

На правах рукописи



Гуриков Олег Викторович

**МЕТОДИКА ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ СИСТЕМНЫХ
СТАБИЛИЗАТОРОВ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ
РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ, РАБОТАЮЩИХ В
ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЯХ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ**

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-технический центр
Единой энергетической системы» (АО «НТЦ ЕЭС»)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Аркадий Хаимович Есипович

Официальные оппоненты: **Фишов Александр Георгиевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет», профессор кафедры
автоматизированных электроэнергетических
систем;

Кузнецов Олег Николаевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
университет “МЭИ”», доцент кафедры
электроэнергетических систем;

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится «__» _____ 2020 г. в __:__ на заседании диссертационного совета
Д 512.002.01 на базе акционерного общества «Научно-технический центр
Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» (АО «НТЦ ФСК
ЕЭС») по адресу: 115201, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 22, корп. 3, этаж
3, зал НТС.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте АО «НТЦ ФСК ЕЭС»
по адресу: www.ntc-power.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Новиков Николай
Леонтьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Синхронная зона единой электроэнергетической системы¹ (ЕЭС) представляет собой энергообъединение сложной структуры протяженностью порядка 6500 км с множеством слабых связей, большинство из которых близки к предельной загрузке по условиям статической устойчивости. Это обуславливает наличие в синхронной зоне ЕЭС значительного количества слабо демпфируемых резонансных частот колебаний режимных параметров (низкочастотные межсистемные колебания), а также существенное изменение их параметров при изменении схемы и режима работы энергосистемы.

Наиболее эффективным средством демпфирования низкочастотных межсистемных колебаний являются автоматические регуляторы возбуждения сильного действия синхронных генераторов (далее – АРВ СД), имеющие в своем составе каналы стабилизации. Наличие у синхронной зоны ЕЭС указанных свойств предъявляет повышенные требования к эффективности структуры стабилизации АРВ СД и качеству настройки их параметров, которые изложены в стандарте АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.160.20.001-2012 «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов» (далее – Стандарт). Стандарт устанавливает порядок сертификации АРВ СД, включающий проведение сертификационных испытаний в тестовой схеме, и определяет довольно жесткие требования к точности математических моделей АРВ СД, что обеспечивает создание их достоверных цифровых моделей и позволяет использовать эти модели для выбора параметров настройки АРВ СД.

В АО «НТЦ ЕЭС» разработана эффективная методика выбора параметров настройки каналов стабилизации АРВ СД с использованием цифровых моделей энергосистемы и программные средства, реализующие эту методику. Существенной особенностью этой методики является то, что она ориентирована на выбор параметров настройки каналов стабилизации АРВ СД только отечественной структуры.

Вместе с тем в ЕЭС России при модернизации и вводе нового генераторного оборудования в последние годы установлено значительное число систем возбуждения зарубежного производства. В их составе применяются современные микропроцессорные АРВ СД с системными стабилизаторами, подавляющее большинство которых работают на основе расчета интеграла ускоряющей мощности² (*PSS2A*, *PSS2B*, *PSS2C* в соответствии со стандартом *IEEE 421.5*) и имеют тип *PSS2B*. Количество генераторов, на которых установлены такие системные стабилизаторы, на начало 2019 года составляет порядка 180 единиц.

Выбор параметров настройки работающих на основе расчета интеграла ускоряющей мощности системных стабилизаторов, как правило, осуществляется на основе методик, приведенных в зарубежной нормативной документации. Эти методики разработаны и используются в зарубежных энергосистемах, которые значительно отличаются от ЕЭС России по своим физическим свойствам, что является причиной существенных различий в подходах к методам выбора

¹ В синхронную зону ЕЭС на начало 2019 года входят ЕЭС России (за исключением ОЭС Востока и изолированно работающих энергосистем), Азербайджана, Беларуси, Грузии, Казахстана, Киргизстана, Латвии, Литвы, Молдовы, Монголии, Таджикистана, Узбекистана, Украины и Эстонии

² Ускоряющая мощность – мощность, затрачиваемая на изменение кинетической энергии вращения ротора

параметров настройки системных стабилизаторов и критериям оценки их эффективности. Практика показывает, что применение зарубежных методик для выбора параметров настройки системных стабилизаторов АРВ СД генераторов, работающих в ЕЭС России, не обеспечивает эффективное демпфирование колебаний параметров электрического режима в широком многообразии схемно-режимных условий работы энергосистемы. Так, например, установленные параметры настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B* АРВ СД на Северо-Западной ТЭЦ привели к возникновению слабозатухающих колебаний, а на Няганской ГРЭС – к отключению всех трех энергоблоков суммарной установленной мощностью 2400 МВт технологическими защитами из-за возникновения синхронных колебаний увеличивающейся амплитуды.

Таким образом, отсутствие эффективной методики выбора параметров настройки АРВ СД с работающими на основе расчета интеграла ускоряющей мощности системными стабилизаторами для схемно-режимных условий ЕЭС России существенно снижает надёжность ее функционирования, и разработка такой методики является **актуальной** проблемой, требующей скорейшего разрешения.

Объектом исследования является генератор, работающий в энергообъединении сложной структуры в широком многообразии схемно-режимных условий ее функционирования. **Предметом исследования** являются системные стабилизаторы, работающие на основе расчета интеграла ускоряющей мощности.

Целью диссертационной работы является разработка расчетной методики выбора параметров настройки работающих на основе расчета интеграла ускоряющей мощности системных стабилизаторов микропроцессорных АРВ СД, обеспечивающей колебательную устойчивость в широком многообразии схемно-режимных условий работы энергообъединения сложной структуры. Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи**:

1. выполнить анализ существующих показателей качества систем автоматического регулирования и определить наиболее эффективный показатель для выбора параметров АРВ СД генераторов, работающих в условиях энергообъединения сложной структуры;

2. разработать методику создания достоверных математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД;

3. сформулировать требования к выбору схемно-режимных условий энергосистемы, используемых для анализа колебательной устойчивости;

4. разработать расчетную методику выбора параметров настройки работающих на основе расчета интеграла ускоряющей мощности системных стабилизаторов микропроцессорных АРВ СД, обеспечивающей колебательную устойчивость в широком многообразии схемно-режимных условий работы энергообъединения сложной структуры;

5. реализовать в программном виде разработанные методики создания достоверных математических моделей АРВ СД и выбора параметров настройки работающих на основе расчета интеграла ускоряющей мощности системных стабилизаторов микропроцессорных АРВ СД;

6. выполнить проверку эффективности разработанных методик при решении практических задач.

Методология и методы исследования. В ходе исследований применены теория автоматического управления, математический анализ, методы численного и физического моделирования. Численные эксперименты выполнены в цифровой модели энергосистемы, реализованной в программно-вычислительном комплексе (ПВК) *Eurostag* и модуле анализа колебательной устойчивости энергосистем, реализованном автором в системе автоматизированного проектирования (САПР) *Mathcad*. Экспериментальные исследования промышленных образцов АРВ СД проведены на цифро-аналого-физическом комплексе моделирования электромеханических переходных процессов в энергосистеме (ЦАФК) и цифровом программно-аппаратном комплексе моделирования энергосистем в режиме реального времени (ПАК РВ) *RTDS*.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика выбора параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B*, эффективная в условиях энергообъединения сложной структуры (ЕЭС России).
2. Сформулированы требования к выбору схемно-режимных условий для анализа колебательной устойчивости генератора.
3. Разработана методика создания достоверных математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД, которые могут использоваться для выбора их рабочих параметров настройки.
4. Разработан алгоритм аппроксимации экспериментальных частотных характеристик (ЧХ) промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД и цифровых моделей энергосистемы высокого дифференциального порядка передаточной функцией в операторном виде.

Теоретическая значимость работы:

1. Показано, что в условиях энергообъединения сложной структуры обеспечение максимальной эффективности системного стабилизатора типа *PSS2B* в одном электрическом режиме может привести к его неэффективной работе в остальных электрических режимах. Поэтому выбор параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B* в условиях работы ЕЭС России следует производить на основании анализа колебательной устойчивости группы характерных электрических режимов.
2. Предложен способ учета в математической модели микропроцессорных АРВ СД эффекта задержки, возникающей при обмене данными через буфер между различными подпрограммами, с учетом различной организации процедуры записи/чтения.
3. Получены аппроксимации Паде для большинства дискретных динамических звеньев, используемых в алгоритмах регулирования микропроцессорных АРВ СД, которые позволяют получать достоверные математические модели АРВ для исследования колебательной устойчивости энергосистем.

Практическая значимость работы:

1. Разработана методика выбора параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B*, которая позволяет обеспечить колебательную устойчивость генераторов в составе энергообъединений сложной структуры.

2. Выполнен выбор рабочих параметров настройки системных стабилизаторов *PSS2B* АРВ СД типа *THYRIPOL* генераторов Северо-Западной ТЭЦ и Няганской ГРЭС.

3. Сформулированы требования к подготовке перечня схемно-режимных условий работы энергосистемы, рассмотрение которых необходимо при выборе параметров настройки АРВ СД с использованием цифровой модели энергосистемы.

4. Разработана методика создания достоверных математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД, которые могут использоваться для выбора их параметров настройки.

5. Разработан алгоритм аппроксимации экспериментальных ЧХ каналов регулирования АРВ СД и ЧХ энергообъединений сложной структуры. Алгоритм может использоваться для разложения колебательного процесса на простейшие составляющие (аналог разложения методом Прони).

6. Разработан алгоритм аппроксимации на основе теоремы Паде, который позволяет получать аппроксимации дискретных фильтров с учетом зависимости динамических характеристик аппроксимирующих функций от параметров дискретных фильтров в виде, пригодном для использования в ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме.

Положения, выносимые на защиту:

1. Расчетная методика выбора параметров настройки работающих на основе расчета интеграла ускоряющей мощности системных стабилизаторов микропроцессорных АРВ СД генераторов, работающих в энергообъединении сложной структуры.

2. Методика создания достоверных математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД.

3. Алгоритм аппроксимации экспериментальных ЧХ в виде, пригодном для использования в ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме.

4. Аппроксимации Паде большинства дискретных фильтров, предназначенные для создания достоверных математических моделей микропроцессорных АРВ СД.

Достоверность полученных результатов исследования подтверждается корректным применением теории автоматического управления и математического анализа. Эффективность выбранных параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B* подтверждена экспериментально на ЦАФК и ПАК РВ *RTDS*, оснащенных промышленными образцами АРВ СД, а также положительным опытом эксплуатации АРВ СД на действующих электростанциях ЕЭС России.

Апробация результатов работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 3 конференциях «Электроэнергетика глазами молодежи» – Екатеринбург 2012 год (доклад отмечен дипломом 1 степени), Томск 2014 год (доклад отмечен дипломом 1 степени), Казань 2016 год.

Результаты, полученные в диссертации, использованы в ряде научно-исследовательских работ АО «НТЦ ЕЭС» и одном стандарте АО «СО ЕЭС». Ряд цифровых моделей микропроцессорных АРВ СД отечественного и зарубежного производства, полученных с использованием разработанной автором методики, используется в АО «НТЦ ЕЭС» и филиалах АО «СО ЕЭС» при расчетах

электромеханических переходных процессов и включен в библиотеку стандартных моделей ПВК *RUStab*. С использованием разработанной автором методики выполнен выбор рабочих параметров настройки системных стабилизаторов АРВ СД типа *THYRIPOL* генераторов Северо-Западной ТЭЦ и Няганской ГРЭС. Эффективность методики подтверждена опытом эксплуатации АРВ СД Северо-Западной ТЭЦ (по данным системы мониторинга системных регуляторов) и результатами экспериментов в тестовой схеме ЦАФК АО «НТЦ ЕЭС».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 3 научные статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора. Положения, выносимые на защиту, получены автором лично.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 82 наименований, содержит 196 страниц, 4 таблицы, 42 рисунка, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, ее практическая и теоретическая значимость и научная новизна, а также представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведено краткое описание принципов работы АРВ СД отечественной структуры и АРВ СД с системными стабилизаторами, работающими на основе расчета интеграла ускоряющей мощности. Выполнен краткий обзор существующих критериев качества систем автоматического регулирования. Описан принятый метод анализа колебательной устойчивости энергосистем и подход к решению поставленных задач.

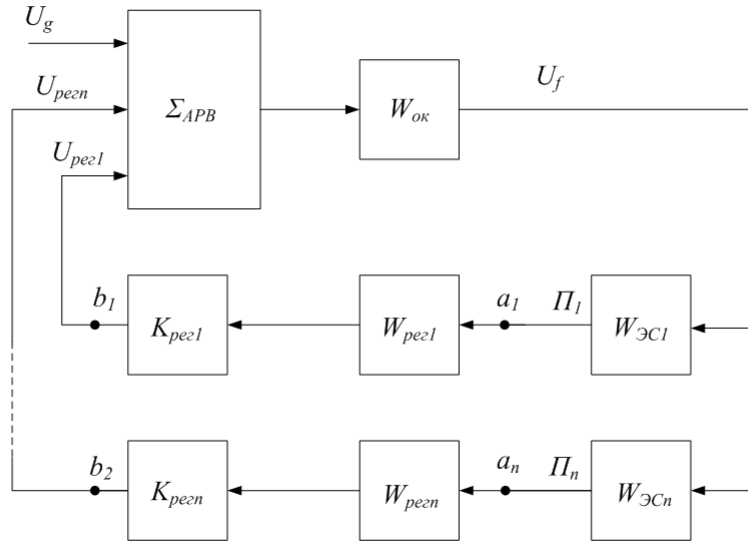
Методика выбора параметров настройки АРВ СД генератора в цифровой модели энергосистемы должна включать в себя разработку достоверной математической модели промышленного образца АРВ СД, подготовку схемно-режимных условий работы рассматриваемого генератора, необходимых для анализа его колебательной устойчивости в цифровой модели энергосистемы, методику анализа колебательной устойчивости и порядок выбора параметров настройки.

В АО «НТЦ ЕЭС» разработана методика анализа колебательной устойчивости и реализующий ее ПВК «*WinOblast*». Методика включает в себя: подачу тестового сигнала на дополнительный вход АРВ СД в цифровой модели энергосистемы; получение отклика модели энергосистемы по частоте напряжения; расчет передаточной функции замкнутой системы регулирования (режимные частотные характеристики – РЧХ) по частоте напряжения; анализ полученных РЧХ, включающий построение областей устойчивости и оптимизацию параметров настройки АРВ СД. Вместе с тем ПВК «*WinOblast*» не может использоваться для выбора параметров настройки АРВ СД системных стабилизаторов типа *PSS2B*, так как реализованные в нем алгоритмы не позволяют выполнять анализ колебательной устойчивости при наличии в структуре АРВ СД звеньев чистого запаздывания, функциональной зависимости коэффициентов усиления каналов регулирования АРВ

СД от его параметров настройки, использовании более одного режимного параметра в законе стабилизации.

Для устранения отмеченных недостатков автором выполнена коррекция ряда алгоритмов ПВК «WinOblast», а также разработаны и реализованы новые алгоритмы в САПР *Mathcad* с использованием встроенного в него языка программирования, что обеспечило возможность выбора параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B*.

Синхронный генератор, работающий параллельно с энергообъединением любой сложности, можно представить в виде структурной схемы, приведенной на рисунке 1.



$\Sigma_{АРВ}$ – сумматор АРВ СД; $W_{ок}$ – передаточная функция возбудителя совместно с суммирующим выходным усилителем АРВ СД; $W_{эсn}$ – передаточные функции синхронного генератора совместно с энергосистемой по n -му режимному параметру; $W_{регн}$ – передаточные функции n -го канала регулирования АРВ СД; $K_{регн}$ – коэффициенты усиления n -го канала АРВ СД; U_g – тестовый сигнал; U_f – напряжение возбуждения; Π_f – n -ый режимный параметр регулирования; $U_{регн}$ – управляющий сигнал n -го канала регулирования

Рисунок 1 – Структурная схема объекта регулирования

Получено выражение для расчета передаточных функций замкнутой системы по каждому из режимных параметров $W_{замk}$ при произвольной настройке регулятора на основе результата единственного эксперимента:

$$W'_{замk} = \frac{W_{замk} \cdot \frac{W'_{ок}}{W_{ок}}}{1 - \sum_{i=1}^n \left(\left(W_{regi} \cdot K_{regi} - W'_{regi} \cdot K'_{regi} \cdot \frac{W'_{ок}}{W_{ок}} \right) \cdot W_{замi} \right)}, \quad k \in [1, n], \quad (1)$$

где $W'_{замk}$ – передаточная функция замкнутой системы по k -му режимному параметру при произвольных параметрах настройки АРВ СД; здесь и далее со штрихами будут обозначаться переменные и функции при произвольных параметрах настройки АРВ СД, без штрихов – полученные экспериментально.

Также получена система уравнений для построения границы областей устойчивости по единственному эксперименту при произвольных параметрах настройки АРВ СД в осях произвольных коэффициентов усиления:

$$\begin{pmatrix} K_{pe1}^{obl} \\ K_{pe2}^{obl} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \operatorname{Re}(W'_{pe1}) & \operatorname{Re}\left(\frac{W_{zam2}}{W_{zam1}} \cdot W'_{pe2}\right) \\ \operatorname{Im}(W'_{pe1}) & \operatorname{Im}\left(\frac{W_{zam2}}{W_{zam1}} \cdot W'_{pe2}\right) \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \operatorname{Re}\left(W'^{-1}_{zam1} + W'_{pe1} \cdot K'_{pe1} + \frac{W_{zam2}}{W_{zam1}} \cdot W'_{pe2} \cdot K'_{pe2}\right) \\ \operatorname{Im}\left(W'^{-1}_{zam1} + W'_{pe1} \cdot K'_{pe1} + \frac{W_{zam2}}{W_{zam1}} \cdot W'_{pe2} \cdot K'_{pe2}\right) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Выражение (2) при применении нелинейного масштабирования координатных осей позволяет получать области устойчивости как в плоскости постоянных времени каналов регулирования, так и при функциональной зависимости коэффициента усиления канала регулирования от нескольких параметров настройки АРВ СД. Это позволяет выбирать параметры настройки системного стабилизатора типа *PSS2B*, в котором коэффициент усиления канала стабилизации по активной мощности зависит от произведения коэффициентов K_{s1} и K_{s2} .

Оценка качества регулирования выполняется по отображению передаточной функции замкнутой системы в частотной области, выражение для которой при произвольных параметрах настройки определяется по формуле (1). Для оценки качества регулирования используется функционал:

$$J = \Psi(K'_{0f}, K'_{1f}) \text{ или } J = \Psi(K'_{s1}, K'_{s2}). \quad (3)$$

В данной постановке задача выбора оптимальных параметров настройки регулятора возбуждения сводится к поиску минимума функции (3), который осуществляется ее прямым расчетом при заданном диапазоне и шаге изменения коэффициентов K'_{s1} и K'_{s2} . Преимущество данного метода состоит в том, что он дает полную картину поведения показателя качества в заданном диапазоне изменения коэффициентов K'_{s1} и K'_{s2} .

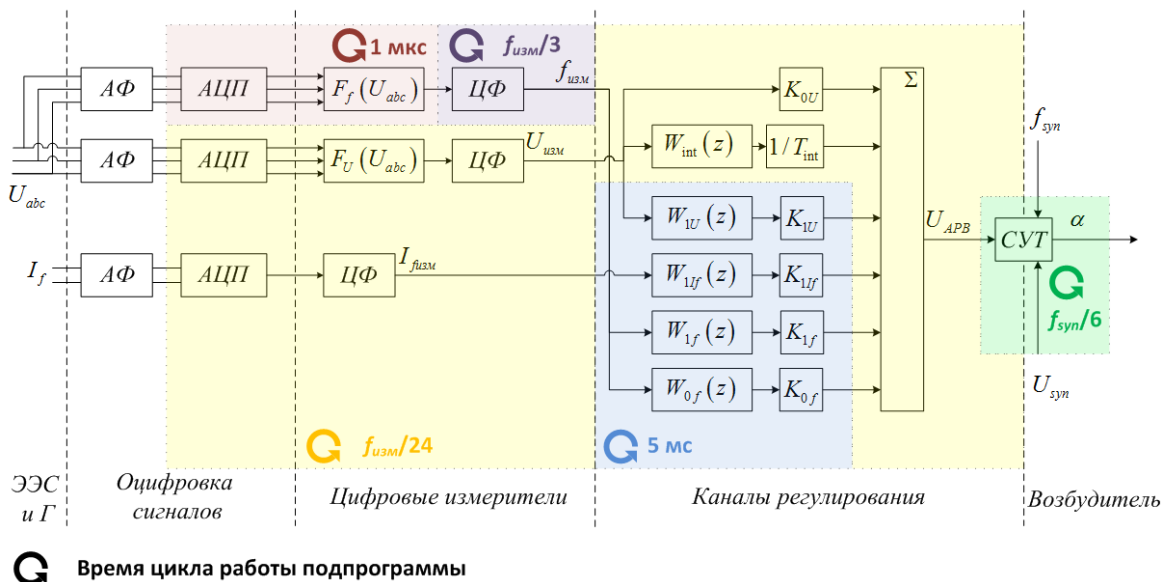
Описанные расчетные выражения положены в основу метода анализа колебательной устойчивости энергосистем для выбора параметров настройки АРВ СД как отечественного, так и зарубежного производства.

Вторая глава посвящена разработке методики создания достоверных математических моделей АРВ СД на основе экспериментальных частотных характеристик и технической документации от производителя оборудования.

На рисунке 2 в качестве примера представлена функциональная схема части алгоритма промышленного образца микропроцессорного АРВ СД, отвечающего за регулирование напряжения генератора и стабилизацию электромеханических колебаний его ротора.

Как правило, в микропроцессорных устройствах реализуется модульный принцип работы, при котором расчетный цикл и различные подпрограммы связаны друг с другом общей памятью (буферами обмена), а подпрограммы вызываются из основного цикла. Эти подпрограммы имеют различное время своего выполнения, вызванного, например, ожиданием входной информации. Так обмен информацией между подпрограммами является синхронным (синхронный буфер), когда между моментами чтения и записи информации проходит регламентированное время, либо асинхронным, когда чтение и запись данных подпрограммами производятся в зависящий от внешних причин момент времени. Причем время выполнения каждой из этих подпрограмм может существенно различаться, что сказывается и на процессе обмена информацией, и на особенностях функционирования цифровых фильтров.

В соответствии с требованиями Стандарта производители предоставляют на сертификацию частотные характеристики промышленных образцов АРВ СД и математические модели этих регуляторов, предназначенные для расчетов электромеханических переходных процессов в энергосистеме. Опыт сертификации показывает, что в подавляющем большинстве случаев и предоставляемые производителем ЧХ и ЧХ, получаемые с помощью этих моделей, значительно отличаются от экспериментальных ЧХ. Это происходит потому, что при разработке математических моделей производители зачастую применяют грубые аппроксимации или вовсе не учитывают динамические характеристики цифровых измерителей и ряда дискретных фильтров, не учитывают запаздывание, возникающее при обмене данными через буфер обмена, подменяют экспериментальные ЧХ полученными аналитически или с помощью специального отладочного аналогового входа и выхода АРВ СД и т. п. Математические модели, полученные с помощью таких ЧХ, не соответствуют требованиям Стандарта по точности и не могут использоваться для выбора параметров настройки АРВ СД.



ЭЭС и Г – электроэнергетическая система и генератор; АФ – аналоговый фильтр; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; F – нелинейная функция цифрового измерителя; ЦФ – выходной цифровой фильтр измерителя; СУТ – система управления тиристорами; W – дискретная передаточная функция канала регулирования; K и T – коэффициенты усиления и постоянные времени каналов регулирования; U_{abc} и I_f – трехфазное напряжение статора и ток возбуждения генератора соответственно; $U_{изм}$, $I_{физм}$, $f_{изм}$ – выходные значения измерителей действующего напряжения статора, тока возбуждения и частоты напряжения генератора соответственно; $U_{АРВ}$ – выходное значение сумматора АРВ СД; U_{syn} и f_{syn} – напряжение и частота синхронизации; α – угол управления тиристорами

Рисунок 2 – Функциональная схема части алгоритма микропроцессорного АРВ СД для целей исследования колебательной устойчивости

В диссертационной работе разработана методика создания достоверных математических моделей микропроцессорных АРВ СД. Методика основана на создании максимально подробной универсальной математической модели АРВ СД по его техническому описанию, которая упрощается путем точной аппроксимации ее отдельных элементов, проверяется и в случае необходимости корректируется по экспериментальным ЧХ промышленного образца АРВ СД, снятым по специально подготовленной программе испытаний.

Сначала алгоритмы функционирования АРВ СД по имеющейся документации представляются в виде функциональной схемы (фрагмент схемы приведен на рис. 2). Затем с использованием методов аппроксимации каждый из элементов схемы замещается непрерывным динамическим звеном в операторном виде. Способ замещения некоторых элементов широко известен (например, аналоговый фильтр в виде RC -цепочки, АЦП), замещение других элементов может вызвать затруднение (буфер обмена, измерители режимных параметров, цифровые фильтры). В диссертации приведен способ замещения данных элементов, обеспечивающий необходимую точность получаемой математической модели АРВ СД.

Асинхронный буфер обмена данными замещается экстраполятором нулевого порядка $W_{zoh}(p, h)$ с постоянной времени h_{read} , а синхронный буфер обмена данными при $h_{read} \leq h_{write}$ и $h_{write} = n \cdot h_{read}$ не отражается в схеме замещения, при $h_{read} > h_{write}$ и $n \cdot h_{write} = h_{read}$ замещается звеном $W_{zoh}(p, h_{read})/W_{zoh}(p, h_{write})$, а в остальных случаях – экстраполятором нулевого порядка $W_{zoh}(p, h)$ с постоянной времени h_{read} . Здесь h_{write} – время цикла работы подпрограммы, производящей запись, h_{read} – время цикла работы подпрограммы, производящей чтение, n – любое целое число.

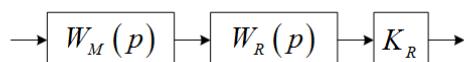
При замещении первичных измерителей режимных параметров (действующее значение тока и напряжения статора, угол нагрузки, частота напряжения) учитываются динамические и статические характеристики их алгоритмов. В диссертации приведены рекомендации по моделированию первичных измерителей при отсутствии конкретной информации об их алгоритмах работы. Например, для измерителя частоты напряжения по положительным переходам через ноль на периоде по одной из фаз рекомендуется модель – $W_{zoh}(p, 0.02)^2$.

Вторичные измерители режимных параметров, рассчитываемые через другие режимные параметры, учитываются путем задания соответствующих зависимостей. Например, при использовании в АРВ СД расчетного значения скорости вращения ротора ω в качестве стабилизирующего сигнала его измеритель представляется по следующей формуле:

$$\omega = f_U + \frac{p}{1+0.02p} \cdot \arctan\left(\frac{P \cdot x_q}{Q \cdot x_q + U^2}\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50}, \text{ о.е.} \quad (4)$$

Для дискретных фильтров применяются точные аппроксимации с сохранением зависимости их динамических и статических характеристик от параметров настройки по методике, приведенной в главе 3.

В завершении выполняется понижение дифференциального порядка математической модели АРВ СД с сохранением требуемой точности. В результате замещения всех элементов функциональной схемы каждый канал регулирования АРВ СД представляется в виде, показанном на рисунке 3.



$W_M(p)$ – передаточная функция в операторном виде, учитывающая характеристики входных аналоговых и цифровых фильтров (АФ+ЦФ), а так же особенности дискретной работы алгоритма;
 $W_R(p)$ – передаточная функция канала регулирования в виде последовательно соединенных динамических звеньев, учитывающая характеристики канала в зависимости от параметров настройки

Рисунок 3 – Упрощенное представление математической модели канала регулирования АРВ СД

Далее снимаются экспериментальные ЧХ каналов регулирования как минимум для трех наборов параметров настройки – предустановленного, максимально и минимально реализующего форсирующие способности каналов регулирования, и выполняется проверка достоверности математической модели путем сравнения ЧХ каналов регулирования модели и промышленного образца АРВ СД. В случае необходимости осуществляется коррекция математической модели каналов регулирования АРВ СД по экспериментальным ЧХ.

На рисунке 4 приведены: ЧХ одного из каналов регулирования промышленного образца АРВ СД отечественного производства, полученная экспериментально с использованием *RTDS* (эксп.); ЧХ канала регулирования, полученная по разработанной автором методике (апрокс.); ЧХ канала регулирования, полученная по математической модели, предоставленной разработчиками АРВ СД (произв.). На рисунке 5 приведен результат расчета погрешности для всех каналов регулирования в математической модели АРВ СД, полученной по разработанной автором методике (апрокс.) и предоставленной разработчиками АРВ СД (произв.).

Согласно Стандарту математическая модель АРВ СД признается достоверной, если погрешность не превышает 10 % в каждой экспериментально снятой точке. Из рисунка 5 видно, что математическая модель АРВ СД, предоставленная производителем, уже на частотах порядка 1 Гц перестает быть достоверной по всем каналам регулирования (погрешность становится более 10 %), что не соответствует требованиям Стандарта и не позволяет использовать ее для выбора параметров настройки АРВ СД. Математическая модель, полученная с помощью разработанной в диссертационной работе методики, удовлетворяет требованиям Стандарта и может использоваться для выбора параметров настройки АРВ СД.

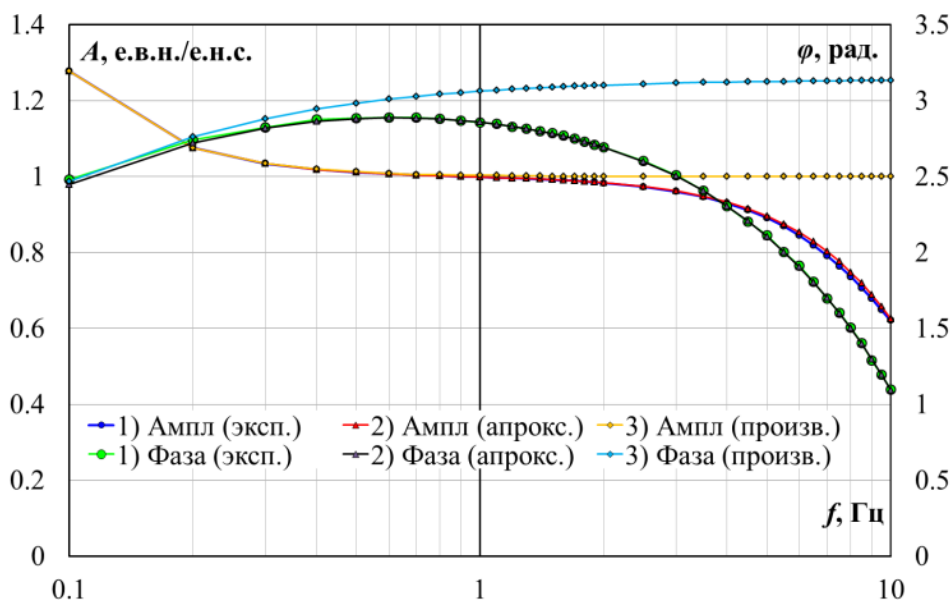


Рисунок 4 – ЧХ пропорционально-интегрального канала регулирования по отклонению напряжения промышленного образца АРВ СД

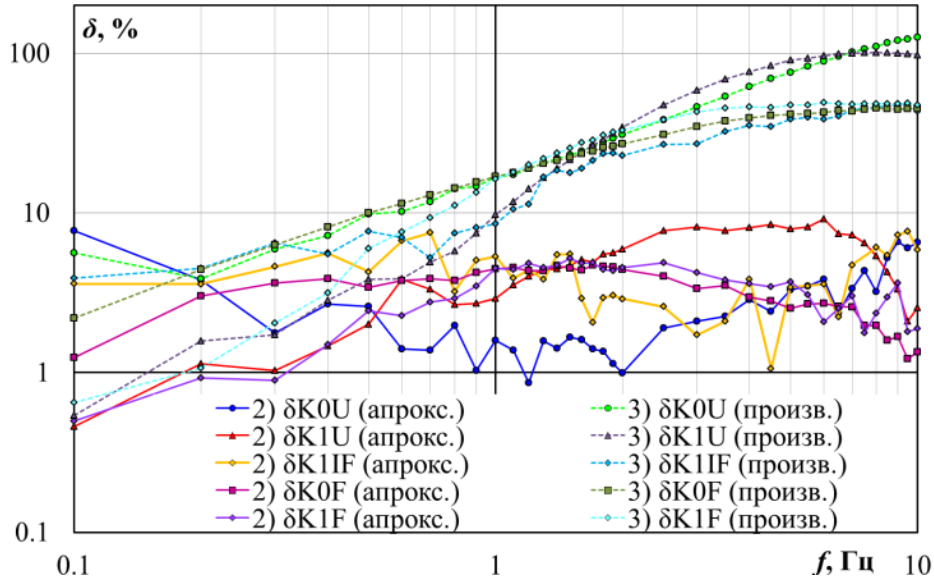


Рисунок 5 – Относительная погрешность в процентах, определенная для математической модели, полученной от производителя и модели, полученной по описываемой методике

Третья глава посвящена разработке методики аппроксимации экспериментальных ЧХ и дискретных фильтров.

Для создания достоверных математических моделей микропроцессорных АРВ СД необходимо получить аппроксимации ЧХ каналов регулирования и отдельных дискретных фильтров в виде, пригодном для использования в ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме. Для получения аппроксимаций в диссертационной работе разработаны алгоритмы на основе метода наименьших квадратов (МНК) и теоремы Паде.

Алгоритм аппроксимации МНК.

Полученная опытным путем (экспериментальная) амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) $W_s(\omega)$ представляется в виде функции от угловой частоты ω :

$$W_s(\omega_i) = V(\omega_i) + jU(\omega_i), \quad i \in [1, N]. \quad (5)$$

В ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме обычно используется представление дифференциальных уравнений передаточными функциями в непрерывном операторном виде. Таким образом, возникает задача аппроксимации произвольной АФЧХ дробно-рациональной функцией:

$$W_{an}(p, \mathbf{a}, \mathbf{b}) = \frac{1}{p^\ell} \frac{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n}{1 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m} = \frac{\sum_{r=0}^n a_r p^r}{p^\ell \cdot \left(1 + \sum_{k=1}^m b_k p^k\right)} = \frac{A(p, \mathbf{a})}{p^\ell \cdot B(p, \mathbf{b})}. \quad (6)$$

Задача решается итерационным способом, на каждом шаге которого осуществляется минимизация функции методом наименьших квадратов:

$$F(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{K(\omega_i)} \cdot |W_s(\omega) \cdot (j\omega)^\ell \cdot B(\omega, \mathbf{b}) - A(\omega, \mathbf{a})|^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

Так как задача решается путем поиска локального экстремума нелинейной функции, то выбор первого приближения определяет как скорость сходимости итерационной процедуры, так и результат аппроксимации. На первой итерации

осуществляется поиск коэффициентов массивов $\mathbf{a}_1$ и $\mathbf{b}_1$ путем минимизации (7) и использованием масштабирующей функции, прогнозирующей расположение полюсов передаточной функции $W_s(\omega)$:

$$K_1(\omega_i) = \frac{|W_s'(\omega_i)|^2}{\omega_i} \cdot \left[\frac{\ln \left(\frac{\sqrt{1 + (T_{apr1} \cdot \omega_i)^2} + T_{apr1} \cdot \omega_i}{\sqrt{1 + (T_{apr2} \cdot \omega_i)^2} + T_{apr2} \cdot \omega_i} \right)}{\omega_i \cdot (T_{apr1} - T_{apr2})} \right]^n. \quad (8)$$

На каждой следующей итерации осуществляется поиск новых значений коэффициентов массивов $\mathbf{a}_{it}$ и $\mathbf{b}_{it}$ путем повторной минимизации (7) и использованием масштабной функции, которая рассчитывается через коэффициенты массива, найденные на предыдущей итерации $\mathbf{b}_{it-1}$:

$$K_{it}(\omega_i) = \frac{|B(j\omega_i, \mathbf{b}_{it-1})|^2}{\omega_i} \cdot \frac{1}{K_{tol}(\omega_i)}, \quad (9)$$

где $K_{tol}(\omega)$ – весовая функция, оценивающая степень достоверности определения исходных экспериментальных точек.

В качестве показателя сходимости итерационного процесса принята величина изменения коэффициентов массива $\mathbf{b}$ на текущей итерации относительно предыдущей итерации:

$$\sqrt{\sum_{k=1}^m \left(\frac{b_k^{[it-1]} - b_k^{[it]}}{b_k^{[it]}} \right)^2} \leq \varepsilon. \quad (10)$$

В формулах масштабной функции (8) и (9) использован масштабный коэффициент $1/\omega$, что при суммировании в формуле (7) эквивалентно логарифмическому масштабированию по частоте, которое обеспечивает более равномерную чувствительность оптимизационной процедуры ко всему диапазону частот.

Описанный алгоритм программно реализован в САПР *Mathcad* с использованием встроенного в него языка программирования. Разработаны процедуры, обеспечившие повышение производительности алгоритмов и нормализацию матриц получаемых систем линейных уравнений, а также разработан способ выбора коэффициентов аппроксимации.

Алгоритм аппроксимации МНК опробован на тестовых функциях различного вида, в качестве которых использованы как частотные характеристики сложных энергообъединений, полученных в математической модели высокого дифференциального порядка (в том числе более 6000), так и экспериментальные частотные характеристики. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) одной из тестовых функций и результат ее аппроксимации приведены на рисунке 6. Погрешность аппроксимации, вычисленная для этой тестовой функции, существенно меньше требуемой по Стандарту, а порядок аппроксимации выбран равным $\ell = -1$, $n = 13$, $m = 18$.

На рисунке 7 приведена экспериментальная АЧХ канала регулирования по производной частоты и результат ее аппроксимации для одного из аналоговых АРВ СД, входящих в состав ЦАФК АО «НТЦ ЕЭС». Порядок аппроксимации выбран равным $\ell = -1$, $n = 2$, $m = 4$. По всем каналам регулирования этого АРВ СД относительная погрешность аппроксимации в диапазоне частот до 3 Гц не превысила 5%.

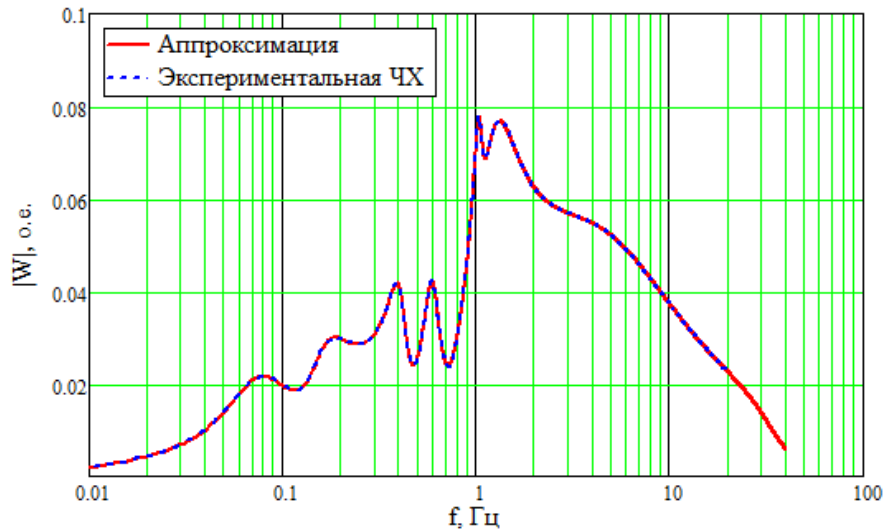


Рисунок 6 – АЧХ тестовой функции, полученной в цифровой модели энергосистемы высокого дифференциального порядка, и ее аппроксимация

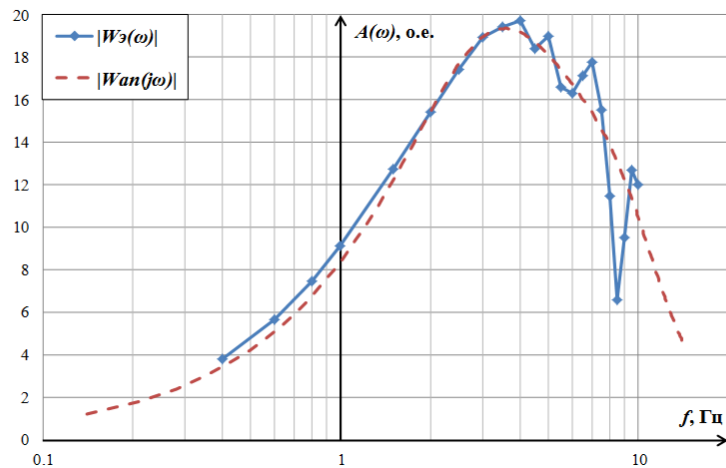


Рисунок 7 – АЧХ канала регулирования по производной частоты АРВ СД, входящего в состав ЦАФК АО «НТЦ ЕЭС», и его аппроксимация

Алгоритм аппроксимации на основе теоремы Паде.

В АРВ СД, разработанных на базе микропроцессорной техники, измерители режимных параметров и алгоритмы регулирования реализуются в дискретном виде, что необходимо учитывать. Так, в этих АРВ СД широко используется ряд дискретных фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры), например, фильтр скользящего среднего. Перевод КИХ-фильтров в операторный вид приводит к значительному количеству звеньев чистого запаздывания с малыми значениями постоянных времени. Непрерывные динамические звенья в операторном виде реализуются в микропроцессорной технике разностными уравнениями (дискретизация) в виде дискретных фильтров с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтры). Например, большинство производителей АРВ СД программно реализует апериодическое звено $W(p) = 1 / (1 + T \cdot p)$ в виде разностного уравнения $y_i = (h \cdot x_i + T \cdot Y_{i-1}) / (h + T)$, что позволяет совершить обратный переход к непрерывному операторному виду: $W'(p) = h / (h + T - T \cdot e^{-h \cdot p})$. Вместе с тем КИХ- и БИХ-фильтры, представленные в операторном виде, не могут быть реализованы в ряде ПВК для расчета

электромеханических переходных процессов в энергосистеме и имеют плохую вычислительную устойчивость, поэтому их необходимо аппроксимировать.

В диссертационной работе реализован алгоритм аппроксимации на основе теоремы Паде в виде:

$$W(p, T) \approx W_{anL/M}(p, T) = \frac{B(p, T)}{C(p, T)} \cdot e^{-p \cdot T_{\text{мод}}} = \frac{b_0(T) + b_1(T) \cdot p + \dots + b_L(T) \cdot p^L}{c_0(T) + c_1(T) \cdot p + \dots + c_M(T) \cdot p^M} \cdot e^{-p \cdot T_{\text{мод}}}, \quad (11)$$

где $W_{anL/M}(p, T)$ – модифицированная аппроксимация Паде функции $W(p, T)$ при заданном порядке аппроксимации L/M и постоянной времени сдвига аппроксимации $T_{\text{мод}}$,

$b(T)$, $c(T)$ – коэффициенты полиномов, являющиеся функциями от параметров функции $W(p, T)$.

В микропроцессорных АРВ СД некоторых производителей для расчета производной используется дискретный КИХ-фильтр «дифференцирования с наилучшим среднеквадратичным приближением к результатам измерений», для которого получены аппроксимации Паде различного порядка:

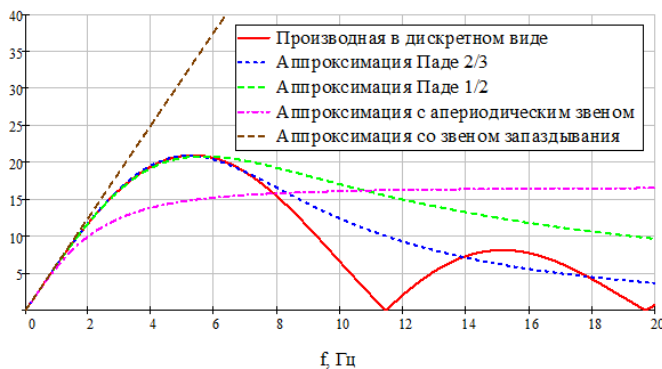
$$W_{an2/3}(p) = \frac{15 \cdot p \cdot (T \cdot p + 35)}{41 \cdot (T \cdot p)^3 + 225 \cdot (T \cdot p)^2 + 540 \cdot T \cdot p + 525}, \text{ порядок} - 2/3, \quad (12)$$

$$W_{an1/2}(p) = \frac{p \cdot e^{-p \cdot 0.2 \cdot T}}{0.22 \cdot (T \cdot p)^2 + 0.8 \cdot T \cdot p + 1}, \text{ порядок} - 1/2, \quad (13)$$

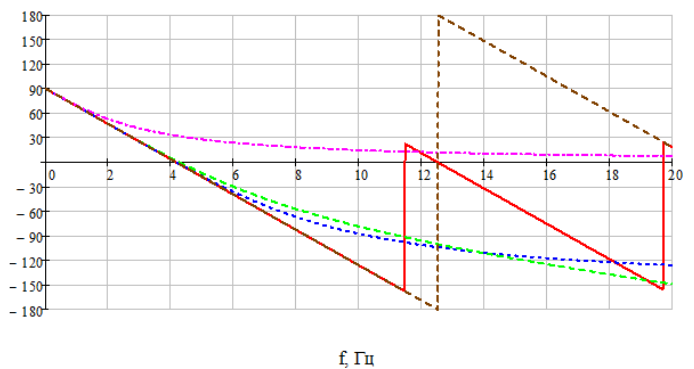
$$W_{an1/1}(p) = p / (1 + p \cdot T), \text{ порядок} - 1/1 \text{ (с апериодическим звеном)}, \quad (14)$$

$$W_{an1/0}(p) = p \cdot e^{-p \cdot T}, \text{ порядок} - 1/0 \text{ (со звеном запаздывания)}. \quad (15)$$

На рисунке 8 приведены АЧХ и фазочастотные характеристики (ФЧХ) данного дискретного фильтра производной в дискретном виде с постоянной времени 0.06 с, а также его аппроксимации Паде различного порядка. Из оценки погрешности функций на рисунке 8 можно заключить, что традиционно используемые производителями аппроксимации фильтра производной апериодическим звеном $p/(1 + T \cdot p)$ и звеном запаздывания $p \cdot e^{-T \cdot p}$ не могут обеспечить получение достоверной математической модели АРВ СД, в то время как аппроксимация Паде порядка 2/3 этого дискретного фильтра позволяет обеспечить требуемую Стандартом точность представления каналов регулирования в математической модели и использовать последнюю для выбора параметров настройки АРВ СД.



а) АЧХ



б) ФЧХ

Рисунок 8 – АЧХ и ФЧХ звена производной и её различных аппроксимаций при

$T = 0.06 \text{ с}$

В диссертационной работе получены аппроксимации в виде непрерывных динамических звеньев для ряда дискретных и непрерывных звеньев при их дискретизации различными способами, используемых в микропроцессорных АРВ СД. Эти аппроксимации обеспечивают создание математических моделей АРВ СД с требуемой точностью.

В четвертой главе приведена расчетная методика выбора параметров настройки АРВ СД с использованием частотных методов анализа и представлены результаты оценки ее эффективности в тестовой модели энергосистемы.

Методика выбора параметров настройки АРВ СД рассмотрена на примере системного стабилизатора типа *PSS2B* в составе промышленного образца АРВ СД типа *AVR-4M* производства ООО «АСУ-ВЭИ», структурная схема системного стабилизатора которого приведена на рисунке 9. Выход системного стабилизатора, реализованного в АРВ СД типа *AVR-4M*, поступает на выходной сумматор АРВ СД.

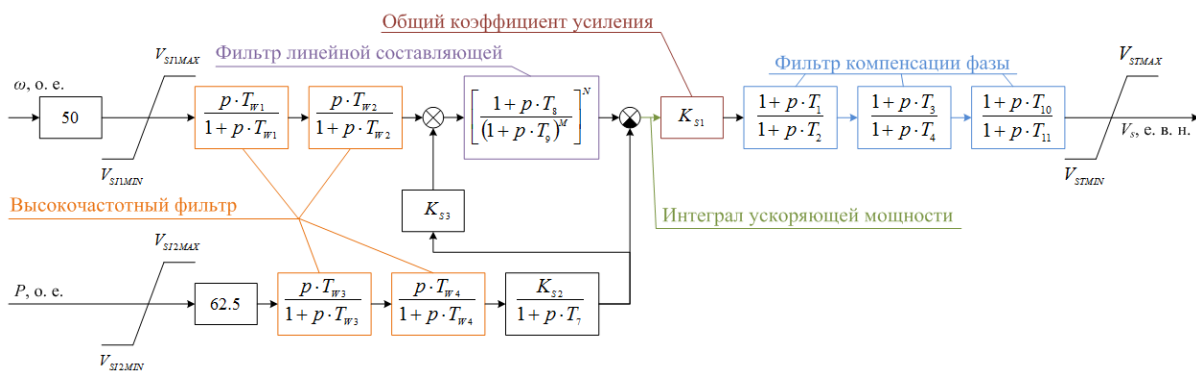


Рисунок 9 – Структурная схема системного стабилизатора типа *PSS2B* в составе *AVR-4M*

Методика выбора параметров настройки АРВ СД разработана на основе сложившегося в зарубежной практике метода, который имеет широкое распространение, хорошо себя зарекомендовал и подробно описан в ряде опубликованных работ. Далее для упрощения данный метод назван «классическим». В соответствии с данным методом частота среза высокочастотного фильтра выбирается ниже наименьшей частоты среди всех наблюдаемых электромеханических колебаний вблизи рассматриваемого генератора. Параметры фильтра линейной составляющей принимаются в соответствии со стандартом *IEEE 421.5*. Значение коэффициента усиления K_{S2} рассчитывается через постоянную времени инерции ротора рассматриваемого генератора. Параметры фильтра компенсации фазы подбираются таким образом, чтобы в диапазоне частот наблюдаемых электромеханических колебаний ФЧХ данного фильтра была обратна к ФЧХ переходной функции разомкнутой системы, характеризующей отношение электромагнитного момента генератора к выходному значению сигнала АРВ СД. Значение коэффициента K_{S1} выбирается максимально возможным для конкретных условий эксплуатации генератора и определяется опытным путём на действующем объекте.

В диссертационной работе «классический» метод доработан с учетом устранения недостатков, выявленных при его применении в энергообъединении сложной структуры и описанных во введении, путем использования частотных методов анализа колебательной устойчивости.

Работа генератора, для АРВ СД которого выбираются параметры настройки, может сопровождаться различными видами колебаний по их физической природе и характеристикам. При этом характеристики колебательного процесса в энергообъединении сложной структуры существенно зависят от множества факторов и могут варьироваться в широком диапазоне. По данной причине для анализа колебательной устойчивости с целью выбора параметров настройки АРВ СД генераторов, работающих в энергообъединении сложной структуры, необходимо рассматривать комплекс схемно-режимных условий, в которых бы наблюдался весь возможный набор резонансных частот, а также были бы созданы наихудшие условия их демпфирования. В связи с этим в диссертационной работе уделено особое внимание формированию требований к подготовке цифровой модели энергосистемы и рассматриваемых в ней схемно-режимных условий работы генератора при выборе параметров настройки его АРВ СД. Этот подход используется в разработанной в АО «НТЦ ЕЭС» методике выбора параметров настройки АРВ СД отечественного производства. В диссертационной работе выполнены формализация и актуализация требований к подготовке цифровой модели энергосистемы и рассматриваемых в ней схемно-режимных условий работы генератора, а также методике выбора параметров настройки АРВ СД произвольной структуры, учитывающей современный этап развития микропроцессорных регуляторов возбуждения.

Для выбора параметров настройки АРВ СД генераторов электростанции (далее – рассматриваемая электростанция) должна использоваться актуализированная цифровая модель энергосистемы, в которой рассматриваемая электростанция должна быть представлена в подробном (развернутом) виде с заданием отдельных генераторов со своими блочными трансформаторами, параметры которых задаются в соответствии с паспортными данными.

Методика предусматривает разработку и верификацию математической модели исследуемого АРВ СД (см. главу 2) с ее реализацией в ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме. В цифровых моделях АРВ СД необходимо заблокировать действие всех функций кроме основного алгоритма регулирования напряжения статора генератора и каналов стабилизации, а также исключить все ограничения по величинам сигналов.

При выборе параметров настройки АРВ СД необходимо рассматривать базовые электрические режимы зимнего и летнего максимума и минимума нагрузок энергосистемы. В одном из базовых электрических режимов должен быть предусмотрен максимальный состав включенного генерирующего оборудования на рассматриваемой электростанции, а в другом – минимальный состав. Перечень базовых электрических режимов может быть расширен путем включения дополнительных режимов, отражающих наиболее тяжелые схемно-режимные условия работы энергосистемы, например, электрический режим паводка. Во всех базовых электрических режимах схему рассматриваемой электростанции необходимо привести к нормальной, а генераторы загрузить до максимального уровня по активной мощности и до характерного значения по реактивной мощности.

Условия демпфирования колебаний режимных параметров существенно зависят от загрузки слабых связей по активной мощности, поэтому параметры настройки АРВ СД необходимо выбирать в электрических режимах с загрузкой

наиболее значимых контролируемых сечений до величин максимально допустимого перетока активной мощности (МДП) в нормальной схеме. Однако как определение перечня наиболее значимых контролируемых сечений, так и сама процедура их загрузки сложно поддается формализации и основывается на знании характерных особенностей конкретной энергосистемы. В диссертационной работе приведены общие рекомендации, которые позволяют формализовать подготовку характерных электрических режимов с учетом требования к уровню загрузки контролируемых сечений. В соответствии с данными рекомендациями в цифровой модели энергосистемы определяются контролируемые сечения, на относительно к МДП загрузку которых наиболее влияет рассматриваемая электростанция. Затем выбирается ограниченное количество таких контролируемых сечений и во всех базовых электрических режимах выполняется их одновременная загрузка до величины МДП в направлении, характерном для базового электрического режима. Допускается создание нескольких базовых электрических режимов с поочередной загрузкой каждого из контролируемых сечений до величины МДП.

На основе каждого из базовых электрических режимов работы энергосистемы подготавливаются характерные электрические режимы, включающие: базовый электрический режим без изменений; схемы с отключением одного и двух сетевых элементов схемы выдачи мощности рассматриваемой электростанции или контролируемого сечения, для которого выполнялась загрузка до величины МДП; режим потребления или минимальной генерации реактивной мощности.

В случае выхода параметра любого электрического режима из области длительно допустимых значений (например, превышение МДП, длительно допустимой токовой нагрузки, снижение напряжения ниже минимально допустимого и т.д.) для ввода электрического режима в область длительно допустимых значений допускается изменение мощности генераторов других электростанций энергосистемы и включение/отключение устройств регулирования напряжения, компенсации реактивной мощности и генерирующего оборудования.

В соответствии с разработанной методикой все параметры системного стабилизатора кроме параметров фильтра компенсации фазы и общего коэффициента усиления рассчитываются по «классическому» методу.

Затем производится расчет фактических ФЧХ интеграла ускоряющей мощности системного стабилизатора для всего набора характерных схемно-режимных условий работы рассматриваемого генератора. Из данного набора ФЧХ производится расчет вспомогательных кривых, ограничивающих максимальные, минимальные значения, а также среднеарифметические значения среди всех ФЧХ набора. Расчет вспомогательных кривых существенно ограничивает количество данных для дальнейшего анализа, позволяя сохранить наиболее значимую информацию, существенно облегчить анализ колебательной устойчивости и ускорить работу алгоритмов оптимизации параметров настройки системного стабилизатора.

Далее осуществляется выбор параметров фильтра компенсации фазы компромиссным способом, обеспечивая максимизацию расстояния вспомогательных кривых ФЧХ от границ $\pm 90^\circ$ по направлению к величине 0° в диапазоне частот, в котором наблюдаются колебания режимных параметров.

В качестве примера на рисунке 10 приведены ФЧХ выходного сигнала системного стабилизатора для электрических режимов 1' и 8 тестовой схемы, а так же ФЧХ выбранного фильтра компенсации фазы. На рисунке 10 также отмечена область значений фазы с границами $\pm 90^\circ$, причем в диапазоне частот с участками фазочастотной характеристики: внутри данной области системный стабилизатор будет обеспечивать эффективное демпфирование колебаний; вблизи границ данной области системный стабилизатор малоэффективен; вне данной области системный стабилизатор будет ухудшать условия демпфирования колебаний, что при увеличении общего коэффициента усиления может привести к появлению незатухающих колебаний и нарушению колебательной устойчивости. Из рисунка 10 видно, что выбор параметров фильтра компенсации фазы с максимальной эффективностью стабилизации в одном электрическом режиме не может обеспечить эффективную работу системного стабилизатора в другом электрическом режиме.

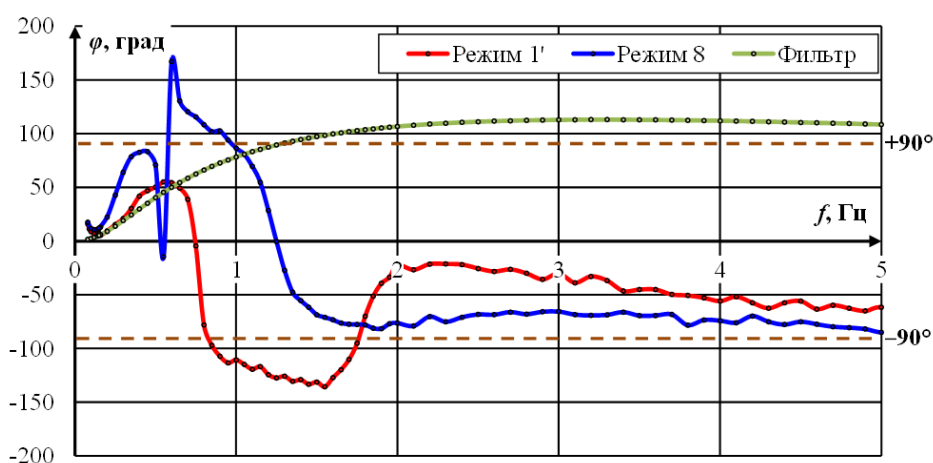


Рисунок 10 – Фазочастотные характеристики выходного значения системного стабилизатора и фильтра компенсации фазы в разомкнутой системе

Далее осуществляется оптимизация коэффициентов усиления K_{s1} и K_{s2} с использованием разработанных в разделе 1 алгоритмов, включающих: построение границ областей устойчивости для представительных электрических режимов, значений «минимаксного» критерия качества по параметру частоты напряжения генератора в тех же осях, и условной кривой, ограничивающей область эффективных значений K_{s1} и K_{s2} по демпфированию колебаний (см. рисунок 11).

Сравнительная оценка эффективности результатов выбора параметров настройки по разработанной методике выполнена в тестовой схеме, характеристики которой отображают основные схемно-режимные особенности энергообъединения сложной структуры и обеспечивают получение объективной оценки эффективности применения конкретного АРВ СД в ЕЭС России. В качестве альтернативных методов выбора параметров настройки рассмотрены «классический» метод и метод многопараметрической оптимизации эвристическими алгоритмами по параметрам K_{s1} , K_{s2} , K_{s3} , T_1 - T_4 , T_{10} , T_{11} по «минимаксному» критерию качества по параметру частоты напряжения генератора.

Выбор параметров настройки регулятора напряжения АРВ СД зарубежного производства осуществляется по уже существующей в АО «НТЦ ЕЭС» методике.

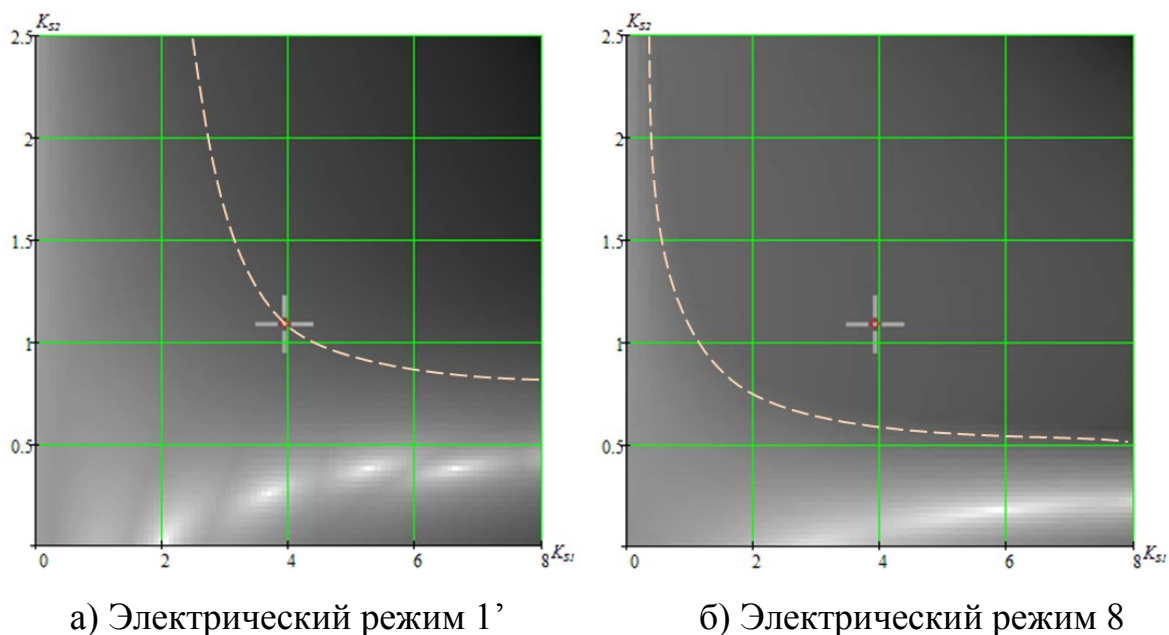


Рисунок 11 – Область устойчивости с выбранными параметрами настройки по разработанной методике

Экспериментальная проверка выполнена с использованием промышленного образца АРВ СД типа *AVR-4M* производства ООО «АСУ-ВЭИ» (см. рисунок 9), подключенного в одной серии экспериментов к ПАК РВ *RTDS*, а в другой – к ЦАФК АО «НТЦ ЕЭС».

Результаты проведенных экспериментов показали, что параметры настройки, выбранные методом многопараметрической оптимизации, обеспечивают наилучшее демпфирование колебаний в выбранном для оптимизации диапазоне частот 0.1-2 Гц, однако вызывают колебания реактивной мощности и напряжения большой амплитуды с частотой порядка 0.04 Гц. Выбранные «классическим» методом параметры настройки только в одном из характерных электрических режимов обеспечивают качество демпфирования колебаний сопоставимое с качеством, достигаемым при использовании параметров настройки, полученных по разработанной методике. Однако в других рассмотренных электрических режимах параметры настройки системных стабилизаторов, выбранные «классическим» способом, приводят к ухудшению качества демпфирования колебаний и появлению слабовыраженных колебаний на частоте порядка 0.7 Гц, то есть, оказываются не инвариантными к изменению схемно-режимной ситуации. Параметры настройки системного стабилизатора типа *PSS2B*, выбранные по разработанной методике в условиях тестовой схемы обеспечивают высокое качество стабилизации колебаний во всех рассмотренных схемно-режимных ситуациях.

Разработанная методика применена на практике при выборе рабочих параметров настройки АРВ СД типа *THYRIPOL* генераторов газовых турбин ПГУ-1 и ПГУ-2 Северо-Западной ТЭЦ, и, начиная с 2016 года, обеспечивает устойчивую параллельную работу электростанции с энергосистемой. В 2019 году параметры настроек, выбранные автором по разработанной методике, установлены в качестве рабочих параметров настройки АРВ СД типа *THYRIPOL* ПГУ 1-3 Няганской ГРЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе:

1. Разработана методика выбора рабочих параметров настройки работающих на основе расчета интеграла ускоряющей мощности системных стабилизаторов микропроцессорных АРВ СД для генераторов, работающих в энергообъединении сложной структуры. Методика может быть использована для выбора параметров настройки одноканальных системных стабилизаторов (*PSS1A*) и системных стабилизаторов на основе расчета интеграла ускоряющей мощности (*PSS2A*, *PSS2B*, *PSS2C*).

2. Разработанные алгоритмы и методики программно реализованы в системе автоматизированного проектирования *Mathcad* с использованием встроенного в него языка программирования.

3. Разработанная автором методика применена при выборе рабочих параметров настройки АРВ СД типа *THYRIPOL*, имеющих в своем составе системный стабилизатор типа *PSS2B*, генераторов Северо-Западной ТЭЦ и Няганской ГРЭС. Эффективность методики подтверждена опытом эксплуатации АРВ СД Северо-Западной ТЭЦ (по данным системы мониторинга системных регуляторов).

4. Формализован и представлен в виде четко изложенных требований уже имеющийся подход к подготовке перечня схемно-режимных условий работы рассматриваемого генератора в цифровой модели энергосистемы при выборе параметров настройки его АРВ СД. Данный подход актуализирован с учетом современного этапа развития микропроцессорных АРВ СД. В результате выполнения данных требований формируется перечень наиболее тяжелых схемно-режимных условий работы рассматриваемого генератора с позиции анализа колебательной устойчивости, что обеспечивает выбор эффективных параметров настройки АРВ СД генераторов, работающих в энергообъединении сложной структуры.

5. Разработана методика создания достоверных математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД, которые могут использоваться для выбора их параметров настройки. Методика основана на получении экспериментальных частотных характеристик промышленного образца микропроцессорного АРВ СД в ходе его испытаний по специальной программе и проверке и корректировке исходной математической модели АРВ СД по экспериментальным частотным характеристикам.

6. Разработан алгоритм аппроксимации частотной характеристики передаточной функцией в операторном виде методом наименьших квадратов и алгоритм аппроксимации на основе теоремы Паде, который позволяет получить аппроксимацию дискретных фильтров в дробно-рациональном операторном виде с учетом зависимости динамических характеристик аппроксимирующей функции от параметров дискретного фильтра. Данные методики аппроксимации позволяют создавать достоверные цифровые модели промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД в программно-вычислительных комплексах для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Гуриков О. В., Зеленин А. С., Штефка Й. Методика построения математических моделей микропроцессорных АРВ // Известия НТЦ Единой Энергетической Системы. – 2016. – № 75. – С. 45-58. (0.438/0.875 п.л.)
2. Гуриков О. В., Штефка Й. Алгоритм аппроксимации амплитудно-фазовой частотной характеристики дробно-рациональной функцией методом наименьших квадратов и его программная реализация // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2015. – № 2 (74). – С. 83-88. (0.22/0.375 п.л.)
3. Гуриков О. В., Зеленин А. С., Кабанов Д. А. Разработка методики настройки системных стабилизаторов зарубежного типа с использованием частотных методов анализа // Электрические станции. – 2015. – №12. – С. 9-17. (0.563/1.125 п.л.)

Публикации в других изданиях:

4. Гуриков О. В., Зеленин А. С., Кабанов Д. А. Влияние точности цифровой модели автоматического регулятора возбуждения на результаты оптимизации его настроечных параметров // Сборник статей VII Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» Т.2 – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т. – 2016. – С. 178-181. (0.25/0.5 п.л.)
5. Выборных И. Г., Гуриков О. В. Алгоритм аппроксимации частотных характеристик методом наименьших квадратов // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2014. – № 2 (71). – С. 35-42. (0.4/0.5 п.л.)
6. Гуриков О. В. Применение аппроксимации Паде для представления цифровых фильтров в виде рациональных дробей // Сборник статей V Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» Т.1 – Томск: Мин-во образования и науки РФ, Томский политехнический университет. – 2014. – С. 585-590. (0.75/0.75 п.л.)
7. Гуриков О. В., Штефка Й. Совершенствование программных средств оценки качества регулирования при оптимизации настроек автоматических регуляторов возбуждения сильного действия // Сборник статей III Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» Т.2 – Екатеринбург: УрФУ. – 2012. – С. 155-160. (0.6/0.75 п.л.)

Научное издание

Гуриков Олег Викторович

**Методика выбора параметров настройки системных стабилизаторов
микропроцессорных автоматических регуляторов возбуждения, работающих в
энергообъединениях сложной структуры**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать . Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 1.

Тираж 100 экз. Заказ № .

Отпечатано с оригинал-макета, предоставленного автором,
в типографии ,

, Россия, Санкт-Петербург,