификации: дис. …канд. техн. наук: 05.14.02/ Беляев Андрей Николаевич. – СПб., 2000. – 204 с.

2. Беляев, А.Н. Динамические свойства и устойчивость транзитных электропередач и автономных энергосистем с новым управляемым силовым оборудованием: дис. …докт. техн. наук: 05.14.02/ Беляев Андрей Николаевич. – СПб., 2011. – 276 с.

3. Бочкова Н. Г. Переходные процессы бесщёточного возбудителя. / Н. Г. Бочкова// Электричество. – 1978. – №10. С. 35-39.

4. Глебов, И.А Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин / А.И. Глебов – Л.: Наука. Ленинград. отд-ние, 1988. - 332 с.

5. Глебов, И.А Системы возбуждения мощных синхронных машин / А.И. Глебов – Л.: Наука. 1979. - 316 с.

6. Глебов, И.А Электромагнитные процессы систем возбуждения синхронных машин / А.И. Глебов – Л.: Наука. 1987. - 344 с.

7. ГОСТ 21558-2018 Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. – М.: Стандартинформ, 2019. – 22 с.

8. Есипович, А.Х. Программный комплекс расчета колебательной устойчивости и выбора настройки регуляторов возбуждения. / А.Х.Есипович, А.С. Зеккель - Электрические станции - №12, 1995. С. 34-42.

9. Климова, Т.Г. Анализ функционирования автоматических регуляторов возбуждения синхронного генератора с различными сигналами каналов стабилизации частоты/ Т. Г. Климова, О. О. Николаева // Электрические станции – 2020. – №7 – С. 24-32.

10. Коган, Ф. Л. Особенности сильного регулирования возбуждения синхронных генераторов в сложной энергосистеме/ Ф. Л. Коган// Электрические станции – 2019. – №7 – С. 27-35.
11. Кожевников, В.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов. / В.А. Кожевников, А.А. Юрганов - СПб.: Наука, 1996. 138 с.
12. Комков, А. Л. Определение частотных характеристик энергосистемы при проведении пусконаладочных работ на системе возбуждения турбогенератора ТГ5 Белоярской АЭС/ А. Л. Комков, А. А. Вишняков, Н. Ю. Филимонов, А. А. Юрганов, И. М. Бикбаев, К. В. Прохоров// Электрические станции – 2019. – №10 – С. 14-20.
13. Комков, А. Л. Способы и средства улучшения динамических характеристик бесщёточных систем возбуждения/ А. Л. Комков, Н. Ю. Филимонов, А. А. Юрганов // Электрические станции – 2020. – №5 – С. 40-46.
14. Меркурьев Г. В. Устойчивость энергосистем. Том 2. Расчёты: Монография. / Г. В. Меркурьев, Ю. М. Шаргин – СПб.: НОУ "Центр подготовки кадров энергетики", 2006. - 300с.
15. Методические указания по проведению испытаний автоматических регуляторов возбуждения сильного действия синхронных генераторов и алгоритмов их функционирования. АО «СО ЕЭС», 2019
16. Методические указания по наладке и испытаниям бесщёточной диодной системы возбуждения турбогенераторов серии ТВВ мощностью 1000 МВт [Текст]: МУ 34-70-140-89. – М., СПО Союзтехэнерго, 1983.
17. Методические указания по техническому обслуживанию бесщёточной диодной системы возбуждения турбогенераторов серии ТВВ мощностью 1000 МВт [Текст]: МУ 34-70-138-86. – М., СПО Союзтехэнерго, 1987
18. Методические указания по устойчивости энергосистем, утвержденные приказом Минэнерго России 30.06.2003 - № 277.

19. Морозова Ю. Л. Частотные характеристики возбудителей с неуправляемыми выпрямителями [Текст] / Ю. Л. Морозова, Г. Н. Бурухин, Ю. Л. Филиппов // Электричество. – 1980. – №5. – С. 44 – 47.
20. Отчёт АО «НТЦ ЕЭС». Выбор параметров настройки регуляторов возбуждения АРВ-РЭМ700 турбогенераторов ТГ-4, 5, 6 Белоярской АЭС в цифровых моделях ОЭС Урала. Инв. №1490-КТ. – СПб, 2019.
21. Отчёт АО «НТЦ ЕЭС». Результаты проверки параметров настройки регуляторов возбуждения АРВ-РЭМ700 турбогенераторов ТГ-4,5,6 Белоярской АЭС на ЦАФК АО «НТЦ ЕЭС» в схеме физической модели ОЭС Урала. Инв. №1511-КТ. – СПб, 2019.
22. Отчёт АО «НТЦ ЕЭС». Физическая модель энергосистемы. Программа испытаний регуляторов возбуждения АРВ-РЭМ700 турбогенераторов ТГ-4, 5, 6 Белоярской АЭС в схеме физической модели ОЭС Урала. Инв. №1501-КТ. – СПб, 2019.
23. Приказ Минэнерго России 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, утверждённые приказом Минэнерго России от 19 июня 2003 г. № 229, Москва, 2019
24. Седойкин Д.Н. Адаптивный автоматический регулятор возбуждения на основе нечеткого аппроксиматора в режиме недовозбуждения синхронной машины. / Д. Н. Седойкин, А. А. Юрганов // Научнотехнические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. - 2018.-Том 24.- № 2.– С. 22–29.
25. Седойкин Д.Н. Эффективность адаптивного АРВ на основе нечеткого аппроксиматора при работе синхронного генератора в сложной энергосистеме/ Седойкин Д.Н., Юрганов А.А. // Релейная защита и автоматизация. - 2018. - № 2 (Июнь). – С. 32–37.
26. Стандарт. Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов (СТО

59012820.29.160.20.004-2019, утвержден и введен в действие 05.09.2019), АО «СО ЕЭС», 2019

27. Тимощенко, К.П. Ключевые особенности проектирования систем управления возбуждением синхронных машин. / К.П. Тимощенко, А.А. Юрганов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2014. - № (1)190. – С. 75-81.

28. Хрущев, Ю. В. Методы расчёта устойчивости энергосистем. Учебное пособие / Ю. В. Хрущев - Томск.: SST, 2005. – 176 с.

29. Хуторецкий, Г. М. Проектирование турбогенераторов / Г. М. Хуторецкий, М. И. Токов, Е. В. Толвинская. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1987. – 256 с.

30. Цифровая подстанция [Электронный ресурс]. 2020. URL: http://digitalsubstation.com/blog/2016/01/28/rossijskij-profil-iec-61850-9-2/ (Дата обращения: 01.09.2020).

31. Шустерман М. И. Машинный возбудитель переменного тока как звено системы автоматического регулирования / М. И. Шустерман // Электричество. – 1973. – №12. – С. 31 – 36.

32. Шхати, Х. В. Формы крутильных колебаний валопровода турбоагрегата/ Х. В. Шхати, Кадхем Б. Т., Беляев А. Н., Смоловик С. В.// Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – №4. – С.169-180.

33. Щегляев А. В. Паровые турбины. / А. В. Щегляев – М.: Энергия. 1976. – 368 с.;

34. Kundur, P. Power System Stability and Control / P.Kundur. - McGraw-Hill, 1994. 1167 pp.

35. MathWorks. Performance of Three PSS for Interarea Oscillations: site. – URL: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/performance-of-three-pss-for-interarea-oscillations.html (дата обращения: 01.09.2020)