Акционерное общество «Научно-технический центр Единой энергетической системы» (АО «НТЦ ЕЭС»)

На правах рукописи

ГУРИКОВ ОЛЕГ ВИКТОРОВИЧ

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

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и

электроэнергетические системы

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Аркадий Хаимович Есипович

Санкт-Петербург – 2020

оглавление

Введение	5
1 Постановка задачи и методика исследования колебательной устойчивости энергосистем	ı 15
1.1 Постановка задач работы	15
1.1.1 Проблема разработки методики выбора параметров настройки АРВ СД в целом	17
1.1.2 Проблема создания достоверной цифровой модели энергообъединения	20
1.1.3 Проблема создания достоверной цифровой модели АРВ СД	22
1.1.4 Проблема оптимизации	23
1.1.5 Задачи диссертационного исследования	25
1.2 Общее описание принципа работы АРВ СД	26
1.2.1 Особенности математических моделей АРВ СД «отечественной структуры»	28
1.2.2 Особенности математических моделей АРВ СД с системными стабилизаторами,	
работающими на основе расчета интеграла ускоряющей мощности	29
1.3 Обзор показателей качества переходного процесса	32
1.3.1 Прямые методы оценки качества	33
1.3.2 Интегральные методы оценки качества	36
1.3.3 Корневые методы оценки качества	39
1.3.4 Частотные методы оценки качества	42
1.3.4.1 Оценка запасов устойчивости САР по ее частотным характеристикам	42
1.3.4.2 Построение областей устойчивости в плоскости параметров САР (<i>D</i> -разбиение)	' 44
1.3.4.3 Частотный метод оценки качества регулирования	45
1.3.5 Выводы	47
1.4 Принятая методика анализа колебательной устойчивости энергосистем	48
1.5 Выводы	59
2 Методика создания математических моделей АРВ СД, предназначенных для выбора их параметров настройки	60
2.1 Особенности работы микропроцессорных АРВ СД	60
2.2 Методика создания математических моделей микропроцессорных АРВ СД	64
2.2.1 Область применения	64
2.2.2 Общие замечания	65
2.2.3 Создание математической модели АРВ СД на основе документации	67
2.2.4 Дальнейшие действия для варианта 1	70
2.2.5 Дальнейшие действия для варианта 2	70
2.2.6 Дальнейшие действия для варианта 3	72
2.3 Результат создания модели тестового образца АРВ СД по разработанной методике	74
2.4 Выводы	81

3 Вопросы аппроксимации функций комплексного аргумента	83
3.1 Оценка погрешности функций комплексного аргумента и требования к точности	
аппроксимаций	83
3.2 Аппроксимация методом наименьших квадратов	86
3.2.1 Постановка задачи	86
3.2.2 Алгоритм аппроксимации методом наименьших квадратов	87
3.2.3 Способ выбора коэффициентов аппроксимации	93
3.2.4 Применение алгоритма аппроксимации методом наименьших квадратов на тестовых данных	95
3.2.5 Выводы	101
3.3 Аппроксимация на основе теоремы Паде	102
3.3.1 Постановка задачи	102
3.3.2 Алгоритм аппроксимации на основе теоремы Паде	104
3.3.3 Получение аппроксимаций Паде для динамических звеньев, использующихся в микропроцессорных АРВ СД	106
3.3.4 Рекомендации по применению аппроксимаций Паде на основе оценки их	108
3 3 5 BUDOUL	112
5.5.5 Быбоды	112
4 Методика выбора параметров настройки микропроцессорного АРВ СД генератора	ι,
работающего в энергообъединении сложной структуры	114
4.1 Область применения	114
4.2 Подготовка цифровой модели энергосистемы для выбора параметров настройки APB СД	116
4.2.1 Виды колебаний и факторы, влияющие на степень их демпфирования	116
4.2.1.1 Колебания на собственной частоте электромеханических колебаний ротора	a
генератора	116
4.2.1.2 Станционные колебания	117
4.2.1.3 Внутригрупповые колебания	117
4.2.1.4 Низкочастотные межсистемные колебания	117
4.2.1.5 Высокочастотные колебания	118
4.2.1.6 Выводы	119
4.2.2 Требования к цифровой модели энергосистемы	119
4.2.3 Требования к цифровым моделям АРВ СД	121
4.2.4 Требования к перечню рассматриваемых режимов работы энергосистемы	122
4.2.4.1 Перечень базовых электрических режимов	122
4.2.4.2 Подготовка базовых электрических режимов и порядок загрузки контролируемых сечений по мощности	и 123
4.2.4.3 Подготовка характерных электрических режимов на основе базовых электрических режимов	x 127
4.2.5 Выводы	129
4.3 Условия проведения экспериментов в тестовой модели энергосистемы	129
4.4 Выбор параметров настройки по «классической» методике	132
4.5 Выбор параметров настройки методом многопараметрической оптимизации	137
4.6 Разработанная методика выбора параметров настройки АРВ СД	138

4.7 Результаты проверки параметров настройки системного стабилизатора типа <i>PSS2B</i> ,	144
4.8 Выводы	144
Заключение	155
Список сокращений и условных обозначений	157
Термины и определения	159
Список литературы	163
Приложение А (информационное) Результаты внедрения	171
Приложение В (обязательное) Блок-схемы разработанных методик	175

введение

Синхронная зона единой электроэнергетической системы¹ (ЕЭС), включающая ЕЭС России, представляет собой энергообъединение сложной структуры протяженностью порядка 6500 км. В ее состав входят национальные и региональные энергосистемы, объединенные межсистемными связями, пропускная способность которых мала по сравнению с установленной мощностью этих энергосистем (слабые связи). Перечисленные особенности синхронной зоны ЕЭС придают ей уникальные физические свойства, состоящие в том, что относительные углы между векторами напряжений наиболее удаленных друг от друга подстанций синхронной зоны ЕЭС могут в нормальных режимах составлять более 200 электрических градусов, а загрузка большинства межсистемных и части внутрисистемных связей близка к предельной по условиям статической апериодической устойчивости. Это обусловливает наличие в синхронной зоне ЕЭС значительного количества слабо демпфируемых низкочастотных составляющих переходного процесса (низкочастотные межсистемные колебания) [1-3], а также существенное изменение их параметров при ремонтах сетевых элементов схем выдачи мощности электростанций и межсистемных связей или изменении режима работы самой энергосистемы [4-6].

Наиболее эффективным средством демпфирования низкочастотных межсистемных колебаний являются автоматические регуляторы возбуждения сильного действия синхронных генераторов (далее – АРВ СД), имеющие в своем составе каналы стабилизации, а также соответствующий выбор их параметров настройки. 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) [7]. Стандарт устанавливает порядок сертификации АРВ СД, включающий проведение сертификационных испытаний в тестовой схеме, характеристики которой отображают схемно-режимные особенности энергообъединения сложной структуры и основные обеспечивают получение объективной оценки эффективности применения конкретного АРВ СД в ЕЭС России. Стандарт устанавливает порядок сертификации АРВ СД, включающий проведение сертификационных испытаний в тестовой схеме, и определяет довольно жесткие

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

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 Советском Союзе, а позднее в России, большое внимание уделялось разработке методов анализа колебательной устойчивости и выбора параметров настройки каналов стабилизации АРВ СД. Этим вопросам посвящено большое количество работ, среди которых следует отметить работы В. В. Бушуева, А. Х. Есиповича, И. А. Груздева, А. С. Зеккеля, В. А. Кожевникова, Н. Н. Лизалека, И. В. Литкенс, В. А. Масленникова, В. Г. Любарского, И. Ф. Перельмана, Н. Д. Поляхова, В. И. Пуго, А. А. Рагозина, В. А. Строева, А. А. Юрганова. Так в АО «НТЦ ЕЭС» была разработана методика выбора параметров настройки каналов стабилизации АРВ СД с использованием цифровых моделей энергосистемы и программные средства, реализующие эту методику [4, 5, 8-10]. Эффективность данной методики подтверждена успешным опытом эксплуатации АРВ СД с выбранными расчетным путем параметров тепловых и гидравлических электростанций синхронной зоны ЕЭС. 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 [11]. В их составе применяются современные микропроцессорные АРВ СД с системными стабилизаторами, подавляющее большинство которых работают на основе расчета интеграла ускоряющей мощности (*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.

Вопросам анализа колебательной устойчивости и разработке методик выбора параметров настройки системных стабилизаторов АРВ СД зарубежного производства посвящено большое количество работ, среди которых следует отметить работы *G. R. Bérubé*, *M. J. Gibbard, L. M. Hajagos, D. N. Kosterev, R. Kutzner, P. Kundur, A. R. Messina, A. Murdoch, G. J. Rogers, D. J. Vowels.* Выбор параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B*, как правило, осуществляется на основе методик, приведенных в нормативной документации и инструкциях [12-15]. Эти методики широко используются при выборе параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B* в зарубежных энергосистемах, которые значительно отличаются от ЕЭС России по своим физическим свойствам. Последнее является причиной существенных различий в подходах к методам выбора параметров настройки системных

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 энергообъединения сложной структуры. Опыт сертификационных испытаний микропроцессорных АРВ СД зарубежного производства на соответствие требованиям Стандарта свидетельствует о том, что выбранные с использованием применяемых методик параметры настройки в ходе испытаний корректируются разработчиками, так как не позволяют обеспечить эффективное демпфирование параметров электрического режима [11, 16]. Корректировка выбранных параметров настройки системных стабилизаторов зарубежного производства, как правило, производится и при проверке параметров настройки АРВ СД цифро-аналого-физическом конкретных энергообъектов на комплексе моделирования электромеханических переходных процессов в энергосистеме (ЦАФК). А на ряде энергообъектов, для которых проверка и корректировка параметров настройки Стандартом не предусматривается, установленные параметры настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B* приводят либо к возникновению слабозатухающих колебаний, как, например, при пусконаладочных работах на Северо-Западной ТЭЦ, либо – к нарушению устойчивости параллельной работы при технологических нарушениях, как, например, на Няганской ГРЭС, все три энергоблока которой суммарной установленной мощностью 2400 МВт были отключены технологическими защитами из-за возникновения синхронных колебаний увеличивающейся амплитуды [17, 18].

Таким образом, отсутствие эффективной методики выбора параметров настройки APB 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 многообразии сложной В широком схемно-режимных условий структуры ee Предметом стабилизаторы, функционирования. исследования являются системные 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:

7

- выполнить анализ существующих показателей качества систем автоматического регулирования и определить наиболее эффективный показатель для выбора параметров настройки АРВ СД генераторов, работающих в условиях энергообъединения сложной структуры;
- разработать методику создания достоверных математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД;
- сформулировать требования к выбору схемно-режимных условий энергосистемы, использующихся 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;
- реализовать в программном виде разработанные методики создания достоверных математических моделей АРВ СД выбора параметров настройки работающих на основе расчета интеграла ускоряющей мощности системных стабилизаторов микропроцессорных АРВ СД;
- 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 ЦАФК и цифровом программно-аппаратном комплексе моделирования энергосистем в режиме реального времени (ПАК РВ) «*Real Time Digital Power System Simulator*» производства *RTDS Technologies Inc. (RTDS*).

Научная новизна работы:

- 1. Разработана методика выбора параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B*, эффективная в условиях энергообъединения сложной структуры (ЕЭС России).
- 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.

 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.
- 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.
- Получены аппроксимации Паде для большинства дискретных динамических звеньев, использующихся в алгоритмах регулирования микропроцессорных АРВ СД.

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* APB СД типа *THYRIPOL* генераторов Северо-Западной ТЭЦ и Няганской ГРЭС.
- Сформулированы требования к подготовке перечня схемно-режимных условий работы энергосистемы, рассмотрение которых необходимо при выборе параметров настройки АРВ СД с использованием цифровой модели энергосистемы.
- Разработана методика создания достоверных математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД, которые могут использоваться для выбора их параметров настройки.
- 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 [19, 20]).

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:

- 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.
- 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 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, реализация и внедрение результатов исследования.

Полученные в работе результаты обсуждались на:

- III Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2012», доклад отмечен диплом 1 степени (Российская Федерация, г. Екатеринбург, 2012);
- V Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2014», доклад отмечен диплом 1 степени (Российская Федерация, г. Томск, 2014);
- VII Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2016» (Российская Федерация, г. Казань, 2016).

Аспекты предложенной методики анализа колебательной устойчивости использованы в работе [21] (см. Приложение А), в которой выполнена оценка возможности совместного управления возбуждением генераторов и мощностью турбин ГТУ Северо-Западной ТЭЦ, а так

же выполнены теоретические исследования по синтезу закона управления возбуждением генераторов с использованием данных от устройств системы мониторинга переходных режимов (СМПР), установленных на удаленных подстанциях энергосистемы. Исследования показали, что в условиях работы Северо-Западной ТЭЦ как реализация совместного управления возбуждением генераторов и мощностью турбин ГТУ Северо-Западной ТЭЦ, так и использование данных от устройств СМПР в законах управления возбуждением генераторов – не целесообразны.

С использованием методики создания достоверных математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД реализуются все цифровые модели АРВ СД в ПВК *Eurostag* и ПВК *RUStab* начиная с 2017 года, проходящие сертификационные испытания в АО «НТЦ ЕЭС» на соответствие требованиям Стандарта [7], а именно АРВ типа: *AVR*-45M, APB-PЭM700, *THYRIPOL*, *Unitrol* 6800, *EX*2100, Oвация APB-1100, *THYNE*1, *THYRIPOL* 6*RV*80. Данные цифровые модели APB СД:

- используются в АО «СО ЕЭС» и АО «НТЦ ЕЭС» при расчетах электромеханических переходных процессов;
- используются в АО «НТЦ ЕЭС» для выбора параметров настройки АРВ СД;
- включены в библиотеку стандартных моделей ПВК *RUStab*.

Формализованные требования к подготовке перечня схемно-режимных условий работы энергосистемы в цифровой модели энергосистемы и обзор показателей качества систем автоматического регулирования использованы в работе «Разработка методических указаний по проверке параметров настройки APB сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы в формате ПВК *Eurostag*» для AO «CO EЭC» [22, 23]. Материалы одной из данных работ [22] использованы в стандарте AO «CO EЭC» «Методические указания по осуществлению диспетчерскими центрами AO «CO EЭC» оценки параметров настройки автоматических регуляторов возбуждения сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы» [24] (см. Приложение A).

Методика выбора параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B* использована для выбора параметров настройки APB CД типа *THYRIPOL* генераторов Г-1, Г-2, Г-5, Г-6 Северо-Западной ТЭЦ и APB CД типа *THYRIPOL* генераторов ПГУ 1,2,3 Няганской ГРЭС [25, 26] (см. приложение А). Эффективность методики выбора параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B* подтверждена на тестовой схеме ЦАФК АО «НТЦ ЕЭС» [7, 27] и данными системы мониторинга системных регуляторов (СМСР) Северо-Западной ТЭЦ (см. приложение А).

Результаты диссертационных исследований в отчетах по НИР:

- 1. Разработка технологии и системы управления, обеспечивающих устойчивую работу генераторов на электростанциях, присоединенных к электроэнергетической (ЭЭС) системе и оборудованных парогазовыми (ПГУ) и газотурбинными (ГТУ) установками. Результаты исследований систем регулирования частоты и напряжения энергоблоков Разработка ПГУ электростанциях ИНТЕР EЭC. (ГТУ) на группы PAO организационных и технических мероприятий по повышению надежности систем регулирования частоты и напряжения энергоблоков ПГУ (ГТУ) / А.Н. Смирнов, А.С. Герасимов, Т.А. Гущина, О.В. Гуриков, С.Р. Богданова, В.В. Дегтярев, Н.А. Мичурин, А.Н. Кушнир // – СПб: ОАО «НТЦ ЕЭС», 2013. – 208 с.
- 2. Разработка методических указаний по проверке параметров настройки APB сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы в формате ПК EUROSTAG. Методические указания проверки параметров настройки APB сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы, включающие описание практического применения методики проверки параметров настройки APB сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы, включающие описание практического применения методики проверки параметров настройки APB сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы на примере действующего энергообъекта в ЕЭС России / А.Н. Смирнов, О.В. Гуриков, Е.С. Суворов // СПб: АО «НТЦ ЕЭС», 2016. 52 с.
- 3. Разработка методических указаний по проверке параметров настройки АРВ сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы в формате ПК EUROSTAG. Обзор существующих методов настройки АРВ сильного действия синхронных генераторов. Критерии оценки эффективности параметров настройки АРВ сильного действия синхронных генераторов / А.Н. Смирнов, О.В. Гуриков, Е.С. Суворов // – СПб: АО «НТЦ ЕЭС», 2017. – 40 с.
- 4. Выбор параметров настройки АРВ НГРЭС расчетным путем на модели энергосистемы и проверка их правильности в соответствии с требованиями Стандарта организации АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.160.20.001-2012 «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов» на математической модели. Выбор параметров настройки регуляторов возбуждения сильного действия системы возбуждения ТНҮКІРОL ПГУ 1,2,3 Няганской ГРЭС / Д.А. Кабанов, А.Н. Смирнов, О.В. Гуриков, К.В. Прохоров // СПб: АО «НТЦ ЕЭС», 2018. 40 с.
- Выбор параметров настройки АРВ НГРЭС расчетным путем на модели энергосистемы и проверка их правильности в соответствии с требованиями Стандарта организации АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.160.20.001-2012 «Требования к системам

возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов» на математической модели. Математическая модель энергосистемы. Результаты проверки параметров настройки регуляторов возбуждения THYRIPOL генераторов ПГУ 1,2,3 Няганской ГРЭС в схеме ОЭС Урала на ПАК РВ АО «НТЦ ЕЭС» / Д.А. Кабанов, А.Х. Есипович, О.В. Гуриков, А.С. Зеленин, Д.А. Елисеев, А.Ю. Сульчакова // – СПб: АО «НТЦ ЕЭС», 2018. – 356 с.

Результаты диссертационных исследований в нормативной документации:

Методические указания по осуществлению диспетчерскими центрами АО «СО ЕЭС» оценки параметров настройки автоматических регуляторов возбуждения сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы. Приложение 1 к распоряжению АО «СО ЕЭС» от 19.08.2019 № 94р. Введены в действие с 19.08.2019 // – М.: АО «СО ЕЭС», 2019. – 29 с.

Публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

- 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.)
- 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.)
- 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:

- 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.)
- 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.)
- Гуриков О. В. Применение аппроксимации Паде для представления цифровых фильтров в виде рациональных дробей // Сборник статей V Международной научнотехнической 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.)

 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.)

Личный вклад автора. Положения, выносимые на защиту, и все основные результаты диссертационной работы получены автором лично. Проведение опытов с промышленными образцами АРВ СД на ЦАФК и ПАК РВ *RTDS* выполнено в коллективе с А. С. Зелениным и Д. А. Кабановым, а иллюстративный материал по результатам проведенных опытов подготовлен А. С. Зелениным (подразделы 2.3 и 4.7). Автор выражает благодарность А. С. Герасимову, А. Х. Есиповичу, А. С. Зеленину, Д. А. Кабанову, А. Н. Смирнову, С. В. Смоловику, Й. Штефке за рецензирование, критику, ценные замечания и помощь в редактировании текста различных разделов диссертации и автореферата на диссертацию.

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.

1 Постановка задачи и методика исследования колебательной устойчивости энергосистем

1.1 Постановка задач работы

Как уже было обозначено, целью диссертационной работы является разработка расчетной методики выбора параметров настройки микропроцессорных АРВ СД, обеспечивающих колебательную устойчивость в широком многообразии схемно-режимных условий работы энергообъединения сложной структуры. На этапе постановки задач диссертационного работы необходимо проанализировать свойства как системы регулирования, так и объекта регулирования. В условиях поставленной цели диссертационной работы системой регулирования является современный микропроцессорный АРВ СД, а объектом регулирования – синхронный генератор при его параллельной работе в энергообъединении сложной структуры.

Существует два принципиальных подхода к выбору параметров настройки АРВ СД. Первым из них является экспериментальный подход с проведением опытов на реальном оборудовании в реальных условиях эксплуатации промышленного образца АРВ СД (системных экспериментов) на конкретном генераторе электростанции. Вторым из них является расчетный подход с использованием математических моделей объекта и системы регулирования, в том числе реализованных в каком-либо компьютерном программно-вычислительном комплексе. Большинство современных методик выбора параметров настройки АРВ СД, доказавших свою эффективность, в той или иной степени используют оба обозначенных подхода.

Очевидно, что преимуществом подхода с проведением опытов на реальном оборудовании является отсутствие какой-либо погрешности в учете системы и объекта регулирования. Но в этом же кроется и принципиальный недостаток, возникающий ввиду нестационарности объекта управления. Статические и колебательные свойства синхронного генератора, работающего параллельно с энергообъединением, в части регулирования напряжения статора и стабилизации синхронных колебаний зависят как от режима работы синхронного генератора, так и от режима работы энергообъединения. Причем статические и колебательные свойства энергообъединения сложной структуры могут существенно различаться в различных режимах его работы. Существенность различия режимов работы заключается в том, что оптимальные по какому-либо критерию параметры настройки для одного режима работы могут приводить к нарушению устойчивости в других режимах работы энергообъединения сложной структуры. При проведении же системных экспериментов отсутствует возможность учесть широкий диапазон возможных режимов работы энергообъединения сложной структуры. По этой причине данный подход не является подходящим для достижения поставленной цели диссертационной работы.

Современные АРВ СД выполняются на современной микропроцессорной базе, что обеспечивает крайне высокую степень совпадения поведения различных образцов АРВ СД одного типа с одной версией программного обеспечения с одними параметрами настроек основного алгоритма функционирования. То есть, если известны статические и динамические характеристики, а также их зависимость от параметров настроек, для одного образца микропроцессорного АРВ СД, то они будут достоверно отражать характеристики других образцов микропроцессорных АРВ СД того же типа и с той же версией программного обеспечения. Это позволяет выполнить эксперименты с единственным экземпляром микропроцессорного АРВ СД для выявления его свойств и создания его математической модели и использовать данную математическую модель для представления всех образцов микропроцессорных АРВ СД того же типа и с той же версией программного обеспечения. Это позволяет использовать единую математическую модель для представления всех образцов микропроцессорных АРВ СД одинакового типа и с одинаковой версией программного обеспечения. Получение такой математической модели возможно путем проведения экспериментов с единственным экземпляром микропроцессорного АРВ СД из данной серии.

Для АРВ СД, основные алгоритмы которых реализуются на аналоговой технике или с использованием магнитных усилителей, ввиду естественных свойств базовых элементов, реализующих алгоритм регулирования, будет наблюдаться разница в статических и динамических свойствах среди различных экземпляров таких АРВ СД с одинаково заданными параметрами настроек. Представляется, что величина данной разницы в динамических и статических свойствах таких АРВ СД с одинаково заданными параметрами настроек. Представляется, что величина данной разницы в динамических и статических свойствах таких АРВ СД с одинаково заданными параметрами настроек, с учетом изменения свойств таких АРВ СД в процессе эксплуатации, не позволила бы создать единую математическую модель для всех экземпляров с точностью, заданной Стандартом [7].

Использование расчетного подхода с использованием математических моделей объекта и системы регулирования позволяет учесть изменение статических и колебательных свойств генератора, работающего параллельно с энергообъединением сложной структуры, при изменении режимов работы энергообъединения. С учетом объема анализируемой информации расчетный подход должен быть реализован в компьютерных программно-вычислительных комплексах с характеристиками цифровых моделей объекта и системы регулирования, достоверно отражающих характеристики объекта и системы регулирования. Таким образом, в данном случае необходимо иметь достоверные для поставленной цели цифровые модели объекта и системы регулирования, а также задать порядок операций с данными моделями.

16

Для достижения поставленной цели диссертационной работы является целесообразным применить комбинированный подход, заключающийся в:

- проведении натурных экспериментов с промышленным образцом микропроцессорного APB СД с целью создания его достоверной цифровой модели и проверки эффективности выбранных параметров настройки;
- проведении расчетных экспериментов для выбора параметров настройки АРВ СД с использованием цифровой модели объекта регулирования и цифровой модели системы регулирования, созданной на основе экспериментальных данных.

С учетом выбранного подхода необходимо обозначить факторы, влияющие на результат выбора параметров настройки АРВ СД:

- достоверность используемой цифровой модели энергообъединения сложной структуры с учетом различного вида неопределенностей;
- достоверность используемой цифровой модели АРВ СД;
- вид целевой функции, использующейся при оптимизации;
- режимный параметр, входящий в целевую функцию;
- метод поиска оптимума целевой функции;

Далее более подробно рассмотрим проблему разработки методики выбора параметров настройки APB CД в целом и проблему каждого из обозначенных факторов, влияющих на результат выбора параметров настройки APB CД, с учетом уже существующего опыта и существующих методик выбора параметров настройки APB CД.

1.1.1 Проблема разработки методики выбора параметров настройки АРВ СД в целом

В Советском Союзе, а позднее в России, большое внимание уделялось разработке методов анализа колебательной устойчивости, совершенствованию структуры АРВ СД и выбору параметров настройки его каналов стабилизации. Этим вопросам посвящено большое количество работ множества коллектива авторов. Так, АО «НТЦ ЕЭС» имеет большой опыт анализа колебательной устойчивости энергообъединений сложной структуры и в АО «НТЦ ЕЭС» была разработана методика выбора параметров настройки каналов стабилизации АРВ СД с использованием цифровых моделей энергосистемы и программные средства, реализующие эту методику [4, 5, 8-10, 28]. Эффективность данной методики подтверждена успешным опытом эксплуатации АРВ СД с выбранными расчетным путем параметрами настройки на большинстве генераторов атомных электростанций и крупных генераторов тепловых и гидравлических

электростанций синхронной зоны ЕЭС. 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 [11]. В их составе применяются современные микропроцессорные АРВ СД с системными стабилизаторами, подавляющее большинство которых работают на основе расчета интеграла ускоряющей мощности и имеют тип *PSS2B*. Количество генераторов, на которых установлены такие системные стабилизаторы, на начало 2019 года составляет порядка 180 единиц.

Ввод в работу АРВ СД зарубежного производства, включающих в себя системный стабилизатор типа *PSS2B*, требует выбора их параметров настройки. В процессе развития энергосистемы (например, при строительстве электростанций и линий электропередачи) динамические свойства энергосистемы могут измениться. Проверка ранее выбранных параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B* с учетом изменившихся динамических свойств энергосистемы может выявить необходимость повторного выбора параметров настройки. Повторный выбор параметров настройки также требуется и при выявлении некорректной работы АРВ СД зарубежного производства в процессе эксплуатации.

На данный момент в отечественной практике отсутствует устоявшийся и зарекомендовавший себя практический опыт выбора параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B* в составе APB CД зарубежного производства, хотя в данном направлении наблюдается развитие в ряде исследовательских коллективов [18, 29, 30]. Отсутствие в отечественной практике зарекомендовавшей себя методики требует привлечения производителя промышленных образцов микропроцессорных APB CД для выбора параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B* в их составе.

Выбор параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B* в составе APB CД зарубежного производства, как правило, осуществляется их производителями на основе методик, приведенных в нормативной документации и инструкциях [12-15]. Эти методики широко используются при выборе параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B* в зарубежных энергосистемах. Однако производители зарубежного оборудования не имеют опыта работы в условиях ЕЭС России, а их методики выбора параметров не обеспечивают эффективное демпфирование колебаний параметров электрического режима в широком многообразии схемно-режимных условий работы энергообъединения сложной структуры.

18

Причину, по которой методики выбора параметров, используемых производителями зарубежных АРВ СД, не могут гарантировать устойчивую работу в широком многообразии схемно-режимных условий работы генераторов электростанций в составе ЕЭС России кратко можно объяснить следующим. Во введении отмечены особенные свойства синхронной зоны ЕЭС, заключающиеся в значительном количестве слабо демпфируемых низкочастотных составляющих переходного процесса (низкочастотные межсистемные колебания) [1-3], а также существенном изменении их параметров при ремонтах сетевых элементов схем выдачи мощности электростанций и межсистемных связей или изменении режима работы самой энергосистемы [4-6]. Данные свойства в той или иной степени присущи всем крупным энергообъединениям. Однако, например, по результатам мониторинга в условиях работы энергообъединения европейских стран (UCTE) достаточная для надежной регистрации программными комплексами амплитуда системных колебаний появляется только при их возбуждении каким-либо серьезным возмущением в энергосистеме, при этом низшая частота среди зарегистрированных таким образом низкочастотных межсистемных колебаний составляет порядка 0.2 Гц [31]. Тогда как по результатам мониторинга в условиях работы ЕЭС России даже нерегулярные колебания мощности в нормальных эксплуатационных режимах возбуждают низкочастотные межсистемные колебания достаточной амплитуды для надежной регистрации программными комплексами. Частота зарегистрированных таким образом низкочастотных межсистемных колебаний в ЕЭС России находится в диапазоне частот 0.1-0.7 Гц (и почти в два раза большем их количестве), при этом низшая частота среди наблюдаемых низкочастотных межсистемных колебаний составляет порядка 0.12 Гц [32].

Наличие у синхронной зоны ЕЭС, и соответственно у ЕЭС России, ярко выраженных свойств энергообъединения сложной структуры требует повышенных требований к качеству работы АРВ СД и способности обеспечивать стабилизацию колебаний в широком многообразии схемно-режимных условий работы. Данные повышенные требования нашли отражение в существующих методиках выбора параметров настройки АРВ СД «отечественной структуры» и методик анализа колебательной устойчивости энергосистем [3-5, 8, 28, 33-35]. В зарубежной практике методики анализа колебательной устойчивости энергосистем с целью выбора параметров настройки АРВ СД отличаются от отечественных, и больше направлены на обеспечение демпфирования наилучшего качества колебаний в единственном эксплуатационном режиме или существенно ограниченном их количестве [12-15, 36-39]. Использование данных методик анализа колебательной устойчивости энергосистем характерно в условиях концентрированных энергосистем или имеющих неярко выраженные свойства энергообъединений сложной структуры, так как обеспечивает необходимую эффективность в задачах выбора параметров настройки АРВ СД.

Разница в свойствах ЕЭС России от других крупных энергообъединений отражается и в разнице свойств тестовых схем и программ испытаний для проверки АРВ в ЕЭС России [7] и систем режимного регулирования в энергообъединениях других стран [40]. Также следует отметить, что отличаются и требования к подробности представления математических моделей АРВ СД – в зарубежной практике принято создавать модели с достоверностью воспроизведения процессов с частотой до 3-5 Гц без четких критериев оценки корректности модели [41, 42]. В Стандарте [7] же приняты более жесткие требования к достоверности представления математических моделей АРВ СД. При этом в [7] сформулированы конкретные требования по методу расчета погрешности ЧХ каналов регулирования математической модели АРВ СД, которые устанавливают высокие требования по точности в диапазоне частот до 10 Гц. Это позволяет создавать достоверные математические модели промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД для анализа колебательной устойчивости и выбора их параметров настройки, но требует учета особенностей работы современной микропроцессорной техники [43].

Следует отдельно отметить, что проблема эффективности самих системных стабилизаторов в составе АРВ СД зарубежного производства уже является достаточно исследованной и не нуждается в дополнительном изучении в рамках диссертационной работы. Так, опыт показывает, что системные стабилизаторы типа PSS1A, PSS2A и PSS3B вне зависимости от применяемой методики не позволяют обеспечить эффективную стабилизацию режимных параметров в условиях энергообъединения сложной структуры и не рекомендованы к использованию в ЕЭС России. Системные стабилизаторы типа PSS2B и PSS4B принципиально могут обеспечить эффективную стабилизацию режимных параметров В условиях энергообъединения сложной структуры, для этого необходимо использовать эффективную методику выбора их параметров настройки [11, 16]. Всестороннего исследования возможности применения системных стабилизаторов других типов в условиях работы ЕЭС России не проводилось.

1.1.2 Проблема создания достоверной цифровой модели энергообъединения

Работа генератора, для АРВ СД которого выбираются параметры настройки, может сопровождаться различными видами колебаний по их физической природе и характеристикам [33, 44]. При этом характеристики колебательного процесса в энергообъединении сложной структуры существенно зависят от множества параметров и состояния элементов энергосистемы, которые могут варьироваться в широком диапазоне.

Величины нагрузок, состав включенного генерирующего оборудования и его загрузка по мощности, параметры сетевых элементов и их коммутационное состояние, а так же потокораспределение мощностей по элементам электрической сети, являются наиболее неопределенной частью цифровой модели энергосистемы и изменяются в процессе эксплуатации. Большинство параметров моделей элементов энергосистемы не определены экспериментально и являются паспортными, и ещё большая часть задается экспертно, так как они отсутствуют в паспортных данных оборудования. Так, например, динамические характеристики нагрузки в протяженном энергообъединении принципиально не могут быть достоверно учтены ввиду известных причин, а некоторые из важнейших параметров синхронных генераторов для анализа колебательной устойчивости энергосистем определяются расчетным путем приближенными методами на этапе проектирования (сверхпереходная постоянная времени по продольной оси, переходное и сверхпереходное сопротивление синхронной машины по продольной оси) либо вовсе отсутствуют в паспортных данных (сверхпереходная постоянная времени по поперечной оси, сверхпереходное сопротивление синхронной машины по поперечной оси). Также все элементы энергосистемы моделируются с рядом тех или иных упрощений и для одного элемента энергосистемы может существовать несколько различных по подробности математических моделей, применяемых для разных задач. Сказанное является факторами нестационарности и факторами неопределенности математической энергообъединения, модели как части системы автоматического регулирования.

Влияние указанных свойств энергообъединения на результат решения практических задач традиционно учитывается путем уточнения моделей и параметров элементов энергосистемы, наиболее важных для конкретной задачи, а также рассмотрением ряда предельных режимов работы энергосистемы по ограниченному набору параметров. Таким образом, создание достоверной цифровой модели энергообъединения для задачи выбора параметров настройки АРВ СД должно сопровождаться уточнением ряда моделей и параметров элементов энергосистемы и моделированием наиболее вероятных и наиболее тяжелых с точки зрения колебательной устойчивости схемно-режимных условий энергообъединения. При этом должны быть учтены свойства энергообъединений сложной структуры.

1.1.3 Проблема создания достоверной цифровой модели АРВ СД

В подавляющем большинстве существующих расчетных методов выбора параметров настройки APB CД уделяется недостаточно внимания точности соответствия цифровой модели APB CД его промышленному образцу, что, как показано в [43, 45, 46], может привести к некорректным результатам анализа колебательной устойчивости.

Анализ колебательной устойчивости и выбор параметров настройки APB СД выполняется с помощью специализированных методик [8] и ПВК, например, таких как ПВК *Eurostag* и ПВК *«WinOblast»* [9]. В связи со спецификой применяемых в электроэнергетике ПВК цифровая модель APB СД должна отвечать следующим требованиям задачи анализа колебательной устойчивости энергосистем:

- цифровая модель АРВ СД должна быть представлена в непрерывном операторном виде;
- все динамические звенья математической модели АРВ СД должны быть физически реализуемыми и обладать вычислительной устойчивостью;
- в математической модели АРВ СД должны быть учтены параметры настройки (коэффициенты и постоянные времени) с корректным учетом их влияния на динамические и статические характеристики каналов регулирования АРВ СД;
- математическая модель АРВ СД должна быть максимально простой, но при этом отвечать необходимым требованиям по точности.

В соответствии с требованиями Стандарта [7] производители предоставляют математические модели своих промышленных образцов АРВ СД, предназначенные для задач расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме. Опыт показывает, что в подавляющем большинстве случаев предоставляемые производителем математические модели значительно отличаются по динамическим характеристикам от промышленных образцов АРВ СД. Это происходит потому, что при разработке математических моделей АРВ СД производитель не учитывает в математической модели АРВ СД все реально существующие фильтры, допускает грубые аппроксимации дискретных фильтров и прочее. Такие математические модели не могут использоваться для выбора параметров настройки АРВ СД, так как их использование может привести к некорректным результатам анализа колебательной устойчивости [46].

Таким образом, необходима разработка методики создания достоверных математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД, предназначенных для анализа колебательной устойчивости энергосистем и выбора их параметров настройки.

Практически все новые устройства режимного регулирования, в том числе и АРВ СД, в результате совершенствования материально-технической базы выполняются производителями

на основе микропроцессорной техники. В таких устройствах измерители режимных параметров и алгоритмы регулирования реализуются в дискретном виде.

Реализация алгоритмов регулирования в дискретном виде имеет свои отличительные особенности. Входной аналоговый сигнал подвергается дискретизации по времени и квантованию по уровню. Результатом является последовательность отсчетов. Алгоритм управления описывается в разностных уравнениях и выполняется в режиме реального времени – при получении нового входного отсчета рассчитывает выходной отсчет до пришествия следующего входного.

Задуманные производителем алгоритмы регулирования АРВ СД представляются в виде структурной схемы в непрерывном операторном виде. При этом реализация алгоритмов регулирования в дискретном виде требует перехода от непрерывных операторных уравнений к разностным (процедура дискретизации), что вызывает искажение ЧХ непрерывных динамических звеньев [43, 45, 47]. Помимо этого в алгоритмах регулирования АРВ СД часто применяются дискретные фильтры в разностных уравнениях, которые в операторном виде представляются чрезвычайно громоздко, тогда как для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме необходимо иметь максимально простые и точные математические модели устройств регулирования в непрерывном операторном виде.

В связи со сказанным для создания достоверных математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД необходимо получить аппроксимации ЧХ каналов регулирования и отдельных дискретных фильтров в непрерывном операторном виде, пригодном для использования в ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме. Таким образом, возникает задача аппроксимации произвольной ЧХ дробно-рациональной функцией.

1.1.4 Проблема оптимизации

Существует множество методик выбора параметров настройки АРВ СД с использованием математических и цифровых моделей энергосистемы, и в каждой из методик используются определенные критерии качества, в том числе заключающиеся в предъявлении требований к численному значению ряда определенных показателей качества. В большинстве методик делается акцент на колебательные свойства объекта регулирования и, исходя из этого, используемый показатель качества будет давать количественную оценку качества стабилизации переходного процесса. При такой постановке задачи, процедура оптимизации параметров настройки АРВ СД сводится либо к минимизации (или максимизации) значения показателя

качества, либо к стремлению обеспечить значение показателя качества не менее (или не более) заданного значения при варьировании параметров настройки АРВ СД.

Таким образом, выбор самого показателя качества, используемого при оптимизации параметров настройки APB CД, является важной задачей, так как выбранный показатель качества (целевая функция), в существенной степени определяет результат оптимизации, что в свою очередь влияет на колебательную устойчивость энергосистемы.

Следует отметить, что в рассматриваемой задаче метод поиска оптимума является наименее значимым фактором, влияющим на результат. Это связано с рядом обстоятельств. Наиболее важным из обстоятельств является то, что традиционно используемые целевые функции являются непрерывными с относительно небольшими величинами частных производных по параметрам целевой функции. Это обуславливает слабое изменение значения целевой функции вблизи глобального оптимума, что проявляется в возможности обеспечить сравнимое качество переходных процессов при изменении параметров настройки АРВ СД в относительно широком диапазоне вблизи глобального оптимума, является то, что, как правило, в результате оптимизации один или более параметров оказываются на границе заданного допустимого диапазона изменения данных параметров. При этом сам допустимый диапазон изменения параметров задается экспертом. Таким образом, получается ситуация, в которой ряд параметров получается выбранным решением эксперта, несмотря на формальное проведение процедуры оптимизации в соответствии с заданной целевой функцией.

Вместе с тем на данный момент проблема поиска глобального оптимума многомерной функции с учетом ограничений, наложенных на значения параметров, уже является достаточно исследованной и нуждается лишь в адаптации для решения конкретной задачи.

По этим причинам в рамках диссертационной работы не поставлено задачи разработки новых методов поиска оптимума и примененные методы поиска оптимума подробно не рассматриваются.

1.1.5 Задачи диссертационного исследования

В соответствии с обозначенной проблематикой расчетная методика выбора параметров настройки микропроцессорных АРВ СД 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. И, таким образом, поставлены следующие задачи диссертационной работы:

- выполнить анализ существующих показателей качества систем автоматического регулирования и определить наиболее эффективный показатель для выбора параметров настройки АРВ СД генераторов, работающих в условиях энергообъединения сложной структуры;
- разработать методику создания достоверных математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД;
- сформулировать требования к выбору схемно-режимных условий энергосистемы, использующихся для анализа колебательной устойчивости;
- разработать расчетную методику выбора параметров настройки микропроцессорных АРВ СД, обеспечивающих колебательную устойчивость в широком многообразии схемно-режимных условий работы энергообъединения сложной структуры;
- реализовать в программном виде разработанные методики создания достоверных математических моделей АРВ СД и выбора параметров настройки микропроцессорных АРВ СД;
- выполнить проверку эффективности разработанных методик при решении практических задач.

Общая структурная схема системы автоматического регулирования (САР) возбуждения синхронных генераторов в соответствии с требованиями международной электротехнической комиссии приведена на рисунке 1.1 [48, 49]. Она состоит из:

- синхронной машины (генератора), работающего в энергосистеме;
- силового элемента (возбудителя с его системой регулирования);
- автоматического регулятора возбуждения (АРВ), включающего его систему регулирования, стабилизаторы и ограничители режима.



 V_{REF} – уставка по напряжению; V_{UEL} – ограничение минимального возбуждения (*underexcitation limiter*); V_{OEL} – ограничение максимального возбуждения (*overexcitation limiter*); V_C – выход преобразователя напряжения; V_R – выход регулятора напряжения; V_{SI} – выход стабилизатора внутреннего движения; V_{S2} – выход системного стабилизатора; E_{fd} и I_{fd} – напряжение и ток ротора соответственно; \bar{I}_T – комплексное значение тока статора; \bar{V}_T – комплексное значение напряжения статора; \bar{I}_{Σ} – комплексное значение суммарного тока статтора группы генераторов, работающих на общие шины

Рисунок 1.1 – Общая функциональная блок-схема САР возбуждения синхронного генератора

Современный АРВ СД в общем случае состоит из собственно системы регулирования (регулятора напряжения), стабилизатора внутреннего движения, стабилизатора внешнего движения (системного стабилизатора) и компенсатора нагрузки [33]. АРВ СД выполняет разнообразные системные, технологические и защитные функции. Системными функциями АРВ СД являются [7, 33, 49]:

 регулирование напряжения на шинах синхронного генератора или блока генератор-трансформатор по пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) или пропорционально-интегральному (ПИ) закону регулирования напряжения;

- обеспечение устойчивости регулирования во всех режимах работы синхронного генератора, включая холостой ход, работу с внешним фазовым углом, приближающимся к 90° (так называемая, зона искусственной устойчивости), и в режиме недовозбуждения при больших внутренних углах синхронного генератора;
- демпфирование колебаний роторов синхронных генераторов в нормальных, ремонтных и послеаварийных режимах работы энергосистемы, исключающее самораскачивание или возникновение незатухающих колебаний в энергосистеме;
- обеспечение высоких уровней динамической устойчивости путем форсирования возбуждения вплоть до предельного значения при коротких замыканиях и внезапных увеличениях нагрузки во внешней электрической сети.

Перечисленные выше блоки APB CД (см. рисунок 1.1) позволяют обеспечить реализацию всех системных функций. Кроме этих системных функций для исследования электромеханических переходных процессов представляет интерес и ряд защитных функций APB CД, так как их реализация приводит к изменению закона регулирования возбуждения [7, 33]:

- ограничение двукратного тока ротора;
- ограничение минимального возбуждения (OMB);
- блокировка системного стабилизатора при изменении частоты со скоростью 0.05 Гц/с и более с настраиваемой выдержкой времени на ввод и запретом работы блокировки при возникновении в энергосистеме колебаний параметров электрического режима;
- ограничение максимального напряжения ротора и тока возбуждения бесщеточного возбудителя при применении АРВ СД в составе бесщеточных систем возбуждения.

В АРВ СД в качестве режимных параметров контура стабилизации применяются [7]:

- частота напряжения статора синхронного генератора;
- первая производная (скорость изменения) тока ротора;
- частота вращения ротора;
- активная мощность генератора.

Таким образом, демпфирование колебаний роторов синхронных генераторов в широком многообразии схемно-режимных условий энергосистемы, исключающее самораскачивание или возникновение незатухающих колебаний в энергосистеме, является одной из основных системных функций АРВ СД. Способ и качество реализации в АРВ СД указанной функции может существенно влиять на показатели устойчивости и эксплуатационной надежности всей энергосистемы.

1.2.1 Особенности математических моделей АРВ СД «отечественной структуры»

В отечественной практике моделирования для задач расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме традиционно проводится разделение математической модели системы возбуждения на два отдельных элемента:

- математическая модель возбудителя;
- математическая модель АРВ, включающая:
 - о закон регулирования напряжения генератора;
 - о закон стабилизации электромеханических колебаний ротора генератора;
 - о все ограничители режимных параметров и блокировки;
 - о алгоритмы форсировки возбуждения;
 - о алгоритмы измерения режимных параметров и их первичной фильтрации.

На рисунке 1.2 приведена типовая структурная схема АРВ СД, распространенная среди отечественных производителей («отечественная структура»). Данная структурная схема отражает только законы регулирования напряжения генератора и стабилизации электромеханических колебаний ротора генератора, которые являются основными с позиции анализа колебательной устойчивости энергосистемы.

Как правило, реализуется ПИД-закон регулирования напряжения статора генератора, условно разделяемый на ПИ-регулятор и дифференциальный канал стабилизации по напряжению. Структура ПИ-регулятора может реализовываться различными способами в зависимости от конкретного производителя АРВ СД. Основной задачей ПИ-регулятора напряжения статора генератора является поддержание заданной уставки по напряжению статора генератора в установившихся режимах и медленных переходных процессах. Основной задачей дифференциального канала по напряжению статора генератора является стабилизация напряжения статора генератора в переходных процессах и вспомогательная – стабилизация электромеханических колебаний ротора генератора. Стабилизация электромеханических колебаний ротора генератора осуществляется за счет каналов по производной тока ротора генератора, отклонения и производной частоты напряжения статора генератора.



ΔU – отклонение напряжения статора генератора от уставки в относительных единицах, приведенных к номинальному напряжению статора генератора; I_f – ток ротора генератора в единицах возбуждения номинальных (е. в. н.); f – частота напряжения статора генератора в герцах; U_{APB} – выходное значение управляющего сигнала APB СД в е. в. н.; T_{1U}, T_{1If}, T_{1If}, T_{0f}, T_{0f}, T_{0f}, T_{0f}, T_{0f}, K_{0U}, K_{1U}, K_{0U}, K_{1U}, T_{0f}, K_{0f}, K_{1f} – коэффициенты усиления и постоянные времени каналов регулирования и стабилизации APB СД

Рисунок 1.2 – Типовая структурная схема математической модели АРВ СД отечественного производства

Следует отметить, что общепринятой задачей по выбору параметров настройки APB CД «отечественной структуры» является выбор коэффициентов усиления по всем каналам и постоянной времени интегрирования. При этом все постоянные времени фильтров в каналах регулирования и стабилизации считаются фиксированными и их выбор не производится. В редких случаях постоянные времени фильтров в каналах регулирования могут корректироваться для повышения эффективности фильтрации на частотах выше 3 Гц.

1.2.2 Особенности математических моделей АРВ СД с системными стабилизаторами, работающими на основе расчета интеграла ускоряющей мощности

В зарубежной практике моделирования для задач расчетов электромеханических переходных процессов в энергосистеме традиционно проводится разделение математической модели системы возбуждения на ряд отдельных элементов:

• математическая модель возбудителя, включающая:

- о систему регулирования;
- о преобразователь напряжения;
- математическая модель системного стабилизатора;
- математическая модель «ограничителя недовозбуждения» (under-excitation limiter);
- математическая модель «ограничителя перевозбуждения» (over-excitation limiter).

На рисунке 1.3 приведена структурная схема математической модели возбудителя типа *ST*1*A*, а на рисунке 1.4 приведена структурная схема математической модели системного стабилизатора типа *PSS*2*B*. Данные структурные схемы отражают только законы регулирования напряжения генератора и стабилизации электромеханических колебаний ротора генератора, а также модель возбудителя, которые являются основными с позиции анализа колебательной устойчивости энергосистемы.



V_s – выходной сигнал системного стабилизатора в относительных единицах, приведенных к номинальному напряжению статора генератора; E_{fd} – напряжение возбуждения в единицах возбуждения холостого хода (е. в. х. х.); T_A, T_B, T_B, T_C, T_C, T_F, K_A, K_F –коэффициенты усиления и постоянные времени модели возбудителя и системы автоматического регулирования

Рисунок 1.3 – Структурная схема математической модели возбудителя типа ST1A

В математической модели возбудителя типа *ST*1*A* задается коэффициент усиления по напряжению K_A и величина постоянной времени T_A , свойственной системе возбуждения. Как правило, в данном типе возбудителя реализуется уменьшение коэффициента усиления системы возбуждения в переходных процессах или за счет звеньев с постоянными времени T_C , T_B , T_{C1} , T_{B1} , или за счет звена обратной связи с коэффициентом усиления K_F и постоянной времени T_F .

Особенностью математического моделирования систем возбуждения в зарубежной практике является система относительных единиц сигналов со стороны ротора синхронной машины, для которых используются единицы возбуждения холостого хода. Так же встречается представление модели системы возбуждения с использованием системы относительных единиц сигналов со стороны ротора синхронной машины, для которых базисными величинами являются их максимальные значения.



ω – частота вращения ротора в относительных единицах, приведенных к номинальной; *P* – активная мощность генератора в относительных единицах, приведенных к полной мощности; *T*_{w1}-*T*_{w4}, *T*₁-*T*₄, *T*₇-*T*₁₁, *K*_{s1}-*K*_{s3}, *N*, *M* – коэффициенты усиления и постоянные времени системного стабилизатора

Рисунок 1.4 – Структурная схема математической модели системного стабилизатора типа *PSS2B*

В соответствии с [12, 36, 37, 41] системные стабилизаторы, работающие на основе расчета интеграла ускоряющей мощности, можно разделить на следующие функциональные элементы:

- высокочастотные фильтры в каналах по частоте вращения ротора и активной мощности генератора;
- фильтр линейной составляющей;
- звено с коэффициентом K_{s2} интегратор, совмещенный с высокочастотным фильтром первого порядка;
- фильтр компенсации фазы.

Подробное описание назначения данных функциональных элементов и принцип выбора их параметров приведены в главе 4 диссертации, посвященной методике выбора параметров настройки АРВ СД.

Следует отметить, что в современных системных стабилизаторах, реализованных на микропроцессорной технике и работающих на основе расчета интеграла ускоряющей мощности, не используется прямое измерение частоты вращения ротора. Как правило, в таких системных стабилизаторах вместо входного сигнала по частоте вращения ротора используется сигнал по частоте напряжения статора или, так называемый, сигнал компенсированной частоты. Сигнал компенсированной частоты является расчетным через частоту и величину напряжения статора, активную и реактивную мощность генератора и, так называемое, сопротивление компенсации. Идея состоит в том, что рассчитывается значение частоты напряжения в точке, электрически удаленной от точки подключения синхронного генератора к энергосистеме на величину сопротивления компенсации, по которому протекает ток статора синхронного генератора. Величину сопротивления компенсации каждый из производителей АРВ СД задает в

соответствии с разработанными им инструкциями, и оно может, например, приравниваться одному из синхронных или переходных сопротивлений синхронного генератора в поперечной или продольной оси.

К системным стабилизаторам, работающим на основе расчета интеграла ускоряющей мощности, относятся системные стабилизаторы типа *PSS2A*, *PSS2B*, *PSS2C* [41], которые различаются лишь количеством динамических звеньев в фильтре компенсации фазы. Важной особенностью является то, что выходной сигнал системного стабилизатора типа *PSS2B* поступает на сумматор регулятора напряжения, когда в отечественной практике все стабилизирующие сигналы поступают на выходной сумматор АРВ СД. Задачей по выбору параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B* является выбор как коэффициентов усиления, так и всех постоянных времени, что существенно отличатся от задачи выбора параметров настройки АРВ СД «отечественной структуры».

1.3 Обзор показателей качества переходного процесса

При исследовании качества систем регулирования в соответствии с теми или иными показателями можно пользоваться множеством различных подходов, заключающихся в различном математическом описании процессов, происходящих в системе автоматического регулирования. Наиболее распространенными подходами в инженерных расчетах являются:

- анализ во временной области;
- корневые методы анализа;
- частотные методы анализа.

С теоретической точки зрения такое разделение является весьма условным, так как многие показатели качества при одном методе анализа имеют полное соответствие некоторым показателям качества при другом методе анализа.

Показатели качества, основанные на анализе во временной области, являются наиболее понятными для понимания и простыми для интерпретации в отличие от показателей качества, основанных на корневых и частотных методах анализа.

В западной практике анализа колебательной устойчивости энергосистем для целей выбора параметров настройки APB CД наиболее распространено использование корневых методов (модального анализа). Поиск основанных на них показателей качества, позволяющих обеспечить необходимые эксплуатационные характеристики САР, осуществлен теоретически и затем адаптирован для решения практической задачи по выбору параметров настройки APB CД. Это обусловливает глубокую теоретическую связь между используемыми в данном методе

показателями качества и основами теории автоматического регулирования [12, 50].

В отечественной теории и практике выбора параметров настройки АРВ СД опыт использования показателей качества, основанных на корневых методах анализа, показал их эффективность, однако их использование с учетом особенностей работы ЕЭС России было затруднено [3, 4]. В связи с этим, для обеспечения требования по демпфированию колебаний в широком многообразии схемно-режимных условий работы энергообъединения сложной структуры, получили распространение частотные методы анализа колебательной устойчивости и основанные на них показатели качества [4, 8, 34, 51, 52]. Однако аналитический поиск наиболее эффективных показателей качества был затруднен ввиду чрезвычайной сложности математического описания энергообъединении сложной структуры И устройств автоматического регулирования. В связи с этим используемые показатели качества в отечественной практике выбора параметров настройки АРВ СД по большей части основаны на расчетно-экспериментальных результатах [4, 34, 51, 52] и, например, математически строгое обоснование используемых в [8] показателей качества переходного процесса отсутствует.

Таким образом, отсутствие строгого математического обоснования используемых показателей качества в отечественной практике выбора параметров настройки АРВ СД затрудняет интерпретацию получаемых результатов анализа колебательной устойчивости. Использование показателей качества переходного процесса, распространенных и в отечественной и в зарубежной практике анализа колебательной устойчивости для целей выбора параметров настройки АРВ СД, не всегда является простым и понятым для понимания, что требует высокой квалификации специалиста.

Несмотря на указанные недостатки используемых в отечественной практике частотных методов анализа колебательной устойчивости энергосистем, они никак не снижают эффективность данных методов при решении практических задач и простоту их программной реализации для анализа энергообъединений сложной структуры.

1.3.1 Прямые методы оценки качества

Характер переходного процесса линейной САР зависит не только от параметров САР, но и от вида возмущающего или задающего воздействия и начальных условий. Наиболее часто рассматривается воздействие вида единичной ступенчатой функции при нулевых начальных условиях, которое называется переходной функцией системы h(t), а также воздействие вида единичного импульса при нулевых начальных условиях, которое называется импульсной функцией системы g(t). Для большинства САР обычно рассматривают переходную функцию

Выделяют следующие основные показатели качества переходного процесса САР [53, 54]:

- Время регулирования или время переходного процесса t_p время, по истечении которого отклонение регулируемой величины относительно установившегося значения h_y становится и остается по абсолютному значению меньше заданной величины ε = Δ·h_y. Обычно принимается Δ = 5%.
- Время достижения первого максимума *t*_м.
- Время установления t_н промежуток времени, за который регулируемая величина в первый раз достигает своего установившегося значения h_y. Время установления характеризует скорость процесса регулирования.
- Перерегулирование σ выраженное в процентах отношение максимального отклонения регулируемой величины h_м от своего установившегося значения h_y относительно h_y:

$$\sigma = 100 \cdot \frac{h_{\rm M} - h_{\rm y}}{h_{\rm y}}, \%.$$

Перерегулирование характеризует склонность системы к колебаниям и имеет прямую связь с запасом устойчивости.

 Число N и частота колебаний или их период f = 1/T_к регулируемой величины в течение переходного процесса.

На рисунке 1.5 приведены графики импульсной g(t) и переходной h(t) функции колебательной системы, для которой $h(t) = 1 \cdot e^{-0.5 \cdot t} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 0.3 \cdot t + \pi/4)$, а также на рисунке изображены пояснения по определению показателей качества.

Предельные и желаемые значения показателей качества переходного процесса определяются на основании опыта эксплуатации подобных САР и требований к экономичности, безопасности и сохранности оборудования. К САР можно предъявить некоторые общие требования [54]. В большинстве случаев считается, что запас устойчивости системы достаточен, если величина перерегулирования σ не превышает 10-30%. Но в некоторых случаях требуется, чтобы переходной процесс протекал без перерегулирования и был монотонным, а в других случаях может быть допустимым перерегулирование 50-70%. Иногда дополнительно к величине перерегулирования σ задается допустимое число колебаний N порядка 1-2. Но в некоторых случаях колебания не допускаются, а в других случаях может допускаться 3-4 колебания. Как правило, на значение частоты колебаний ограничений не накладывается, но при

этом само значение частоты может являться дополнительным признаком, характеризующим какое-либо свойство САР [54].

Достоинством прямых методов оценки качества переходного процесса является простота их расчета, при этом они являются наглядными и понятными для восприятия. Отмечается, что данные стандартные показатели качества напрямую связаны с запасами устойчивости и, в связи с этим, обеспечение стандартных показателей качества также обеспечивает и необходимый запас устойчивости [55].

На практике исследуются САР высокого дифференциального порядка, у которых часто переходной процесс протекает колебательно на нескольких ярко выраженных резонансных частотах колебаний, что делает невозможным определение одних численных значений показателей качества переходного процесса, и затрудняет определение и интерпретацию других показателей.





Следует отметить, что прямые методы оценки качества наиболее широко применяются для следящих систем, что определяет их использование для анализа переходной характеристики САР h(t). Так, например, для АРВ СД при выборе его параметров настройки часто проводится опыт ступенчатого изменения уставки по напряжению на небольшую величину с последующим анализом процесса изменения напряжения статора генератора $h_U(t)$. Для данного опыта прямые показатели качества переходного процесса могут быть использованы без затруднений. Однако для оценки качества стабилизации намного более информативным является анализ характера изменения активной мощности и частоты напряжения статора генератора при быстропроходящих возмущениях, таких как короткое замыкание в прилегающей электрической сети или подача тестового сигнала в виде дельтафункции в систему регулирования. Очевидно, что в таких опытах будет получена импульсная функция САР по возмущению $g_P(t)$ или $g_f(t)$, и для таких функций прямые показатели качества переходного процесса не могут быть использованы впрямую. По этой причине использование прямых показателей качества переходного процесса ограничено для выбора параметров настройки каналов стабилизации АРВ СД с учетом требования по демпфированию колебаний в широком многообразии схемно-режимных условий работы энергообъединения сложной структуры.

1.3.2 Интегральные методы оценки качества

Интегральные показатели качества позволяют одновременно оценить скорость затухания переходного процесса и величину отклонения регулируемой величины. Такие критерии могут быть использованы для САР любого дифференциального порядка вне зависимости от количества выраженных резонансных частот колебаний, а так же могут быть использованы как для переходной функции САР h(t), так и для импульсной функции g(t). Для примера далее будут рассмотрены примеры оценки показателей качества по импульсной функции g(t) САР при изменении возмущающего воздействия.

В соответствии с [54] простейший интегральный показатель качества имеет вид:

$$I_1 = \int_0^\infty \Delta g(t) dt \,, \tag{1.2}$$

где $\Delta g(t)$ – отклонение величины стабилизируемого параметра от установившегося значения.

САР должна сводить величину интеграла (1.2) к некоторому достижимому минимальному значению. Существенным недостатком простейшего интегрального показателя качества является то, что минимальное значение интеграла (1.2) может быть достигнуто при наличии незатухающих или слабозатухающих колебаний. В связи с этим используются другие интегральные показатели качества [54]:

$$I_2 = \int_0^\infty |\Delta g(t)| dt , \qquad (1.3)$$

$$I_{3} = \int_{0}^{\infty} \Delta g(t)^{2} dt , \qquad (1.4)$$
где *I*₂ – интегральный показатель качества по модулю величины;

*I*₃ – квадратичный интегральный показатель качества.

Как отмечается в [54], недостатком интегральных показателей качества (1.3) и (1.4) является то, что при их использовании ничем не ограничивается форма кривой переходного процесса – то есть одинаковую величину данных показателей качества могут иметь монотонный процесс или медленно затухающий колебательный, или, например, быстро затухающий колебательный с большой величиной перерегулирования. Также интегральный показатель качества (1.3) на практике используется редко в виду сложности вычисления по характеристическому уравнению САР. Кроме того, часто оказывается, что минимум показателей качества (1.3) и (1.4) соответствуют переходному процессу, сопровождающемуся длительными колебаниями. Это объясняется тем, что параметры САР, выбранные в соответствии с данными показателями качества, обеспечивают максимально быстрый переход от одного состояния к другому, что вызывает большую скорость процесса при подходе к установившемуся значению [54]. Увеличение же начальной скорости может вызвать значительное перерегулирование, а значит, и обеспечит малый запас устойчивости. Показатели качества (1.3) и (1.4) учитывают только величину отклонения и скорость затухания и никак не учитывают близость САР к границе колебательной устойчивости.

Могут также использоваться следующие интегральные показатели качества [54]:

$$I_4 = \int_0^\infty \left[\Delta g(t)^2 + T_1^2 \cdot \left(\frac{d\Delta g(t)}{dt} \right)^2 \right] dt , \qquad (1.5)$$

$$I_{5} = \int_{0}^{\infty} \left[\Delta g(t)^{2} + T_{1}^{2} \cdot \left(\frac{d\Delta g(t)}{dt} \right)^{2} + T_{2}^{4} \cdot \left(\frac{d^{2} \Delta g(t)}{dt^{2}} \right)^{2} \right] dt , \qquad (1.6)$$

где T_1 , T_2 – некоторые постоянные времени;

*I*₄ – квадратичный интегральный показатель качества с ограничением скорости величины отклонения;

*I*₅ – квадратичный интегральный показатель качества с ограничением скорости и ускорения величины отклонения.

Как отмечается в [54], минимизация интегрального показателя качества (1.5) позволяет приблизить переходный процесс к экспоненциальному виду с заданной постоянной времени T_1 , а минимизация интегрального показателя качества (1.6) позволяет приблизить переходный процесс к решению, определяемому дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными времени T_1 , T_2 . На практике использование показателей качества (1.5) и (1.6) может быть затруднительным, так как в этом случае к вопросу определения достаточного значения самого показателя качества дополнительно встает вопрос объективного определения необходимого значения постоянных времени.

Существует ряд критериев с весом по времени, описание которых редко встречается в отечественных источниках, из которых можно отметить следующие:

$$I_{2t} = \int_{0}^{\infty} t \cdot \left| \Delta g(t) \right| dt , \qquad (1.7)$$

$$I_{3t} = \int_{0}^{\infty} t^{2} \cdot \Delta g(t)^{2} dt, \qquad (1.8)$$

где *I*_{2t} – интегральный показатель качества по модулю величины с весом по времени;

*I*_{3t} – квадратичный интегральный показатель качества с весом по квадрату времени.

Отмечается, что интегральные показатели качества с весом по времени [56, 57] будут характеризовать приближение переходного процесса к быстро затухающему и по сравнению с другими интегральными показателями качества показывают лучшее качество в соотношении быстродействие системы – запас устойчивости [57, 58].

Контроль одного режимного параметра позволяет достичь оптимума только лишь в САР, характеризующимися малым дифференциальным порядком. В системе большого дифференциального порядка может потребоваться контроль и оптимизация сразу по нескольким режимным параметрам, в связи с чем интегральные показатели качества могут быть обобщены. Так, в [4] и [52] в качестве меры оценки качества САР в устойчивых колебательных системах с *n* степенями свободы вводится квадратичный интегральный показатель качества с ограничением скорости величины отклонения, взвешенный по всем степеням свободы:

$$I_{4n} = \sum_{i=1}^{n} \int_{0}^{\infty} \left[C_i \cdot \Delta g_i(t)^2 + T_{1i}^2 \cdot \left(\frac{d\Delta g_i(t)}{dt}\right)^2 \right] dt, \qquad (1.9)$$

где С_і – безразмерная константа;

 T_{1i} – постоянные времени.

Согласно [4] вследствие большого количества степеней свободы, разнообразия электрических режимов и возмущений, сложно объективно выбрать значения *C_i* и *T_i*.

Достоинством представленных интегральных показателей качества является простота их определения во временной области и простота определения большинства из них по характеристическому уравнению САР, а также возможность их использования для оценки качества промышленных образцов САР в условиях эксплуатации. Недостаток представленных интегральных показателей качества – необходимость иметь допустимое значение, с которым

нужно выполнять сравнение. Для определения допустимых значений могут производиться аналитические расчеты для достаточно упрощенных, но близких по свойствам САР [57].

1.3.3 Корневые методы оценки качества

При исследовании САР удобно использовать их математическую модель в виде дифференциального уравнения или системы дифференциальных уравнений, с помощью которых описываются происходящие в них динамические процессы. Далее к таким уравнениям применяется преобразование Лапласа, что позволяет перейти от дифференциальных уравнений к алгебраическим и представить систему уравнений в виде соединённых друг с другом динамических звеньев. Такое представление является основой для исследования свойств САР как корневыми методами, так и частотными [53].

Для оценки качества переходных процессов САР рассматривают устойчивую САР. Поведение САР по управляемой величине при замкнутом контуре регулирования определяется передаточной функцией вида:

$$\Phi(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)} = \frac{A(p)}{B(p)},$$
(1.10)

где W(p) и $\Phi(p)$ – передаточная функция разомкнутой и замкнутой САР соответственно; A(p) и B(p) – многочлены числителя и знаменателя замкнутой САР соответственно.

Корни многочлена A(p) называются нулями передаточной функции $\Phi(p)$, корни многочлена B(p) называются полюсами передаточной функции $\Phi(p)$, а уравнение B(p) = 0 называется характеристическим уравнением замкнутой системы, которое обычно представляется в виде:

$$\sum_{i=0}^{n} a_{n-i} p^{i} = a_{0} p^{n} + a_{1} p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p^{1} + a_{n} = 0.$$
(1.11)

Переходная характеристика САР определяется как полюсами, так и нулями передаточной функции замкнутой системы $\Phi(p)$. Корни характеристического уравнения можно представить в виде точек на комплексной плоскости. Для приближенной оценки качества переходного процесса САР достаточно выделить область, где располагаются корни характеристического уравнения на комплексной плоскости.

Область расположения корней характеристического уравнения можно представить в виде фигуры (см. рис. 1.6а), ограниченной дугами окружностей с радиусами, равными

наибольшему M и наименьшему m из модулей корней характеристического уравнения, и отрезками лучей, проведенных из начала координат через ту пару корней, которая дает наибольший угол ψ [56, 59]:

ł

$$M = \max(|\alpha_0 + j\omega_0|, |\alpha_1 + j\omega_1|, \dots, |\alpha_n + j\omega_n|), \qquad (1.12)$$

$$n = \min(|\alpha_0 + j\omega_0|, |\alpha_1 + j\omega_1|, \dots, |\alpha_n + j\omega_n|), \qquad (1.13)$$

$$\psi = \max(\arctan(\omega_0/\alpha_0), \arctan(\omega_1/\alpha_1), \dots, \arctan(\omega_n/\alpha_n)), \qquad (1.14)$$



Рисунок 1.6 – Области расположения корней характеристического уравнения САР

Оценить величины M и m можно на основании теоремы Какейя, в соответствии с которой если все коэффициенты характеристического уравнения положительны и все отношения последующего коэффициента к предыдущему заключены между двумя положительными числами M и m, то модули всех корней характеристического уравнения так же заключены между этими числами M и m [59]. То есть значения M и m можно оценить, не вычисляя корней характеристического уравнения, по следующим

$$M \approx \max\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_0}, \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \dots, \frac{\alpha_n}{\alpha_{n-1}}\right), m \approx \min\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_0}, \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \dots, \frac{\alpha_n}{\alpha_{n-1}}\right).$$
(1.15)

Чаще область расположения корней характеристического уравнения представляется трапецией, на сторонах и основаниях которой располагаются хотя бы по одному корню, а вне ее корней нет (см. рис. 1.6б). Эта область определяется тремя параметрами [54, 59]:

- абсолютным значением вещественной части пары корней, ближайших к мнимой оси *α_{min}* – эта величина называется степенью устойчивости;
- абсолютным значением вещественной части пары корней, наиболее удаленных от мнимой оси *а_{max}*;

 углом ψ, внутри и на границах которого расположены все корни, тангенс этого угла λ = tan(ψ) называется корневым показателем колебательной системы или колебательностью системы.

Величина степени устойчивости *а_{min}* может служить приближенной оценкой времени переходного процесса:

$$t_p \approx \frac{1}{\alpha_{\min}} \ln\left(\frac{1}{\Delta}\right).$$
 (1.16)

Некоторой обобщенной оценкой может служить параметр, называемый среднегеометрическим корнем [54]:

$$\Omega_{mean} \approx \sqrt[n]{\frac{a_n}{a_0}}.$$
(1.17)

Параметр Ω_{mean} косвенно характеризует быстродействие САР. Увеличение Ω_{mean} ведет к тому, что форма переходной функции не изменяется, а время регулирования уменьшается [54].

Задание области расположения и полюсов и нулей позволяет более полно определить вид переходного процесса. Существуют общие рекомендации, которых желательно придерживаться при выборе расположения полюсов и нулей передаточной функции замкнутой САР [54]:

- желательно располагать нули вблизи области расположения полюсов, что уменьшит амплитуду собственных колебаний в переходном процессе;
- часто бывает выгодно удалять полюсы друг от друга, что уменьшит отклонения в переходном процессе;
- приближение полюсов друг к другу не представляет опасности для тех полюсов, которые расположены далеко от мнимой оси.

Недостатком корневых методов анализа устойчивости является невозможность анализа систем с запаздыванием или систем с распределенными параметрами, так как они не могут описываться передаточными функциями в виде соотношения полиномов. Достоинством является относительная простота интерпретации показателей качества, выраженных численно.

Задача вычисления корней характеристического уравнения может решаться при помощи средств современной вычислительной техники, если параметры элементов САР заданы численно и дифференциальный порядок системы не очень высокий. При дифференциальном порядке системы выше 200-500 появляются сложности, связанные с устойчивостью численных методов вычисления значений корней и задача вычисления значений всех корней характеристического уравнения становится нецелесообразной. В таких случаях, например,

могут применяться алгоритмы определения только доминирующих корней характеристического уравнения САР (находящихся в непосредственной близости от границы устойчивости), что требует применения специализированных и достаточно сложных математических процедур [44].

1.3.4 Частотные методы оценки качества

Частотные критерии устойчивости основаны на использовании ЧХ, получаемых с помощью преобразования Фурье. Основное преимущество частотных критериев устойчивости заключается в том, что ЧХ САР можно получить экспериментально. Также ЧХ могут быть получены и для САР с запаздыванием или САР с распределенными параметрами. Кроме того, ЧХ позволяют сравнительно просто определить влияние того или иного параметра на устойчивость САР, а также дают возможность судить о переходном процессе САР. Эти критерии являются графоаналитическими и получили широкое распространение, так как позволяют сравнительно легко исследовать устойчивость систем высокого порядка, а также имеют простую геометрическую интерпретацию и наглядность [53].

Некоторые из методов оценки качества САР частотными методами, в том числе и ряд показателей качества, связаны с непосредственной оценкой запасов её устойчивости, в том числе при варьировании какого-либо параметра.

1.3.4.1 Оценка запасов устойчивости САР по ее частотным характеристикам

Широкое распространение получил критерий устойчивости по логарифмическим частотным характеристикам разомкнутой САР. В основе данного критерия лежит критерий устойчивости Найквиста, который можно сформулировать следующим образом: замкнутая САР устойчива, если сумма переходов логарифмической фазочастотной характеристикой (ФЧХ) разомкнутой САР через критический отрезок была равна k/2 раз, где k – число правых корней характеристического уравнения разомкнутой САР. Критическим отрезком называется луч из критической точки (-1;j0) вдоль вещественной оси в отрицательную сторону. Переход сверху вниз считается положительным, а снизу вверх – отрицательным [54].

В качестве примера на рисунке 1.7а приведены амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и ФЧХ, на рисунке 1.7б приведена амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) для устойчивой в замкнутом и разомкнутом состоянии САР. По виду АЧХ и ФЧХ (или

АФЧХ) можно определить частоту среза f_{cpe3} , запас устойчивости по фазе φ_{3an} и запас устойчивости по амплитуде A_{3an} [59].



а) АЧХ и ФЧХ
 Б) АФЧХ
 Рисунок 1.7 – Частотные характеристики САР

Для целей анализа колебательных свойств энергосистемы и, в частности, для оценки качества работы АРВ СД характеристики $f_{\text{срез}}$, $\varphi_{\text{зап}}$, $A_{\text{зап}}$ используются достаточно ограниченно. Характеристики f_{cpe3} , φ_{3an} , A_{3an} разомкнутой САР могут быть рассчитаны через характеристики замкнутой САР, определенные экспериментальным путем. В [13] рекомендуется соблюдать запас устойчивости по фазе 40° и запас устойчивости по амплитуде 0.5 для синхронного генератора в режиме холостого хода по параметру коэффициента усиления системы возбуждения генератора, выражающего отношение напряжения статора генератора в о.е. к управляющему сигналу АРВ СД в единицах возбуждения холостого хода. В [13] также отмечается, что допустимые значения запаса по амплитуде и фазе могут сильно зависеть от параметров генератора, при этом даже при соблюдении заданных запасов по фазе и амплитуде коэффициента усиления системы возбуждения генератора, устойчивость работы не гарантируется в широком многообразии схемно-режимных условий работы энергосистемы. Оценка запасов устойчивости системы управления по ее частотным характеристикам путем анализа параметров f_{срез}, φ_{3an} , A_{3an} удобна лишь для оценки качества поддержания напряжения статора генератора, а оценка качества стабилизации при работе синхронного генератора в энергообъединении сложной структуры таким способом затруднительна.

1.3.4.2 Построение областей устойчивости в плоскости параметров САР (*D*-разбиение)

Метод *D*-разбиения в плоскости коэффициентов усиления получил в отечественной практике анализа колебательной устойчивости энергосистем большое распространение [4, 8, 34, 51, 52], поскольку он позволяет указывать пределы, в которых могут изменяться параметры САР без нарушений условий устойчивости. Тем самым, степень удаления рабочей точки от границы области устойчивости косвенно характеризует качество САР. При этом построение границ областей устойчивости для ряда схемно-режимных условий работы энергообъединения сложной структуры позволяет выделить общую для всех из них область устойчивости и осуществить выбор параметров настройки внутри данной области, что позволяет обеспечить выполнение требования по демпфированию колебаний в этих схемно-режимных условиях [4, 52].

С помощью критерия устойчивости Найквиста можно выяснить влияние некоторых параметров на устойчивость САР и построить ее область устойчивости в пространстве одного или более варьируемых параметров САР. Обычно исследуют влияние на устойчивость САР одного или двух параметров, линейно входящих в характеристическое уравнение САР [59].

Например, при построении области устойчивости в пространстве двух параметров *K*1 и *K*2 необходимо нанести линии, соответствующие границе устойчивости. Тогда область, ограниченная этими линиями, будет представлять область устойчивости. Для проверки необходимо для любой точки внутри такой области выполнить проверку устойчивости в соответствии с любым критерием. Если в этой точке CAP устойчива, то и для любых других точек эта область CAP также будет устойчива [54].

Для получения области устойчивости характеристическое уравнение системы (1.11) представляется в виде уравнения с комплексными коэффициентами:

$$\sum_{i=0}^{n} a_{n-i}(p)^{i} = \sum_{i=0}^{n} a_{n-i}(j\omega)^{i} = X(\omega) + jY(\omega) = 0.$$
(1.18)

Если два рассматриваемых параметра входят в уравнение (1.18) линейно, тогда для границы колебательной устойчивости оно распадается на два уравнения с вещественными коэффициентами:

$$\begin{cases} X(\omega, K1, K2) = 0, \\ Y(\omega, K1, K2) = 0. \end{cases}$$
(1.19)

Уравнение (1.19) представляет собой параметрическое уравнение границы области устойчивости. Так же к уравнению (1.19) добавляется два условия для границы апериодической устойчивости:

$$a_0(K1, K2) = 0, \ a_n(K1, K2) = 0.$$
 (1.20)

В некоторых случаях дополнительно на этот же график с нанесенным областями устойчивости наносят так называемые кривые равного затухания, получаемые путем решения этой же задачи, но при подстановке в уравнение (1.18) требуемого затухания САР *α*:

$$\sum_{i=0}^{n} a_{n-i} (p')^{i} = \sum_{i=0}^{n} a_{n-i} (\alpha + j\omega)^{i} = X'(\omega) + jY'(\omega) = 0$$
(1.21)

Кривые равного затухания позволяют определить не только область устойчивости, но и запас устойчивости при изменении параметров САР, что является важной практической задачей.

1.3.4.3 Частотный метод оценки качества регулирования

Частотные оценки качества переходного процесса базируются на связи, которая существует между переходными процессами, вызываемыми в системе ступенчатыми, импульсными или гармоническими воздействиями. Преимуществом оценки качества САР частотными методами является возможность использования не только расчетных, но и экспериментальных данных, а также наглядность изменений динамических характеристик САР в результате изменения ее параметров и/или структуры. В оценках могут использоваться различные ЧХ. Для минимально-фазовых САР, у которых все полюсы и нули имеют отрицательные или нулевые вещественные части, характерна однозначная связь их АЧХ и ФЧХ. Поэтому для таких САР можно пользоваться одной АЧХ, так как она полностью определяет свойства САР, а, значит, и качество переходных процессов в ней [59].

Частотным показателем колебательности M называется отношение максимального значения АЧХ при частоте резонанса ω_{pes} к ее значению при $\omega = 0$ (см. рисунок 1.8) [59]:

$$M = \frac{A_{3.MAKC}}{A_{3}(0)}.$$
 (1.22)



Рисунок 1.8 – Определение частотного показателя колебательности по АЧХ

С ростом M колебательность системы увеличивается и при $M \to \infty$ возникают незатухающие колебания, свидетельствующие о том, что система находится на границе устойчивости. Обычно считается допустимым иметь $1.5 \ge M \ge 1.1$ [59].

Полосой пропускания САР называется интервал частот от f = 0 до $f = f_0$, для которого выполняется условие [59]:

$$A_{3}(f_{0}) \ge \frac{A_{3}(0)}{\sqrt{2}}.$$
 (1.23)

Полоса пропускания должна быть достаточно широкой, чтобы САР могла пропустить полезный сигнал – задающее воздействие, но не настолько широкой, чтобы пропускать высокочастотные помехи [59].

Частота среза f_{cp} – частота, при которой АЧХ переходной функции САР принимает значение, равное $A_3(0)$, то есть $A_3(f_{cp}) = A_3(0)$. Эта частота косвенно характеризует длительность переходного процесса. Время регулирования обратно пропорционально частоте среза [59]:

$$t_p \approx (1-2) \frac{1}{f_{cp}}$$
 (1.24)

Переходный процесс в САР, вызванный единичным воздействием при нулевых начальных условиях, то есть его переходная характеристика, может быть построена по ЧХ переходной функции САР. Следовательно, по виду ЧХ переходной функции можно судить и об основных показателях качества САР. Так же к частотным показателям качества относятся и ранее рассмотренные запасы устойчивости по фазе и амплитуде.

46

1.3.5 Выводы

Выполнен краткий обзор наиболее широко используемых методов оценки качества систем автоматического регулирования, которые могут быть применены с целью оценки эффективности параметров настройки АРВ СД. Общепринятым является, что устойчивость является главным требованием, предъявляемым к системам автоматического регулирования. Для оценки качества переходных процессов рассматривают устойчивую систему автоматического регулирования.

Показателями качества могут быть аналитические выражения, определяющие величину запаса устойчивости, определяющие качество переходного процесса или же определяющие точность регулирования. На основе проведенного обзора, по мнению автора наиболее удобными и эффективными показателями качества переходного процесса являются показатели, основанные на частотных методах анализа колебательной устойчивости. Они просты в программной реализации при их применении для анализа энергообъединений сложной структуры и не требуют существенной доработки для обеспечения требования по демпфированию колебаний в широком многообразии схемно-режимных условий работы энергосистемы.

Почти все рассмотренные методы применимы только к линейным или линеаризованным системам автоматического регулирования (или к нелинейным при достаточно малых возмущениях), тогда как большинство реальных систем автоматического регулирования являются нелинейными. Анализ качества регулирования В нелинейных системах автоматического регулирования требует либо применения специализированных и сложных в учитывающих специфику использовании методик, узкую исследуемой системы автоматического регулирования, либо, в условиях решаемой задачи, требует прямого расчета переходных процессов с использованием цифровой модели энергосистемы. Опыт анализа колебательной устойчивости энергообъединений сложной структуры позволяет заключить, что сам процесс выбора параметров настройки АРВ СД может быть эффективно осуществлен с допущением о линеаризации уравнений энергосистемы при условии проверки выбранных параметров настройки АРВ СД путем моделирования больших по амплитуде возмущений, когда проявляются нелинейные свойства объекта управления.

Свойством всех описанных показателей качества является необходимость иметь допустимое значение, с которым нужно выполнять сравнение. При решении практических задач критерии качества, предъявляемые к системам автоматического регулирования, в большинстве случаев задаются экспертно на основании опыта эксплуатации и представлении о возможных пределах эффективности и пределах «прочности» подобных систем

автоматического регулирования и не имеют строгого теоретического обоснования [12, 55]. Однако это не вызывает сложностей при решении задачи оптимизации, когда необходимо определить значения параметров настройки АРВ СД, обеспечивающих минимальное/максимальное значение выбранного показателя качества.

1.4 Принятая методика анализа колебательной устойчивости энергосистем

В АО «НТЦ ЕЭС» разработана методика анализа колебательной устойчивости, основанная на частотных методах анализа, и реализующий ее ПВК «*WinOblast*». Общее обоснование основных теоретических предпосылок и программно-технических решений, принятых при его создании приведено в [9, 10]. Методика включает в себя:

- подачу тестового сигнала на дополнительный вход АРВ СД в цифровой модели энергосистемы;
- получение импульсной переходной функции по параметру частоты напряжения (отклик САР);
- расчет передаточной функции замкнутой САР (режимные частотные характеристики РЧХ) по частоте напряжения;
- анализ полученных РЧХ, включающий построение границ областей устойчивости и оптимизацию параметров настройки АРВ СД.

ПВК «WinOblast» позволяет выбирать параметры настройки APB CД отечественного производства для повышения колебательной устойчивости энергосистемы. Вместе с тем ПВК «WinOblast» не может использоваться для выбора параметров настройки APB CД 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, необходимость задания которых возникает при моделировании микропроцессорных АРВ СД;
- функциональной зависимости коэффициентов усиления каналов регулирования АРВ СД от его параметров настройки, что характерно для работающих на основе расчета интеграла ускоряющей мощности системных стабилизаторов и для АРВ СД, в которых сигналы каналов стабилизации поступают на сумматор регулятора напряжения;
- использовании более одного режимного параметра в законе стабилизации, что характерно для всех современных системных стабилизаторов зарубежного производства;

 анализе показателя качества на основе режимного параметра отличного от режимного параметра, использующегося в канале стабилизации.

Для устранения отмеченных недостатков автором выполнена коррекция ряда алгоритмов ПВК «*WinOblast*», а также разработаны и реализованы новые алгоритмы в САПР *MathCad*, что обеспечило возможность выбора параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B*. Новые алгоритмы [60] разработаны на основе анализа диссертации [4] и результатов проведенного обзора существующих критериев качества систем управления.

Синхронный генератор, работающий параллельно с энергосистемой любой сложности, можно представить в виде структурной схемы, показанной на рисунке 1.9.



Σ_{АРВ} – выходной сумматор АРВ СД; W_{ок} – передаточная функция возбудителя совместно с суммирующим выходным усилителем АРВ СД; W_{ЭСп} – передаточные функции синхронного генератора совместно с энергосистемой по *n*-му режимному параметру; W_{pern} – передаточные функции *n*-го канала регулирования АРВ СД; K_{pern} – коэффициенты усиления *n*-го канала АРВ СД; U_g – тестовый сигнал; U_f – напряжение возбуждения; П_f – *n*-ый режимный параметр регулирования; U_{pern} – управляющий сигнал *n*-го канала регулирования

Рисунок 1.9 – Структурная схема объекта регулирования

Далее, при анализе колебательной устойчивости энергосистем все каналы регулирования и каналы стабилизации АРВ СД для упрощения объединены в один термин – каналы регулирования. При этом под термином:

- каналов системной стабилизации в случае АРВ СД «отечественной структуры» подразумеваются каналы стабилизации по отклонению частоты напряжения статора и её производной;
- каналов стабилизации в случае АРВ СД «отечественной структуры» подразумеваются каналы стабилизации по отклонению частоты напряжения статора и её производной, а также производной тока ротора.

При подаче тестового сигнала на дополнительный вход выходного сумматора APB СД можно измерить отклик CAP по каждому из режимных параметров за один эксперимент (точки a на рисунке 1.9), найти их отображения в частотной области, и построить передаточные функции замкнутой CAP по каждому из режимных параметров $W_{\text{замk}}$:

$$\frac{\Pi_k}{U_g} = W_{_{3aMk}} = \frac{W_{_{o\kappa}} \cdot W_{_{\Im Ck}}}{1 - W_{_{o\kappa}} \cdot \sum_{i=1}^n \left(W_{_{\Im Ci}} \cdot W_{_{peri}} \cdot K_{_{peri}} \right)}, \ k \in [1, n].$$
(1.25)

Если тестовый сигнал является δ-функцией Дирака, его отображение в частотной области тождественно равно единице, и, передаточные функции замкнутой САР совпадают с соответствующими отображениями измеренных параметров регулирования:

$$\frac{\Pi_k}{U_g} = \frac{\Pi_k}{1} = W_{_{3aMk}}, \ k \in [1, n].$$
(1.26)

Из (1.25) получено выражение для расчета передаточных функций замкнутой САР по каждому из режимных параметров W_{3aMk} при произвольных параметрах настройки АРВ СД на основе результата единственного эксперимента:

$$W_{3aMk}' = \frac{W_{0\kappa}}{1 + \sum_{i=1}^{n} \left(\left(W_{pezi} \cdot K_{pezi} - W_{pezi}' \cdot K_{pezi}' \cdot W_{0\kappa}' \right) \cdot W_{3aMi} \right)}, \quad k \in [1, n], \quad (1.27)$$

где W'_{3aMk} – передаточная функция замкнутой САР 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 при проведении эксперимента.

В АРВ СД один режимный параметр может использоваться в нескольких каналах регулирования, примем, что $W_{\Im C1} = W_{\Im C2}$, тогда будет выполняться равенство $W_{\text{pa31}} = W_{\text{pa32}}$. Разомкнём структурную схему в точках b_1 и b_2 (выход первого и второго канала регулирования), подадим тестовый сигнал на дополнительный вход и запишем передаточную функцию разомкнутой системы $W_{\text{pa31,2}}$:

$$W_{pasl,2} = \frac{W_{o\kappa} \cdot W_{\Im Cl} \cdot \left(W_{perl} \cdot K_{perl} + W_{per2} \cdot K_{per2}\right)}{1 - W_{OK} \cdot \sum_{i=3}^{n} \left(W_{\Im Ci} \cdot W_{peri} \cdot K_{peri}\right)}.$$
(1.28)

В соответствии с рядом существующих методик выбора параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B* как в математической модели энергосистемы, так и на действующих электростанциях, проводится ряд экспериментов с выведенным из работы системным стабилизатором. В условиях работы некоторых электростанций ЕЭС России колебательная устойчивость не может быть обеспечена при выведенных из работы системных стабилизаторах генераторов в составе данной электростанции, что не позволяет провести данные эксперименты. Например, проведение таких экспериментов в математической модели энергосистемы требуется для определения передаточной функции разомкнутой САР по сигналу системной стабилизации. Полученное выражение (1.28) позволяет рассчитать передаточную функцию разомкнутой САР по экспериментально полученным передаточным функциям замкнутой САР без выведения из работы системного стабилизатора.

Замкнутая САР находится на границе устойчивости, если АФЧХ разомкнутой САР проходит в комплексной плоскости через точку с координатами (-1;0), не охватывая последнюю. Это условие отражается формулой:

$$W_{pa3l,2} - 1 = 0. (1.29)$$

Тогда, используя выражения (1.25), (1.28) и (1.29) можно получить значения коэффициентов регулирования, отвечающие границе области устойчивости [10]:

$$W_{peel} \cdot K_{peel}^{o\delta_{1}} + W_{pee2} \cdot K_{pee2}^{o\delta_{1}} = W_{3a_{M}}^{-1} + W_{peel} \cdot K_{peel} + W_{pee2} \cdot K_{pee2}, \qquad (1.30)$$

где K_{perl}^{obn} и K_{perl}^{obn} – являются функциями от частоты и в параметрической форме описывают границу области устойчивости в плоскости коэффициентов регулирования K_{perl} и K_{perl} .

Уравнение (1.30) можно представить в матричной форме и решить относительно $K_{perl}^{o\delta n}$ и $K_{per2}^{o\delta n}$:

$$\begin{pmatrix} K_{pe2l}^{o\delta n} \\ K_{pe2l}^{o\delta n} \\ Hm(W_{pe2l}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Re}(W_{pe2l}) & \text{Re}(W_{pe22}) \\ \text{Im}(W_{pe2l}) & \text{Im}(W_{pe22}) \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \text{Re}(W_{3aM}^{-1} + W_{pe2l} \cdot K_{pe2l} + W_{pe22} \cdot K_{pe2l}) \\ \text{Im}(W_{3aM}^{-1} + W_{pe2l} \cdot K_{pe2l} + W_{pe22} \cdot K_{pe22}) \end{pmatrix}.$$
(1.31)

Из системы уравнений (1.31) путем учета формулы (1.27) получена система уравнений, задающая границу области устойчивости по единственному эксперименту при произвольных параметрах настройки АРВ СД в осях произвольных коэффициентов усиления:

$$\begin{pmatrix} K_{pe21}^{o\delta,n} \\ K_{pe22}^{o\delta,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \operatorname{Re}(W'_{pe21}) & \operatorname{Re}\left(\frac{W_{3aM2}}{W_{3aM1}} \cdot W'_{pe22}\right) \\ \operatorname{Im}(W'_{pe21}) & \operatorname{Im}\left(\frac{W_{3aM2}}{W_{3aM1}} \cdot W'_{pe22}\right) \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \operatorname{Re}\left(W'_{aaM1} + W'_{pe21} \cdot K'_{pe21} + \frac{W_{3aM2}}{W_{3aM1}} \cdot W'_{pe22} \cdot K'_{pe22}\right) \\ \operatorname{Im}\left(W'_{aaM1} + W'_{pe21} \cdot K'_{pe21} + \frac{W_{3aM2}}{W_{3aM1}} \cdot W'_{pe22} \cdot K'_{pe22}\right) \end{pmatrix}. (1.32)$$

Рассмотрим далее, как частный случай, использование полученных выражений на примере использования АРВ СД «отечественной структуры», схема которого изображена на рисунке 1.10.



*W*_{AU}, *W*_{If}, *W*_{Af}, *W*_{Af}, –передаточные функции синхронного генератора совместно с внешней сетью по отклонению напряжения, току ротора, отклонению частоты напряжения, разнице скольжения ротора генератора и средневзвешенного скольжения роторов генераторов энергосистемы соответственно; *ΔU*, *If*, *Δf*, *Δs* – соответствующие режимные параметры; *W*_{0U}, *W*_{1U}, *W*_{intU}, *W*_{1ff}, *W*_{0f}, *W*_{1f} – передаточные функции каналов регулирования АРВ по отклонению напряжения, производной напряжения, интегралу отклонения напряжения, производной тока ротора, отклонению частоты напряжения и производной частоты напряжения соответственно; *K*_{0U}, *K*_{1U}, *T*_{int}, *K*_{1If}, *K*_{0f}, *K*_{1f} – соответствующие коэффициенты регулирования и постоянные времени каналов АРВ

Рисунок 1.10 - Структурная схема объекта регулирования с обобщённым

АРВ сильного действия

Для вычислений удобно представить параметры САР в векторном виде:

$$\mathbf{W}_{pez} = \begin{pmatrix} W_{0U} \\ W_{1U} \\ W_{intU} \cdot W_{0U} \\ W_{1nf} \\ W_{0f} \\ W_{1f} \\ 0 \end{pmatrix}, \ \mathbf{K}_{pez} = \begin{pmatrix} K_{0U} \\ K_{1U} \\ K_{0U} / T_{int} \\ K_{0f} \\ K_{1f} \\ 0 \end{pmatrix}, \ \mathbf{W}_{3C} = \begin{pmatrix} W_{\Delta U} \\ W_{M} \\$$

С учетом записи в векторном виде выражения (1.25) и (1.27) виде будут выглядеть:

$$\mathbf{W}_{_{3aM}} = \frac{W_{_{o\kappa}} \cdot \mathbf{W}_{_{\mathcal{H}C}}}{1 - W_{_{o\kappa}} \cdot \mathbf{W}_{_{\mathcal{H}C}} \cdot \left(\mathbf{K}_{_{per}} \circ \mathbf{W}_{_{per}}\right)},$$
(1.34)

$$\mathbf{W}_{3aM}^{'} = \frac{\frac{W_{o\kappa}^{'}}{W_{o\kappa}} \cdot \mathbf{W}_{3aM}}{1 + \left(\mathbf{K}_{pee} \circ \mathbf{W}_{pee} - \mathbf{K}_{pee}^{'} \circ \mathbf{W}_{pee}^{'} \cdot \frac{W_{o\kappa}^{'}}{W_{o\kappa}}\right) \cdot \mathbf{W}_{3aM}},$$
(1.35)

где ° – оператор Адамарова (поэлементного) произведения векторов.

Выражение (1.32) невозможно использовать в случае построения областей устойчивости при функциональной зависимости коэффициентов усиления каналов регулирования APB CД от его параметров настройки. Так, например, в APB CД, приведенном на рисунке 1.10, коэффициент усиления в интегральном канале по напряжению равен K_{0U}/T_{int} , а в системном стабилизаторе типа *PSS2B* коэффициент усиления по каналу активной мощности равен $K_{s1} \cdot K_{s2}$. Для устранения данного недостатка произведена соответствующая коррекция алгоритмов расчета границ областей устойчивости, заключающаяся в нелинейном масштабировании координатных осей. В результате коррекции алгоритмов граница областей колебательной устойчивости может быть построена в плоскости любых коэффициентов усиления и постоянных времени, что позволило применять существующую методику при выборе параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B*.

Оценка качества регулирования выполняется по передаточной функции замкнутой системы в частотной области, выражение для которой при произвольных параметрах настройки определяется по формуле (1.35). В общем виде для оценки качества регулирования используется показатель качества САР:

$$J = \Psi \left(W_{_{3aM}} \right), \tag{1.36}$$

Меньшим значениям *J* соответствует лучшее качество переходного процесса. Показатель качества САР с учетом формулы (1.35) можно представить в виде функции двух переменных (остальные фиксируются):

$$J = \Psi\left(K_{0f}, K_{1f}\right) \text{ или } J = \Psi\left(K_{s1}, K_{s2}\right).$$
(1.37)

В данной постановке задача выбора оптимальных значений коэффициентов \vec{K}_{0f} и \vec{K}_{1f} (или K_{s1} и K_{s2}) сводится к поиску минимума функции (1.37), который осуществляется ее прямым расчетом при заданном диапазоне и шаге изменения коэффициентов \vec{K}_{0f} и \vec{K}_{1f} (или K_{s1} и K_{s2}). Преимущество данного метода состоит в том, что он дает полную картину поведения показателя качества в заданном диапазоне изменения коэффициентов \vec{K}_{0f} и \vec{K}_{1f} (или K_{s1} и K_{s2}) [10].

В настоящее время в ПВК «*WinOblast*» принято использовать отклонение частоты напряжения Δf в качестве единственного режимного параметра оптимизации. Однако, например, в [4] рекомендуется использовать разницу скольжения ротора генератора и средневзвешенного скольжения роторов генераторов энергосистемы: $\Delta s = s_{por} - s_{cp.B3B.}$. ПВК *Eurostag* позволяет реализовать измерение Δs для определения отклика системы при подаче тестового сигнала в выходной сумматор АРВ СД, что отражено на рисунке 1.10 соответствующим звеном. В разрабатываемых алгоритмах анализа колебательной устойчивости предусмотрено использование произвольного заранее заданного режимного параметра, по которому осуществляется оптимизация.

В ПВК «WinOblast» при оптимизации используются следующие показатели качества:

$$J = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} A(f)^2 df$$
, («интегральный» показатель качества) (1.38)

$$J = \max(A(f)), f \in (f_{\min}, f_{\max}), («минимаксный» показатель качества)$$
(1.39)

где A(f) – модуль частотной характеристики передаточной функции замкнутой системы W_{3am} по режимному параметру, по которому осуществляется оптимизация;

f- частота;

f_{min} и *f_{max}* – минимальное и максимальное значение диапазона частот, в котором осуществляется оптимизация.

Данные показатели качества показали свою эффективность, однако не во всех схемнорежимных условиях работы рассматриваемой электростанции использование данного показателя позволяет обеспечить необходимые запасы колебательной устойчивости. Это проявляется в результате оптимизации, при котором хоть и обеспечивается удовлетворительное качество переходного процесса в рассматриваемых схемно-режимных условиях работы рассматриваемой электростанции, но значение оптимальных параметров настройки получается близким к низкочастотной границе области колебательной устойчивости [4]. Особенно это проявляется при использовании «интегрального показателя» (1.38). Данный результат подтверждается информацией, полученной из обзора существующих интегральных методов оценки качества переходного процесса (см. подраздел 1.3.2), так как согласно теореме Парсеваля квадратичный интегральный показатель качества во временной области (1.4) эквивалентен «интегральному показателю» в частотной области (1.38):

$$\int_{0}^{\infty} \Delta g(t)^{2} dt = \int_{0}^{\infty} \left| W_{\Delta g}(2\pi f) \right|^{2} df , \qquad (1.40)$$

где $W_{\Delta g}$ – результат преобразования Фурье для сигнала g(t).

Так, в [54] указывается, что минимум показателя качества (1.4), а значит и показателя качества (1.38), соответствуют переходному процессу, сопровождающемуся длительными колебаниями.

Также было отмечено, что [56-58] интегральные показатели качества с весом по времени по сравнению с другими интегральными критериями показывают лучшее качество в соотношении быстродействие системы – запас устойчивости. В соответствии с данной информацией, используя теорему Парсеваля и свойства преобразования Фурье можно из формулы (1.8) получить:

$$\int_{0}^{\infty} t^{2} \cdot \Delta g(t)^{2} dt = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{\infty} \left| \frac{dW_{Ag}(2\pi f)}{df} \right|^{2} df \,.$$
(1.41)

Таким образом, можно ввести показатель качества по интегралу модуля квадрата производной частотной характеристики:

$$\Psi = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \left| \frac{dW_{3aM}(f)}{df} \right|^2 df$$
, («интегральный производной» показатель качества) (1.42)

В существующий ПВК «*WinOblast*» автором путем модификации исходного кода и перекомпиляции добавлена возможность проведения оптимизационной процедуры с использованием показателя качества по формуле (1.42). Также разработанные алгоритмы с учетом их адаптации для выбора параметров настройки системных стабилизаторов, работающих на основе расчета интеграла ускоряющей мощности, реализованы в САПР *Mathcad* с использованием встроенного в него языка программирования. На рисунке 1.11 приведен фрагмент рабочего окна модифицированного ПВК «*WinOblast*» с изображением границы области устойчивости, и результат оптимизации в плоскости коэффициентов *K*_{0f} и *K*_{1f} при трех различных используемых показателей качества для генератора одной из электростанций в составе ЕЭС России, оснащенным АРВ СД «отечественной структуры».

Более темным областям графика соответствует меньшее значение показателя качества (лучшее качество переходного процесса), а черной точкой отмечена рабочая настройка, выбранная экспертом. Из рисунка 1.11 видно, что в данном конкретном случае использование показателя качества «интегральный» дает результат с нулевыми коэффициентами усиления K_{0f} и K_{1f} , тогда как использование показателя качества «интегральный производной» дает результат с настройками, близкими к выбранным экспертом.



Рисунок 1.11 – Фрагмент рабочего окна программы с результатом построения границы области устойчивости и результатом оптимизации при использовании различных показателей качества для APB CД «отечественной структуры»

В качестве примера на рисунке 1.12 приведен результат расчета границы области устойчивости и результат оптимизации в плоскости коэффициентов K_{s1} и K_{s2} с использованием показателя качества «интегральный производной» для генератора одной из электростанций в составе ЕЭС России, оснащенной АРВ СД зарубежного производства и системным стабилизатором типа *PSS2B*. Более темным областям соответствует меньшее значение показателя качества (лучшее качество переходного процесса), а красной точкой обозначены значения коэффициентов K_{s1} и K_{s2} , обеспечивающие минимальное значение показателя качества.



Рисунок 1.12 – Результат расчета границы области устойчивости с наложенным поверх результатом расчета показателя качества «интегральный производной» для системного стабилизатора типа *PSS2B*

На рисунке 1.13 приведены АЧХ передаточной функции замкнутой САР по параметру частоты напряжения статора генератора при:

- введенном в работу системном стабилизаторе со значениями коэффициентов *K*_{s1} и *K*_{s2}, обеспечивающими минимальное значение показателя качества;
- при выведенном из работы системном стабилизаторе.



Рисунок 1.13 – АЧХ передаточной функции замкнутой САР по параметру частоты напряжения статора генератора при введенном в работу системном стабилизаторе (синяя кривая) и выведенном из работы системном стабилизаторе (красная кривая)

Из рисунка 1.12 видно, что граница области устойчивости является разомкнутой, а качества «интегральный производной» обеспечивают минимум показателя значения коэффициентов K_{s1} и K_{s2}, при которых могут наблюдаться колебания высокой частоты порядка 5 Гц (см. рисунок 1.13). Так как используемые модели возбудителя и генератора не предназначены для анализа процессов с частотами выше 5 Гц, результаты такой оптимизации могут быть ошибочными – то есть установка таких параметров настройки системного стабилизатора на действующем оборудовании может привести к появлению слабозатухающих колебаний режимных параметров. Следует отметить, что все реализованные показатели качества обеспечивают получение аналогичного результата оптимизации. Это приводит к тому, что подход с построением границ областей устойчивости и наложением значений показателя качества поверх границ, несмотря на эффективность использования при оптимизации параметров АРВ СД «отечественной структуры», оказывается не эффективным для практического применения при выборе коэффициентов K_{s1} и K_{s2} системного стабилизатора типа PSS2B.

Для эффективного решения практических задач разработана модификация данной методики, позволяющая эффективно выбирать коэффициенты K_{s1} и K_{s2} . Описание модифицированной методики приведено в главе 4 диссертации, посвященной методике выбора параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B*.

1.5 Выводы

Выполнен краткий обзор основных функций АРВ СД и показателей качества переходного процесса. Для анализа колебательный устойчивости энергосистем выбраны частотные методы, в соответствии с чем при проведении процедуры оптимизации в качестве целевой функции использованы показатели качества переходного процесса, выраженные в частотной области. Заложенные частотные методы анализа колебательной устойчивости и алгоритмы существующего ПВК «*WinOblast*», не смотря на их эффективность анализа колебательной устойчивости энергообъединений сложной структуры, не позволяют эффективно осуществлять выбор параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B*. Совершенствование его алгоритмов на основе выполненного обзора существующих показателей качества переходного процесса обеспечило возможность выбора и оптимизацию параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B*, ускорило и упростило процесс выбора параметров настройки АРВ СД «отечественной структуры».

Автором произведена доработка существующего ПВК «*WinOblast*» путем модификации его исходного кода и перекомпиляции. А также описанные расчетные выражения положены в основу метода анализа колебательной устойчивости энергосистем для выбора параметров настройки АРВ СД как отечественного, так и зарубежного производства, и реализованы в САПР *Mathcad* с использованием встроенного в него языка программирования.

2 Методика создания математических моделей АРВ СД, предназначенных для выбора их параметров настройки

2.1 Особенности работы микропроцессорных АРВ СД

Все современные АРВ СД выполнены на микропроцессорной базе, что обуславливает ряд особенностей их функционирования, которые необходимо учитывать при создании их математических моделей. АРВ СД при исследовании колебательной устойчивости может быть представлен функциональной схемой, приведенной на рисунке 2.1.





ЭЭС и Г – электроэнергетическая система и генератор; АΦ – аналоговый фильтр; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; *F* – нелинейная функция цифрового измерителя; ЦΦ – цифровой фильтр; 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 ротора генератора соответственно; *U*_{изм}, *I*_{fнзм}, *f*_{нзм} – выходные значения измерителей действующего значения напряжения статора, тока возбуждения и частоты напряжения статора генератора соответственно; *U*_{APB} – выходное значение выходного сумматора APB СД; *U*_{syn} и *f*_{syn} – напряжение и частота синхронизации; α – угол управления тиристорами

Рисунок 2.1 – Функциональная схема микропроцессорного АРВ СД для задачи исследования колебательной устойчивости энергосистем

На рисунке 2.1 в качестве примера представлена лишь одна из возможных реализаций части алгоритма АРВ СД, отвечающей за регулирование напряжения генератора и стабилизацию электромеханических колебаний ротора генератора. Представленную на рисунке 2.1 функциональную схему АРВ СД можно условно разделить на следующие функциональные части [61-63]:

- оцифровка аналоговых и физических сигналов;
- цифровые измерители режимных параметров;
- каналы регулирования.

Входными параметрами в рассматриваемом варианте реализации части алгоритма АРВ СД являются трехфазное напряжение статора генератора с измерительных трансформаторов и напряжение с шунта в обмотке возбуждения, пропорциональное току ротора. Далее следует гальваническая развязка, с выхода которой сигналы поступают на АЦП через аналоговые антиалайзинговые фильтры (как правило, *RC*-цепочки). Цифровые выходы АЦП объединены шиной данных с микроконтроллером. Из параметров мгновенных значений напряжения статора производится расчет режимных параметров, необходимых для функционирования основного алгоритма регулирования. Измерительный тракт дополняется цифровыми фильтры служат для снижения уровня пульсаций в рассчитанных режимных параметрах, вызванных либо работой тиристорного преобразователя, либо реализацией алгоритма расчета режимного параметра. Основной закон регулирования состоит из отдельных каналов регулирования по различным режимным параметрам, выходы которых поступают на общий сумматор. Сигнал с общего сумматора поступает на систему управления тиристорами, которая в свою очередь управляет тиристорным возбудителем.

Следует отметить ряд особенностей функционирования микропроцессорных АРВ СД. 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.

Цифровой измеритель частоты напряжения физически может быть реализован на отдельном измерительном устройстве со временем основного расчетного цикла существенно меньшим, чем время выполнения других подпрограмм микропроцессорного устройства. Такая необходимость может быть вызвана требованиями к уровню инструментальной погрешности: при измерении частоты напряжения по переходам сигнала мгновенного значения напряжения через нулевое значение необходима высокая частота опроса АЦП. В свою очередь, при таком

способе измерения само значение частоты напряжения может обновляться только 3 раза за период частоты напряжения при работе измерителя по трем сигналам фазного напряжения и регистрации перехода через ноль только в одном направлении.

В рассмотренном примере основной алгоритм регулирования и работа АЦП измерителей напряжения статора и тока ротора генератора синхронизированы относительно перехода через 0 линейного напряжения U_{ab} и производятся 24 раза за период напряжения. Алгоритмы работы СУТ должны быть синхронизированы относительно напряжения источника питания (напряжение синхронизации), регулирующее значение которых обновляется не чаще 6 раз за период (количество плеч выпрямительного моста).

Еще одной особенностью микропроцессорных устройств является реализация алгоритмов в конечно-разностных уравнениях. В связи с этим возникает необходимость преобразования непрерывных фильтров в операторном виде к дискретному виду, что дополнительно открывает возможность использования КИХ-фильтров в основном алгоритме управления. Такое преобразование чаще всего осуществляется методом прямой разности, но может быть осуществлено и методом обратной разности или билинейным преобразованием [64].

В отечественной практике, в отличие от зарубежной, принято разделять математическую модель АРВ СД и возбудителя. В случае микропроцессорных АРВ СД это может быть достаточно проблематично, так как функции по управлению тиристорами осуществляются средствами АРВ СД и присутствуют в основном законе регулирования, хотя функционально их принято относить к возбудителю. Для упрощения, в данном примере выходом АРВ СД принят выход с последнего сумматора АРВ СД, а СУТ представлена в виде условного блока и отнесена к модели возбудителя.

В соответствии с требованиями Стандарта [7] производители предоставляют на сертификацию ЧХ промышленных образцов АРВ СД и их математические модели, предназначенные для задач расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме. Опыт сертификационных испытаний микропроцессорных АРВ СД зарубежного производства на соответствие требованиям Стандарта [7] показал, что в подавляющем большинстве случаев и предоставляемые производителем ЧХ и ЧХ, получаемые с помощью этих математических моделей, значительно отличаются от экспериментальных ЧХ. Это происходит потому, что при разработке математических моделей АРВ СД производитель:

- не учитывает в математической модели АРВ СД как все реально существующие фильтры цифровых измерителей, так и влияние эффектов, возникающих при преобразовании фильтров в операторном виде к дискретному виду;
- применяет грубые аппроксимации дискретных фильтров;

- не учитывает запаздывание, возникающее при обмене данными через буфер обмена;
- подменяет экспериментальные ЧХ полученными аналитически или с помощью специального отладочного аналогового входа и выхода АРВ СД;
- предоставляет техническую документацию, содержащую неполное описание алгоритма работы АРВ СД, либо несоответствующую промышленному образцу АРВ СД;
- допускает ошибки в программном коде промышленного образца микропроцессорного АРВ СД, приводящие к некорректной реализации задуманного закона управления.

Математические модели, полученные с помощью таких ЧХ, не соответствуют требованиям Стандарта [7] по точности и не могут использоваться для выбора параметров настройки АРВ СД, так как их использование может привести к некорректным результатам анализа колебательной устойчивости [46].

По этой причине по разработанной в АО «НТЦ ЕЭС» методике [65] проводятся эксперименты по получению ЧХ промышленного образца микропроцессорного АРВ СД. Методикой [65] предусмотрено получение ЧХ всей цепочки элементов внутренней структуры АРВ СД, что позволяет устранить последствия указанных выше проблем. Однако в связи с этим возникает несколько новых задач:

- задача получения универсальной математической модели в непрерывном операторном виде промышленного образца микропроцессорного АРВ СД по его описанию, при этом качество совпадения математической модели с промышленным образцом должно сохраняться при изменении значений параметров настройки АРВ СД;
- задача подготовки программы испытаний промышленного образца микропроцессорного АРВ СД, позволяющей выполнить проверку достоверности его математической модели;
- задача коррекции математической модели АРВ СД по экспериментально полученным ЧХ при негативном результате проверки.

Задача создания и верификации цифровой модели микропроцессорного АРВ СД в выбранном ПВК расчета переходных процессов в энергосистеме или специализированном ПВК анализа колебательной устойчивости энергосистем на основе его достоверной математической модели в диссертационной работе не рассматривается по причине ее тривиальности.

2.2 Методика создания математических моделей микропроцессорных АРВ СД

2.2.1 Область применения

Методика создания математических моделей микропроцессорных АРВ СД разработана с целью повышения качества выполняемых работ с использованием математических моделей АРВ СД, включая анализ колебательной устойчивости, и предназначена для создания математических моделей промышленных образцов микропроцессорных APB СЛ с использованием их технического описания и проведением экспериментов с промышленными образцами. Настоящая методика предназначена для использования научными и научнотехническими специалистами, при разработке ими математических моделей микропроцессорных АРВ СД, предназначенных для анализа электромеханических переходных процессов в энергосистеме и анализа колебательной устойчивости энергосистем.

Методика создания математических моделей микропроцессорных АРВ СД:

- учитывает особенности работы дискретных устройств в достаточном объеме для создания математических моделей микропроцессорных АРВ СД с целью выбора их параметров настроек;
- преполагает наличие технической документации на промышленный образец микропроцессорного АРВ СД;
- требует применения алгоритма аппроксимации методом наиманьших квадратов и алгоритма аппроксимации на основе теоремы Паде;
- используется для создания верифицированных цифровых моделей АРВ СД, необходимых в методике выбора параметров настройки микропроцессорных АРВ СД, обеспечивающих колебательную устойчивость в широком многообразии схемнорежимных условий работы энергообъединения сложной структуры.

Настоящая методика устанавливает:

- порядок создания математической модели промышленного образца микропроцессорного АРВ СД;
- порядок подготовки программы испытаний промышленного образца микропроцессорного АРВ СД;
- порядок проверки и корректировки математической модели по экспериментальным ЧХ промышленного образца микропроцессорного АРВ СД.

Настоящая методика не устанавливает:

- распределение функций и порядок взаимодействия между различными организациями при сборе исходных данных, проверке результатов, проведении экспериментов с промышленным образцом микропроцессорного АРВ СД;
- создание и верификацию цифровой модели микропроцессорного АРВ СД в выбранном ПВК расчета переходных процессов в энергосистеме или специализированном ПВК анализа колебательной устойчивости энергосистем на основе его достоверной математической модели.

Настоящая методика не может быть применена для создания математической модели промышленного образца микропроцессорного АРВ СД:

- при наличии существенного количества ошибок и неточностей в предоставленной производителем технической документации;
- при отсутствии технической документации.

При отсутствии технической документации или при наличии в ней существенного количества ошибок настоящая методика позволяет лишь:

- составить список экспериментов, необходимых для создания математической модели промышленного образца микропроцессорного АРВ СД экспертным способом;
- получить математическую модель промышленного образца микропроцессорного APB СД лишь при тех постоянных времени, при которых проведены эксперименты по получению ЧХ (при этом будет корректно учтено вляние коэффициентов усиления каналов регулирования).

В приложении *В* приведены блок-схемы разработанной методики создания математических моделей микропроцессорных АРВ СД, а в настоящем разделе диссертационной работы приведено ее описание с подробными комментариями и иллюстративными примерами.

2.2.2 Общие замечания

Задача получения передаточной функции канала регулирования в непрерывном операторном виде по его экспериментальным полученным ЧХ может быть решена путем аппроксимации этих ЧХ методом наименьших квадратов (МНК) и на основе теоремы Паде по алгоритмам, изложенным в главе 3 [66, 67].

Пренебрегая нелинейностью функций цифровых измерителей, каждый канал регулирования на первом этапе упрощения возможно представить в виде, представленном на рисунке 2.2.



W_{Mp} – передаточная функция в операторном виде, учитывающая характеристики АФ; *W_{Mz}* – передаточная функция
в дискретном виде, учитывающая характеристики ЦФ измерителя режимного параметра; *W_{discr}* – передаточная
функция в операторном виде, учитывающая дополнительные задержки, которые возникают в результате
циклического характера работы алгоритма и наличием буферов обмена данных; *W_R* – передаточная функция в
дискретном виде канала регулирования, учитывающая характеристики канала регулировния в зависимости от
параметров настройки; *K_R* – коэффициент усиления канала регулирования

Рисунок 2.2 – Представление математической модели канала

регулирования АРВ СД до упрощения

Однако представление в таком виде не отвечает требованиям решаемой задачи, в соответствии с которыми необходимо провести дополнительные упрощения. Каждый канал регулирования после проведения дополнительных упрощений представляется в виде, приведенном на рисунке 2.3.



 $W_M(p)$ – 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 2.3 – Представление математической модели канала регулирования АРВ СД после упрощения

В зависимости от условий проведения эксперимента, возможно три различных варианта создания математической модели АРВ СД с представлением каналов регулирования в соответствии с рисунком 2.3:

- 1. получение ЧХ промышленного образца микропроцессорного АРВ СД не представляется возможным, есть только его техническое описание;
- имеется техническое описание АРВ СД и во время получения ЧХ промышленного образца микропроцессорного АРВ СД возможно измерение только значения его выходного сигнала;
- имеется техническое описание АРВ СД и во время получения ЧХ промышленного образца микропроцессорного АРВ СД возможно как измерение значения его выходного сигнала, так и значений сигналов с промежуточных точек из структуры АРВ СД посредством специальных отладочных выходов.

Варианты создания математической модели промышленного образца микропроцессорного АРВ СД расположены в порядке убывания сложности по получению качественного результата. Во всех вариантах создание математической модели проводится на основе предоставленной производителем технической документации в соответствии со списком, приведенным в Стандарте [7].

В первом варианте выполнение экспериментальной проверки созданной математической модели промышленного образца микропроцессорного АРВ СД не представляется возможным.

Во втором варианте методика получения ЧХ позволяет получить ЧХ канала регулирования совместно с измерителями, что позволяет выполнить проверку созданной математической модели промышленного образца микропроцессорного АРВ СД. Однако, для данного варианта не во всех случаях гарантируется получение математической модели промышленного образца микропроцессорного АРВ СД с возможностью корректного учета влияния постоянных времени на динамические характеристики математической модели – в таких случаях гарантируется получение математической модели – в таких случаях гарантируется получение математической модели промышленного образца микропроцессорного АРВ СД лишь при тех постоянных времени, при которых проведены эксперименты по получению ЧХ.

В третьем варианте при наличии ограниченного количества ошибок и неточностей в предоставленной производителем технической документации гарантируется создание математической модели промышленного образца микропроцессорного АРВ СД с возможностью корректного учета влияния всех параметров на статические и динамические характеристики АРВ СД.

2.2.3 Создание математической модели АРВ СД на основе документации

Создание математической модели АРВ СД на основе документации выполняется вне зависимости от возможности проведения экспериментов с промышленным образцом, то есть для всех вариантов создания математической модели АРВ СД.

Сначала алгоритмы функционирования АРВ СД по имеющейся документации представляются в виде функциональной схемы в виде, приведенном на рисунке 2.1. Затем с использованием алгоритмов аппроксимации каждый из элементов схемы замещается динамическим звеном в операторном виде.

Параметры передаточных функций аналоговых антиалайзинговых фильтров $W_{Mp}(p)$ рассчитываются исходя из фактических значений параметров *RC*-цепочек. Если параметры *RC*цепочек неизвестны, то, исходя из предназначения фильтров, они представляются в виде апериодического звена с постоянной времени $T_{RC} = h/2$, где h – период опроса АЦП.

АЦП в математической модели замещается звеном экстраполятора нулевого порядка (zero-order hold) с постоянной времени, равной периоду дискретизации АЦП h: $W_{zoh}(p,h) = (1 - e^{-x \cdot p})/x \cdot p$. Квантование сигнала по уровню в математической модели АРВ СД не учитывается.

Передача данных из одной подпрограммы в другую осуществляется через буфер обмена. Для описания схем замещения буферов обмена данными воспользуемся обозначениями: h_{write} – время цикла работы подпрограммы, производящей запись; h_{read} – время цикла работы подпрограммы, производящей чтение; n – любое целое число. Асинхронный буфер обмена данными замещается экстраполятором нулевого порядка $W_{zoh}(p,h)$ с постоянной времени h_{read} . Синхронный буфер обмена данными:

- при $h_{read} \le h_{write}$ 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 $W_{zoh}(p, h_{read})/W_{zoh}(p, h_{write})$;
- в остальных случаях замещается экстраполятором нулевого порядка $W_{zoh}(p,h)$ с постоянной времени h_{read} .

Алгоритм расчета первичных измерений режимных параметров (действующее значение тока и напряжения статора, угол нагрузки, частота напряжения статора) представляется в виде линейного динамического звена в операторном виде. При отсутствии конкретной информации об алгоритмах работы измерителей следует использовать следующие динамические звенья:

- для измерителя значения прямой последовательности первой гармоники напряжения и тока *W_{zoh}(p*,0.02);
- для измерителя фазового угла между векторами прямой последовательности первой гармоники напряжения и тока (*W*_{zoh}(*p*,0.02))²;
- для измерителя частоты напряжения статора только по положительным (или только по отрицательным) переходам через ноль на периоде W_{zoh}(p,0.02). Необходимо дополнительно учесть период обновления измерения звеном W_{zoh}(p,0.02) в случае измерения только по одной фазе и звеном W_{zoh}(p,0.02/3) в случае измерения по всем трем фазам;↓↑
- для измерителя частоты напряжения статора и по положительным и по отрицательным переходам через ноль на периоде – W_{zoh}(p,0.02). Необходимо дополнительно учесть период обновления измерения звеном W_{zoh}(p,0.01) в случае измерения только по одной фазе и звеном W_{zoh}(p,0.01/3) в случае измерения по всем трем фазам;
- для измерителя частоты напряжения статора по периоду между положительным и отрицательным переходом через ноль (на полупериоде) W_{zoh}(p,0.01). Необходимо дополнительно учесть период обновления измерения звеном W_{zoh}(p,0.01) в случае измерения только по одной фазе и звеном W_{zoh}(p,0.01/3) в случае измерения по всем трем фазам.

Измерители режимных параметров, рассчитываемые через другие режимные параметры, задаются соответствующими зависимостями. Если в АРВ СД в качестве сигнала стабилизации

используется сигнал по частоте вращения ротора ω и конкретный алгоритм его расчета или способ измерения неизвестен, то его измеритель выполняется по следующей формуле:

$$\omega = f_U + \frac{p}{1 + 0.02p} \cdot \arctan\left(\frac{P \cdot x_q}{Q \cdot x_q + U^2}\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50}, \text{ o.e.,}$$
(2.1)

где f_U – измеренное значение частоты напряжения статора генератора, о.е,

P, *Q* – измеренное значение активной и реактивной мощности генератора соответственно, о.е.,

U-измеренное значение напряжения статора генератора, о.е.,

x_q – паспортное значение синхронного индуктивного сопротивления генератора по поперечной оси, о.е.

Каналы регулирования АРВ СД представляются в виде набора элементарных динамических звеньев с указанием их связей в соответствии с технической документацией. Все фильтры на структурных схемах в технической документации, представленные в операторном виде, в большинстве случаев реализованы в промышленном образце микропроцессорного АРВ СД дискретными фильтрами с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтры). Параметры этих фильтров получаются в результате преобразования методом прямой разности, обратной разности или билинейным преобразованием [64]. Конкретный метод дискретизации уточняется у производителя, в отсутствии таких данных принимается, что было использовано преобразование методом прямой разности. Далее для каждого динамического звена проводится сама аппроксимация [68] в соответствии с информацией в подразделе 3.3:

- Для БИХ-фильтров с периодом дискретизации *h* как минимум в 5 раз меньшим, чем наименьшая постоянная времени звена 5·*h* < min(T1, T2...), применяется представление этого фильтра до дискретизации.
- Для БИХ-фильтров с 5·h > min(T1, T2...) применяется аппроксимация Паде с минимально возможным порядком, учитывающим h. Например, для апериодического звена и его дискретизации методом прямой разности: W_{an1/1}(p) = 0.5 · h · p + 1/(T + 0.5 · h) · p + 1.
- Для КИХ-фильтра звена производной по формуле дифференцирования многочлена наилучшим среднеквадратичным приближением к результатам измерений (далее «производная») при T ≤ 0.02 с применяется аппроксимация Паде W_{an1/0}(p)= p · e^{-p·T}. При этом оператор дифференцирования p необходимо перенести в ближайшее в структурной схеме апериодическое звено.

- Для КИХ-фильтра «производная» при $0.02 < T \le 0.12$ с применяется аппроксимация Паде: $W_{anl/2}(p) = \frac{p \cdot e^{-p \cdot 0.2 \cdot T}}{0.22 \cdot (T \cdot p)^2 + 0.8 \cdot T \cdot p + 1}$.
- Для КИХ-фильтра «производная» при $0.12 < T \le 0.3$ с применяется аппроксимация Паде: $W_{an2/3}(p) = \frac{15 \cdot p \cdot (T \cdot p + 35)}{41 \cdot (T \cdot p)^3 + 225 \cdot (T \cdot p)^2 + 540 \cdot T \cdot p + 525}.$
- Для КИХ-фильтра скользящего среднего (суммирующий фильтр) при $T \le 0.04$ с применяется аппроксимация Паде: $W_{an0/1}(p) = \frac{e^{-p \cdot 0.2 \cdot T}}{0.3 \cdot T \cdot p + 1}$.
- При наличии прочих фильтров применяется известная и максимально простая аппроксимация, обеспечивающая необходимую точность.

2.2.4 Дальнейшие действия для варианта 1

Данные действия выполняются в том случае, когда получение ЧХ промышленного образца микропроцессорного АРВ СД не представляется возможным, есть только его техническое описание.

Сначала проводится создание математической модели АРВ СД на основе технической документации по методике в подразделе 2.2.3.

Далее проводится процедура понижения дифференциального порядка математической модели путем применения алгоритмов аппроксимации. Все динамические звенья математической модели, параметры которых задаются как настроечные, оставляются без изменений. Все остальные динамические звенья аппроксимируются совместно по алгоритмам, реализующим метод на основе теоремы Паде либо метод наименьших квадратов (см. главу 3) таким образом, чтобы погрешность аппроксимации динамических звеньев соответствовала выбранному требованию по точности, а порядок аппроксимации был минимальным.

2.2.5 Дальнейшие действия для варианта 2

Данные действия выполняются в том случае, когда имеется техническое описание APB СД и во время получения ЧХ промышленного образца микропроцессорного APB СД возможно измерение только значения его выходного сигнала.

Сначала проводится создание математической модели АРВ СД на основе технической документации по методике в подразделе 2.2.3.

Далее проводятся эксперименты по получению ЧХ каналов регулирования $W_{Ch}(\omega)$ промышленного образца микропроцессорного АРВ СД как минимум для трех наборов параметров настроек АРВ СД:

- для предустановленного набора параметров настроек;
- для набора параметров настроек максимально реализующего форсирующие способности каналов регулирования;
- для набора параметров настроек минимально реализующего форсирующие способности каналов регулирования.

Под форсирующей способностью канала регулирования понимается соотношение усиления на высоких частотах к усилению на низких частотах данного канала регулирования. В данном случае обеспечивается получение ЧХ каналов регулирования АРВ СД совместно с измерителями: $W_{Ch}(\omega) = W_M(\omega) \cdot W_R(\omega)$ (см. рисунок 2.3).

Если оценка погрешности в соответствии с выбранным критерием оказывается неудовлетворительной хотя бы для одного из наборов параметров настроек, повышается порядок аппроксимации для динамических звеньев. Если после этого оценка погрешности продолжает оставаться неудовлетворительной, то с участием производителя уточняется структура канала регулирования и способ представления фильтров в дискретном виде.

Если после этого оценка погрешности продолжает оставаться неудовлетворительной и величина погрешности имеет близкую величину для всех наборов параметров настроек, то возможно «перенесение» погрешности математической модели канала регулирования в передаточную функцию измерителя $W_{M_err}(\omega)$. По данным опыта с предустановленным набором параметров настроек необходимо рассчитать передаточную функцию измерителя с «перенесенной» в него погрешностью по следующей формуле:

$$W_{M err}(\omega) = W_{Chl}(\omega) / W_{Rl}(\omega), \qquad (2.2)$$

где $W_{Ch1}(\omega)$ – экспериментально полученная ЧХ канала регулирования для опыта с предустановленным набором настроек,

 $W_{RI}(\omega)$ – математическая модель канала регулирования для опыта с предустановленным набором настроек.

Очевидно, что оценка погрешности математической модели канала регулирования для опыта с предустановленным набором настроек покажет величину 0%. Далее выполнятся оценка погрешности математической модели каналов регулирования, полученных при других наборах

параметров настройки с учетом уже рассчитанной передаточной функции измерителя $W_{M_{err}}(\omega)$.

Если оценка погрешности математической модели канала регулирования хотя бы для одного из наборов параметров настроек будет неудовлетворительной в соответствии с выбранным критерием или функция $W_{M_err}(\omega)$ получилась физически нереализуемая, то задача создания математической модели канала регулирования с учетом влияния параметров настройки на его динамические характеристики не может быть выполнена.

В таком случае для одного из наборов параметров настройки используется аппроксимация МНК для канала регулирования совместно с измерителями $W_{Ch}(\omega)$. При этом полученная математическая модель канала регулирования не будет позволять изменение постоянных времени фильтров в процессе выбора его параметров настройки.

В конце проводится процедура понижения дифференциального порядка математической модели путем применения алгоритмов аппроксимации. Все динамические звенья математической модели, параметры которых задаются как настроечные, оставляются без изменений. Все остальные динамические звенья аппроксимируются совместно по алгоритмам, реализующим метод на основе теоремы Паде либо метод наименьших квадратов (см. главу 3) таким образом, чтобы погрешность аппроксимации динамических звеньев соответствовала выбранному требованию по точности, а порядок аппроксимации был минимальным.

2.2.6 Дальнейшие действия для варианта 3

Данные действия выполняются в том случае, когда имеется техническое описание APB СД и во время получения ЧХ промышленного образца микропроцессорного APB СД возможно как измерение значения его выходного сигнала, так и значений сигналов с промежуточных точек из структуры APB СД посредством специальных отладочных выходов.

Сначала проводится создание математической модели АРВ СД на основе технической документации по методике в подразделе 2.2.3.

Далее проводятся эксперименты по получению ЧХ каналов регулирования $W_{Ch}(\omega)$ промышленного образца микропроцессорного АРВ СД как минимум для трех наборов параметров настроек АРВ СД:

- для предустановленного набора параметров настроек;
- для набора параметров настроек максимально реализующего форсирующие способности каналов регулирования;
для набора параметров настроек минимально реализующего форсирующие способности каналов регулирования.

Под форсирующей способностью канала регулирования понимается соотношение усиления на высоких частотах к усилению на низких частотах данного канала регулирования. В данном случае обеспечивается получение отдельно ЧХ каналов регулирования АРВ СД $W_R(\omega)$ от ЧХ измерителей $W_M(\omega)$ (см. рисунок 2.3). Так как передаточные функции измерителей $W_M(\omega)$ не предполагают изменения своих параметров настройки в процессе эксплуатации, то для них применяется аппроксимация МНК (см. главу 3) по экспериментально полученным ЧХ этих измерителей. В АРВ СД могут возникать дополнительные задержки при приеме и передаче аналоговых сигналов через интерфейс ввода-вывода в обход измерителей режимных параметров и СУТ. Также в АРВ СД могут применяться алгоритмы в СУТ, вносящие дополнительное запаздывание, когда разрабатываемая методика позволяет выявить данную задержку только при получении ЧХ каналов регулирования совместно с измерителями. В связи с этим, предпочтительно получение ЧХ каналов регулирования совместно с измерителями. Получение экспериментальных ЧХ отдельных динамических звеньев, используя промежуточные точки из структуры АРВ СД посредством специальных отладочных выходов, необходимо лишь для уточнения их математических моделей в случае выявления неудовлетворительной величины погрешности.

Если оценка погрешности в соответствии с выбранным критерием оказывается неудовлетворительной хотя бы для одного из наборов параметров настроек, повышается порядок аппроксимации для динамических звеньев. Если после этого оценка погрешности продолжает оставаться неудовлетворительной, то с участием производителя уточняется структура канала регулирования и способ представления фильтров в дискретном виде, а также выполняется проверка передаточных функций математической модели каналов регулирования АРВ СД в отдельности, используя промежуточные точки из структуры АРВ СД посредством специальных отладочных выходов.

Если после этого оценка погрешности продолжает оставаться неудовлетворительной и величина погрешности имеет близкую величину для всех наборов параметров настроек, то возможно «перенесение» погрешности математической модели канала регулирования в передаточную функцию измерителя $W_{M_err}(\omega)$. По данным опыта с предустановленным набором параметров настроек необходимо рассчитать передаточную функцию измерителя с «перенесенной» в него погрешностью по формуле (2.2).

Далее выполнятся оценка погрешности математической модели каналов регулирования, полученных при других наборах параметров настройки с учетом уже рассчитанной передаточной функции измерителя $W_{M \ err}(\omega)$.

Если оценка погрешности математической модели канала регулирования хотя бы для одного из наборов параметров настроек будет неудовлетворительной в соответствии с выбранным критерием или функция $W_{M_{err}}(\omega)$ получилась физически нереализуемая, то задача создания математической модели канала регулирования с учетом влияния параметров настройки на его динамические характеристики не может быть выполнена.

В таком случае для одного из наборов параметров настройки используется аппроксимация МНК для канала регулирования совместно с измерителями $W_{Ch}(\omega)$. При этом полученная математическая модель канала регулирования не будет позволять изменение постоянных времени фильтров в процессе выбора его параметров настройки.

В конце проводится процедура понижения дифференциального порядка математической Bce модели применения алгоритмов аппроксимации. динамические путем звенья математической модели, параметры которых задаются как настроечные, оставляются без изменений. Все динамические звенья математической модели, параметры которых задаются как настроечные, оставляются без изменений. Bce остальные динамические звенья аппроксимируются совместно по алгоритмам, реализующим метод на основе теоремы Паде либо метод наименьших квадратов (см. главу 3) таким образом, чтобы погрешность аппроксимации динамических звеньев соответствовала выбранному требованию по точности, а порядок аппроксимации был минимальным.

2.3 Результат создания модели тестового образца АРВ СД по разработанной методике

Экспериментальное получение ЧХ каналов регулирования и создание математической модели выполнено для промышленного образца АРВ СД «отечественной структуры» по варианту 2 (см. выше), согласно которому во время получения ЧХ промышленного образца микропроцессорного АРВ СД возможно измерение только значения его выходного сигнала. Подробно процедура получения экспериментальных ЧХ промышленного образца микропроцессорного АРВ СД описана в [65]. Производителем предоставлена математическая модель промышленного образца микропроцессорного АРВ СД.

74



*U*_Γ – напряжение статора генератора, *f*_Γ – частота напряжения статора генератора, *I*_{*f*}_Γ – ток ротора генератора; *K*0*U*, *K*1*U*, *K*0*F*, *K*1*F*, *K*1*IF*, – коэффициенты усиления пропорционального и дифференциального каналов по отклонению напряжения статора, пропорционального и дифференциального каналов по отклонению частоты напряжения, дифференциального канала по току ротора; *T*_{*f*U1_1}, *T*_{*f*U1_2}, *T*_{*f*F0_1}, *T*_{*f*F0_2}, *T*_{*f*F1_1}, *T*_{*f*F1_2}, *T*_{*f*F1_1} – постоянные времени соответствующих каналов, *T*_{*I*} – постоянная времени интегратора в общем канале регулирования

Рисунок 2.4 – Предоставленная производителем математическая модель промышленного образца микропроцессорного АРВ СД

Согласно [65] промышленный образец микропроцессорного АРВ СД подключен к интерфейсным блокам ПАК РВ *RTDS*, где далее выполнена настройка его измерительных органов. В специально разработанной цифровой модели энергосистемы, работающей в режиме реального времени с подключенным к ней промышленным образцом микропроцессорного APB СД, проведены эксперименты, позволяющие получить ЧХ по каждому из каналов регулирования.

Для верификации математической модели АРВ СД эксперименты проведены для разных значений его параметров настройки согласно таблице 2.1.

Канал	Значения параметров настройки
Пропорционально-интегральный канал по отклонению напряжения статора (<i>K</i> 0 <i>U</i> , <i>T</i> ₁) ²	$K0U = 2$ e.B.H./e.B.c., $T_I = 2$ c ³
	$K0U = 5 \text{ e.B.H./e.B.c.}, T_I = 2 \text{ c}$
	$K0U = 10 \text{ e.B.H./e.B.c.}, T_I = 2 \text{ c}$
	$K0U = 2 \text{ e.B.H./e.B.c.}, T_I = 1 \text{ c}$
	$K0U = 5$ e.B.H./e.B.c., $T_I = 1$ c
	$K0U = 10 \text{ e.B.H./e.B.c.}, T_I = 1 \text{ c}$
Дифференциальный канал по отклонению напряжения статора (<i>K</i> 1 <i>U</i>)	$K1U = 2$ е.в.н./(е.в.с./с), $T_{fU1 \ 1} = 50$ мс, $T_{fU1 \ 2} = 50$ мс
	$K1U = 4 \text{ e.B.H.}/(\text{e.B.c./c}), T_{fU1_1} = 50 \text{ Mc}, T_{fU1_2} = 50 \text{ Mc}$
	$K1U = 2$ е.в.н./(е.в.с./с), $T_{fU1 \ 1} = 100$ мс, $T_{fU1 \ 2} = 50$ мс
	$K1U = 2 \text{ e.B.H.}/(\text{e.B.c./c}), T_{fU1 \ 1} = 100 \text{ Mc}, T_{fU1 \ 2} = 100 \text{ Mc}$
Пропорциональный канал по отклонению частоты напряжения статора (K0F)	$K0F = 2$ е.в.н./Гц, $T_{fF0 \ 1} = 50$ мс, $T_{fF0 \ 2} = 2500$ мс
	$K0F = 4$ е.в.н./Гц, $T_{fF0\ 1} = 50$ мс, $T_{fF0\ 2} = 2500$ мс
	$K0F = 4$ е.в.н./Гц, $T_{fF0 \ 1} = 50$ мс, $T_{fF0 \ 2} = 1250$ мс
	$K0F = 4$ е.в.н./Гц, $T_{fF0_1} = 5$ мс, $T_{fF0_2} = 1250$ мс
Дифференциальный канал по отклонению частоты напряжения статора (<i>K</i> 1 <i>F</i>)	$K1F = 1$ е.в.н./(Гц/ c), $T_{fF1 \ 1} = 200$ мс, $T_{fF1 \ 2} = 200$ мс
	$K1F = 2$ е.в.н./(Гц/ <i>c</i>), $T_{fF1 \ 1} = 200$ мс, $T_{fF1 \ 2} = 200$ мс
	$K1F = 1$ е.в.н./(Гц/ <i>c</i>), $T_{fF1 \ 1} = 400$ мс, $T_{fF1 \ 2} = 200$ мс
	$K1F = 1$ е.в.н./(Гц/ <i>c</i>), $T_{fF1 \ 1} = 200$ мс, $T_{fF1 \ 2} = 500$ мс
Дифференциальный канал по току ротора (<i>K</i> 1 <i>IF</i>)	$K1IF = 2, Ti = 2 \text{ с}, T_{fIF 1} = 50 \text{ мс}, T_{fIF 2} = 50 \text{ мс}$
	$K1IF = 4$, $Ti = 2$ c, $T_{fIF 1} = 50$ mc, $T_{fIF 2} = 50$ mc
	$K1IF = 2, Ti = 2 c, T_{fIF_1} = 100 мс, T_{fIF_2} = 50 мс$
	$K1IF = 2, Ti = 2 \text{ с}, T_{fIF_1} = 50 \text{ мс}, T_{fIF_2} = 200 \text{ мс}$

Таблица 2.1 – Программа экспериментов по получению экспериментальных ЧХ АРВ СД

На рисунке 2.5 приведены в общем виде динамические звенья измерительного тракта промышленного образца микропроцессорного АРВ СД, не учтенные производителем в предоставленной им математической модели. Зеленым цветом показаны динамические звенья, описание которых присутствует в технической документации производителя, но не учтенные им в математической модели (например, усредняющие суммирующие фильтры). Синим – динамические звенья, наличие которых обусловлено дискретностью выполнения алгоритма промышленного образца микропроцессорного АРВ СД. Оранжевым – динамические звенья, не отраженные в технической документации производителя.

² Для пропорционального канала (с учетом интегратора в общем канале регулирования АРВ СД) по отклонению напряжения статора выполнено избыточное количество тестов, так как эти каналы регулирования всегда остаются в работе, в результате чего в погрешности определения ЧХ других каналов оказывается заложенной погрешность определения ЧХ пропорционального канала регулирования по отклонению напряжения статора

³ Полужирным шрифтом выделены параметры настройки, для которых приведены рисунки ЧХ



зеленым цветом показаны динамические звенья, описание которых присутствует в технической документации производителя, но не учтенные им в математической модели; **синим** цветом – динамические звенья, наличие которых обусловлено дискретностью выполнения алгоритма; **оранжевым** цветом – динамические звенья, не отраженные в технической документации производителя; *zoh* – динамическое звено, аппроксимирующее экстраполятор нулевого порядка (*zero-order-hold*); *sum* – динамическое звено, аппроксимирующее суммирующий фильтр; *del* – звено задержки сигнала

Рисунок 2.5 – Дополнительные динамические звенья итоговой математической модели, полученные с помощью разработанной методики и проверенные по экспериментальным ЧХ

На рисунке 2.6⁴ приведены ЧХ каждого из каналов регулирования АРВ СД:

- 1) промышленного образца микропроцессорного АРВ СД, полученные экспериментально с использованием ПАК РВ *RTDS* (эксп.)
- математической модели АРВ СД, полученные по разработанной автором методике (апрокс.). Полная математическая модель каналов регулирования включает закон регулирования (см. рисунок. 2.4) и дополнительные динамические звенья (см. рисунок. 2.5);
- математической модели АРВ СД, предоставленной производителем (произв.) (см. рисунок. 2.4).

⁴ Частотные характеристики приведены с учетом интегратора в общем канале АРВ СД



б) дифференциальный канал по отклонению напряжения статора

1

-4

10

0

0.1



г) пропорциональный канал по отклонению частоты напряжения статора



д) дифференциальный канал по отклонению частоты напряжения статора
 Рисунок 2.6 – ЧХ каналов регулирования промышленного образца
 микропроцессорного АРВ СД

На рисунке 2.7 приведен результат расчета погрешности для всех каналов регулирования математической модели АРВ СД, полученной по разработанной автором методике (апрокс.) и предоставленной производителем АРВ СД (произв.). Расчет погрешностей в каждой экспериментально полученной точке выполнен по формуле [7]:

$$\delta_i = \frac{\left|\Delta r_i\right| + \left|r_i \cdot \Delta \varphi_i\right|}{r_{\max}},\tag{2.3}$$

где *i* – точка экспериментально полученной ЧХ;

 δ_i – погрешность математической модели канала регулирования АРВ СД в каждой *i*-ой точке;

r_i – значение экспериментальной АЧХ канала регулирования АРВ СД в каждой *i*-ой точке;

 Δr_i – отклонение значения АЧХ математической модели канала регулирования от соответствующего значения экспериментальной АЧХ канала регулирования АРВ СД в каждой *i*-ой точке;

 $\Delta \varphi_i$ – отклонение значения ФЧХ математической модели канала регулирования от соответствующего значения экспериментальной ФЧХ канала регулирования АРВ в каждой *i*-ой точке (в радианах);

*r*_{max} – максимальное значение экспериментальной АЧХ канала регулирования АРВ СД.



Рисунок 2.7 – Относительная погрешность в процентах для обеих математических моделей

Согласно Стандарту [7] математическая модель АРВ СД признается достоверной, если погрешность, рассчитанная по формуле (2.3), не превышает 10 % в каждой экспериментально полученной точке. Из рисунка 2.7 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 [7] и не позволяет использовать ее для выбора параметров настройки АРВ СД.

Математическая модель, полученная с помощью разработанной автором методики, удовлетворяет требованиям Стандарта [7] и может использоваться для выбора параметров настройки АРВ СД. Математическая модель сохраняет достоверность при всех приведенных в таблице 2.1 наборах параметров настройки АРВ СД.

2.4 Выводы

Для выполнения расчетов электромеханических переходных процессов с целью анализа колебательной устойчивости и выбора параметров настройки APB CД требуется создание его достоверной математической модели. Математические модели APB CД, предоставляемые производителями, часто не соответствуют требованиям Стандарта [7] по точности и не могут использоваться для выбора параметров настройки APB CД, так как их использование может привести к некорректным результатам анализа колебательной устойчивости [46].

В диссертационной работе разработана методика создания достоверных математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД [69]. Методика основана на

81

создании максимально подробной универсальной математической модели АРВ СД по техническому описанию АРВ СД, которая упрощается путем точной аппроксимации ее отдельных элементов, проверяется и в случае необходимости корректируется по экспериментальным ЧХ промышленного образца микропроцессорного АРВ СД, полученным по специально подготовленной программе испытаний. Методика позволяет получать достоверные математические модели промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД для анализа колебательной устойчивости и выбора параметров настройки АРВ СД.

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.

С использованием методики создания достоверных математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД реализуются все цифровые модели АРВ СД в ПВК *Eurostag* и ПВК *RUStab* начиная с 2017 года, проходящие сертификационные испытания в АО «НТЦ ЕЭС» на соответствие требованиям Стандарта [7], а именно АРВ типа: *AVR*-45M, APB-PЭM700, *THYRIPOL*, *Unitrol* 6800, *EX*2100, OBaция APB-1100, *THYNE*1, *THYRIPOL* 6*RV*80. Данные цифровые модели APB СД:

- используются в АО «СО ЕЭС» и АО «НТЦ ЕЭС» при расчетах электромеханических переходных процессов;
- используются в АО «НТЦ ЕЭС» для выбора параметров настройки АРВ СД;
- включены в библиотеку стандартных моделей ПВК *RUStab*.

Однако, несмотря высокую степень достоверности самой математической модели АРВ СД, остается погрешность самого подхода математического моделирования с использованием однолинейной схемы замещения элементов ЭЭС, общепринятого в электроэнергетике при расчете электромеханических переходных процессов. Тогда как на АРВ СД в условиях эксплуатации поступают реальные сигналы (токи и напряжения), в которых могут наблюдаться высшие гармоники, субгармоники и несимметрия, что при данном подходе математического моделирования не может быть корректно учтено.

В связи с этим на заключительном этапе работ по выбору параметров настройки APB CД необходимо проведение экспериментов с промышленным образцом микропроцессорного APB CД, подключенным к цифровой модели энергосистемы, реализованной на ЦАФК или ПАК PB *RTDS*. Такой подход позволяет выполнить проверку работы промышленного образца микропроцессорного APB CД с выбранными в цифровой модели энергосистемы параметрами настройки в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации, что позволяет компенсировать указанные недостатки использования цифрового моделирования.

82

3 Вопросы аппроксимации функций комплексного аргумента

Для получения аппроксимации произвольной ЧХ дробно-рациональной функцией в диссертационной работе разработаны алгоритмы на основе метода наименьших квадратов (МНК) и теоремы Паде.

3.1 Оценка погрешности функций комплексного аргумента и требования к точности аппроксимаций

В диссертационной работе возникает необходимость аппроксимации экспериментально полученных ЧХ каналов регулирования АРВ СД и отдельных динамических звеньев его каналов регулирования, а также ЧХ энергосистемы. Для оценки точности аппроксимации необходим функционал, количественно показывающий степень соответствия аппроксимации эталону. Для функций комплексного аргумента таких функционалов может быть множество и каждый из них имеет свои особенности.

Таким образом, необходимо выбрать наиболее подходящий функционал для рассматриваемых в диссертационной работе задач и выбрать его предельное значение, при котором степень соответствия можно считать удовлетворительной.

При анализе колебательной устойчивости энергосистем на частотах колебаний в диапазоне от 0 до 3 Гц необходимо иметь по возможности максимально достоверные математические модели промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД, так как эти частоты колебаний характерны ДЛЯ электромеханических переходных процессов, демпфирование которых является одной из основных функций АРВ СД. В настоящее время как среди отечественных производителей АРВ СД, так и в зарубежной практике [41] по этой причине принято создавать математические модели систем возбуждения и АРВ СД с «достоверностью» в указанном диапазоне частот – от 0 до 3 Гц. Такие математические модели получаются достаточно простыми и их создание у производителей АРВ СД не вызывает больших сложностей. Опыт эксплуатации АРВ СД же показывает, что в определенных случаях возможно возникновение незатухающих колебаний в электромагнитных контурах генератора с высокими частотами – до 6-12 Гц. При анализе колебательной устойчивости энергосистем это вызывает необходимость создавать более точные математические модели промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД в области высоких частот. В связи с этим в отечественном стандарте «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов» [7] были приняты более жесткие требования к достоверности представления математических моделей АРВ СД. При этом в [7] сформулированы конкретные требования по методу расчета погрешности ЧХ каналов регулирования математической модели АРВ СД (см. формулу 2.3), которые устанавливают высокие требования по точности в диапазоне частот до 10 Гц.

Создание математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД с необходимой для обеспечения требований Стандарта [7] точностью является трудоемкой задачей и приводит к усложнению самих математических моделей. Ввиду отсутствия опыта производителей по созданию математических моделей АРВ СД для задач расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме с такой высокой точностью, предоставляемые ими математические модели своих устройств не могут удовлетворить требований Стандарта [7].

Следует отметить, что требования по точности, обозначенные в Стандарте [7], распространяются на ЧХ каналов регулирования АРВ СД, и Стандарт не выдвигает требований по точности иных элементов математической модели энергосистемы. В связи с этим, при анализе колебательной устойчивости с целью выбора параметров настройки АРВ СД помимо оценки точности ЧХ каналов регулирования АРВ СД возникает необходимость оценки точности различного вида функций комплексной переменной, описывающих прочие элементы энергосистемы.

В диссертационной работе для решения различных задач приняты несколько разных функционалов, оценивающих относительную погрешность аппроксимации ЧХ в комплексном виде. Один из функционалов оценивает относительную погрешность по интегральному критерию, который позволяет учитывать погрешность функции комплексного аргумента по амплитуде и по фазе совместно, в диапазоне частот от f_{min} до f_{max} :

$$\delta_{an} = \frac{\int_{\min}^{f_{\max}} |W(j2\pi f) - W_{an}(j2\pi f)| df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} |W(j2\pi f)| df} \cdot 100\%, \qquad (3.1)$$

где $W(j2\pi f)$ – эталонная АФЧХ;

 $W_{an}(j2\pi f)$ – аппроксимирующая АФЧХ;

 f_{min} и f_{max} — пределы диапазона оценки степени соответствия эталонной и аппроксимирующей АФЧХ (пределы интегрирования), f_{min} и f_{max} принимаются равными 0 Гц и 10 Гц соответственно.

При аппроксимации ЧХ энергосистемы, имеющих сложный вид с множеством

колебательных степеней свободы, использован функционал, который оценивает относительную погрешность по интегральному критерию. Он позволяет учитывать погрешность функции комплексной переменной по амплитуде и по фазе совместно, в диапазоне частот от f_{min} до f_{max} в логарифмических координатах:

$$\delta_{an} = \frac{\int_{\min}^{J_{\min}} W(j2\pi f) - W_{an}(j2\pi f) |d\ln(f)}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} W(j2\pi f) |d\ln(f)} \cdot 100\%, \qquad (3.2)$$

где величины f_{min} и f_{max} выбираются из свойств самой аппроксимируемой функции.

В диссертационной работе приняты следующие предельные значения погрешности аппроксимации δ_{an} , полученные по формулам (3.1) и (3.2), в качестве допустимых при аппроксимации ЧХ энергосистемы и отдельных динамических звеньев:

- $\delta_{a\pi} < 5\%$ при $f_{min} = 0$ Гц и $f_{max} = 3$ Гц;
- $\delta_{a\pi} < 15\%$ при $f_{min} = 0$ Гц и $f_{max} = 10$ Гц.

Предложенные величины допустимого значения δ_{an} одновременно позволяют получить «количественно достоверную» математическую модель энергосистемы и отдельных динамических звеньев до 3 Гц и «качественно достоверную» математическую модель в диапазоне до 10 Гц, при этом существенно не усложняя структуру модели.

Более строгие требования к достоверности математической модели представляются нецелесообразными ввиду следующих причин:

- при анализе колебательной устойчивости энергосистем допускается множество других неустранимых погрешностей, на фоне которых бо́льшая достоверность математических моделей ее элементов не представляется значимой, особенно в зоне высоких частот;
- при аппроксимации с излишне жесткими требованиями по достоверности математических моделей элементов энергосистемы возможно появление явления «переаппроксимации», которое приводит к появлению либо физически нереализуемых или численно неустойчивых динамических звеньев, либо к получению динамических звеньев, не несущих в себе полезной информации;
- получение более достоверных математических моделей элементов энергосистемы приводит к неоправданному усложнению самой модели энергосистемы (повышению её дифференциального порядка), что замедляет процесс расчета электромеханических переходных процессов и работы алгоритмов анализа колебательной устойчивости;

 при создании слишком сложных математических моделей элементов энергосистемы увеличивается вероятность незамеченного допущения исследователем технической ошибки, что в итоге снижает общее качество математической модели энергосистемы.

В тексте диссертационной работы в каждом отдельном случае описана используемая формула оценки погрешности функции комплексного аргумента.

3.2 Аппроксимация методом наименьших квадратов

Обзор показал, что в технической литературе по направлению электроэнергетики и теории автоматического управления вопрос аппроксимации ЧХ и функций комплексного аргумента подробно не рассмотрен. В смежных областях найдены примеры алгоритмов аппроксимации ЧХ методом наименьших квадратов [70-74]. Однако в приведенном виде они не могут быть использованы ввиду различий в особенностях решаемых задач и объекта исследования.

В диссертационной работе для задачи анализа колебательной устойчивости энергосистемы использованы частотные методы, в которых по отношению к АРВ СД математическая модель энергосистемы представлена набором ЧХ. Аппроксимация этих ЧХ дробно-рациональными функциями открывает возможность выполнять анализ колебательной устойчивости энергосистемы корневыми методами [66, 67].

3.2.1 Постановка задачи

Экспериментально полученная ЧХ $W_{2}(\omega)$ является функцией от угловой частоты ω :

$$W_{\mathfrak{I}}(\omega_i) = V(\omega_i) + jU(\omega_i), \ i \in [1, N],$$
(3.3)

где N – количество точек функции $W_{9}(\omega)$;

 $V(\omega), U(\omega)$ – вещественная и мнимая части $W_{2}(\omega)$ соответственно.

Необходимо аппроксимировать произвольную ЧХ $W_{\mathfrak{g}}(\omega)$ дробно-рациональной функцией $W_{\mathfrak{an}}(p, \mathbf{a}, \mathbf{b})$:

$$W_{an}(p,\mathbf{a},\mathbf{b}) = \cdot \frac{1}{p^{\ell}} \frac{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n}{1 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m} = \frac{\sum_{r=0}^n a_r p^r}{p^{\ell} \cdot \left(1 + \sum_{k=1}^m b_k p^k\right)} = \frac{A(p,\mathbf{a})}{p^{\ell} \cdot B(p,\mathbf{b})}, \quad (3.4)$$

где ℓ , *n* и *m* – задаваемые степени полиномов $A(p,\mathbf{a})$ и $B(p,\mathbf{b})$;

a и b – коэффициенты полиномов $A(p, \mathbf{a})$ и $B(p, \mathbf{b})$ соответственно;

а и **b** – массивы коэффициентов *а* и *b* соответственно.

Необходимо найти такую аппроксимирующую функцию $W_{an}(p, \mathbf{a}, \mathbf{b})$, чтобы ее значение было тождественно равно экспериментальной ЧХ $W_{\mathfrak{g}}(\omega)$ в каждой точке:

$$W_{an}(j\omega_i, \mathbf{a}, \mathbf{b}) \equiv W_{\mathfrak{g}}(\omega_i), \ i \in [1, N].$$
(3.5)

Таким образом, при заданных $W_{\mathfrak{I}}(\omega)$, ℓ , *n* и *m* необходимо путем решения (3.5) найти все коэффициенты массивов **a** и **b**.

Очевидно, что тождественное равенство (3.5) во всех точках может быть гарантированно обеспечено только при $n + m + 1 \ge N$. При решении же практических задач суммарный порядок полиномов аппроксимирующей функции существенно меньше количества точек экспериментальной ЧХ: $n + m + 1 \le N$. В результате чего $W_3(\omega)$ и $W_{an}(j\omega, \mathbf{a}, \mathbf{b})$ не будут тождественно равны в каждой точке. Запишем эту разницу:

$$f_0(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{a}, \mathbf{b}) = W_{\mathfrak{g}}(\boldsymbol{\omega}) - W_{\mathfrak{g}\mathfrak{g}}(j\boldsymbol{\omega}, \mathbf{a}, \mathbf{b}), \qquad (3.6)$$

Минимизация функции (3.6) является сложной оптимизационной задачей, так как (3.6) является функцией комплексного аргумента, количество коэффициентов аппроксимации может быть значительно и все коэффициенты массива **b** входят в нее нелинейно. Для решения данной оптимизационной задачи могут быть использованы различные итеративные алгоритмы, требующие больших вычислительных затрат и не всегда сходящиеся к глобальному минимуму.

3.2.2 Алгоритм аппроксимации методом наименьших квадратов

Задача становится линейной относительно всех коэффициентов массивов **a** и **b**, если правую часть уравнения (3.6) умножить на знаменатель аппроксимирующей функции $(j\omega)^{\ell} \cdot B(j\omega, \mathbf{b})$ и представить в следующем виде:

$$f_1(\omega, \mathbf{a}, \mathbf{b}) = \left(W_{\mathfrak{s}}(\omega) \cdot B(\omega, \mathbf{b}) - A(\omega, \mathbf{a})\right), \quad W_{\mathfrak{s}}(\omega) = W_{\mathfrak{s}}(\omega) \cdot (j\omega)^{\ell}.$$
(3.7)

Видно, что функция комплексного аргумента $f_1(\omega, \mathbf{a}, \mathbf{b})$ является линейно зависимой от коэффициентов массивов **a** и **b**, что существенно упрощает задачу. Однако следует обратить внимание, что увеличение значения угловой частоты ω приводит к существенному увеличению значения функции $(j\omega)^{\ell} \cdot B(j\omega, \mathbf{b})$, причем на крутизну данной зависимости большое влияние

оказывает порядок степени полиномов ℓ и *m*. Это приводит к тому, что минимизация функции (3.7) приводит к получению результата с существенно увеличенной «чувствительностью» к экспериментальной ЧХ $W_3(\omega)$ в области высоких частот и существенно сниженной «чувствительностью» к экспериментальной ЧХ $W_3(\omega)$ в области низких частот. Уже при порядке m = 3 разница в чувствительности к экспериментальной ЧХ $W_3(\omega)$ в области высоких частот по отношению к области низких частот не позволяет получить удовлетворительный результат – аппроксимирующая функция получается близкой к экспериментальной только в верхней части задаваемого диапазона частот.

Описанная проблема решается путем соответствующего масштабирования функции (3.7). В результате задача решается итерационным способом, на каждом шаге которого осуществляется минимизация функции методом наименьших квадратов:

$$F(\mathbf{a},\mathbf{b}) = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{K(\omega_i)} \cdot \left| f_1(\omega_i, \mathbf{a}, \mathbf{b}) \right|^2 \to \min, \qquad (3.8)$$

где *K*(ω) в общем случае является вспомогательной произвольной вещественной масштабной функцией.

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 a_1 и b_1 путем минимизации (3.8) и использованием масштабирующей функции:

$$K_{1}(\omega_{i}) = \frac{\left|W_{2}'(\omega_{i})\right|^{2}}{\omega_{i}} \cdot \left[\frac{\ln\left(\frac{\sqrt{1+\left(T_{apr1}\cdot\omega_{i}\right)^{2}}+T_{apr1}\cdot\omega_{i}}{\sqrt{1+\left(T_{apr2}\cdot\omega_{i}\right)^{2}}+T_{apr2}\cdot\omega_{i}}\right)}{\omega_{i}\cdot(T_{apr1}-T_{apr2})}\right]^{n}, \qquad (3.9)$$

где *T_{apr1}* и *T_{apr2}* – минимальное и максимальное значение предполагаемых постоянных времени аппроксимирующей функции.

Формула (3.9) по своему смыслу является прогнозом расположения полюсов аппроксимирующей функции. Прогноз осуществлен на предположении о равномерной плотности распределения полюсов по расстоянию от комплексной оси в диапазоне задаваемых постоянных времени T_{apr1} и T_{apr2} , и плотности их распределения по расстоянию от вещественной оси, равной амплитуде АЧХ аппроксимируемой функции.

Если по виду графиков экспериментальной ЧХ или свойствам исследуемого объекта регулирования определить постоянные времени T_{apr1} и T_{apr2} затруднительно, то их рекомендуется принять равными:

$$T_{apr1} = 5 \cdot (\omega_N / 2\pi)^{-1}, \ T_{apr2} = 5^{-1} \cdot (\omega_0 / 2\pi)^{-1}.$$
(3.10)

На первой итерации осуществляется поиск коэффициентов массивов \mathbf{a}_1 и \mathbf{b}_1 путем минимизации (3.8) и использованием масштабирующей функции для первой итерации (3.9). На каждой следующей итерации осуществляется поиск новых значений коэффициентов массивов \mathbf{a}_{it} и \mathbf{b}_{it} путем повторной минимизации (3.8) и использованием масштабной функции, которая рассчитывается через коэффициенты массива, найденные на предыдущей итерации \mathbf{b}_{it-1} :

$$K_{it}(\omega_i) = \frac{\left|B(j\omega_i, \mathbf{b}_{it-1})\right|^2}{\omega_i} \cdot \frac{1}{K_{tol}(\omega_i)}, \qquad (3.11)$$

где $K_{tol}(\omega)$ – весовая функция, оценивающая степень достоверности определения исходных экспериментальных точек (для данных, полученных с использованием программных комплексов расчета переходных процессов принимается $K_{tol}(\omega) = 1$ для всех ω);

it – номер итерации.

Показателем сходимости итерационного процесса принята величина изменения коэффициентов массива **b** относительно этих же коэффициентов, определенных на прошлой итерации, и завершение итерационного процесса определяется по достижении количества 50 итераций либо при выполнении следующего условия:

$$\sqrt{\sum_{k=1}^{m} \left(\frac{b_{k}^{[it-1]} - b_{k}^{[it]}}{b_{k}^{[it]}}\right)^{2}} \le \varepsilon, \qquad (3.12)$$

где ε – задаваемая относительная длина вектора изменения коэффициентов массива **b**, принимается равной 10^{-3}

В формулах масштабной функции (3.9) и (3.11) использован масштабный коэффициент $1/\omega$, что при суммировании в формуле (3.8) эквивалентно логарифмическому масштабированию по частоте, которое обеспечивает более равномерную чувствительность оптимизационной процедуры ко всему диапазону частот.

Рассмотрим процесс решения уравнения (3.8). Решением (3.8) будет система из n + m + 1 уравнений с n + m + 1 неизвестными:

$$\begin{cases} \frac{\partial F(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b})}{\partial a_k} = 0, k \in [0, n], \\ \frac{\partial F(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b})}{\partial b_l} = 0, l \in [1, m]. \end{cases}$$
(3.13)

Так как функция (3.8) является квадратичной относительно коэффициентов *a* и *b*, то (3.13) будет являться системой линейных уравнений (СЛУ):

$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{D} = \mathbf{0}, \tag{3.14}$$

СЛУ (3.14) удобно представить в блочном виде с указанием размерности подматриц:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{C} 1 \, \mathbf{1}_{(n+1) \times (n+1)} & \mathbf{C} 1 \, \mathbf{2}_{(n+1) \times (m)} \\ \mathbf{C} 2 \, \mathbf{1}_{(m) \times (n+1)} & \mathbf{C} 2 \, \mathbf{2}_{(m) \times (m)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{(n+1) \times (1)} \\ \mathbf{b}_{(m) \times (1)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{D} \mathbf{1}_{(n+1) \times (1)} \\ \mathbf{D} \mathbf{2}_{(m) \times (1)} \end{pmatrix} = 0, \qquad (3.15)$$

где подматрицы определяются следующими выражениями:

$$\mathbf{C} \mathbf{1} = \frac{\partial F^{2}(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{\partial^{2} \mathbf{a}}, \quad \mathbf{C} \mathbf{1} = \mathbf{C} \mathbf{2} \mathbf{1}^{T} = \frac{\partial F^{2}(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{\partial \mathbf{a} \partial \mathbf{b}}, \quad \mathbf{C} \mathbf{2} = \frac{\partial F^{2}(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{\partial^{2} \mathbf{b}}, \quad \mathbf{D} \mathbf{1} = \frac{\partial F(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{\partial \mathbf{a}} \Big|_{\mathbf{b} = 0}, \quad \mathbf{D} \mathbf{2} = \frac{\partial F(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{\partial \mathbf{b}} \Big|_{\mathbf{b} = 0}. \quad (3.16)$$

Используя свойства функций комплексного аргумента, матрицы частных производных (3.16) могут быть легко получены из (3.13) в аналитическом виде, как функции от ω , $V(\omega)$, $U(\omega)$:

$$d1_{r} = \sum_{i=1}^{N} d1_{r}^{[i]} = \sum_{i=1}^{N} (\omega_{i})^{r} \cdot K(\omega_{i}) \cdot [-V(\omega_{i}) \cdot \tau(r) + U(\omega_{i}) \cdot \tau(r+1)], \qquad (3.17)$$

$$d2_{k} = \sum_{i=1}^{N} d2_{k}^{[i]} = \sum_{i=1}^{N} (\omega_{i})^{k} \cdot K(\omega_{i}) \cdot |W(\omega_{i})|^{2} \cdot \tau(k), \qquad (3.18)$$

$$c11_{r,s} = \sum_{i=1}^{N} c11_{r,s}^{[i]} = \sum_{i=1}^{N} (\omega_i)^{r+s} \cdot K(\omega_i) \cdot \tau(r-s), \qquad (3.19)$$

$$c12_{r,k} = \sum_{i=1}^{N} c12_{r,k}^{[i]} = \sum_{i=1}^{N} (\omega_i)^{r+k} \cdot K(\omega_i) \cdot \left[-V(\omega_i) \cdot \tau(r-k) + U(\omega_i) \cdot \tau(r-k+1) \right], \quad (3.20)$$

$$c22_{k,q} = \sum_{i=1}^{N} c22_{k,q}^{[i]} = \sum_{i=1}^{N} (\omega_i)^{k+q} \cdot K(\omega_i) \cdot |W(\omega_i)|^2 \cdot \tau(k-q),$$
(3.21)

$$r, s \in [0, n], \ k, q \in [1, m], \ \tau(n) = (-1)^{\frac{n}{2}} + (-1)^{-\frac{n}{2}},$$
(3.22)

где $d1_r$, $d2_k$, $c11_{r,s}$, $c12_{r,k}$, $c22_{k,q}$ – элементы подматриц и векторов **D**1, **D**2, **C**11, **C**12, **C**22 соответственно.

Функция $\tau(n)$ вещественна при всех значениях целого n:

$$\tau(n) = \begin{cases} 2 \cdot (-1)^{\frac{n \mod(4)}{2}} & \operatorname{прu} n \mod(4) - \operatorname{четном}, \\ 0 & \operatorname{прu} n \mod(4) - \operatorname{нечетном}. \end{cases} (3.23)$$

Прямой расчёт всех элементов (3.17)-(3.22) является вычислительно затратной процедурой, в особенности с учетом ее многократного повтора при итерационном способе решения задачи. В связи с этим требуется оптимизация процедуры расчета данных элементов подматриц. Для иллюстрации идеи оптимизации вычислений проанализируем структуру получаемых матриц, опуская обозначение зависимости функций *V*(*ω*), *U*(*ω*) от частоты:

$$\mathbf{D} \mathbf{I} = 2\sum_{i} K(\omega_{i}) \cdot \begin{pmatrix} -V \\ U \cdot \omega^{2} \\ V \cdot \omega^{2} \\ U \cdot \omega^{3} \\ -V \cdot \omega^{4} \\ \dots \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D} 2 = 2\sum_{i} - \omega^{2} \cdot (V^{2} + U^{2}) \cdot K(\omega_{i}) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -\omega^{2} \\ 0 \\ \omega^{4} \\ \dots \end{pmatrix}, \quad (3.24)$$

$$\mathbf{C} \mathbf{I} \mathbf{I} = 2\sum_{i} K(\omega_{i}) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\omega^{2} & 0 & \omega^{4} & \dots \\ 0 & \omega^{2} & 0 & -\omega^{4} & 0 & \dots \\ -\omega^{2} & 0 & \omega^{4} & 0 & -\omega^{6} & \dots \\ 0 & -\omega^{4} & 0 & \omega^{6} & 0 & \dots \\ 0 & -\omega^{4} & 0 & -\omega^{6} & 0 & \omega^{8} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}, \quad (3.25)$$

$$\mathbf{C} \mathbf{I} \mathbf{2} = 2\sum_{i} K(\omega_{i}) \cdot \begin{pmatrix} U \cdot \omega & V \cdot \omega^{2} & -U \cdot \omega^{3} & -V \cdot \omega^{4} & \dots \\ -V \cdot \omega^{2} & U \cdot \omega^{3} & V \cdot \omega^{4} & -U \cdot \omega^{5} & \dots \\ -U \cdot \omega^{3} & -V \cdot \omega^{4} & U \cdot \omega^{5} & V \cdot \omega^{6} & \dots \\ -U \cdot \omega^{3} & -V \cdot \omega^{4} & U \cdot \omega^{5} & V \cdot \omega^{6} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}, \quad (3.26)$$

$$\mathbf{C} \mathbf{2} \mathbf{2} = 2\sum_{i} \omega^{2} \cdot (V^{2} + U^{2}) \cdot K(\omega_{i}) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\omega^{2} & 0 & \omega^{4} & \dots \\ 0 & \omega^{2} & 0 & -\omega^{4} & 0 & \dots \\ -\omega^{2} & 0 & \omega^{4} & 0 & -\omega^{6} & \dots \\ 0 & -\omega^{4} & 0 & \omega^{6} & 0 & \dots \\ 0 & -\omega^{4} & 0 & \omega^{6} & 0 & \dots \\ 0 & -\omega^{4} & 0 & \omega^{6} & 0 & \dots \\ \omega^{4} & 0 & -\omega^{6} & 0 & \omega^{8} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}, \quad (3.27)$$

Из структурных особенностей представленных подматриц (3.24)-(3.27) можно заметить, что под знаком суммы они имеют общие элементы, которые отличаются друг от друга на множитель, кратный ω^2 . Для оптимизации вычислений удобно воспользоваться рекуррентными соотношениями при расчете элементов данных подматриц ещё до операции суммирования в формуле (3.8). Таким образом, на каждом шаге суммирования *i* производится расчет вспомогательных коэффициентов, которыми затем заполняются подматрицы:

$$\omega 2^{[i]} = \omega_i^2 , \qquad (3.28)$$

$$Kaa_0^{[i]} = K(\omega_i), \qquad (3.29)$$

$$Kab_0^{[i]} = K(\omega_i) \cdot V(\omega_i), \qquad (3.30)$$

$$Kbb_0^{[i]} = 0, (3.31)$$

$$Kab_{I}^{[i]} = K(\omega_{i}) \cdot U(\omega_{i}) \cdot \omega_{i}, \qquad (3.32)$$

$$Kbb_0^{[i]} = \left(V(\omega_i)^2 + U(\omega_i)^2\right) \cdot K(\omega_i) \cdot \omega 2^{[i]}, \qquad (3.33)$$

$$Kaa_{ni}^{[i]} = Kaa_{ni-1}^{[i]} \cdot \omega 2^{[i]}, \qquad (3.34)$$

$$Kbb_{mi}^{[i]} = Kbb_{mi-1}^{[i]} \cdot \omega 2^{[i]}, \qquad (3.35)$$

$$Kab_{nmi}^{[i]} = Kab_{nmi-2}^{[i]} \cdot \omega 2^{[i]}, \qquad (3.36)$$

$$ni \in [1, n], mi \in [1, m], nmi \in [2, n+m].$$
 (3.37)

Использование рекуррентных формул (3.28)-(3.37) для расчета элементов подматриц (3.17)-(3.22) до операции суммирования в формуле (3.8) позволяет существенно сократить вычислительные затраты по сравнению с прямым расчетом элементов подматриц (3.17)-(3.22).

Следует отметить, что матрица С является плохо обусловленной, а величина её определителя может достигать крайне больших величин, что при больших порядках аппроксимации делает решение СЛУ (3.14) невозможным. Поэтому решение системы уравнений (3.14) находится в следующем виде:

$$\mathbf{X} = -\mathbf{V} \cdot (\mathbf{V} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{V})^{-1} \cdot (\mathbf{V} \cdot \mathbf{D}).$$
(3.38)

Матрица V является диагональной и выбирается такой, чтобы приблизить значение определителя матрицы $V \cdot C \cdot V$ к единице и максимально улучшить её обусловленность. Для расчета матрицы V воспользуемся следующими выражениями:

$$\mathbf{V1}_{i,j} = \begin{cases} 1/\sqrt{C_{i,j}} & \text{при}\,i=j, \\ 0 & \text{при}\,i\neq j, \end{cases} i, j \in [0, n+m].$$
(3.39)

$$\begin{cases} \mathbf{V2}_{r,s} = (1/\sqrt{0.85})^r & \text{при } \mathbf{r} = s, \\ \mathbf{V2}_{r,s} = 0 & \text{при } \mathbf{r} \neq s, \\ \mathbf{V2}_{n+k,n+q} = (1/\sqrt{0.85})^{k-1} & \text{при } \mathbf{k} = q, \\ \mathbf{V2}_{n+k,n+q} = 0 & \text{при } \mathbf{k} \neq q, \end{cases} r, s \in [0,n], \ k, q \in [1,m].$$
(3.40)

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}\mathbf{1} \cdot \mathbf{V}\mathbf{2} \ . \tag{3.41}$$

Описанный алгоритм реализован в САПР *Mathcad* с использованием встроенного в него языка программирования. Следует добавить, что задача по минимизации функции (3.8) сформулирована из предположения, что расстояние между всеми отсчетами экспериментальной

ЧХ $W_{3}(\omega)$ по угловой частоте ω_{i} одинаково и равно фиксированному шагу $\Delta\omega$. Однако во многих случаях шаг по угловой частоте не является константой. В реализованных алгоритмах в САПР *Mathcad* учтено фактическое значение шага по частоте между каждой парой соседних отсчетов. Описание способа учета в представленных формулах не приведено ввиду излишнего усложнения описания задачи и второстепенности данного фактора.

3.2.3 Способ выбора коэффициентов аппроксимации

Коэффициентами аппроксимации в данном случае являются задаваемые степени полиномов ℓ , *n* и *m*. При заданных коэффициентах аппроксимации ℓ , *n*, *m*, разработанный алгоритм позволяет итерационно решать плохо обусловленные СЛУ (3.14), в результате которого рассчитываются коэффициенты массивов **a** и **b**. Однако решение с требуемой точностью может быть найдено для различных комбинаций коэффициентов аппроксимации ℓ , *n*, *m*. При этом отсутствие априорного знания о структурных свойствах объекта регулирования, с которого получены экспериментальные ЧХ, вносит неопределенность в значения данных коэффициентов аппроксимации, **a**, значит, и в результат аппроксимации.

На данный момент не удалось разработать автоматическую процедуру выбора коэффициентов аппроксимации ℓ , n, m в зависимости от входных данных. В диссертационной работе реализован автоматизированный способ выбора коэффициентов аппроксимации ℓ , n, m на основе предварительного анализа вида графиков экспериментальной ЧХ $W_{3}(\omega)$.

С учетом специфики целей, для которых предполагается использовать результат аппроксимации МНК, и на основе полученного опыта использования данного алгоритма аппроксимации разработан способ получения удовлетворительного результата аппроксимации МНК:

• В соответствии с [41] модели систем возбуждения и АРВ СД для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме создаются достоверными только в пределах отклонения частоты ±5% и частоте колебаний до 3 Гц. В [7] же содержится требование по точности воспроизведения частотных характеристик каналов регулирования АРВ СД в цифровых моделях вплоть до 10 Гц. Таким образом, для получения качественного результата аппроксимации ЧХ каналов регулирования АРВ СД и РЧХ энергосистемы в диапазоне частот до 10 Гц. необходимо принимать значение параметра ω_{max} не менее 20 Гц. Также необходимо обеспечить получение экспериментальных ЧХ с частотой до 20 Гц.

- Значение параметра ω_{min} необходимо принимать не более 0.05 Гц. Также необходимо обеспечить получение экспериментальных ЧХ с частотой от 0.05 Гц.
- При аппроксимации ЧХ элемента, который имеет в своём составе производную, значение параметра ω_{max} необходимо принимать как минимум на 50% больше частоты, при которой модуль экспериментальной ЧХ |W₃(ω)|начнет убывать.
- Если при частоте близкой к нулю экспериментальная ЧХ стремится к нулю $\lim_{\omega \to 0} W_{3}(\omega) = 0$, то требуется задание одного нулевого решения в функции $W_{an}(p, \mathbf{a}, \mathbf{b})$. Если касательная в начале координат $W_{3}(\omega)$ близка к нулевому наклону, то требуется задание двух нулевых решений в функции $W_{an}(p, \mathbf{a}, \mathbf{b})$ и так далее. В этом случае в разработанном алгоритме предусмотрено принудительное задание n_{zero} первых коэффициентов массива **a** равными нулю с исключением соответствующих уравнений в СЛУ.
- Коэффициент аппроксимации *n* следует принимать равным или более числа визуально наблюдаемых резонансных максимумов модуля экспериментальной ЧХ |*W*₃(ω)|. Если экспериментальная ЧХ обладает низкой степенью зашумленности, то для более надёжного визуального обнаружения количества резонансных максимумов рекомендуется анализировать вид функции:

$$\left|\frac{dW_{\circ}(\omega)}{d\ln(\omega)}\right|.$$
(3.42)

- Предполагается, что экспериментальная ЧХ описывает устойчивые САР или динамические звенья, которые также в большинстве случаев являются и минимальнофазовыми. Это позволяет сделать допущение о том, что и нули и полюса аппроксимирующей функции $W_{an}(p, \mathbf{a}, \mathbf{b})$ находятся левее мнимой оси на комплексной плоскости. Из этих соображений коэффициент аппроксимации *m* следует принимать зависимым от *n* и принимать равным $m = n - n_{\phi}$, где $n_{\phi} = ceil((arg(W_3(\omega_{min})) - arg(W_3(\omega_{max})))/90^\circ) - n_{zero}$. В случае, когда экспериментальная ЧХ описывает устойчивые САР или динамические звенья, но не являющимся минимально-фазовыми, то величина n_{ϕ} будет больше ранее рассчитанной $n_{\phi} > ceil((arg(W_3(\omega_{min})) - arg(W_3(\omega_{max})))/90^\circ) - n_{zero}$.
- Если известна относительная погрешность определения экспериментальной ЧХ W₃(ω) для каждой экспериментальной точки ω_i, то следует ее использовать как весовую функцию при расчете масштабирующей функции (3.11), отдавая приоритет значениям с меньшей погрешностью.

- Следует получить несколько аппроксимирующих функций экспериментальной ЧХ *W*₃(ω) при различном сочетании коэффициентов аппроксимации *l*, *n*, *m*. Все полученные аппроксимирующие функции должны удовлетворять необходимым требованиям по точности аппроксимации.
- Для всех полученных аппроксимирующих функций экспериментальной ЧХ W₃(ω) при различном сочетании коэффициентов аппроксимации ℓ, n, m, необходимо вычислить корни полинома B(p,b) и произвести проверку на наличие корней с положительной вещественной частью. В случае наличия таковых, данная аппроксимирующая функция является неустойчивой, что является некорректным решением для рассматриваемых задач. Такие аппроксимирующие функции необходимо исключить при дальнейшем рассмотрении.
- Из оставшихся нескольких аппроксимирующих функций следует отдать предпочтение той функции, у которой меньшее суммарное значение коэффициентов аппроксимации (*m* + *n*) = *min*.

3.2.4 Применение алгоритма аппроксимации методом наименьших квадратов на тестовых данных

На рисунке 3.1 показана структура матрицы коэффициентов **C** и вектора свободных коэффициентов **D** СЛУ (3.15) в логарифмическом масштабе для одной из тестовых функций. Коэффициенты аппроксимации $\ell = -1$, n = 13, m = 18. Белому цвету соответствуют нулевые значения, черному – $5 \cdot 10^{70}$.



Рисунок 3.1 – Структура матрицы коэффициентов **С** и вектора свободных коэффициентов **D** СЛУ

Значение определителя представленной матрицы коэффициентов СЛУ может быть оценено величиной $2 \cdot 10^{2037}$, а ее число обусловленности по евклидовой норме равно $5.5 \cdot 10^{70}$. При этом максимальное значение числа, которое может быть представлено типом *double float* равняется $1.7 \cdot 10^{308}$, что много меньше значения определителя матрицы коэффициентов СЛУ. Относительная точность числа типа *double float* – $1.11 \cdot 10^{-16}$, что много больше обратного значения числа обусловленности матрицы коэффициентов СЛУ по евклидовой норме. Из этого следует, что для (3.15) следует применять специальные методы решения плохо обусловленных СЛУ, которые широко известны, но алгоритмически сложны в реализации.

Для решения данной проблемы реализован достаточно простой способ нормализации матрицы коэффициентов СЛУ по формулам (3.38)-(3.41), использующий их структурные особенности, которые можно рассмотреть на рисунке 3.1 и формулах (3.24)-(3.27). В результате нормализации для данного примера определитель матрицы коэффициентов СЛУ становится равным 40.5, а число ее обусловленности по евклидовой норме становится равным 6.1·10⁶, что позволяет в этом случае использовать тип числа *double float* без применения специальных методов решения плохо обусловленных СЛУ. Следует отметить, что обусловленность матрицы коэффициентов СЛУ резко ухудшается при увеличении порядка аппроксимации и соотношения $\omega_{max}/\omega_{min}$.

Для количественной оценки качества аппроксимации использована формула относительной погрешности (3.2), которая для данной задачи записывается как:

$$\delta = \frac{\int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} |W_{\mathfrak{g}}(\omega) - W_{an}(j\omega, \mathbf{a}, \mathbf{b})| d\ln \omega}{\int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} |W_{\mathfrak{g}}(\omega)| d\ln \omega}, \qquad (3.43)$$

Разработанный алгоритм опробован при аппроксимации тестовых функций четырех типов. В качестве тестовых функций первого типа использованы аналитические передаточные функции в операторном виде различного порядка с известными коэффициентами. Для всех рассмотренных функций погрешность аппроксимации, рассчитанная по формуле (3.43), не превышает 0.1% при выборе соответствующих коэффициентов аппроксимации. В качестве примера на рисунке 3.2 приведен результат аппроксимации и ЧХ следующей передаточной функции:

$$W_{test1}(p) = \frac{1+0.9p}{1+0.4p} \frac{7 \cdot p^2}{1+7p} \frac{1}{(1+0.2p)^3} \frac{0.98^2 (5^2 + (2\pi 2.5)^2) + 2 \cdot 0.98 \cdot 5p + p^2}{(5^2 + (2\pi 2.5)^2) + 2 \cdot 5p + p^2} \cdot \frac{1+0.03p}{(8^2 + (2\pi 1)^2) + 2 \cdot 8p + p^2} \prod_{k=1}^5 \frac{0.8^2 \left(\frac{3}{k^2}^2 + \left(2\pi \frac{2.5}{k^2}\right)^2\right) + 2 \cdot 0.8 \cdot \frac{3}{k^2}p + p^2}{\left(\frac{3}{k^2}^2 + \left(2\pi \frac{2.5}{k^2}\right)^2\right) + 2 \cdot \frac{3}{k^2}p + p^2}.$$
(3.44)

Погрешность аппроксимации, рассчитанная по формуле (3.43) для тестовой передаточной функции $W_{test1}(p)$ составляет 3·10⁻⁵%. Коэффициенты аппроксимации соответствуют самой тестовой передаточной функции и равны $\ell = -2$, n = 16, m = 19.



Рисунок 3.2 – АЧХ тестовой функции $W_{test1}(p)$ и полученной аппроксимирующей функции

В качестве тестовых функций второго типа использованы передаточные функции в дискретном виде различной сложности. Для всех рассмотренных передаточных функций в дискретном виде погрешность аппроксимации, рассчитанная по формуле (3.43), не превышает 1%, при этом остается возможность дополнительного уменьшения погрешности за счет увеличения коэффициентов аппроксимации. В качестве примера на рисунке 3.3 приведен результат аппроксимации и ЧХ следующей передаточной функции в дискретном виде с периодом дискретизации 0.02 с:

$$W_{test2}(z) = \frac{\sum_{i=0}^{5} z^{-i}}{6} \frac{1 - z^{-2}}{1.02 - z^{-1}} \frac{4.5 - 5.5z^{-1} + 2z^{-2}}{3.5 - 3.5z^{-1} + z^{-2}} \frac{1.65 - 0.73z^{-1} + 0.08z^{-2}}{1.64 - 0.68z^{-1} + 0.04z^{-2}}.$$
 (3.45)

Погрешность аппроксимации, рассчитанная по формуле (3.43), для тестовой передаточной функции в дискретном виде $W_{test2}(z)$ составила 0.2%. Коэффициенты аппроксимации выбраны равными $\ell = -1$, n = 3, m = 5. Из рисунка 3.3 видно, что ЧХ имеет характерный вид для дискретных функций, а именно эффект периодизации, проявляющийся в скачке фазы на 180° и нулевом коэффициенте усиления на частоте порядка 16 Гц. Несмотря на данные особенности ЧХ, полученная аппроксимация позволяет их корректно воспроизвести.









б) ФЧХ

Рисунок 3.3 – ЧХ тестовой функции *W*_{test2}(z) и полученной аппроксимирующей функции

В качестве тестовых функций третьего типа использованы ЧХ энергообъединений сложной структуры, полученные в математической модели высокого дифференциального порядка, в том числе более 6000. АЧХ одной из тестовых функций и результат аппроксимации приведены на рисунке 3.4.











Рисунок 3.4 – ЧХ и результат аппроксимации тестовой функции, полученной в цифровой модели энергосистемы высокого дифференциального порядка

Погрешность аппроксимации, рассчитанная по формуле (3.43), для данной тестовой передаточной функции составляет 1.6%. Коэффициенты аппроксимации выбраны равными $\ell = -1$, n = 13, m = 18 (тот же пример, что на рисунке 3.1). Данная тестовая функция имеет 9000 точек, и на ней выполнена проверка быстродействия алгоритмов. Проверка потребовала проведения оптимизации алгоритмов, которая описана в формулах (3.28)-(3.37), что в результате позволило сократить время работы алгоритма до 30 с. До проведения оптимизации алгоритма не регистрировалось, так как составляло более 1200 с, что для выполнения задачи аппроксимации ЧХ не является приемлемым.

В качестве функций четвертого типа использованы экспериментально полученные ЧХ каналов регулирования одного из АРВ СД, входящего в состав ЦАФК АО «НТЦ ЕЭС». На рисунке 3.5 приведена экспериментальная АЧХ и результат аппроксимации для канала регулирования по производной частоты напряжения. Коэффициенты аппроксимации выбраны равными $\ell = -1$, n = 2, m = 4. В данном примере погрешность аппроксимации составила около 15%, но она обусловлена значительной зашумленностью входных данных на частотах выше 3 Гц. При этом относительная погрешность по всему диапазону частот не может характеризовать качество аппроксимации. По всем каналам регулирования данного АРВ СД, входящего в состав ЦАФК АО «НТЦ ЕЭС», относительная погрешность аппроксимации в диапазоне частот до 3 Гц не превышает 5%.



Рисунок 3.5 – АЧХ и результат аппроксимации для канала регулирования по производной частоты напряжения АРВ СД, входящего в состав ЦАФК АО «НТЦ ЕЭС»

3.2.5 Выводы

Разработан алгоритм аппроксимации ЧХ передаточной функцией в операторном виде методом наименьших квадратов и реализован в САПР *Mathcad* с использованием встроенного в него языка программирования. Алгоритм является итерационным с условием прерывания итерационной процедуры, основанным на надежном критерии сходимости. В качестве первого приближения использована специальная функция, прогнозирующая распределение полюсов аппроксимирующей функции на комплексной плоскости. Для улучшения сходимости итерационной процедуры задача решена в логарифмических координатах по *ω*.

Показано, что для больших значений коэффициентов аппроксимации возникает необходимость совершения операций с матрицами, которые имеют значение определителя и числа обусловленности матрицы коэффициентов СЛУ, не позволяющими использовать стандартные алгоритмы решения СЛУ. Разработана процедура нормализации матриц, позволяющая использовать стандартные алгоритмы решения СЛУ. Так же проведена оптимизация алгоритмов, позволяющая за приемлемое время получить результат аппроксимации для размерности задач, характерных при аппроксимации передаточных функций цифровой модели энергосистемы высокого дифференциального порядка.

Приведен способ выбора коэффициентов аппроксимации для решения задач аппроксимации экспериментально полученных ЧХ каналов регулирования АРВ СД и для аппроксимации передаточных функций математической модели энергосистемы высокого дифференциального порядка. В результате проведенных исследований можно заключить, что реализованный в САПР *Mathcad* алгоритм аппроксимации МНК:

- дает устойчивый результат при суммарном порядке аппроксимации *m* + *n* < 40, чего достаточно для задач анализа колебательной устойчивости энергосистем высокого дифференциального порядка и выбора параметров настройки АРВ СД;
- позволяет получать аппроксимации ЧХ САР, характеризующихся высокой жесткостью и наличием большого количества колебательных степеней свободы (до 20) с низкой степенью демпфирования;
- может использоваться для аппроксимации ЧХ, полученных из цифровых моделей энергосистем высокого дифференциального порядка, реализованных ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме;
- может использоваться для аппроксимации экспериментально полученных ЧХ со значительной зашумленностью натурных САР, в том числе промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД;
- может использоваться для разложения колебательного процесса на простейшие составляющие (аналог разложения методом Прони [19, 20]);

 потенциально может использоваться и для других задач, в том числе из смежных областей науки и техники.

3.3 Аппроксимация на основе теоремы Паде

Для получения непрерывных математических моделей дискретных САР необходимо применять методы аппроксимации. Например, может быть использован разработанный одномерный метод аппроксимации переходной функции динамического звена в дробнорациональном виде по методу наименьших квадратов (см. подраздел 3.2) [66, 67, 71]. Но одномерные методы аппроксимации не дают зависимость динамических характеристик переходной функции от ее постоянных времени или других параметров. Для получения такой зависимости необходимо применение методов аппроксимации многомерной функции, что представляет собой сложную математическую задачу и требует применения специальных навыков. Однако для решения такой задачи возможно применение одномерной аппроксимации на основе теоремы Паде (*Padé Approximant*) [75], которая достаточно просто позволяет получить аппроксимацию известной и дифференцируемой функции в дробно-рациональном виде [68].

3.3.1 Постановка задачи

В алгоритмах АРВ СД в основном применяются такие дискретные динамические звенья, как суммирующий фильтр, апериодическое звено, пропорционально-дифференциальное звено со сглаживанием (*lead-lag filter*), дифференциальное звено. При этом звено суммирующего фильтра всегда и звено дифференцирования часто являются КИХ-фильтрами, а остальные выполняются на основе единственного интегратора (для колебательных динамических звеньев второго порядка – на основе двух интеграторов) с прямыми и обратными связями и являются БИХ-фильтрами.

Для всех дискретных динамических звеньев существуют аппроксимации в виде непрерывных динамических звеньев, принятые среди производителей. Так, для всех БИХфильтров представление остаётся таким, каким оно было до дискретизации. Аппроксимацию же КИХ-фильтров каждый из производителей АРВ СД осуществляет по своей методике, и, как будет показано далее, погрешность этих аппроксимаций может быть достаточно высока.

Например, большинство производителей АРВ СД алгоритмически реализует

апериодическое звено $W(p) = \frac{1}{1+T \cdot p}$ в виде разностного уравнения $y_i = \frac{h \cdot x_i + T \cdot y_{i-1}}{h+T}$, где y – выход апериодического звена, x – вход апериодического звена, h – период дискретизации, i – номер отсчета. Зная данную особенность реализации апериодического звена в виде разностного уравнения, можно было бы легко совершить обратный переход к операторному представлению: $W'(p) = \frac{h}{h+T-T \cdot e^{-h \cdot p}}$. Но функции такого вида, как W'(p), не могут быть реализованы в ряде ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме, а так же такие функции имеют плохую численную устойчивость, которая обуславливается наличием положительной обратной связи со звеном чистого запаздывания. Этим объясняется необходимость аппроксимации функций такого вида.

Математические модели АРВ СД используются для анализа колебательной и динамической устойчивости в различных ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме. В одних ПВК возможно использование звена чистого запаздывания, в других – нет. Разработанный алгоритм аппроксимации на основе теоремы Паде же позволяет получать функцию либо в дробно-рациональном виде, либо в дробно-рациональном с одним звеном чистого запаздывания. При близкой величине погрешности аппроксимации во втором случае вид аппроксимации получается значительно проще, чем в первом.

Алгоритм аппроксимации на основе теоремы Паде заложен в большинстве систем компьютерной алгебры. Однако проверка их работоспособности показала, что применение уже готовых алгоритмов аппроксимации на основе теоремы Паде в зависимости от параметров дискретного динамического звена вызывает трудности, так как в процессе получения аппроксимации ряда функций целесообразно проводить промежуточные упрощения.

Таким образом, необходимо решить следующие задачи:

- представить алгоритм получения аппроксимации на основе теоремы Паде в общем виде, пригодном для реализации без применения систем компьютерной алгебры;
- получить аппроксимации Паде для наиболее часто применяемых дискретных динамических звеньев в промышленных образцах микропроцессорных АРВ СД различного порядка (с и без использования элемента чистого запаздывания);
- полученные аппроксимации Паде должны быть устойчивыми;
- для каждого ИЗ дискретных динамических звеньев оценить погрешность аппроксимации различного порядка с использованием и без использования звена чистого запаздывания и на основе этого разработать рекомендации по применению аппроксимаций Паде моделирования APB СД ПВК для В для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме.

3.3.2 Алгоритм аппроксимации на основе теоремы Паде

Аппроксимация Паде представляет собой функцию в виде отношения двух полиномов. Теорема Паде заключается в том, что коэффициенты данных полиномов однозначно определяются через коэффициенты разложения аппроксимируемой функции в ряд Тейлора [75]. Аппроксимация Паде представляется в виде:

$$W(p,T) \approx W_{anL/M}(p,T) = \frac{B(p,T)}{C(p,T)} = \frac{b_0(T) + b_1(T) \cdot p + \dots + b_L(T) \cdot p^L}{c_0(T) + c_1(T) \cdot p + \dots + c_M(T) \cdot p^M},$$
(3.46)

где $W_{anL/M}(p,T)$ – аппроксимация Паде функции W(p,T) при заданном порядке аппроксимации L/M;

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

Получение аппроксимации сводится к нахождению полиномов B(p,T) и C(p,T). Предлагается алгоритм нахождения полиномов в общем виде, основанный на простейшем методе из [75, с 17–18].

Сперва необходимо получить первые L + M + 1 коэффициентов a(T) полинома при разложении функции W(p,T) в ряд Тейлора:

$$W(p,T) = a_0(T) + a_1(T) \cdot p + a_2(T) \cdot p^2 + \dots,$$
(3.47)

$$a_k(T) = \frac{W^{(k)}(0,T)}{k!}, \ k \in [0, L+M+1],$$
(3.48)

где $W^{(k)}(0,T)$ – значение частной производной *k*-ой степени по параметру *p* функции W(p,T) в нулевой точке.

Затем находится матрица A(T) размерности $(M+1) \times M$, а так же вектора B(p,T) и C(p) длины (M+1) такие, что:

$$\mathbf{A}_{i,j}(T) = \begin{cases} a_{L-M+1+i+j}(T), \text{если} (L-M+1+i+j) \ge 0, \\ 0, \text{если} (L-M+1+i+j) < 0, \end{cases}$$
(3.49)

$$\mathbf{B}_{i}(p,T) = \begin{cases} \sum_{m=0}^{L-M+i} a_{m}(T) \cdot p^{M+m-i}, \text{если} (L-M+i) \ge 0, \\ 0, \text{если} (L-M+i) < 0, \end{cases}$$
(3.50)

$$C_i(p) = p^{M-i},$$
 (3.51)
 $i \in [0, M], \ j \in [0, M-1].$

Определители составных матриц из A(T) и B(p,T), из A(T) и C(p) являются искомыми полиномами B(p,T) и C(p,T) соответственно:

$$B(p,T) = \left\| \left(\mathbf{A}(T) \mid \mathbf{B}(p,T) \right) \right\|, \tag{3.52}$$

$$C(p,T) = |(\mathbf{A}(T)|\mathbf{C}(p))|.$$
(3.53)

Таким образом, по формулам (3.48)-(3.53) для функции W(p,T) при заданном порядке аппроксимации L/M находится аппроксимирующая функция $W_{anL/M}(p,T)$.

В данной задаче порядок аппроксимации L/M выбирается исходя из требуемой точности аппроксимации. Чтобы описанный алгоритм аппроксимации на основе теоремы Паде было возможно использовать на практике, необходимо найти коэффициенты $a_k(T)$, как зависимость от k и параметров самого динамического звена.

Для получения аппроксимации Паде с использованием звена чистого запаздывания необходимо искать коэффициенты разложения в ряд Тейлора (3.48) модифицированной функции (3.47) *W*(*p*):

$$W_{_{MO\partial}}(p,T) = W(p,T) \cdot e^{p \cdot T_{_{MO\partial}}} = a_0(T) + a_1(T) \cdot p + a_2(T) \cdot p^2 + \dots,$$
(3.54)

где $T_{\text{мод}}$ – постоянная времени сдвига аппроксимации.

Далее по тому же самому алгоритму осуществляется поиск числителя и знаменателя аппроксимации Паде необходимого порядка. С учетом внесенной величины сдвига исходной функции, итоговый вид аппроксимации Паде вместо (3.46) примет вид:

$$W(p,T) \approx W_{anL/M}(p,T) = \frac{B(p,T)}{C(p,T)} \cdot e^{-p \cdot T_{MOO}} = \frac{b_0(T) + b_1(T) \cdot p + \dots + b_L(T) \cdot p^L}{c_0(T) + c_1(T) \cdot p + \dots + c_M(T) \cdot p^M} \cdot e^{-p \cdot T_{MOO}} .$$
(3.55)

Величина постоянной времени $T_{\text{мод}}$ выбирается по специальному алгоритму. Необходимо задать шаг изменения постоянной времени $T_{\text{мод}}$ и с данным шагом начиная с 0 с находить аппроксимации Паде заданного порядка. Поиск аппроксимаций Паде при увеличении шага следует прекратить, как только будет получена первая аппроксимация Паде с неустойчивым решением (один из корней полинома C(p,T) становится отрицательным). Из полученного ряда аппроксимаций Паде необходимо выбрать ту, которая обеспечивает наименьшее значение погрешности аппроксимации в соответствии с выбранным критерием.

Описанный алгоритм получения аппроксимаций Паде реализован в САПР Mathcad с использованием встроенного в него языка программирования.

3.3.3 Получение аппроксимаций Паде для динамических звеньев, использующихся в микропроцессорных АРВ СД

В качестве первого примера использовано дискретное звено производной, представленное КИХ-фильтром. В промышленных образцах микропроцессорных АРВ СД расчета производителей производной используется некоторых для формула дифференцирования с наилучшим среднеквадратичным приближением к результатам измерений [61, 62]:

$$y_{i} = \frac{12}{h \cdot N \cdot (N^{2} - 1)} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \left(\frac{N-1}{2} - n\right) \cdot x_{i-n} , \qquad (3.56)$$

где у и х – выход и вход звена дифференцирования соответственно,

і – номер отсчета,

h – период дискретизации,

N – количество точек суммирования.

Эквивалентная постоянная времени *T* производной, рассчитываемой по формуле (3.56) будет равна:

$$T = h \cdot \frac{N-1}{2} \,. \tag{3.57}$$

Сперва необходимо перейти от уравнений в конечно-разностном виде к непрерывному операторному по известному способу [64, с 216–219, 224]:

$$W(p) = \frac{12}{h \cdot N \cdot (N^2 - 1)} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \left(\frac{N - 1}{2} - n\right) \cdot e^{-h \cdot n \cdot p} .$$
(3.58)

Коэффициенты разложения находятся по формуле (3.48):

$$a_{k} = \frac{12}{h \cdot N \cdot (N^{2} - 1)} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \left(\frac{N - 1}{2} - n\right) \cdot \frac{(-h \cdot n)^{k}}{k!}.$$
(3.59)

Получаемая через коэффициенты разложения в ряд Тейлора (3.59) аппроксимация Паде получается относительно громоздкая и неудобная для использования в практических целях. Её вид можно значительно упростить, сделав допущения о том, что количество точек N значительно и T >> h. С учетом данных допущений сумма в выражении (3.59) заменяется интегралом, который может быть найден в общем виде. В результате формула (3.59) с учётом подстановки (3.57) упростится до вида:

$$a_k \approx \frac{6 \cdot (-2 \cdot T)^{k-1} \cdot k}{(k+2)!}.$$
 (3.60)

Таким образом по формулам (3.46), (3.49)-(3.53), (3.60) найдем аппроксимацию Паде порядка *L* = 2 и *M* = 3:

$$W_{an2/3}(p) = \frac{15 \cdot p \cdot (T \cdot p + 35)}{41 \cdot (T \cdot p)^3 + 225 \cdot (T \cdot p)^2 + 540 \cdot T \cdot p + 525}.$$
(3.61)

Возможно получить аппроксимацию Паде более простого вида, если данная задача допускает использование элемента чистого запаздывания:

$$W_{an1/2}(p) = \frac{p \cdot e^{-p \cdot 0.2 \cdot T}}{0.22 \cdot (T \cdot p)^2 + 0.8 \cdot T \cdot p + 1}.$$
(3.62)

Возможно получение аппроксимаций функции (3.58) более высокого порядка, которые обеспечивают меньшую погрешность аппроксимации. Но возможность применения аппроксимаций более высокого порядка в ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме ограничена ввиду их громоздкого вида и появлению постоянных времени очень малой величины, что может привести либо к замедлению процесса расчета либо к ухудшению численной устойчивости динамического звена.

В качестве второго примера использовано апериодическое звено:

$$W(p) = \frac{1}{1+T \cdot p}$$
 (3.63)

Представление апериодического звена при его программной реализации в виде разностных уравнений (дискретизация) может осуществляться разными способами. Наиболее часто встречается дискретизация методом обратной разности, реже встречается дискретизация билинейным методом (дискретизация методом трапеций или преобразование Тастина), реже всего – методом прямой разности. Разностные уравнения для каждого из методов дискретизации апериодического звена следующие:

$$y_i = \frac{h \cdot x_i + T \cdot y_{i-1}}{h+T}$$
 (дискретизация методом обратной разности), (3.64)

$$y_i = \frac{h \cdot x_{i-1} + (T-h) \cdot y_{i-1}}{T}$$
 (дискретизация методом прямой разности), (3.65)

$$y_{i} = \frac{h \cdot (x_{i} + x_{i-1}) + (2 \cdot T - h) \cdot y_{i-1}}{(2 \cdot T + h)}$$
(дискретизация билинейным методом). (3.66)

Процесс получения коэффициентов разложения соответствующих для данных преобразований функций в ряд Тейлора (48) достаточно громоздкий. В связи с этим в качестве примера можно привести только результат для наиболее широко применяемой дискретизации методом обратной разности, который использует рекуррентные соотношения:

$$a_0 = 1, \ a_k = \frac{T}{h} \cdot \sum_{n=0}^{k-1} \left(\frac{k! (-1)^{k+n}}{n! (k-n)!} \cdot a_n \right).$$
(3.67)

По формулам (3.46), (3.49)-(3.53), (3.60) можно найти аппроксимацию Паде порядка L = 1 и M = 1 для дискретного апериодического звена при различных методах дискретизации:

$$W_{anl/1}(p) = \frac{1+0.5 \cdot h \cdot p}{1+(T+0.5 \cdot h) \cdot p}$$
(дискретизация методом обратной разности), (3.68)

$$W_{an1/1}(p) = \frac{1 - 0.5 \cdot h \cdot p}{1 + (T - 0.5 \cdot h) \cdot p}$$
 (дискретизация методом прямой разности), (3.69)

$$W_{anl/1}(p) = \frac{1}{1+T \cdot p}$$
 (дискретизация билинейным методом). (3.70)

Из формулы (3.70) видно, что представление в операторном виде апериодического звена совпадает с его аппроксимацией Паде порядка L = 1 и M = 1 при его дискретизации билинейным методом. Для данного случая результат аппроксимации Паде порядка L = 2 и M = 2 будет:

$$W_{an2/2}(p) = \frac{1 + (h \cdot p)^2 \cdot 1/12}{1 + T \cdot p + (h \cdot p)^2 \cdot 1/12}$$
(дискретизация билинейным методом). (3.71)

3.3.4 Рекомендации по применению аппроксимаций Паде на основе оценки их погрешности

Относительная погрешность аппроксимации Паде оценена в комплексном виде по интегральному критерию, который позволяет учитывать погрешность по амплитуде и по фазе совместно, в диапазоне частот от f_{min} до f_{max} :

$$\delta_{an} = \frac{\int_{min}^{f_{max}} |W(j2\pi f) - W_{an}(j2\pi f)| df}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} |W(j2\pi f)| df}$$
(3.72)
Для оценки качества аппроксимации приняты значения нижнего предела интегрирования f_{min} равной 0 Гц, и верхнего предела интегрирования f_{max} равной 10 Гц. Точность аппроксимации зависит как от постоянной времени динамического звена, так и от периода дискретизации. Таким образом, аппроксимация может быть пригодна только в определённом диапазоне этих параметров.

В качестве примера рассмотрен регулятор *AVR*-3M производства ООО «АСУ-ВЭИ», в котором для дискретного звена производной период дискретизации $h \approx 5$ мс, а постоянная времени звена производной *T* может варьироваться от 0.02 с до 0.06 с. В таблице 3.1 приведены оценки погрешностей по формуле (3.72) при разных порядках аппроксимаций Паде дискретного звена производной, в том числе и принятых среди различных производителей, а на рисунке 3.6 приведены их АЧХ и ФЧХ.

Таблица 3.1 – Оценка погрешности аппроксимаций Паде различного порядка дискретного звена производной

Аппроксимация	$\delta_{ m an},$ %, до 3 Гц / до 5 Гц / до 10 Гц		
	T = 0.02 c	T = 0.06 c	
$W_{{ m an1/2}}(p)$	0.16 / 0.40 / 1.15	0.17 / 2.22 / 26.45	
$W_{\mathrm{an2/3}}(p)$	0.16 / 0.45 / 1.7	0.44 / 0.63 / 13.67	
$p/(1+T \cdot p)$	2.56 / 6.64 / 21.2	18.61 / 39.13 / 92.67	
$p \cdot e^{-T \cdot p}$	0.88 / 2.46 / 10.22	7.17 / 21.27 / 117.31	

Из оценки погрешности рассмотренных аппроксимаций Паде различного порядка можно заключить, что традиционно используемые производителями аппроксимации дискретного звена 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 фильтра позволяет обеспечить требуемую Стандартом точность представления каналов регулирования в математической модели АРВ СД и использовать последнюю для выбора параметров настройки АРВ СД.



б) ФЧХ

Рисунок 3.6 – ЧХ дискретного звена производной и её аппроксимаций Паде различного порядка при *T* = 0.06 с

Оценка погрешности по описанному способу проведена для ряда наиболее используемых в микропроцессорных АРВ СД дискретных динамических звеньев при варьировании их постоянных времени и варьировании порядка аппроксимации. Рекомендации по представлению динамических звеньев в математической модели АРВ СД при их дискретизации различными методами в виде БИХ-фильтра, разработанные на основе сравнения погрешностей, приведены в таблице 3.2.

Представление звена до	Рекомендуемый вид замещения дискретного звена при соотношении постоянных времени и шага дискретизации: 5· <i>h</i> > min(T1, T2) при дискретизации методом			
дискретизации	обратной разности	прямой разности		
$\frac{1}{T \cdot p}$	$\frac{1}{T \cdot p}$	$\frac{1}{T \cdot p}$		
$\frac{1}{\overline{T \cdot p + 1}}$	$\frac{1+0.5\cdot h\cdot p}{1+(T+0.5\cdot h)\cdot p}$	$\frac{1 - 0.5 \cdot h \cdot p}{1 + (T - 0.5 \cdot h) \cdot p}$		
$\frac{p}{T \cdot p + 1}$	$\frac{p}{1 + (T + 0.5 \cdot h) \cdot p}$	$\frac{p}{1 + (T - 0.5 \cdot h) \cdot p}$		
$\frac{\overline{T_1 \cdot p + 1}}{\overline{T_2 \cdot p + 1}}$	$\frac{1 + (T_1 + 0.5 \cdot h) \cdot p}{1 + (T_2 + 0.5 \cdot h) \cdot p}$	$\frac{1 + (T_1 - 0.5 \cdot h) \cdot p}{1 + (T_2 - 0.5 \cdot h) \cdot p}$		
$\frac{1}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	$\frac{h \cdot \left(1 + \frac{h \cdot T_1}{3 \cdot T_2^2}\right) \cdot p + 1}{\left(T_2^2 + 0.5 \cdot T_1 \cdot h\right) \cdot p^2 + \left(T_1 + h\right) \cdot p + 1}$	$\frac{h \cdot \left(1 - \frac{h \cdot T_1}{3 \cdot T_2^2}\right) \cdot p + 1}{\left(T_2^2 - 0.5 \cdot T_1 \cdot h\right) \cdot p^2 + \left(T_1 - h\right) \cdot p + 1}$		
$\frac{T_{a2}^2 \cdot p^2 + T_{a1} \cdot p + 1}{T_{b2}^2 \cdot p^2 + T_{b1} \cdot p + 1}$	$\frac{\left(T_{a2}^{2}+0.5\cdot T_{a1}\cdot h+0.25\cdot h^{2}\right)\cdot p^{2}+\left(T_{a1}+h\right)\cdot p+1}{\left(T_{b2}^{2}+0.5\cdot T_{b1}\cdot h+0.25\cdot h^{2}\right)\cdot p^{2}+\left(T_{b1}+h\right)\cdot p+1}$	$\frac{\left(T_{a2}^2 - 0.5 \cdot T_{a1} \cdot h + 0.25 \cdot h^2\right) \cdot p^2 + (T_{a1} - h) \cdot p + 1}{\left(T_{b2}^2 - 0.5 \cdot T_{b1} \cdot h + 0.25 \cdot h^2\right) \cdot p^2 + (T_{b1} - h) \cdot p + 1}$		

Таблица 3.2 – Рекомендации по замещению дискретных динамических звеньев в математической модели АРВ СД непрерывными динамическими звеньями

При дискретизации динамических звеньев билинейным методом рекомендуется применение представления этих звеньев до дискретизации во всем диапазоне постоянных времени – то есть оставлять эти динамические звенья без изменений.

Также интерес представляет дискретный фильтр скользящего среднего (суммирующий фильтр):

$$y_i = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_{i-n} , \qquad (3.73)$$

Если за постоянную времени суммирующего фильтра принять величину $T = h \cdot N$, то по описанному алгоритму для него можно получить следующие аппроксимации Паде:

$$W_{an0/1}(p) = \frac{e^{-p \cdot 0.2 \cdot T}}{0.3 \cdot T \cdot p + 1},$$
(3.74)

$$W_{an0/2}(p) = \frac{12}{(T \cdot p)^2 + 6 \cdot T \cdot p + 12}.$$
(3.75)

Полученные аппроксимации Паде (3.74) и (3.75) обеспечивают удовлетворительную точность при значениях постоянной времени $T \le 0.04$ с. При более высоких значениях постоянной времени дискретного суммирующего фильтра необходимо применение аппроксимации более высокого порядка. Поскольку на практике маловероятно использование

таких фильтров с бо́льшими постоянными времени, то вид аппроксимаций более высокого порядка в диссертационной работе не приведен.

Из предложенных вариантов аппроксимаций дискретного суммирующего фильтра рекомендуется использовать (3.74), если задача применения аппроксимации позволяет использовать звено чистого запаздывания, в ином случае рекомендуется использовать (3.75).

Также необходимо получить аппроксимацию Паде передаточной функции экстраполятора нулевого порядка (*zero-order hold*):

$$W_{zoh}(p) = \frac{1 - e^{-p \cdot T}}{p \cdot T}.$$
(3.76)

Исследования показали, что для звена экстраполятора нулевого порядка целесообразно использовать аппроксимации Паде того же вида, что и для суммирующего звена (3.74) и (3.75).

3.3.5 Выводы

Современные АРВ СД выполняются на микропроцессорной элементной базе. В таких устройствах алгоритм регулирования реализуется конечно-разностными уравнениями с использованием дискретных фильтров, что необходимо учитывать при создании математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД.

Для этого реализован алгоритм аппроксимации на основе теоремы Паде в общем виде, который позволяет получить аппроксимацию дискретных фильтров в дробно-рациональном операторном виде с учетом зависимости динамических характеристик аппроксимирующей функции от параметров дискретного фильтра. Порядок аппроксимации выбирается исходя из требуемой точности в заданном диапазоне изменения параметров дискретного фильтра. Описанный алгоритм реализован в САПР *Mathcad* с использованием встроенного в него языка программирования. Разработана несложная модификация алгоритма, позволяющая получать аппроксимации Паде с реализацией звена чистого запаздывания в аппроксимирующей функции.

Показано, что аппроксимации дискретного звена производной, применяемые среди производителей, имеют относительную погрешность до 18% в диапазоне от 0 до 3 Гц и до 100% в диапазоне от 0 до 10 Гц. Из этого следует, что применение такой аппроксимации дискретного звена производной может привести к количественно некорректным результатам анализа колебательной устойчивости на частотах ниже 3 Гц и качественно некорректным результатам – на частотах свыше 3 Гц.

Разработанный алгоритм аппроксимации на основе теоремы Паде позволяет получать аппроксимации дискретных фильтров в виде, пригодном для использования ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме. В диссертационной работе получены аппроксимации Паде в виде непрерывных динамических звеньев для ряда дискретных КИХ-фильтров и непрерывных динамических звеньев при их дискретизации различными способами, используемых в промышленных образцах микропроцессорных АРВ СД. Эти аппроксимации обеспечивают создание математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД с требуемой точностью.

4 Методика выбора параметров настройки микропроцессорного АРВ СД генератора, работающего в энергообъединении сложной структуры

Расчетная методика выбора параметров настройки микропроцессорных АРВ СД, описанная в диссертационной работе, разработана применительно к АРВ СД, имеющим в своем составе системный стабилизатор типа *PSS2B*. Разработанная автором расчетная методика выбора параметров настройки промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД включает в себя методику выбора параметров настройки регуляторов напряжения и методику выбора параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B*. Выбор параметров настройки регуляторов напряжения, входящих в состав АРВ СД зарубежного производства, может быть осуществлен как с применением уже существующей в АО «НТЦ ЕЭС» расчетной методики выбора параметров настроек АРВ СД с использованием цифровой модели энергосистемы, так и с использованием методик, применяемых в широком круге отечественных и зарубежных исследовательских коллективов. Разработанная автором методика выбора параметров настройки регуляторов напряжения в большей своей части повторяет имеющуюся в АО «НТЦ ЕЭС» методику [8] ввиду ее эффективности. Таким образом, методика выбора параметров настройки регуляторов напряжения, входящих в состав АРВ СД зарубежного производства, является уже решенной задачей и в диссертационной работе не рассматривается.

Расчетная методика выбора параметров настройки микропроцессорных АРВ СД, обеспечивающих колебательную устойчивость в широком многообразии схемно-режимных условий работы энергообъединения сложной структуры, включает в себя методику разработки достоверной математической модели промышленного образца АРВ СД, подготовку схемнорежимных условий работы рассматриваемого генератора, необходимых для анализа его колебательной устойчивости в цифровой модели энергосистемы, методику анализа колебательной устойчивости и порядок выбора параметров настройки.

4.1 Область применения

Настоящая методика разработана с целью повышения надёжности функционирования ЕЭС России и предназначена для использования специалистами при осуществлении выбора параметров настройки APB СД синхронных генераторов, которые работают в энергообъединении сложной структуры и имеют в своем составе системный стабилизатор типа *PSS2B*. Настоящая методика предназначена для использования научными и научнотехническими специалистами, при осуществлении ими выбора параметров настройки системных стабилизаторов АРВ СД, работающих в ЕЭС России или других энергообъединений сложной структуры.

Расчетная методика выбора параметров настройки микропроцессорных АРВ СД, обеспечивающих колебательную устойчивость в широком многообразии схемно-режимных условий работы энергообъединения сложной структуры:

- разработана на основе «классической» методики с учетом устранения ее недостатков и использования частотных методов анализа колебательной устойчивости
- предполагает выбор параметров настройки микропроцессорных APB СД с использованием разработанных автором инструментов в САПР *Mathcad*, но допускает использование других расчетных инструментов с аналогичными алгоритмами;
- предполагает выбор параметров настройки микропроцессорных АРВ СД с использованием цифровой модели энергосистемы, реализованной в ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме;
- требует применения верифицированной цифровой модели энергосистемы;
- требует применения верифицированных цифровых моделей АРВ СД, которые создаются с использованием разработанной методики создания математических моделей микропроцессорных АРВ СД;
- разработана применительно к АРВ СД, имеющим в своем составе системный стабилизатор типа *PSS2B*, и:
 - без каких-либо модификаций может быть применена к АРВ СД, имеющим в своем составе системный стабилизатор типа *PSS2A* или *PSS2C*;
 - путем исключения ряда шагов может быть применена к АРВ СД, имеющим в своем составе системный стабилизатор типа *PSS1A*;
 - путем комбинирования с уже существующей методикой в АО «НТЦ ЕЭС» [8]
 может быть применена к АРВ СД «отечественной структуры».

Настоящая методика устанавливает:

- порядок, выбора параметров настройки АРВ СД синхронных генераторов, имеющих в своем составе системный стабилизатор типа *PSS2B*;
- требования к используемым цифровым моделям энергосистем и расчетным условиям. Настоящая методика не устанавливает:
- распределение функций и порядок взаимодействия между различными организациями при выборе параметров настройки АРВ СД синхронных генераторов, сборе исходных данных, проверке результатов;
- порядок реализации выбранных параметров настройки на конкретном энергообъекте.

В приложении *В* приведены блок-схемы разработанной методики выбора параметров настройки микропроцессорных АРВ СД, а в настоящем разделе диссертационной работы приведено ее описание с подробными комментариями и иллюстративными примерами.

4.2 Подготовка цифровой модели энергосистемы для выбора параметров настройки АРВ СД

4.2.1 Виды колебаний и факторы, влияющие на степень их демпфирования

Работа генератора, для АРВ СД которого выбираются параметры настройки, может сопровождаться низкочастотными межсистемными колебаниями. внутригрупповыми колебаниями, колебаниями, колебаниями собственной станционными на частоте электромеханических колебаний ротора генератора, высокочастотными колебаниями в электромагнитных контурах генератора [33, 44]. Схемно-режимные условия работы генератора и параметры настройки его АРВ СД будут определять степень участия генератора во всех этих типах колебаний и влияние на их развитие. В данном подразделе диссертации сформулированы требования к подготовке рассматриваемых схемно-режимных условий работы генератора в цифровой модели энергосистемы для целей выбора параметров настройки его АРВ СД.

4.2.1.1 Колебания на собственной частоте электромеханических колебаний ротора генератора

На протекание колебаний на собственной частоте электромеханических колебаний ротора генератора в большей степени оказывает влияние загрузка генератора по активной мощности и ослабление схемы выдачи мощности электростанции при отключении входящих в нее сетевых элементов. Ослабление схемы выдачи мощности электростанции, увеличение загрузки генератора по активной мощности и уменьшение загрузки генератора по реактивной мощности и уменьшение загрузки генератора по реактивной мощности приводит к ухудшению условий демпфирования колебаний на собственной частоте электромеханических колебаний ротора генератора.

4.2.1.2 Станционные колебания

На протекание станционных колебаний наибольшее влияние оказывает ослабление схемы выдачи мощности электростанции при отключении входящих в нее сетевых элементов, суммарная загрузка генераторов электростанции по активной и реактивной мощности. Ослабление схемы выдачи мощности электростанции, увеличение суммарной загрузки генераторов электростанции по активной мощности и уменьшение суммарной загрузки генераторов электростанции по реактивной мощности приводит к ухудшению условий демпфирования станционных колебаний.

4.2.1.3 Внутригрупповые колебания

На протекание внутригрупповых колебаний при рассмотрении работы одной электростанции наибольшее влияние оказывает разница загрузки генераторов электростанции по активной и реактивной мощности, различие в параметрах генераторов электростанции, разнотипность систем возбуждения и АРВ генераторов электростанции. Чем больше различия по загрузке генераторов, их параметрам и типам систем возбуждения и АРВ, тем хуже условия демпфирования внутригрупповых колебаний.

Следует отметить, что в отечественной практике не принято принимать во внимание внутригрупповые колебания, так как в связи с особенностями формирования каналов стабилизации APB они являются слабо выраженными и в большинстве случаев их тяжело выделить на фоне станционных колебаний. Также деление локальных колебаний на внутригрупповые колебания, станционные колебания и колебания на собственной частоте электромеханических колебаний ротора генератора весьма условно, так как один из этих типов колебаний может быть представлен как суперпозиция двух других.

4.2.1.4 Низкочастотные межсистемные колебания

Как правило, низкочастотные межсистемные колебания наиболее выражены вблизи слабых связей. Влияние отдельного генератора или электростанции на развитие низкочастотных межсистемных колебаний вблизи слабой связи тем выше, чем больше номинальная мощность отдельного генератора или электростанции, и чем отдельный генератор или электростанция электрически ближе к слабой связи. Кроме того, влияние отдельного

генератора или электростанции на развитие низкочастотных межсистемных колебаний вблизи слабой связи существенно зависит от влияния загрузки электростанции по активной мощности на величину перетока в слабой связи. Увеличение передаваемой мощности по слабой связи, ослабление слабой связи при отключении входящих в нее линий, либо линий, не входящих в нее, но приводящих к снижению предельно передаваемой мощности по статической апериодической устойчивости, приводят к ухудшению условий протекания низкочастотных межсистемных колебаний вблизи данной слабой связи. Следует отметить, что практически оценить степень влияния каждого генератора рассматриваемой части энергосистемы по отдельности на развитие низкочастотных межсистемных колебаний вблизи слабой связи крайне затруднительно. Также степень влияния отдельного генератора электростанции на развитие низкочастотных межсистемных колебаний вблизи слабой связи колебаний вблизи слабой связи крайне затруднительно. Также степень влияния отдельного генератора электростанции на развитие низкочастотных межсистемных колебаний вблизи слабой связи может существенно зависеть от состава всего включенного генерирующего оборудования этой электростанции.

4.2.1.5 Высокочастотные колебания

На протекание высокочастотных колебаний в электромагнитных контурах генератора наибольшее влияние оказывает коэффициент усиления системы возбуждения по напряжению, степень зашумленности в измерительных каналах АРВ СД и уровень их фильтрации. Коэффициент усиления системы возбуждения по напряжению учитывается естественным образом и напрямую зависит от параметров генератора и режима его загрузки по активной и реактивной мощности. Значение этого коэффициента возрастает при снижении загрузки генератора по активной и реактивной мощности, что ухудшает условия протекания высокочастотных колебаний в электромагнитных контурах генератора. Ослабление схемы выдачи мощности электростанции и загрузка контролируемых сечений вблизи электростанции практически не оказывает влияния на условия протекания высокочастотных колебаний в электромагнитных контурах.

Существует множество причин, не позволяющих достоверно воспроизвести протекание высокочастотных колебаний в электромагнитных контурах генератора при цифровом моделировании с использованием ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме. Некоторыми из таких причин являются использование модели синхронного генератора с рядом упрощений (те или иные упрощения используются во всех ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме), малая достоверность сверхпереходных параметров синхронного генератора, принципиальная невозможность учесть степень зашумленности в измерительных органах АРВ СД.

118

4.2.1.6 Выводы

Для многих электростанций ЕЭС России, в особенности большой мощности, свойственно значительное изменение величины эквивалентного внешнего сопротивления в различных единичных и двойных ремонтных схемах. В целом для ЕЭС России свойственна выраженная многочастотность переходных процессов в связи с наличием множества слабых связей в энергосистеме и их высокой степени загрузки. При этом в зависимости от величины суммарной нагрузки в энергосистеме загрузка слабых связей может значительно изменяться. Это приводит к существенному изменению частотных свойств энергосистемы при изменении схемно-режимных условий работы генераторов электростанции, следовательно и изменению условий работы их АРВ СД.

Вместе с этим величины нагрузок, состав включенного генерирующего оборудования, параметры сетевых элементов и их коммутационное состояние, а так же потокораспределение мощностей по элементам электрической сети, являются наиболее неопределенной частью цифровой модели энергосистемы.

В связи с этим для анализа колебательной устойчивости с целью выбора параметров настройки APB СД необходимо рассмотреть комплекс схемно-режимных условий, в которых бы наблюдался весь возможный набор резонансных частот колебаний, а также были бы созданы наихудшие условия их демпфирования.

4.2.2 Требования к цифровой модели энергосистемы

Размерность и детальность цифровой модели энергосистемы определяется мощностью исследуемой электростанции, для которой выполняется выбор параметров настройки АРВ СД. В работе [1] показано, что в зависимости от мощности электростанции, для которой проводится анализ колебательной устойчивости, могут регистрироваться колебания различного вида:

- если в цифровой модели энергосистемы проводится анализ колебательной устойчивости электростанции, установленная мощность которой составляет лишь малую часть от мощности примыкающей к электростанции энергосистемы, наиболее вероятно возникновение только локальных колебаний при моделировании возмущений вблизи исследуемой электростанции;
- если в цифровой модели энергосистемы проводится анализ колебательной устойчивости электростанции сравнительно большой мощности по отношению к мощности примыкающей к электростанции энергосистемы, возможно возникновение

как локальных, так и низкочастотных системных колебаний при моделировании возмущений вблизи исследуемой электростанции.

Данное деление весьма условно и доля мощности электростанции по отношению к мощности примыкающей к электростанции энергосистемы считается малой, если составляет менее 3-5 крат (значение зависит от конкретных постоянных времени инерции генераторов, характеристик нагрузки и систем автоматического регулирования) [1]. Очевидно, что размер и подробность представления цифровой модели энергосистемы во втором случае должны быть больше, чем в первом случае.

Должна использоваться цифровая модель энергосистемы, созданная в ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме, на базе динамической модели объединенной энергосистемы, включающей электростанцию, для генераторов которой выбираются параметры настройки АРВ СД. При этом цифровая модель энергосистемы должна быть актуализирована на момент выбора параметров настройки АРВ СД. Таким образом, для выбора параметров настройки АРВ СД необходимо использовать цифровую модель энергосистемы операционной зоны филиала АО «СО ЕЭС», объектом диспетчеризации которого является рассматриваемая электростанция [7].

В цифровой модели энергосистемы электростанция, для АРВ СД генераторов которой выбираются параметры настройки, должна быть представлена в подробном (развернутом) виде с заданием отдельных генераторов со своими блочными трансформаторами. Параметры трансформаторов должны быть заданы в соответствии с их паспортными данными, а также должно быть корректным образом учтено влияние коэффициента трансформации на прочие параметры трансформатора (зависимость параметров трансформатора от положения анцапфы). Параметры синхронных машин должны быть заданы в соответствии с их паспортными данными, при этом в случае наличия исходных данных для четырех роторных контуров (X_d , $\dot{X_d}$, $X^{"}_{d}, X_{q}, X^{'}_{q}, X^{'}_{q}, T^{'}_{d0}, T^{'}_{d0}, T^{'}_{q0}, T^{'}_{q0})$ необходимо задавать модель синхронной машины по уравнениям Парка-Горева с 4-ю контурами. При использовании моделей синхронных машин без учета насыщения и наличии в паспортных данных одновременно ненасыщенных и сопротивлений синхронной насышенных значений машины необходимо задавать ненасыщенные значения.

Подробное представление в цифровой модели энергосистемы турбины и ее системы регулирования требуется при оснащении турбин быстродействующими системами регулирования, оказывающими заметное влияние на характер протекания электромеханических переходных процессов. При этом необходимо в системе регулирования турбины задать величины зоны нечувствительности по частоте и зоны нечувствительности по мощности равными нулю. В остальных случаях турбины и их системы регулирования необходимо задавать моделью, корректно учитывающей моментно-скоростную характеристику агрегата с учетом изменения потерь. Если таковых данных не имеется, то необходимо задать модели турбин в виде источника неизменной мощности на валу с механическим демпферным коэффициентом равным 1 о.е.

4.2.3 Требования к цифровым моделям АРВ СД

Наиболее существенное влияние на характер и демпфирование электромеханических колебаний оказывают АРВ СД. В связи с этим, корректное моделирование электромеханических переходных процессов реальной энергосистемы при возмущениях возможно лишь при включении в состав цифровой модели энергосистемы подробных моделей возбудителей и верифицированных моделей АРВ СД [76].

Цифровые модели возбудителей для систем возбуждения зарубежного производства следует разрабатывать в соответствии с [41], а параметры запрашивать у производителя. Цифровые модели возбудителей для систем возбуждения отечественного производства следует разрабатывать в соответствии с [33, 77].

К цифровым моделям АРВ СД предъявляются повышенные требования: эти модели должны верифицироваться по экспериментальным данным: ЧХ промышленных образцов микропроцессорных АРВ СД или их подробным и проверенным математическим моделям. Методика создания и проверки математических моделей АРВ СД по экспериментальным данным приведена в главе 2 настоящей диссертации и [69]. Такие требования позволяют обеспечить количественное совпадение результатов расчета электромеханических переходных процессов с данными натурных экспериментов [76].

При выборе параметров настройки АРВ СД и проведении соответствующих расчетных экспериментов, в цифровой модели АРВ СД исследуемого генератора и других генераторов рассматриваемой электростанции должны быть:

- Заблокирована форсировка возбуждения. Если форсировка возбуждения в результате моделирования тестовых возмущений срабатывает на других генераторах цифровой модели энергосистемы, то в цифровых моделях АРВ СД этих генераторов форсировка возбуждения также должна быть заблокирована.
- Устранены все звенья с ограничениями ограничения по потолкам возбуждения, входным и выходным значениям АРВ СД и системного стабилизатора и прочие.

- Устранена возможность перехода в другой режим регулирования кроме регулирования напряжения статора генератора (например, режим ограничения тока ротора или ограничения минимального возбуждения).
- Устранена возможность срабатывания блокировки каналов стабилизации при повышении частоты, снижении активной или реактивной мощности ниже заданной уставки и прочие.

4.2.4 Требования к перечню рассматриваемых режимов работы энергосистемы

4.2.4.1 Перечень базовых электрических режимов

На данном этапе подготовки цифровой модели энергосистемы определяются режимы работы энергосистемы, в которых будет выполняться выбор параметров настройки АРВ СД. При выборе параметров настройки АРВ СД необходимо рассматривать следующие базовые электрические режимы работы энергосистемы:

- электрический режим зимнего максимума нагрузок энергосистемы;
- электрический режим летнего максимума нагрузок энергосистемы;
- электрический режим зимнего минимума нагрузок энергосистемы;
- электрический режим летнего минимума нагрузок энергосистемы.

Перечень рассматриваемых базовых электрических режимов работы энергосистемы может быть расширен путем включения дополнительных электрических режимов, отражающих наиболее тяжелые схемно-режимные условия [7]. Например, для энергосистем, в которых существенную долю генерации составляют ГЭС, в перечень рассматриваемых электрических режимов может быть дополнительно включен электрический режим паводка.

В одном из указанных базовых электрических режимов работы энергосистемы необходимо предусмотреть максимальный состав включенного генерирующего оборудования на рассматриваемой электростанции (на основе наиболее характерного для этого состава оборудования электрического режима).

В одном из указанных базовых электрических режимов работы энергосистемы необходимо предусмотреть минимальный состав включенного генерирующего оборудования на рассматриваемой электростанции (на основе наиболее характерного для этого состава оборудования электрического режима).

4.2.4.2 Подготовка базовых электрических режимов и порядок загрузки контролируемых сечений по мощности

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

Следует заметить, что термин «слабая связь» сложен в своей формализации для применения на практике. При этом в действующих инструкциях по управлению электрическими режимами (положениях по управлению режимом) АО «СО ЕЭС» широко используется термин «контролируемое сечение», там же содержится перечень сетевых элементов входящих в контролируемые сечения, а также подробные результаты расчетов по определению величин максимально допустимого перетока активной мощности (МДП) в контролируемых сечениях. Данные контролируемые сечения заданы в цифровых моделях энергосистемы, которые используются для расчетов установившихся режимов, и которые широко используются среди специалистов. В связи с этим, при подготовке базовых электрических режимов с целью их утяжеления с целью ухудшения условий демпфирования низкочастотных межсистемных колебаний вблизи слабых связей при анализе колебательной представляется целесообразным использовать имеющиеся vстойчивости. ланные по контролируемым сечениям в цифровой модели энергосистемы. Однако при этом малое количество контролируемых сечений будут являться слабыми связями, так как их большая часть ограничивается по МДП по условию максимально допустимой токовой загрузки.

Таким образом, встает задача выделения среди известных контролируемых сечений ограниченного количества «опасных сечений», загрузка которых существенно влияет на условия протекания низкочастотных межсистемных колебаний вблизи них, и загрузка которых по активной мощности потенциально может привести к нарушению колебательной устойчивости энергосистемы. Однако как определение ограниченного количества «опасных сечений» среди известных контролируемых сечений, так и сама процедура их загрузки сложно поддаётся формализации ввиду наличия множества особенностей каждой конкретной энергосистемы и основывается на априорном знании ее характерных особенностей и личного опыта специалиста. Тем не менее, возможна разработка некоторых общих рекомендаций, которые могут оказать помощь в подготовке базовых электрических режимов с учетом требования к уровню загрузки «опасных сечений».

В базовых электрических режимах энергосистемы (см. подраздел 4.2.4.1) необходимо выявить контролируемые сечения вблизи рассматриваемой электростанции, уровень загрузки

которых по активной мощности существенно зависит от уровня загрузки самой электростанции и в перспективе может привести к колебательному процессу в результате возмущения вблизи рассматриваемой электростанции («опасные сечения»), а также определить необходимость в расширении набора или изменении рассматриваемых электрических режимов. При отсутствии возможности определить ограниченное количество «опасных сечений» экспертным способом предлагается использовать следующую последовательность действий:

- Необходимо подготовить цифровую модель энергосистемы для проведения расчетов установившихся режимов с учетом изменения частоты. В граничных узлах, примыкающих к рассматриваемой энергосистеме, необходимо задать эквивалентные генераторы. Номинальная мощность эквивалентных генераторов примыкающей энергосистемы должна соответствовать суммарной номинальной мощности генераторов примыкающей энергосистемы, находящихся во включенном состоянии. В параметрах всех генераторов цифровой модели энергосистемы необходимо задать одинаковый статизм регулирования частоты (или коэффициент чувствительности по частоте). Допустимо рассматривать только один из базовых режимов (см. подраздел 4.2.4.1).
- 2. Загрузить по активной мощности все генераторы рассматриваемой электростанции на половину от номинальной мощности.
- Зарегистрировать перетоки активной мощности в контролируемых сечениях примыкающей к рассматриваемой электростанции энергосистеме (сечение выдачи мощности электростанции не рассматривается). Данное значение мощности для контролируемого сечения № *j* обозначим как *P*_{1/2 сеч-*j*}.
- Загрузить по активной мощности все генераторы рассматриваемой электростанции до номинальной мощности.
- Зарегистрировать перетоки активной мощности в контролируемых сечениях примыкающей к рассматриваемой электростанции энергосистеме. Данное значение мощности для контролируемого сечения № *j* обозначим как P_{сеч-j}.
- 6. Определить МДП по каждому из контролируемых сечений в соответствии с действующим положением по управлению режимом энергосистемы. Значение МДП для контролируемого сечения № *j* обозначим как Р_{МДП-*j*}.
- Определить изменение перетока активной мощности в каждом из контролируемых сечений в результате загрузки рассматриваемой электростанции относительно МДП. Изменение перетока для сечения № *j* рассчитывается по следующей формуле: Δ*P*_{ceч-j} = | *P*_{ceч-j}.- *P*_{1/2_ceч-j} |/ *P*_{MДП-j}.

- 8. Исключить из рассмотрения контролируемые сечения с изменением перетока активной мощности менее 10% относительно предельного значения: ΔP_{сеч-j} <10%. В зависимости от схемно-режимных условий работы рассматриваемой электростанции количество рассматриваемых контролируемых сечений, в которых величина изменения перетока активной мощности равно или более 10%, может получиться различным.</p>
- 9. Выделить не более 3 рассматриваемых контролируемых сечений с наибольшей величиной изменения перетока активной мощности в сечении относительно МДП $\Delta P_{\text{сеч-}i}$. Данные рассматриваемые контролируемые сечения условно можно назвать «опасными сечениями» для рассматриваемой задачи выбора параметров настройки АРВ СД. В установившихся режимах величина перетока мощности в рассматриваемых контролируемых сечениях будет зависеть от загрузки по мощности рассматриваемой электростанции, а, значит, и в переходных процессах изменение активной мощности генераторов электростанции под действием каналов стабилизации АРВ СД будет оказывать влияние на изменение перетоков активной мощности в рассматриваемых контролируемых сечениях. Тем самым выявляются контролируемые сечения, в колебаниях мощности по которым принимает участие рассматриваемая электростанция, и на демпфирование колебаний мощности в которых АРВ СД генераторов рассматриваемой электростанции могут оказывать влияние.
- Далее в зависимости от результатов поиска рассматриваемых контролируемых сечений необходимо подготовить базовые режимы (см. подраздел 4.2.4.1) к выполнению расчетов следующим образом:
 - Рассматриваемых контролируемых сечений не обнаружено. В этом случае требуется подготовить базовые режимы (см. подраздел 4.2.4.1) путем внесения следующих изменений:
 - і. Привести схему рассматриваемой электростанции к нормальной.
 - іі. Затем загрузить все включенные генераторы рассматриваемой электростанции до максимального уровня по активной мощности и до характерного значения для рассматриваемого электрического режима по реактивной мощности (либо выставить номинальные значения напряжения на генераторах электростанции).
 - b. Рассматриваемые контролируемые сечения обнаружены. В этом случае требуется подготовить базовые режимы (см. подраздел 4.2.4.1) путем внесения следующих изменений:
 - і. Привести схему рассматриваемой электростанции к нормальной.

- іі. Затем загрузить все включенные генераторы рассматриваемой электростанции до максимального уровня по активной мощности и до характерного значения для рассматриваемого электрического режима по реактивной мощности (либо выставить номинальные значения напряжения на генераторах электростанции).
- ііі. Далее необходимо одновременно загрузить по активной мощности до уровня МДП все рассматриваемые контролируемые сечения не изменяя мощность исследуемой электростанции в направлении, характерном для рассматриваемого электрического режима. При наличии хотя бы одного рассматриваемого контролируемого сечения, загруженного до уровня 100% от МДП, допускается загрузка прочих рассматриваемых контролируемых сечений до уровня 90%-100% от МДП.
- iv. В случае, если сохраняя мощность исследуемой электростанции не удается загрузить по активной мощности одно рассматриваемое контролируемое сечение до уровня 100% от МДП, а прочие рассматриваемые контролируемые сечения до уровня 90%-100% от уровня МДП, то следует подготовить несколько электрических режимов с поочередной загрузкой рассматриваемых контролируемых сечений до уровня МДП.

Если процедура определения рассматриваемых контролируемых сечений не проводится и загрузка контролируемых сечений производится экспертным способом, то в таком случае требуется подготовить базовые электрические режимы (см. подраздел 4.2.4.1) путем внесения следующих изменений:

- Привести схему рассматриваемой электростанции к нормальной.
- Затем загрузить все включенные генераторы рассматриваемой электростанции до максимального уровня по активной мощности и до характерного значения для рассматриваемого электрического режима по реактивной мощности (либо выставить номинальные значения напряжения на генераторах электростанции).

При подготовке базовых электрических режимов и, в дальнейшем, дополнительных схемно-режимных ситуаций 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 изменение активной и реактивной мощности исследуемой электростанции допускается в последнюю очередь, при исчерпании остальных возможностей регулирования. Например, если требуется ввести

электрический режим в допустимую область по напряжению, то изменение реактивной мощности исследуемой электростанции допускается только при исчерпании иных способов регулирования.

Если в результате изменения загрузки рассматриваемой электростанции параметры электрического режима вышли за область длительно допустимых значений, то 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.

4.2.4.3 Подготовка характерных электрических режимов на основе базовых электрических режимов

На основе каждого из подготовленных базовых электрических режимов работы энергосистемы, разработанных на предыдущем этапе (подраздел 4.2.4.2), необходимо подготовить следующие характерные электрические режимы [7]:

- 1. Нормальная схема выдачи мощности электростанции, без изменений.
- 2. Единичные ремонтные схемы при отключении поочередно всех отходящих от распределительного устройства электростанции (к которому подключен генератор с АРВ СД, для которого выбираются параметры настройки) линий электропередачи или автотрансформаторов связи. При формировании единичных ремонтных схем допустимо рассматривать отключение только одной цепи многоцепной линии электропередачи, которая обладает наименьшим сопротивлением. При отключении линий электропередачи или автотрансформаторов связи заданное напряжение в узлах подключения синхронных генераторов рассматриваемой электростанции не корректируется.
- 3. Двойные ремонтные схемы при отключении поочередно всех отходящих от распределительного устройства электростанции (к которому подключен генератор с АРВ СД, для которого выбираются параметры настройки) линий электропередачи или автотрансформаторов связи в каждой из единичных ремонтных схем. При формировании двойных ремонтных схем и отключении одной или двух цепей многоцепной линии электропередачи допустимо рассматривать отключение только тех цепей, которые обладают наименьшим сопротивлением. При отключении линий электропередачи или автотрансформаторов связи заданное напряжение в узлах

подключения синхронных генераторов рассматриваемой электростанции не корректируется.

- 4. Режим потребления или минимальной генерации реактивной мощности в соответствии с диаграммой мощности синхронного генератора («*P-Q* диаграмма») с учетом параметров настройки ОМВ (вблизи границы ОМВ) в нормальной схеме выдачи мощности электростанции. Для формирования режима необходимо совершить действия в следующем порядке приоритета:
 - Уменьшить заданное напряжение генератора до величины не ниже длительно допустимых значений.
 - Отключить реакторы при их наличии на шинах высокого напряжения электростанции и ближайших подстанций.
 - Подключить к шинам высокого напряжения электростанции фиктивную конденсаторную батарею требуемой мощности.

В случае, если выбираются параметры настройки АРВ СД нескольких генераторов электростанции, то необходимо подготовить режим потребления реактивной мощности всеми данными генераторами одновременно. При этом, для каждого генератора необходимо учитывать его диаграмму мощности («*P-Q* диаграмма») и параметры настройки ОМВ (вблизи границы ОМВ) индивидуально.

- 5. Дополнительно могут быть рассмотрены схемы с отключенным состоянием одного из сетевых элементов, входящих в любое из рассматриваемых контролируемых сечений с одновременным изменением перетока мощности по данному сечению до уровня аварийно допустимого перетока активной мощности (АДП).
- 6. Отключение одного сетевого элемента, входящего в состав любого из рассматриваемых контролируемых сечений с одновременным изменением перетока активной мощности до уровня АДП, приравнивается к единичной ремонтной схеме. На основе данной единичной ремонтной схемы дополнительно могут быть рассмотрены двойные ремонтные схемы путем отключения ещё одного сетевого элемента, входящего в состав любого рассматриваемого контролируемого сечения или подключенного к распределительному устройству рассматриваемой электростанции.

4.2.5 Выводы

Работа генератора, для АРВ СД которого выбираются параметры настройки, может сопровождаться различными видами колебаний по их физической природе и характеристикам [33, 44]. 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 колебаний, 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 «отечественной структуры». В диссертационной работе выполнены формализация и актуализация требований к подготовке цифровой модели энергосистемы и рассматриваемых в ней схемно-режимных условий работы генератора при анализе колебательной устойчивости.

В результате выполнения данных требований формируется перечень наиболее тяжелых с позиции анализа колебательной устойчивости схемно-режимных условий работы электростанции, что необходимо для получения корректных результатов анализа колебательной устойчивости энергосистемы.

4.3 Условия проведения экспериментов в тестовой модели энергосистемы

Разработанную методику выбора параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B* АРВ СД генератора, работающего в энергообъединении сложной структуры, удобно рассмотреть на простом примере известной схемы с её доступным подробным описанием. Такой схемой является тестовая схема энергосистемы для испытаний АРВ СД, описанная в Стандарте АО «СО ЕЭС» [7]. В связи с этим выбор параметров настройки и их проверка выполнена в тестовой схеме [7]. Помимо описания тестовой схемы в [7] приведены различные схемно-режимных условия (Режимы), используемые для проверки основных функций АРВ СД. Выбор параметров настройки АРВ СД и оценка качества регулирования выполнена всего в трех режимах для простоты и наглядности получаемых результатов анализа колебательной

устойчивости. Рассмотрены следующие Режимы (Режимы с (') отличаются от приведенных в [7], цель внесения изменений объяснена ниже):

- Режим 1' Режим, в котором генератор с АРВ СД работает в схеме «машина линия шины бесконечной мощности». Данный режим используется с целью выявления возможных неточностей или ошибок при подготовке исходных данных или при выполнении расчетов, а также для оценки качества демпфирования (см. рисунок 4.1а; во всех режимах АРВ СД подключается к генератору Г-1_1).
- Режим 8 Режим, в котором генератор с АРВ СД работает в схеме, содержащей еще два генератора. Наличие в схеме дополнительных двух генераторов с не оптимально настроенными АРВ СД позволяет оценить влияние выбранной настройки на качество демпфирования не только на собственной частоте электромеханических колебаний ротора исследуемого генератора, но и на частоте взаимных колебаний этого генератора относительно других (см. рисунок 4.1б);
- Режим 4' Режим, при котором наблюдаются колебания режимных параметров на низкой частоте электромеханических колебаний (0.2-0.3 Гц; см. рисунок 4.1в).



Рисунок 4.1 – Схемно-режимные условия для проведения экспериментов по оценке выбранных с помощью методик параметров настройки системного стабилизатора

Примечание: в Режиме 8 генератор ЭС № 2 переведен в двигательный режим

131

Как отмечено выше, в качестве исходных данных для выполнения расчетов по выбору параметров настройки АРВ СД должны выступать верифицированные цифровые модели энергосистемы. На данный момент наиболее достоверно передающей свойства тестовой схемы является ее цифровая модель, созданная в ПАК РВ *RTDS*. Поэтому она использована для получения исходных данных – РЧХ разомкнутой САР. Получение РЧХ разомкнутой САР возможно с помощью методики экспериментального получения ЧХ АРВ СД [65]. Поскольку получение РЧХ разомкнутой САР предполагает отключение стабилизирующих сигналов, то при сильной загруженности линий электропередачи могут появиться незатухающие колебания режимных параметров энергосистемы, что осложнят проведение таких опытов. По этой причине в Режимах 1 и 4 разгружен синхронный генератор, для которого выбираются параметры настройки АРВ СД.

В качестве промышленного образца микропроцессорного АРВ СД использован АРВ СД типа *AVR*-4M производства ООО «АСУ-ВЭИ» [63]. В этом АРВ СД реализован системный стабилизатор типа *PSS2B*, структурная схема которого представлена на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 - Структурная схема системного стабилизатора типа PSS2B в составе AVR-4M

4.4 Выбор параметров настройки по «классической» методике

Оценка эффективности результатов разрабатываемой методики произведена в сравнении с результатами другой методики, которая имеет широкое распространение и хорошо себя зарекомендовала. В целом, в зарубежной практике, применительно к системному стабилизатору типа *PSS2B* вопрос анализа колебательной устойчивости энергосистем рассмотрен в большом количестве литературы [14, 36-39, 44, 50]. Также сформулированы требования к процессу выбора параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B* и качеству стабилизации со стороны нормативно-технической документации [12, 13, 20, 41, 42, 44, 78-80]. В качестве таковой методики рассмотрена подробно описанная в [36, 41, 44] с дополнительными пояснениями в [37]. Далее описаны основные идеи, на которых основана эта методика и

результат выбора параметров настройки в соответствии с ними. Далее для упрощения данная методика названа «классической».

Звенья высокочастотных фильтров (*washout filters*) с постоянными времени T_w служат для определения величины отклонения сигнала от установившегося значения. Без таких фильтров переход от одного установившегося режима работы генератора по частоте или активной мощности к другому сопровождался бы продолжительным изменением напряжения статора под действием отклонения сигнала системного стабилизатора. Чем меньше значение постоянных времени T_w , тем меньше амплитуда и время изменения напряжения статора генератора под действием отклонения сигнала системного стабилизатора при изменении режима работы генератора. С другой стороны, значение постоянных времени T_w должно быть таким высоким, чтобы не искажать фазу измеренного сигнала на наблюдаемых резонансных частотах электромеханических колебаний ротора генератора. Проведенный анализ РЧХ в различных схемно-режимных условиях показал, что генератор принимает участие в колебаниях с наименьшим значением частоты 0.2 Гц. Постоянные времени T_w выбираются равными удвоенному значению периода колебаний на этой частоте. Таким образом, все постоянные времени $T_{w1} = T_{w2} = T_{w3} = T_w = 10$ с, а звено с постоянной времени T_{w4} шунтируется.

Звено фильтра линейной составляющей (*RAMP-tracking filter*) служит как для фильтрации составляющих колебаний на частотах крутильных колебаний валопровода, так и для минимизации отклонения выходного сигнала системного стабилизатора при изменении мощности энергоблока. Такие изменения могут быть вызваны как набором или сбросом мощности энергоблока по заданию оператора, так и при автоматическом регулировании частоты. Следует отметить, что во многих исследованиях не обращается достаточно внимания на то, что параметры этого фильтра существенно влияют на поведение регулятора в области высоких частот (выше 5 Гц). Параметрами данного фильтра являются постоянные времени T_8 и T_9 , степенные показатели N и M, которые выбраны типовыми: N = 1, M = 5, $T_8 = 0.1$ с, $T_9 = T_8 \cdot M = 0.5$ с. Коэффициент усиления K_{s3} для данного типа системного стабилизатора принимается равным 1.

Апериодическое звено с коэффициентом усиления K_{s2} и постоянной времени T_7 называется «интегрирующим», и, соответственно, на его выходе получается интеграл отклонения активной мощности генератора. Данное апериодическое звено является совмещением одного звена высокочастотного фильтра с постоянной времени T_7 и интегрирующего звена с постоянной времени, равной механической постоянной времени инерции агрегата T_j . Выход данного апериодического звена является интегралом отклонения активной мощности генератора от установившегося значения. Постоянная времени T_7

выбирается равной T_w , а коэффициент $K_{s2} = T_7/T_1 = 1$.

Звенья фильтров компенсации фазы (phase compensation) с постоянными времени T_1 - T_4 , *T*₁₀ и *T*₁₁ предназначены для компенсации запаздывания сигнала интеграла ускоряющей мощности, которое возникает за счет инерционности электромагнитных контуров возбудителя и обмотки возбуждения генератора. В идеальном случае, ФЧХ фильтра компенсации фазы должна быть обратна ФЧХ переходной функции разомкнутой САР, характеризующей отношение электромагнитного момента генератора к выходному значению сигнала АРВ СД. Однако для реальных условий эксплуатации такой фильтр физически нереализуем, поэтому данное требование должно выполняться только в диапазоне частот электромеханических колебаний ротора, наблюдаемых на генераторе, для которого выбираются параметры настройки. Даже при этом точная компенсация запаздывания на всём диапазоне частот невозможна. В одном диапазоне может быть избыточная компенсация, а в другом – недостаточная. В «классической» методике [41, 44] дается рекомендация, что при невозможности точной компенсации запаздывания, более желательной является недостаточная компенсация с отставанием по фазе порядка 10-20°, так как при этом возникает дополнительный положительный синхронизирующий момент. Помимо этого, компенсация фазы должна быть выбрана компромиссной для всех схемно-режимных условий работы рассматриваемого генератора.

Получение ФЧХ переходной функции разомкнутой САР, характеризующей отношение электромагнитного момента генератора к выходному значению сигнала АРВ СД, выполнено с использованием рекомендаций, изложенных в [44]. Для получения этой частотной характеристики рассчитывается отношение спектров сигналов, отвечающих электромагнитному моменту генератора и напряжения возбуждения, после подачи тестового импульса на вход возбудителя при фиксированной частоте вращения ротора исследуемого генератора. На рисунке 4.3 изображены полученные таким образом ФЧХ для режимов 1' и 8, а так же ФЧХ фильтра компенсации фазы. Значения параметров фильтров выбраны равными $T_1 = 0.8$ с, $T_2 = 0.01$ с, $T_3 = 2$ с, $T_4 = 1.2$ с, динамическое звено с постоянными времени T_{10} и T_{11} не используется. В соответствии с «классической» методикой параметры фильтров выбраны такими, что в области 0.1-2 Гц наблюдается недостаточная компенсация с отставанием по фазе в 20°. Из рисунка 4.3 видно, что в режиме 8 наблюдается «излом» ФЧХ на частоте 0.6 Гц, который вызван взаимодействием исследуемого генератора с другими генераторами энергосистемы. Вблизи данной резонансной частоты электромеханических колебаний компенсация не может быть обеспечена ни при каких параметрах фильтра. Это является показателем неэффективности демпфирования колебаний системным стабилизатором на данной частоте в режиме 8.

Следует отдельно заметить, что в современных ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме, таких как ПВК *Eurostag* и ПВК *RUStab*, отсутствует возможность проводить опыты с фиксированной частотой вращения ротора генератора. Для этого необходимо создавать специализированные пользовательские модели турбины, которые бы обеспечивали с некоторой погрешностью фиксированную частоту вращения ротора генератора. Однако разработка таких моделей весьма сложна, так как должна учитывать работу численных методов расчета установившихся режимов и переходных процессов в используемом ПВК для одновременного обеспечения численной устойчивости и обеспечения условия постоянства частоты вращения ротора генератора. Это создает проблемы при использовании «классической» методики по выбору параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B* в цифровых моделях, реализованных в ПВК *Eurostag* и ПВК *RUStab*. Однако в цифровой модели энергосистемы, реализованной в ПАК РВ *RTDS*, такие опыты могут быть выполнены.



Рисунок 4.3 – Обратные ФЧХ к ФЧХ переходной функции разомкнутой САР, характеризующей отношение электромагнитного момента генератора к выходному значению сигнала АРВ СД, и ФЧХ фильтра компенсации фазы при выбранных параметрах

Определенные рекомендации в «классической» методике [41, 44] по выбору общего коэффициента усиления системного стабилизатора K_{s1} отсутствуют. В «классической» методике содержатся общие рекомендации, заключающиеся в том, что значение K_{s1} должно быть максимально возможным для конкретных условий эксплуатации генератора, и может быть определено опытным путём. Это требует проведения системных испытаний с прочими выбранными параметрами настройки системного стабилизатора типа *PSS2B*, в котором постепенно повышается значение K_{s1} вплоть до величины, при которой будут наблюдаться слабозатухающие колебания напряжения возбуждения. Рабочее значение K_{s1} выбирается в 2-3

раза меньше полученной величины. Однако разрабатываемая в диссертационной работе методика выбора параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B* не должна требовать проведения таких системных испытаний. По данной причине такой способ выбора значения K_{s1} не считается приемлемым. В данном случае значение коэффициента K_{s1} выбрано таким, чтобы общий коэффициент усиления системного стабилизатора на частотах 0.1-2 Гц получился близким к общему коэффициенту усиления системного стабилизатора с типовыми настройками, приведенными в [41]. Исходя из этого, значение коэффициента получается равным $K_{s1} = 2.8$ е.в.н./о.е.

Определенные рекомендации в «классической» методике [41, 44] по выбору предельных значений входных и выходных величин системного стабилизатора V_{SI1MAX}, V_{SI1MIN}, V_{SI2MAX}, V_{SI2MIN}, V_{STMAX} и V_{STMIN} отсутствуют. Предполагается, что величины предельных значений *V*_{S11MAX}, *V*_{S11MIN}, *V*_{S12MAX}, *V*_{S12MIN}, являются ограничениями, вызванными работой датчиков соответствующих режимных параметров, но также их диапазон может быть уменьшен программными средствами. При этом величины V_{STMAX} и V_{STMIN} традиционно выбираются такими, чтобы под действием работы системного стабилизатора не происходило изменения напряжения статора генератора на величину не более 5% или 10% при изменении частоты в энергосистеме с большой скоростью. В исследуемом АРВ СД типа AVR-4M выход системного стабилизатора поступает на выходной сумматор APB, в связи с чем задание величин V_{STMAX} и V_{STMIN} на уровне 5% или 10% не будет обеспечивать изменение напряжения статора генератора на величину не более 5% или 10% при изменении частоты в энергосистеме с большой скоростью. Для ограничения величины изменения напряжения статора при изменении частоты в энергосистеме с большой скоростью в АРВ СД типа AVR-4M реализован эффективный алгоритм блокировки каналов стабилизации, что позволяет принять задавать произвольные значения величин V_{STMAX} и V_{STMIN}. Предельные значения выхода системного стабилизатора V_{STMAX} и V_{STMIN} приняты равными ±1 е.в.н. Предельные значения входа по активной мощности V_{SI2MAX} и V_{SI2MIN} принимаются равными ±2 о.е.

Выбранные по «классической» методике [41, 44] параметры настройки системного стабилизатора типа *PSS2B* сведены в таблицу 4.1 (столбец под заголовком «вариант 1»).

Пополнотр	Ед. изм.	Значение		
Параметр		Вариант 1*	Вариант 2**	Вариант 3***
T_{WI}	с	10	10	10
T_{W2}	с	10	10	10
T_{W3}	с	10	10	10
T_{W4}	с	****	****	****
T_{I}	с	0.8	0.36	0.6
T_2	с	0.01	0.68	3
T_3	с	2	0.24	0.2
T_4	с	1.2	0.02	0.015
T_7	с	10	10	10
T_8	с	0.5	0.5	0.5
T_{9}	с	0.1	0.1	0.1
T_{10}	с	0.1	0.15	0.2
T_{II}	с	0.1	0.01	0.01
N	с	1	1	1
М	с	5	5	5
K_{sl}	е.в.н./о.е.	2.8	3.8	16
K _{s2}	-	1	1.12	1.6
K_{s3}	-	1	1	0.5
V _{SIIMAX}	0.e.	1	1	1
V _{SIIMIN}	0.e.	-1	-1	-1
V _{SI2MAX}	0.e.	2	2	2
V _{SI2MIN}	0.e.	-2	-2	-2
V _{STMAX}	е.в.н.	1	1	1
V _{STMIN}	е.в.н.	-1	-1	-1

Таблица 4.1 – Сводная таблица параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B* по различным методикам

^{*} – параметры настройки, выбранные по «классической» методике

** – параметры настройки, выбранные в соответствии с разработанной методикой

*** – параметры настройки, выбранные многопараметрическим методом оптимизации

**** – звено с постоянной времени T_{w4} шунтируется

4.5 Выбор параметров настройки методом многопараметрической оптимизации

С учетом высокого уровня развития современной вычислительной техники весьма привлекательной альтернативой разрабатываемой методике выбора параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B* выглядит возможность применения методов многопараметрической оптимизации [81]. В таком случае необходимо задать лишь критерий качества (целевую функцию), в соответствии с которым проводится оптимизация, а так же перечень настраиваемых коэффициентов.

Для оценки эффективности такого подхода использован метод многопараметрической оптимизации эвристическими алгоритмами по параметрам K_{s1} , K_{s2} , K_{s3} , T_1 - T_4 , T_{10} , T_{11} по «минимаксному» показателю качества по параметру частоты напряжения генератора, результаты которого приведены в таблице 4.1 в колонке «вариант 3». При этом на значения параметров не накладывалось каких-либо ограничений и не выполнялся экспертных анализ полученных значений параметров. Описание использованного метода многопараметрической оптимизации не приводится, так как выходит за рамки диссертационной работы и не является предметом исследования.

4.6 Разработанная методика выбора параметров настройки АРВ СД

Методика представляет собой определенную последовательность действий, которую удобно изложить на примере выбора параметров настройки промышленного образца АРВ СД типа *AVR*-4M [63] в условиях работы тестовой схемы энергосистемы [7]:

1. Создание цифровой модели АРВ СД.

Создается подробная верифицированная математическая модель исследуемого АРВ СД. Далее математическая модель реализуется в ПВК для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме и верифицируется по экспериментальным ЧХ промышленного образца микропроцессорного АРВ СД. Подробная методика создания математических моделей АРВ СД вместе с процедурой их верификации изложены в главе 2 диссертации.

2. Создание цифровой модели энергосистемы.

Создается цифровая модель энергосистемы в ПВК для расчета электромеханических переходных процессов. В цифровой модели энергосистемы составляется набор характерных схемно-режимных условий работы генератора. Подробные требования к цифровой модели энергосистемы и списку характерных схемно-режимных условий работы генератора изложены в подразделе 4.2 диссертации.

Поскольку рассматривается пример выбора параметров настройки промышленного образца АРВ СД типа *AVR*-4M в условиях работы тестовой схемы энергосистемы, то список схемно-режимных условий работы не формируется и вместо него используются режим 1', режим 4' и режим 8 в соответствии с [7].

3. Выбор параметров регулятора напряжения.

Выбор параметров настройки регулятора напряжения АРВ СД зарубежного

производства осуществляется по модифицированной методике АО «НТЦ ЕЭС» и в диссертационной работе не рассматривается.

4. Предварительный расчет параметров системного стабилизатора.

Производится расчёт всех параметров настройки системного стабилизатора по «классической» методике (см. раздел 4.4), кроме постоянных времени фильтра компенсации фазы и коэффициента K_{s1} .

5. Создание набора режимных частотных характеристик энергосистемы.

Производится расчет РЧХ энергосистемы по активной мощности и частоте вращения ротора генератора в разомкнутой САР для всего списка характерных схемно-режимных условий работы генератора (п. 2).

6. Расчет РЧХ интеграла ускоряющей мощности.

Для полученного списка РЧХ (п. 5) и математической модели системного стабилизатора (п. 1) производится расчет фактической ЧХ (АЧХ и ФЧХ) интеграла ускоряющей мощности (выход последнего сумматора на рисунке 4.2) для всего списка характерных схемно-режимных условий работы генератора (п. 2).

7. Расчет ФЧХ, обратных к ФЧХ интеграла ускоряющей мощности.

Производится расчет ФЧХ, обратных к полученным по (п. 6) фактическим ФЧХ интеграла ускоряющей мощности для всего списка характерных схемно-режимных условий работы генератора (п. 2).

8. Расчет вспомогательных ФЧХ.

Из набора ФЧХ, полученных по п. 7, производится расчет вспомогательных кривых:

- кривой, объединяющей минимальные значения среди всех ФЧХ для всего списка (п. 2) характерных схемно-режимных условий работы генератора (на рисунке 4.4 кривая обозначена «MIN»);
- кривой, объединяющей максимальные значения среди всех ФЧХ для всего списка (п.
 2) характерных схемно-режимных условий работы генератора (на рисунке 4.4 кривая обозначена «MAX»);
- кривой, со среднеарифметическими значениями среди всех ФЧХ для всего списка (п.
 2) характерных схемно-режимных условий работы генератора (на рисунке 4.4 кривая обозначена «AVG»).

В рассматриваемом примере выбора параметров настройки промышленного образца АРВ СД типа *AVR*-4M в условиях работы тестовой схемы энергосистемы, в котором список схемно-режимных условий состоит всего из трех пунктов, построение данных кривых не целесообразно.

В качестве альтернативного примера на рисунке 4.5 приведены ФЧХ, обратные к

фактическим ФЧХ интеграла ускоряющей мощности (п. 7) с учетом фильтра компенсации фазы для списка характерных схемно-режимных условий работы генератора, состоящим из 15 пунктов. Данные кривые получены для условий работы Няганской ГРЭС. Очевидно, такой список для условий работы других электростанций может быть намного шире, что существенно затруднит анализ колебательной устойчивости и замедлит работу алгоритмов оптимизации параметров настройки системного стабилизатора. Расчет вспомогательных кривых существенно ограничивает количество входных данных для дальнейшего анализа. Результат расчета вспомогательных ФЧХ для условий работы Няганской ГРЭС приведен на рисунке 4.4.



f, Hz

Рисунок 4.4 – Среднее и граничные значения ФЧХ выходного сигнала системного стабилизатора в разомкнутой САР по всему списку схемно-режимных условий работы Няганской ГРЭС



f, Hz

Рисунок 4.5 – ФЧХ выходного значения системного стабилизатора в разомкнутой САР для условий работы Няганской ГРЭС

9. Выбор параметров фильтра компенсации фазы.

На рисунке 4.6 приведены ФЧХ выходного сигнала системного стабилизатора для режимов 1' и 8, а так же ФЧХ фильтра компенсации фазы, которая выбрана компромиссно по отношению ко всему списку характерных схемно-режимных условий работы генератора (п. 2) в диапазоне частот 0.1-2 Гц.

На рисунке 4.6 (как и на рисунках 4.4 и 4.5) также отмечена область значений фазы с границами ±90°, 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.

Таким образом, ФЧХ переходной функции разомкнутой САР по выходному сигналу системного стабилизатора используются для оценки качества демпфирования колебаний при введении системного стабилизатора в работу в различных схемно-режимных условиях. При оценке качества контролируется расположение различных участков ФЧХ относительно границ ±90°.

Необходимо выбрать параметры фильтра компенсации фазы таким образом, чтобы расчетная ФЧХ выходного сигнала системного стабилизатора для всего списка характерных

141

схемно-режимных условий работы генератора (п. 2) во всем диапазоне частот была близка к 0°, что дало бы идеальный стабилизирующий сигнал. Однако, поскольку это невозможно выполнить для всего диапазона частот и списка характерных схемно-режимных условий работы генератора (п. 2), необходим поиск компромиссного варианта параметров настройки системного стабилизатора в ограниченном диапазоне частот колебаний. Компромисс обеспечивается выбором диапазона частот, в котором наблюдаются колебания режимных параметров (для данного случая данных диапазон частот 0.1-2 Гц) и максимизацией расстояния кривых Φ ЧХ от границ ±90° по направлению к величине 0° в выбранном диапазоне частот колебаний. В предлагаемом примере параметры фильтра компенсации фазы рассчитываются оптимизационной процедурой. Описание использованного метода оптимизации не приводится, так как выходит за рамки диссертационной работы и не является предметом исследования.

Из рисунка 4.6 видно, что выбор параметров фильтра компенсации фазы с максимальной эффективностью стабилизации для одного характерного режима, привел бы в другом характерном режиме к неэффективной работе системного стабилизатора на одних частотах колебаний и к ощутимому ухудшению условий демпфирования колебаний на других частотах колебаний.





10. Оптимизация коэффициентов усиления.

Производится оптимизация значений коэффициентов K_{s1} и K_{s2} [8, 10, 60]. Рассчитывается граница области устойчивости в плоскости коэффициентов усиления K_{s1} и K_{s2} для каждого базового электрического режима с нормальной схемой выдачи мощности электростанции и её максимальной загрузкой по активной мощности. После этого осуществляется построение в графическом виде значения «минимаксного» показателя качества по параметру частоты напряжения генератора в осях коэффициентов K_{s1} и K_{s2} (результаты расчетов приведены на рисунке 4.7). Более темным областям соответствуют лучшие условия демпфирования колебаний, более светлым – худшие условия, белым областям – граница области устойчивости, крестом обозначены выбранные значения коэффициентов K_{s1} и K_{s2} . Диапазон построения «минимаксного» показателя качества на рисунке 4.7 ограничивается ожидаемыми значениями коэффициентов K_{s1} и K_{s2} .



Рисунок 4.7 – Область устойчивости с выбранными параметрами настройки системного стабилизатора по разработанной методике

Из рисунка 4.7 видно, что область устойчивости не является замкнутой вблизи ожидаемых значений коэффициентов K_{s1} и K_{s2} . В соответствии с такими результатами расчета условия демпфирования колебаний тем лучше, чем больше значения обоих коэффициентов усиления. Это является логичным следствием того, что при оптимально выбранных параметрах фильтра компенсации фазы повышение коэффициента усиления будет приводить к нарушению устойчивости на частотах колебаний значительно выше 5 Гц (см. рисунок 4.6). Так как используемые модели возбудителя и генератора не предназначены для анализа процессов с частотами выше 5 Гц, результаты такой оптимизации могут быть ошибочными – то есть установка таких параметров настройки системного стабилизатора на действующем оборудовании может привести к появлению слабозатухающих колебаний режимных параметров. Однако анализ показал, что при незначительном повышении коэффициентов K_{s1} и K_{s2} до определённого значения улучшение условий демпфирования колебаний происходит достаточно быстро, а затем сколь угодно большое увеличение значений коэффициентов K_{s1} и K_{s2} не приводит к существенному улучшению условий демпфирования колебаний и,

соответственно, качества переходного процесса. Для всех режимов данная условная граница имеет гиперболический вид, для каждого из них ее местонахождение и «размытость» различается и на рисунке 4.7 её местонахождение отмечено светлой пунктирной линией. Выбираются значения коэффициентов усиления K_{s1} и K_{s2} на границе таких областей для каждого из характерных режимов и в качестве рабочих коэффициентов принимаются наибольшие из них. Таким образом, будут выбраны коэффициенты, достаточно далекие от визуально наблюдаемой на графике границы области устойчивости для всех схемно-режимных условий работы генератора, и при этом не достаточно большие, чтобы происходили колебания возбуждения слабозатухающие напряжения на высоких частотах электромеханических колебаний (выше 5 Гц).

11. Проверка выбранных параметров на модели энергосистемы реального времени.

Осуществляется проверка выбранных параметров настройки системного стабилизатора на ЦАФК или ПАК РВ *RTDS* АО «НТЦ ЕЭС» в соответствии с методикой испытаний АРВ СД, приведенной в Стандарте [7]. При необходимости, в процессе испытаний производится коррекция параметров настройки системного стабилизатора и регулятора напряжения.

В таблице 4.1 сведены все параметры настройки системного стабилизатора, выбранные по разработанной методике в колонку под названием «вариант 2».

4.7 Результаты проверки параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B*, выбранных по различным методикам

Оценка эффективности параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B*, выбранных с использованием разработанной методики, выполнена путем проведения экспериментов в цифровой и физической моделях тестовой схемы. Характеристики тестовой схемы отображают основные схемно-режимные особенности энергообъединения сложной структуры и обеспечивают получение объективной оценки эффективности применения конкретного АРВ СД в ЕЭС России. При проведении экспериментов промышленный образец микропроцессорного АРВ СД типа *AVR*-4M в одной серии экспериментов подключался к цифровой модели тестовой схемы, реализованной в ПАК РВ *RTDS*, а в другой серии экспериментов – к тестовой схеме, реализованной в ЦАФК АО «НТЦ ЕЭС».

В качестве возмущающих воздействий в Режимах 1' и 4' использованы однофазное короткое замыкание длительностью 40 мс (на шинах ВН генератора Г-1_1 – в узле 1), а в Режиме 8 – двухфазное короткое замыкание вблизи шин энергосистемы (ЭС) №1 с отключением Л-2. Один и тот же эксперимент выполнен четырежды:
- с выведенным системным стабилизатором (обозначение на рисунках «без PSS»);
- с введенным системным стабилизатором с настройками «Вариант 1» (обозначение на рисунках «I»);
- то же, «Вариант 2» (обозначение на рисунках «II»);
- то же, «Вариант 3» (обозначение на рисунках «III»).

На рисунках 4.8-4.10 (для серии экспериментов на ПАК PB *RTDS*) и 4.11-4.14 (для серии экспериментов на ЦАФК АО «НТЦ ЕЭС») представлены сравнительные осциллограммы переходных процессов, вызванных указанными выше возмущениями.

Результаты проведенных экспериментов показали, что параметры настройки, выбранные методом многопараметрической оптимизации («Вариант 3»), обеспечивают наилучшее демпфирование колебаний в диапазоне частот 0.1-2 Гц (см. рисунки 4.8 и 4.13), однако вызывают колебания реактивной мощности и напряжения большой амплитуды с частотой порядка 0.04 Гц в сочетании с медленным понижением/повышением напряжения после возмущения (см. рисунок 4.12, кривая 4). Такой результат, полученный методом многопараметрической оптимизации, с обеспечением высокого качества стабилизации параметра активной мощности с одновременным наличием колебаний реактивной мощности и напряжения большой амплитуды при возмущениях в энергосистеме объясняется следующим. В качестве параметра оптимизации использована частота напряжения генератора, которая ввиду физических свойств объекта управления в широком диапазоне частот имеет сильную связь с параметром активной мощности генератора. Таким образом, обеспечение высокого качества стабилизации частоты напряжения будет обеспечивать одновременно и высокое качество стабилизации активной мощности генератора. Одновременно с этим в диапазоне частот порядка менее 0.1 Гц параметры, связанные с напряжением (ток ротора, реактивная мощность генератора, напряжение статора), не имеют сильной связи с параметрами, связанными с мошностью (частота напряжения, активная мощность генератора). В связи с этим возможны ситуации, в которых слабозатухающие колебания высокой амплитуды в диапазоне частот до 0.1 Гц не будут наблюдаться в параметрах, связанных с мощностью, при их наблюдаемости в параметрах, связанных с напряжением. То есть, использование частоты напряжение в качестве параметра оптимизации не является чувствительным ко всем типам колебаний с частотами менее 0.1 Гц. Таким образом, параметры настройки АРВ СД, полученные методом многопараметрической оптимизации (см. подраздел 4.5), привели к колебаниям напряжения большой амплитуды частотой порядка 0.04 Гц в сочетании С с медленным понижением/повышением напряжения, которые одновременно с этим обеспечивают высокое качество стабилизации активной мощности генератора в диапазоне частот 0.1-2 Гц.

Выбранные по «классической» методике [41, 44] параметры настройки системного

стабилизатора только в Режиме 1' обеспечивают качество демпфирования колебаний сопоставимое с качеством, достигаемым при использовании параметров настройки, полученных по разработанной в диссертационной работе методике. Однако в других рассмотренных электрических режимах параметры настройки системных стабилизаторов, выбранные по «классической» методике, приводят к ухудшению качества демпфирования колебаний (см. рисунок 4.9) и появлению слабовыраженных колебаний режимных параметров на частоте порядка 0.7 Гц (см. рисунок 4.12), то есть, оказываются не инвариантными к изменению схемно-режимной ситуации.



(осциллограммы переходного процесса с настройками «Вариант 3» не приводятся, т.к. они не могут обеспечить устойчивую работу генератора в установившемся режиме) Рисунок 4.8 – Однофазное короткое замыкание в режиме 1' (ПАК РВ *RTDS*)



Рисунок 4.9 – Однофазное короткое замыкание в режиме 4' (ПАК PB RTDS)



Рисунок 4.10 – Двухфазное короткое замыкание с отключением линии в режиме 8 (ПАК РВ *RTDS*)



Рисунок 4.11 – Однофазное короткое замыкание в режиме 1' (ЦАФК)



Рисунок 4.12 – Однофазное короткое замыкание в режиме 1' (ЦАФК)



Рисунок 4.13 – Однофазное короткое замыкание в режиме 4' (ЦАФК)



Рисунок 4.14 – Двухфазное короткое замыкание с отключением линии в режиме 8 (ЦАФК)

Построение границ областей устойчивости в соответствии с разработанной в диссертационной работе методике позволило бы выявить возможность возникновения слабовыраженных колебаний режимных параметров на частоте порядка 0.7 Гц при использовании параметров настройки системного стабилизатора, выбранных «классическим» методом, еще на этапе их выбора – на рисунке 4.156 видно, что вблизи точки с выбранными параметрами настройки находится точка границы области устойчивости.



Рисунок 4.15 – Области устойчивости с выбранными параметрами настройки системного стабилизатора по «классической» методике

На рисунке 4.16 приведены АЧХ замкнутой САР по отклонению частоты напряжения генератора с различными вариантами параметров настройки системного стабилизатора, построенные с помощью разработанных в настоящей работе инструментов. Из рисунка 4.16а видно, что введение в работу системного стабилизатора с Вариантом 1 параметров настройки системного стабилизатора в Режиме 1' приводит к увеличению АЧХ на частоте порядка 0.7 Гц, что объясняет появление колебаний режимных параметров на данной частоте при возникновении возмущений в Режиме 1'. Построение и анализ данных АЧХ в соответствии с разработанной в диссертационной работе методикой анализа колебательной устойчивости также бы мог выявить возможность возникновения слабовыраженных колебаний на частоте порядка 0.7 Гц еще на этапе выбора параметров настройки по «классической» методике.





Параметры настройки системного стабилизатора типа *PSS2B*, выбранные по методике, разработанной в диссертационной работе, являются компромиссными: они не приводят к появлению незатухающих колебаний на собственной частоте электромеханических колебаний ротора и на частотах менее 0.1 Гц, обеспечивают корректную работу системного стабилизатора, а также обеспечивают приемлемое качество демпфирования переходных процессов во всех характерных схемно-режимных условиях работы генератора. Также показано, что разработанные средства анализа колебательной устойчивости позволяют оценить эффективность параметров настройки системного стабилизатора еще на этапе их выбора – до их применения на промышленном образце микропроцессорного АРВ СД в условиях работы электростанции.

Параметры настройки системного стабилизатора типа *PSS2B*, выбранные по методике, разработанной в диссертационной работе, в условиях тестовой схемы обеспечивают высокое качество стабилизации колебаний во всех рассмотренных схемно-режимных ситуациях.

4.8 Выводы

В ЕЭС России установлено значительное число систем возбуждения зарубежного производства [11], в составе которых применяются современные микропроцессорные АРВ СД с системными стабилизаторами. Подавляющее большинство таких системных стабилизаторов работают на основе расчета интеграла ускоряющей мощности и имеют тип *PSS2B*. На данный момент в отечественной практике отсутствует устоявшийся и зарекомендовавший себя практический опыт выбора параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B* в составе АРВ СД зарубежного производства, что требует привлечения производителя АРВ СД для выполнения данной задачи.

На примере тестовой схемы энергосистемы [7], характеристики которой отображают основные схемно-режимные особенности энергообъединения сложной структуры и обеспечивают получение объективной оценки эффективности применения конкретного АРВ СД в ЕЭС России, показано, что:

- обеспечение максимальной эффективности системного стабилизатора типа *PSS2B* в одном электрическом режиме может привести к его неэффективной работе в остальных электрических режимах;
- не может быть обеспечена эффективность работы системного стабилизатора типа *PSS2B* по всему диапазону частот колебаний режимных параметров.

Из этого следует, что для системного стабилизатора типа *PSS2B* в условиях работы тестовой схемы необходим поиск компромиссного варианта параметров настройки для группы характерных электрических режимов и в ограниченном диапазоне частот колебаний режимных параметров. Компромиссный вариант параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B* не будет обеспечивать максимальную эффективность стабилизации ни в одном из электрических режимов, но должен обеспечивать достаточный запас колебательной устойчивости в каждом из них.

Практика показывает, что применение зарубежных методик для выбора параметров настройки системных стабилизаторов АРВ СД генераторов, работающих в ЕЭС России, не учитывает особых свойств ЕЭС России, в результате чего не обеспечивает эффективное демпфирование колебаний параметров электрического режима в широком многообразии схемно-режимных условий ее работы.

Выбор эффективных параметров настройки системного стабилизатора может быть осуществлен с использованием разработанной в диссертационной работе методики [82]. Разработанная методика позволяет учесть различные схемно-режимные условия работы энергосистемы и выбрать универсальные параметры настройки системного стабилизатора типа *PSS2B*, обеспечивающие колебательную устойчивость и удовлетворительное качество стабилизации во всех схемно-режимных условиях работы электростанции. Разработаны алгоритмы в САПР *Mathcad*, позволяющие автоматизировать процесс выбора параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B* в соответствии с разработанной методикой.

Разработанная методика выбора параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B* генератора, работающего в энергообъединении сложной структуры:

- Успешно опробована с использованием промышленного образца микропроцессорного АРВ СД в тестовой схеме энергосистемы, реализованной на ЦАФК [7, 27], а подготовка исходных данных для исследований колебательной устойчивости выполнена в ее верифицированной математической модели на ПАК РВ *RTDS*.
- Использована для выбора параметров настройки системных стабилизаторов АРВ СД типа *THYRIPOL* генераторов Г-1, Г-2, Г-5, Г-6 Северо-Западной ТЭЦ (см. приложение А). Анализ результатов испытаний, выполненный по данным, зафиксированным СМСР для генераторов Г-1 и Г-2, показал эффективность демпфирования колебаний на частотах 1 Гц и 0.3 Гц при применении параметров настроек системных стабилизаторов, выбранных с помощью разработанной методики (см. приложение А).
- Использована для выбора параметров настройки системных стабилизаторов и регуляторов напряжения АРВ СД типа *ТНҮКІРОL* генераторов ПГУ 1,2,3 Няганской ГРЭС [25, 26] (см. приложение А). При проведении пуско-наладочных работ на

системах возбуждения генераторов ПГУ 1,2,3 Няганской ГРЭС в качестве исходных параметров настройки АРВ СД использованы выбранные по разработанной в диссертационной работе методике.

Таким образом, эффективность методики выбора параметров настройки системного стабилизатора типа *PSS2B* генератора, работающего в энергообъединении сложной структуры, подтверждена как на тестовой схеме ЦАФК «НТЦ ЕЭС», так и на ряде действующих электростанций, работающих в составе ЕЭС России. Разработанная в диссертационной работе методика позволяет учесть различные схемно-режимные условия, а значит подобрать универсальные параметры настройки, повысив устойчивость работы отдельных генераторов и энергосистемы в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе:

1. Разработана методика выбора рабочих параметров настройки 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В диссертационной работе использованы следующие сокращения и условные обозначения:

АДП	_	аварийно допустимый переток активной мощности
APB	_	автоматический регулятор возбуждения
АРВ СД	_	автоматический регулятор возбуждения сильного действия синхронного
		генератора
АЧХ	_	амплитудно-частотная характеристика
АФЧХ	_	амплитудно-фазовая частотная характеристика
AΦ	_	аналоговый фильтр
АЦП	_	аналого-цифровой преобразователь
БИХ-фильтр	_	цифровой фильтр с бесконечной импульсной характеристикой
ГТУ	_	газотурбинная установка
ГРЭС	_	государственная районная электростанция / гидрорециркуляционная
		электростанция
е. в. н.	_	единицы возбуждения номинальные
е. в. х. х.	_	единицы возбуждения холостого хода
ЕЭС	_	единая электроэнергетическая система
КИХ-фильтр	_	цифровой фильтр с конечной импульсной характеристикой
МДП	_	максимально допустимый переток активной мощности
МНК	_	метод наименьших квадратов
OMB	_	ограничение минимального возбуждения
ПАК РВ	_	цифровой программно-аппаратный комплекс моделирования энергосистем в
		режиме реального времени
ПВК	_	программно-вычислительный комплекс
ПГУ	_	парогазовая установка
ПИ	_	пропорционально-интегральный
ПИД	_	пропорционально-интегрально-дифференциальный
РЧХ	_	режимная частотная характеристика
САПР	_	система автоматизированного проектирования
CAP	_	система автоматического регулирования
СЛУ	_	система линейных уравнений

СМСР	—	система мониторинга системных регуляторов
СМПР	_	система мониторинга переходных режимов
Стандарт	_	стандарт АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.160.20.001-2012 «Требования к
		системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения
		сильного действия синхронных генераторов»
СУТ	—	система управления тиристорами
ТЭЦ	—	теплоэлектроцентраль
ФЧХ	—	фазочастотная характеристика
ЦАФК	—	цифро-аналого-физический комплекс моделирования электромеханических
		переходных процессов в энергосистеме
ЦФ	—	цифровой фильтр
ЧХ	_	частотная характеристика
ЭС	_	энергосистема
ЭЭС	_	электроэнергетическая система
RTDS	—	«Real Time Digital Power System Simulator» производства RTDS Technologies
		Inc.
UCTE	_	энергообъединение европейских стран (Union for the Coordination of
		Transmission of Electricity)
ZOH	—	zero-order hold

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В диссертационной работе использованы следующие термины и определения:

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

Режимный параметр – измеренный параметр электрического режима или основанный на них расчетный параметр, характеризующий какое-либо свойство системы автоматического регулирования или объекта регулирования.

Режимный параметр контура стабилизации – режимный параметр, который используется в качестве входного в системе стабилизации (контуре стабилизации).

Режимный параметр оптимизации – режимный параметр, используемый в целевой функции при проведении процедуры оптимизации.

Стабилизация на основе расчета интеграла ускоряющей мощности – использование интеграла ускоряющей мощности в качестве режимного параметра контура стабилизации.

АРВ СД «отечественной структуры» – АРВ СД с принципом функционирования основных законов регулирования и стабилизации, распространенным среди производителей в Советском Союзе, а позднее в России, и имеющий ряд ключевых особенностей:

- использование сумматора, в который поступают все сигналы регулирования напряжения и стабилизации;
- использование только П-, ПИ- или ПИД-закона регулирования напряжения;
- использование производной по току ротора, частоты напряжения и ее производной в качестве режимных параметров контуров стабилизации;
- использование системы относительных единиц номинального возбуждения.

АРВ СД зарубежного производства – АВР СД с принципом функционирования основных законов регулирования и стабилизации, распространенным среди производителей в зарубежных странах, и имеющий ряд ключевых особенностей:

- суммирование заданного значения напряжения с обобщенным сигналом стабилизации;
- регулирование напряжения может осуществляться в соответствии П-, ПИ- или ПИДзаконом, а также может иметь в своем составе форсирующие звенья с замедлением;
- использование частоты вращения ротора, активной мощности, ускоряющей мощности или интеграла ускоряющей мощности в качестве режимных параметров контура стабилизации;

 использование системы относительных единиц холостого хода или максимального возбуждения.

Энергетическая система (энергосистема) – совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, соединенных между собой и связанных общностью режима в непрерывном процессе производства, преобразования, передачи и распределения электрической энергии и тепловой энергии при общем управлении этим режимом.

Объединенная энергетическая система (энергообъединение) – совокупность нескольких энергетических систем, объединенных общим режимом работы.

Связь (внутрисистемная связь) – последовательность элементов электрической сети, соединяющих две части энергосистемы.

Межсистемная связь – последовательность элементов электрической сети, соединяющих разные энергосистемы.

Слабая связь – межсистемная связь, пропускная способность по статической апериодической устойчивости которой мала по сравнению с установленной мощностью наименьшей из этих энергосистем.

Сечение (сечение электрической сети) – совокупность сетевых элементов одной или нескольких связей, характеризующая суммарную пропускную способность определенного района электрической сети.

Контролируемое сечение – сечение, определяемое диспетчерскими центрами АО «СО ЕЭС», переток активной мощности по которому контролируется в целях обеспечения устойчивой работы, надежности и живучести энергосистемы.

«Опасное сечение» – контролируемое сечение, в состав которого входят одна слабая связь или более, и по которому возможно нарушение статической апериодической или статической колебательной устойчивости.

Энергообъединение сложной структуры – энергообъединение, в состав которого входит множество слабых связей.

Синхронные колебания (синхронных машин) – режим работы синхронных машин, при котором происходят колебания взаимных углов генераторов без перехода в асинхронный режим.

Электромеханические колебания ротора генератора – синхронные колебания, наблюдаемые на исследуемом синхронном генераторе.

Межсистемные колебания – синхронные колебания, в которые вовлечены группы синхронных машин, находящихся в различных энергосистемах.

Низкочастотные межсистемные колебания – межсистемные колебания с участием групп синхронных машин, находящихся по разные стороны слабой связи, и в которые, как правило, вовлечены синхронные машины одного или нескольких энергообъединений, или даже всей синхронной зоны.

Локальные колебания – синхронные колебания, в которое вовлечено небольшое количество синхронных машин, находящихся в одной энергосистеме.

Внутригрупповые колебания – синхронные колебания между генераторами одной электрической станции.

Станционные колебания – синхронные колебания всех генераторов электрической станции относительно остальной части энергосистемы.

Собственная частота электромеханических колебаний ротора генератора – значение частоты синхронных колебаний при эквивалентировании энергосистемы до схемы, в которой исследуемый генератор соединен через эквивалентную связь с эквивалентной синхронной машиной.

Математическая модель – приближенное описание свойств технического объекта и происходящих в нем процессов, выраженное с помощью математической символики;

Цифровая модель – математическая модель, реализованная в компьютерном программно-вычислительном комплексе с учетом особенностей его функционирования;

Достоверная математическая модель – математическая модель, для которой степень приближённости описания достаточна для корректного решения поставленной задачи;

Дифференциальный порядок – порядок системы дифференциальных уравнений, описывающих какую-либо математическую модель или элемент системы автоматического регулирования.

Понижение дифференциального порядка – упрощение математической модели или элемента системы автоматического регулирования путем сокращения количества уравнений в описывающих их системе дифференциальных уравнений, при котором подразумевается сохранение их ключевых свойств.

Непрерывная система автоматического регулирования – система автоматического регулирования, которая характеризуется наличием непрерывных процессов, когда непрерывному изменению времени соответствует непрерывное изменение сигнала.

Дискретная система автоматического регулирования – система автоматического регулирования, которая характеризуется наличием дискретных процессов во времени и квантованных по уровню, когда сигналы изменяются прерывисто в определенные моменты времени и могут принимать значения из строго ограниченного набора.

Динамическое звено – основная элементарная составная часть абстрактной структуры системы автоматического регулирования, описываемая определённым дифференциальным уравнением.

Непрерывное динамическое звено – динамическое звено, являющееся элементарной составной частью непрерывной системы автоматического регулирования.

Дискретное динамическое звено – динамическое звено, являющееся элементарной составной частью дискретной системы автоматического регулирования.

Дискретизация динамического звена – преобразование непрерывного динамического звена в дискретное динамическое звено в соответствии с оговоренными правилами.

Показатель качества – свойство или совокупность свойств, обеспечивающих эффективное функционирование системы автоматического регулирования, и имеющая численное выражение.

Критерий качества – предъявленное требование к значению одного или ряда показателей качества системы автоматического регулирования.

Отклик системы автоматического регулирования – зависимость изменения во времени заранее определенного режимного параметра при подаче тестового импульсного возмущения в управляющий сигнал системы автоматического регулирования.

Режимная частотная характеристика – выраженная в частотной области передаточная функция замкнутой системы автоматического регулирования, характеризующая отношение изменения заранее определенного режимного параметра к управляющему сигналу системы автоматического регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рагозин А. А. Обобщенный анализ динамических свойств энергообъединений на основе структурного подхода: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.02. – СПб, 1998. – 353 с.

2. Разработка расчетных моделей ОЭС/ЕЭС, расчет и анализ режимов, исследование условий синхронизации с энергообъединением *UCTE*. Колебательная устойчивость ЕЭС/ОЭС на период 2008 года. Отчет ОАО «НИИПТ». Инв. № 85-КТ. СПб, 2006.

3. Масленников В. А. Управление собственными динамическими свойствами крупных энергообъединений и дальних электропередач: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.02. – СПб, 1998. – 284 с.

4. Зеккель А. С. Оптимизация управления переходными процессами сложных электроэнергетических систем на основе энергетического подхода: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.02. – Ленинград, 1989. – 450 с.

5. Разработка методических указаний и программного комплекса для расчетов статической устойчивости по самораскачиванию в сложных энергосистемах. Исследование колебательной устойчивости энергообъединений и обобщение опыта оптимизации настроек АРВ генераторов крупных станций. Отчет НИИПТ. Инв. № О-5634. Ленинград, 1990.

6. Исследование аварийных режимов и устойчивости энергосистем России в составе ЕЭС СНГ на перспективных этапах развития и разработка рекомендаций по обеспечению надежности и живучести. Исследование динамических свойств протяженных электроэнергетических объединений. Отчет НИИПТ. Инв. № О-5885. СПб, 1992.

7. CTO 59012820.29.160.20.001-2012 Требования к системам возбуждения И автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов 2012. [электронный pecypc]. _ Москва. _ _ Режим http://soдоступа: ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto es aer sa izm 2015.pdf.

8. Есипович А. Х., Кабанов Д. А. Технология настройки цифровых АРВ сильного действия отечественной структуры // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2016. – № 1 (74). – С. 113-126.

9. Есипович А. Х., Штефка Й. Анализ колебательной устойчивости электроэнергетических систем (*WinOblast*) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618603, 13.09.2013.

10. Герасимов А. С., Есипович А. Х., Зеккель А. С., Штефка Й. Исследование устойчивости энергосистем и настройка системных стабилизаторов современных

автоматических регуляторов возбуждения с использованием программы «Область» // Известия НИИ постоянного тока. – 2007. – № 62, С. 41-50.

11. Estimation of Efficiency of Modern Excitation Controllers of Synchronous Machines in the Conditions of Physical Model of a Complex Power System and Suggestion of Estimation Technique and Criteria as an Addition to the IEC Standard / Burmistrov A., Popov E., Urganov A., Gerasimov A., Esipovich A. – *International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France*, 2012.

12. IEEE Tutorial Course Power System Stabilization via Excitation Control: publication 09TP250. – Excitation Systems Subcomitee, Energy Development and Power Generation Committee, Power and Energy Society, Tampa, 2009.

13. IEEE Std. 421.2-2014 - IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems. IEEE Power Engineering Society, New York, 2014.

14. Integral of accelerating power type PSS Part 1 – Theory design and tuning methodology / Murdoch S., Venkataraman S., Lawson R. A., Pearson W. R. IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 14, № 4, 1999, pp. 1658-1663.

15. WSCC Tutorial on Power System Stabilizers. – WSCC Control Work Group, 1999.

16. Герасимов А. С., Есипович А. Х., Кабанов Д. А. Сертификационные испытания АРВ сильного действия отечественных и зарубежных компаний на цифроаналогово-физическом комплексе ОАО «НТЦ ЕЭС» // Электрические станции. – 2015. – № 12. – С. 4-8.

17. Жуков А. В. Система мониторинга переходных электрических режимов [электронный ресурс] // Конференция по ознакомлению субъектов электроэнергетики с технологической деятельности АО «СО ЕЭС». – Москва. – 2018. – 18 с. – Режим доступа URL: http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/events/2018/konf 5 231018 prez 03 smpr.pdf.

18. Сорокин Д. В. Выбор настроек АРВ генераторов сложной энергосистемы на основе применения генетического алгоритма и методов модального анализа: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – СПб, 2009. – 166 с.

19. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

20. Oscillation Detection Algorithm Development Summary Report and Test Plan: Laboratory Report Number PNNL-18945 / Zhou N., Tuffner F., Huang Z., Jin S. – Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Springfield, 2009.

21. Разработка технологии и системы управления, обеспечивающих устойчивую работу генераторов на электростанциях, присоединенных к электроэнергетической (ЭЭС) системе и оборудованных парогазовыми (ПГУ) и газотурбинными (ГТУ) установками. Результаты исследований систем регулирования частоты и напряжения энергоблоков ПГУ (ГТУ) на

электростанциях группы ИНТЕР РАО ЕЭС. Разработка организационных и технических мероприятий по повышению надежности систем регулирования частоты и напряжения энергоблоков ПГУ (ГТУ). Отчет ОАО «НТЦ ЕЭС». Инв. № 762-КТ. СПб, 2013.

22. Разработка методических указаний по проверке параметров настройки APB сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы в формате ПК *EUROSTAG*. Методические указания проверки параметров настройки APB сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы, включающие описание практического применения методики проверки параметров настройки APB сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы, включающие описание практического применения методики проверки параметров настройки APB сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы на примере действующего энергообъекта в ЕЭС России. Отчет АО «НТЦ ЕЭС». Инв. № 1334-КТ. СПб, 2017.

23. Разработка методических указаний по проверке параметров настройки APB сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы в формате ПК *EUROSTAG*. Обзор существующих методов настройки APB сильного действия синхронных генераторов. Критерии оценки эффективности параметров настройки APB сильного действия синхронных генераторов. Отчет AO «НТЦ ЕЭС». Инв. № 1246-КТ. СПб, 2016.

24. Методические указания по осуществлению диспетчерскими центрами АО «СО ЕЭС» оценки параметров настройки автоматических регуляторов возбуждения сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы. Приложение 1 к распоряжению АО «СО ЕЭС» от 19.08.2019 № 94р. Введены в действие с 19.08.2019 // – М.: АО «СО ЕЭС», 2019. –29 с.

25. Выбор параметров настройки АРВ НГРЭС расчетным путем на модели энергосистемы и проверка их правильности в соответствии с требованиями Стандарта организации АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.160.20.001-2012 «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов» на математической модели. Выбор параметров настройки регуляторов возбуждения сильного действия системы возбуждения *ТНҮ*ПРОL ПГУ 1,2,3 Няганской ГРЭС. Отчет АО «НТЦ ЕЭС». Инв. № 1488-КТ. СПб, 2018.

26. Выбор параметров настройки АРВ НГРЭС расчетным путем на модели энергосистемы и проверка их правильности в соответствии с требованиями Стандарта организации АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.160.20.001-2012 «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов» на математической модели. Математическая модель энергосистемы. Результаты проверки параметров настройки регуляторов возбуждения *ТНҮRIPOL* генераторов ПГУ 1,2,3 Няганской ГРЭС в схеме ОЭС Урала на ПАК РВ АО «НТЦ ЕЭС». Отчет АО «НТЦ ЕЭС». Инв. № 1430-КТ. СПб, 2018.

27. Гущина Т. А, Герасимов А. С, Есипович А. Х, Зеккель А. С., Кирьенко Г. В. Опыт использования цифро-аналого-физического комплекса для обеспечения системной надежности ЕЭС России // Электрические станции. – 2005. – № 12. – С. 16-21.

28. Разработка устройств и мероприятий для повышения устойчивости энергосистем. Исследование и разработка технических предложений по повышению эффективности АРВ генераторов, работающих в сложных энергосистемах. Отчет НИИПТ. Инв. № Б462466. Ленинград, 1975.

29. Тащилин В. А. Анализ и выбор параметров стабилизации устройств регулирования возбуждения с использованием методов идентификации: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Екатеринбург, 2018. – 139 с.

30. Максимов Б. К., Климова Т. Г. Цифровые технологии в научной и образовательной деятельности кафедры «Релейная защита и автоматизация энергосистем» НИУ МЭИ // Энергетик. – 2018. – № 11. – С. 7-16.

31. Analysis and Damping of Inter-Area Oscillations in the UCTE/CENTREL Power System / Breulmann H., Grebe E., Lösing M., Winter W., Witzmann R., Dupuis P., Houry M., Margotin T., Zerenyi J., Dudzik J., Rodriguez J. M. – International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France, 2000.

32. Опалев О. Л. Исследование системных межзональных низкочастотных колебаний параметров электрического режима ЕЭС России // Известия НТЦ Единой Энергетической Системы. – 2018. – № 2 (79). – С. 54-72.

33. Юрганов А. А., Кожевников В. А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов. – СПб.: Наука, 1996. – 138 с.

34. Литкенс И. В., Пуго В. И. Колебательные свойства электрических систем. – М.: Энергосатомиздат, 1988. – 216 с.

35. Литкенс И. В., Строев В. А., Федотова Н. В. Определение области допустимых режимов работы генераторов в электрической системе: учебное пособие / ред. Салихова В. П. – М.: МЭИ, 1980. – 44 с.

36. Gibbard M. J., Pourbeik P., Vowles D. J. Small-Signal Stability, Control and Dynamic Performance of Power Systems. University of Adelaide Press, Adelaide, 2015.

37. Bérubé G. R., Hajagos L. M. Accelerating-Power Based Power System Stabilizers.[Электронныйресурс]

http://www.kestrelpower.com/Docs/PSS_Tutorial_Chapter_Accelerating_Power_R2.pdf.

38. De Mello P. P., Concordia C. Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by *Excitation Control. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS*-88, № 4, 1969, pp. 189-202.

39. Larsen E. V., Swann O. A. Applying Power System Stabilizers, Parts I-III, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 100, № 6, 1981, pp. 3017-3046.

40. Benchmark Systems for Small-Signal Stability Analysis and Control: Technical Report PES-TR18. – Benchmark Systems for Stability Control Task Force, Power System Stability Controls Subcommittee, Power System Dynamic Performance Committee, Power and Energy Society, IEEE, 2015.

41. IEEE Std. 421.5-2016 Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE Power Engineering Society, New York, 2016.

42. AEMO 118-2009 Generating System Model Guidelines. – Australian Energy Market Operator (AEMO), Australia, 2008.

43. Тимощенко К. П. Разработка алгоритмов автоматизированного цифроаналогового стенда для испытаний систем возбуждения электротехнических комплексов: Дис... канд. техн. наук: 05.09.03/ Тимощенко Константин Павлович. – СПб, 2014. – 141 с.

44. Kundur. P. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, Inc., 1993.

45. Арцишевский Я.Л., Климова Т.Г., Жуков А.В., Сацук Е.И., Расщепляев А.И. Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения: получение и верификация моделей микропроцессорных АРВ // Энергетик. – 2014. – № 1. – с. 50-54.

46. 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.

47. Бочаров М. Г., Панько М. А. Анализ соответствия реальных и теоретических характеристик микропроцессорных ПИД-регуляторов // Теплоэнергетика. – 2009. – № 10. – с. 62-67.

48. Математические модели и структурные схемы автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов, типовых регуляторов скорости первичных двигателей, турбин и котлов, применяемых на электростанциях ЕЭС/ОЭС. Отчет о НИР ОАО «НИИПТ». Инв. № 37-КТ. СПб, 2005.

49. Кичаев В. В., Юрганов А. А. Современное состояние проблемы регулирования возбуждения синхронных машин. Сб. материалов международной научно-технической конференции «Современные системы возбуждения для нового строительства и реконструкции электростанций. Опыт наладки и эксплуатации систем возбуждения нового поколения». СПб, 2004. – С. 11-22.

50. G. Rogers. Power System Oscillations. Springer Science+Business Media, 2000.

51. Бушуев В. В. Динамические свойства электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 120 с.

52. Системные вопросы регулирования возбуждения генераторов в сложных энергообъединениях / Есипович А. Х., Жененко Г. Н., Зеккель А. С., Черкасский А. В. – Кишинев: «Штиинца», 1989. – 119 с.

53. Зайцев Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования. 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.

54. Теория систем автоматического управления / Бесекерский В. А., Попов Е. П. – Изд. 4е. перераб. и доп. – СПб: Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.

55. Туманов М. П. Теория линейных систем автоматического управления: учебное пособие. – М.: МГИЭМ, 2005. – 82 с.

56. William S. Levine (ed.). The Control Handbook, Second Edition (three volumes). Volume 1: Control System Fundamentals. CRC Press, IEEE Press, 2010. 780 p.

57. Synthesis of "Optimum" Transient Response – Criteria and Standard Forms: WADC Technical Report Number 53-66 / Frank D. G., Richard C. L. – Wright Air Development Center (WADC), United States Air Force, Ohio, 1953.

58. Tuning PID and $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Controllers using the Integral Time Absolute Error Criterion / Maiti D., Acharya A., Chakraborty M., Konar A., Janarthanan R. Information and Automation for Sustainability, 2008. ICIAFS 2008. 4th International Conference 12-14 Dec. 2008, pp. 457-462.

59. Булкин А. Е. Автоматическое регулирование энергоустановок: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 508 с.

60. 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.

61. Перельман И. Ф. Построение силовых схем, схем защит, управления, регулирования, диагностики, сервисного обслуживания современных систем возбуждения. –Москва, Екатеринбург: Кабинетный ученый, 2014. – 380 с.

62. СО 34.45.629-2002 Методические указания по техническому обслуживанию микропроцессорных АРВ и систем управления силовых преобразователей систем возбуждения генераторов. – Москва. – 2002.

63. Микропроцессорный автоматический регулятор возбуждения типа *AVR*-4M. – Руководство по эксплуатации 421417.033. – Москва, 2015. – 205 с.

64. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы. – М.: Физматлит, 2003. – 228 с.

65. Kabanov D. A., Kushnir A. N., Shtefka Y., Zelenin A. S. Obtaining the frequency response of AVRs in a closed-loop system using RTDS Simulator [Электронный ресурс]: статья в корпоративном журнале «Новости RTDS – март 2015». / RTDS Technologies. – Электрон. журн. – Winnipeg, Canada, 25-29 марта, 2015. – Режим доступа URL: http://www.ennlab.ru/rus/articles/39, свободный.

66. 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.

67. Выборных И. Г., Гуриков О. В. Алгоритм аппроксимации частотных характеристик методом наименьших квадратов // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2014. – № 2 (71). – С. 35-42.

68. Гуриков О. В. Применение аппроксимации Паде для представления цифровых фильтров в виде рациональных дробей // Сборник статей V Международной научнотехнической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» Т.1 – Томск: Мин-во образования и науки РФ, Томский политехнический университет. – 2014. – С. 585-590.

69. Гуриков О. В., Зеленин А. С., Штефка Й. Методика построения математических моделей микропроцессорных АРВ // Известия НТЦ Единой Энергетической Системы. – 2016. – № 75. – С. 45-58.

70. Светуньков С. Г., Заграновская А. В., Светуньков И. С. Комплекснозначный анализ и моделирование неравномерности социально-экономического развития регионов России. – СПб.:, 2012. – 129 с.

71. Moret J.-M. Fitting of Transfer Functions to Frequency Response Measurements. Laboratory Report Number LRP 498/94. Centre de Recherche en Physique des Plasma (CRPP), Lausanne, 1994.

72. King J. D. Frequency Response Approximation Methods of the Dissipative Model of Fluid Transmission Lines. Master's thesis. The University Of Texas at Arlington (UTA), Arlington, 2006.

73. Gustavsen B., Semlyen A. Rational approximation of frequency domain responses by vector *fitting*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, № 3, 1999, pp. 1052–1061.

74. Almeida C. F. M., Kagan N. An Evolutionary Algorithm Based Technique to Determine Rational Approximation of Frequency Domain Responses. The 21st International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Frankfurt, Paper \mathbb{N} 1208, 2011. 75. Бейкер Дж. мл., Грейвс-Моррис П. Аппроксимации Паде. Пер. с англ. М.: Мир, 1986. – 502 с.

76. Смирнов А. Н. Верификация цифровых динамических моделей крупных энергообъединений по данным СМПР: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Москва, 2014. – 202 с.

77. Гуриков О. В. Упрощенная модель бесщеточной системы возбуждения с ограничителями режимных параметров и рассмотрение принятых допущений // Сборник статей V Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» T.1 – Томск: Мин-во образования и науки РФ, Томский политехнический университет. – 2014. – C. 129-134.

78. IESO REQ-0208-2016 Market Manual 2: Market Administration. Part 2.20: Performance Validation. Issue 5.0. – Independent Electricity System Operator (IESO), Ontario, 2016.

79. WECC Power System Stabilizer Design and Performance: Document Number: VAR-502-WECC-CRT-0.2. – Western Electricity Coordinating Council (WECC), 2004.

80. WECC Power System Stabilizer Tuning Guidelines. – Western Electricity Coordinating Council (WECC).

81. Weise T. Global Optimization Algorithms. Theory and Application. 3rd Ed., 2011. [Электронный ресурс]: Режим доступа URL: <u>http://www.it-weise.de/projects/book.pdf</u>.

82. 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.

171

Приложение А

(информационное)

Результаты внедрения

Акционерное общество «Научно-технический центр Единой энергетической системы» (АО «НТЦ ЕЭС»)

ул. Курчатова, д. 1, лит. А, Санкт-Петербург, **УТВЕРЖДАЮ** Россия, 194223 Генеральный директор тел. (812) 297 54 10, факс (812) 552 62 23 E-mail: ntc@ntcees.ru, http://www.ntcees.ru ОКПО 00129704, ОГРН 1027801531427, В.А. Крицкий ИНН/КПП 7802001298/780201001 MATHER 2020 г. 33

Акт внедрения результатов диссертационной работы Гурикова Олега Викторовича

«Методика выбора параметров настройки системных стабилизаторов микропроцессорных автоматических регуляторов возбуждения, работающих в энергообъединениях сложной структуры», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Результаты диссертационной работы Гурикова Олега Викторовича «Методика выбора параметров настройки системных стабилизаторов микропроцессорных автоматических регуляторов возбуждения, работающих в энергообъединениях сложной структуры», а именно:

методы и технология анализа колебательной устойчивости сложных энергосистем,

 методика создания математических моделей промышленных образцов микропроцессорных АРВ,

 – формализованные требования к подготовке перечня схемно-режимных условий работы рассматриваемого генератора в цифровой модели энергосистемы с целью анализа колебательной устойчивости,

- методика настройки системных стабилизаторов типа PSS2B,

в настоящее время широко используются в научно-технической деятельности АО «НТЦ ЕЭС» при выполнении различного рода работ, связанных с вопросами обеспечения устойчивой и корректной работы генерирующего оборудования электростанций, повышения уровня системной надежности энергосистем, а также совершенствования оперативно-диспетчерского, режимного и противоаварийного управления энергосистемами.

В частности, представленная в диссертации методика создания математических моделей микропроцессорных АРВ используется специалистами АО «НТЦ ЕЭС» при сертификационных испытаний автоматических проведении регуляторов сильного действия синхронных генераторов на соответствие требованиям CTO 59012820.29.160.20.001-2012 «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов». В рамках проведения указанных испытаний разрабатываются подробные цифровые модели АРВ в формате специализированных программных комплексов, которые используются в текущей деятельности АО «СО ЕЭС» и АО «НТЦ ЕЭС» при выполнении расчетов электромеханических переходных процессов для решения задач оперативнодиспетчерского, режимного и противоаварийного управления энергосистемами.

Приведенные в диссертации формализованные требования к подготовке перечня схемно-режимных условий работы генератора в цифровой модели энергосистемы использованы при выполнении в АО «НТЦ ЕЭС» работы «Разработка методических указаний по проверке параметров настройки АРВ сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы в формате ПК EUROSTAG» по заказу АО «СО ЕЭС». На основании материалов данной работы подготовлен стандарт АО «СО ЕЭС» «Методические указания по проверке параметров настройки АРВ сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы».

Разработанная в рамках диссертационной работы методика выбора настроечных параметров АРВ применялась при выполнении в АО «НТЦ ЕЭС» работ по выбору настроечных параметров системных стабилизаторов АРВ генераторов Г-1 и Г-2 Северо-Западной ТЭЦ и генераторов ПГУ 1,2,3 Няганской ГРЭС.

Результаты, полученные в диссертации, применялись в рамках работы «Разработка технологии и системы управления, обеспечивающих устойчивую работу генераторов на электростанциях, присоединенных к электроэнергетической системе (ЭЭС) и оборудованных парогазовыми (ПГУ) и газотурбинными (ГТУ) установками», выполненной АО «НТЦ ЕЭС» совместно с ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». В данной работе разработанные в диссертации методы и технология анализа колебательной устойчивости использованы при оценке возможности совместного управления возбуждением и мощностью турбин ГТУ Северо-Западной ТЭЦ, а также использованы при выполнении теоретических исследований синтеза закона управления возбуждением генераторов с использованием удаленных параметров энергосистемы.

Результаты диссертационной работы Гурикова Олега Викторовича «Методика выбора параметров настройки системных стабилизаторов микропроцессорных автоматических регуляторов возбуждения, работающих в энергообъединениях сложной структуры» использованы в следующих отчетах АО «НТЦ ЕЭС»:

1. Разработка технологии и системы управления, обеспечивающих устойчивую работу генераторов на электростанциях, присоединенных к электроэнергетической (ЭЭС) системе и оборудованных парогазовыми (ПГУ) и газотурбинными (ГТУ) установками. Результаты исследований систем регулирования частоты и напряжения энергоблоков ПГУ (ГТУ) на электростанциях группы ИНТЕР РАО ЕЭС. Разработка организационных и технических мероприятий по повышению надежности систем регулирования частоты и напряжения энергоблоков ПГУ (ГТУ) / А.Н. Смирнов, А.С. Герасимов, Т.А. Гущина, О.В. Гуриков, С.Р. Богданова, В.В. Дегтярев, Н.А. Мичурин, А.Н. Кушнир // – СПб: ОАО «НТЦ ЕЭС», 2013. – 208 с.

2. Разработка методических указаний по проверке параметров настройки АРВ сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы в формате ПК EUROSTAG. Методические указания проверки параметров настройки АРВ сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы, включающие описание практического применения методики проверки параметров настройки АРВ сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы, включающие описание практического применения методики проверки параметров настройки АРВ сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы на примере действующего энергообъекта в ЕЭС России / А.Н. Смирнов, О.В. Гуриков, Е.С. Суворов // – СПб: АО «НТЦ ЕЭС», 2016. – 52 с.

3. Разработка методических указаний по проверке параметров настройки APB сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы в

формате ПК EUROSTAG. Обзор существующих методов настройки APB сильного действия синхронных генераторов. Критерии оценки эффективности параметров настройки АРВ сильного действия синхронных генераторов / А.Н. Смирнов, О.В. Гуриков, Е.С. Суворов // – СПб: АО «НТЦ ЕЭС», 2017. – 40 с.

4. Выбор параметров настройки АРВ НГРЭС расчетным путем на модели энергосистемы и проверка их правильности в соответствии с требованиями Стандарта организации АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.160.20.001-2012 «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов» на математической модели. Выбор параметров настройки регуляторов возбуждения сильного действия системы возбуждения ТНҮКІРОЬ ПГУ 1,2,3 Няганской ГРЭС / Д.А. Кабанов, А.Н. Смирнов, О.В. Гуриков, К.В. Прохоров // – СПб: АО «НТЦ E9C», 2018. – 40 c.

5. Выбор параметров настройки АРВ НГРЭС расчетным путем на модели энергосистемы и проверка их правильности в соответствии с требованиями Стандарта организации АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.160.20.001-2012 «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов» на математической модели. Математическая модель энергосистемы. Результаты проверки параметров настройки регуляторов возбуждения THYRIPOL генераторов ПГУ 1,2,3 Няганской ГРЭС в схеме ОЭС Урала на ПАК РВ АО «НТЦ ЕЭС» / Д.А. Кабанов, А.Х. Есипович, О.В. Гуриков, А.С. Зеленин, Д.А. Елисеев, А.Ю. Сульчакова // – СПб: АО «НТЦ ЕЭС», 2018. – 356 с.

Использование результатов диссертационной работы Гурикова Олега Викторовича в практической деятельности АО «НТЦ ЕЭС» позволило повысить качество выполняемых работ, а также расширить компетенции АО «НТЦ ЕЭС» в области цифрового моделирования и оптимизации параметров настройки современных автоматических регуляторов возбуждения сильного действия.

Заведующий отделом электроэнергетических систем, кандидат технических наук

Андрей Николаевич Смирнов

Приложение В

(обязательное)

Блок-схемы разработанных методик

В настоящем приложении приведены блок-схемы разработанной методики выбора параметров настройки микропроцессорных АРВ СД и методики создания математических моделей микропроцессорных АРВ СД. Блок-схемы разработанных методик включают в себя блок-схемы неотъемлемых процедур, которые все вместе составляют следующую иерархию:

- «Выбор параметров настройки АРВ СД» (см. рисунок В.1, 2 листа).
 - о «Создание математической модели АРВ СД» (см. рисунок В.2, 3 листа).
 - «Расчет погрешности математической модели каналов регулирования АРВ СД» (см. рисунок *B*.3, 1 лист).
 - «Замещение элементов функциональной схемы непрерывными динамическими звеньями» (см. рисунок *B*.4, 6 листов).
 - «Финальная подготовка математической модели» (см. рисунок *B*.5, 2 листа).
 - о «Создание цифровой модели энергосистемы» (см. рисунок В.6, 1 лист).
 - «Создание базовых электрических режимов» (см. рисунок *B*.7, 2 листа).
 - ♦ «Определение и загрузка «опасных сечений» до величин МДП» (см. рисунок *B*.8, 2 листа).
 - «Создание характерных электрических режимов» (см. рисунок *B*.9, 2 листа).
 - «Предварительный расчет параметров системного стабилизатора» (см. рисунок *B*.10, 2 листа).



а) лист 1/2





Рисунок В.1 – Блок-схема, поясняющая процесс выбора параметров настройки АРВ СД



а) лист 1/3



б) лист 2/3



в) лист 3/3




Рисунок *В*.3 – Блок-схема, поясняющая процесс расчета погрешности математической модели каналов регулирования АРВ СД



а) лист 1/6



б) лист 2/6

183







185



Представление	Рекомендуемый вид замещения дискретного звена	
звена до	при дискретизации методом	
дискретизации	обратной разности	примой разности
1	1	1
$\overline{T \cdot p}$	$\overline{T \cdot p}$	$\overline{T \cdot p}$
1	1+05-h-p	1-05-h-p
$\overline{T \cdot p + 1}$	$1 + (T + 0.5 \cdot h) \cdot p$	$\overline{1 + (T - 0.5 \cdot h) \cdot p}$
P	<i>p</i>	<i>p</i>
$\overline{T \cdot p + 1}$	$1 + (T + 0.5 \cdot h) \cdot p$	1+(<i>T</i> −0.5· <i>h</i>)· <i>p</i>
$T_1 \cdot p + 1$	$1 + (T_1 + 0.5 \cdot h) \cdot p$	$1 + (T_1 - 0.5 \cdot h) \cdot p$
$\overline{T_2 \cdot p + 1}$	$1 + (T_2 + 0.5 \cdot h) \cdot p$	$\overline{1+(T_2-0.5\cdot h)\cdot p}$
$\frac{1}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	$h \cdot \left(1 + \frac{h \cdot T_1}{3 \cdot T_2^2}\right) \cdot p + 1$	$h \cdot \left(1 - \frac{h \cdot T_1}{3 \cdot T_2^2}\right) \cdot p + 1$
	$(T_2^2 + 0.5 \cdot T_1 \cdot h) \cdot p^2 + (T_1 + h) \cdot p + 1$	$[T_2^2 - 0.5 \cdot T_1 \cdot h] \cdot p^2 + (T_1 - h) \cdot p + 1$
$\frac{T_{a2}^2 \cdot p^2 + T_{a1} \cdot p + 1}{2}$	$\frac{(T_{a1}^2 + 0.5 \cdot T_{a1} \cdot k + 0.25 \cdot k^2) \cdot p^2 + (T_{a1} + k) \cdot p + 1}{(T_{a1}^2 + 0.5 \cdot T_{a1} \cdot k + 0.25 \cdot k^2) \cdot p^2 + (T_{a1} + k) \cdot p + 1}$	$(T_{a2}^2 - 0.5 \cdot T_{a1} \cdot h + 0.25 \cdot h^2) \cdot p^2 + (T_{a1} - h) \cdot p + 1$
$T_{b2}^2 \cdot p^2 + T_{s1} \cdot p + 1$	$[I_{k2}^{*}+0.5\cdot I_{k1}^{*}+0.25\cdot k^{*}]\cdot p^{*}+(I_{k1}^{*}+k)\cdot p+1$	$[T_{02}^{*} - 0 > T_{01}^{*} + 0.2 > h^{*}] \cdot p^{*} + [T_{01}^{*} - h] \cdot p + 1$

д) лист 5/6



е) лист 6/6

Рисунок В.4 – Блок-схема, поясняющая процесс замещения элементов функциональной схемы

непрерывными динамическими звеньями



Рисунок В.5 – Блок-схема, поясняющая процесс финальной подготовки математической модели



Рисунок В.6 – Блок-схема, поясняющая процесс создания цифровой модели энергосистемы



а) лист 1/2



Рисунок В.7 – Блок-схема, поясняющая процесс создания базовых электрических режимов



а) лист 1/2



б) лист 2/2

Рисунок В.8 – Блок-схема, поясняющая процесс определения и загрузки «опасных сечений» до

величин МДП



а) лист 1/2



б) лист 2/2

Рисунок В.9 – Блок-схема, поясняющая процесс создания характерных электрических режимов

195

E1



Рисунок В.10 – Блок-схема, поясняющая процесс предварительного расчета параметров системного стабилизатора