

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Бородин Дмитрий Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НЕУСТОЙЧИВЫХ ДВИЖЕНИЙ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

05.14.02 –

**Электрические станции и электроэнергетические системы**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель –  
д.т.н., профессор Лизалек Н.Н.

НОВОСИБИРСК – 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. ИСТОРИЯ ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ПУТИ ЕЁ РЕШЕНИЯ.....	14
1.1 Нарушение устойчивости энергосистемы и автоматическое управление режимом ее работы.....	14
1.2 Обзор существующих подходов по обеспечению динамической устойчивости синхронных машин в энергосистемах.....	20
1.2.1 Подходы локального противоаварийного управления.....	20
1.2.2 Подходы системного противоаварийного управления.....	22
1.2.3 Структурный анализ устойчивости энергосистем.....	25
1.2.4 Подходы по определению области устойчивости объекта управления в темпе процесса.....	30
1.2.5 Подходы, основанные на применении теоретических методов исследования устойчивости нелинейных систем.....	34
1.3 Недостатки имеющихся методов сохранения динамической устойчивости .....	37
Выводы.....	39
ГЛАВА 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ РАСПАДА СИНХРОННОЙ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ.....	41
2.1 Исследования устойчивости сложных энергосистем.....	41
2.1.1 Выявление структурных свойств сложной энергосистемы.....	41
2.1.2 Оценка динамической устойчивости сложной энергосистемы, оснащённой АПНУ послеаварийных режимов.....	45
2.2 Структурный анализ движения синхронных машин в энергосистемах...	51
2.3 Постановка задачи исследования структуры неустойчивых движений электроэнергетических систем.....	55
Выводы.....	58

ГЛАВА 3 СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И ПРОЦЕССЫ РАСПАДА СИНХРОНИЗМА ЭНЕРГОСИСТЕМ.....		60
3.1	Представление о структурно организованном движении.....	60
3.2	Импульс и энергия структурно организованного движения.....	63
3.2.1	Соотношения для импульсов и скоростей их изменения.....	66
3.2.2	Энергетические соотношения.....	70
3.3	Выделение колебательных структур и их разновидности.....	76
3.4	Исследование процессов распада синхронизма системы при возмущениях на основе энергетических соотношений.....	84
3.5	Траектории устойчивого и неустойчивого движения и их характеристики.....	88
	Выводы.....	100
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НЕУСТОЙЧИВОГО ДВИЖЕНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ .....		101
4.1	Обзорные исследования структуры неустойчивых движений с помощью энерговременных диаграмм.....	101
4.2	Идентификация распада синхронизма при конкретных аварийных ситуациях.....	106
4.2.1	Выявление неустойчивой пары.....	107
4.2.2	Силовые и энергетические соотношения для неустойчивой пары.....	109
4.2.3	Энергетические соотношения около вершины потенциального барьера для региональных движений.....	115
4.3	Метод выбора корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости .....	118
4.4	Расчетный пример выбора управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости энергосистемы.....	126
4.4.1	Алгоритмическая часть методики выбора управляющих воздействий	126
4.4.2	Тестирование метода расчета управляющих воздействий.....	129

4.5 Направления развития метода корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости энергосистем.....	135
Выводы.....	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	141
ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ.....	145
СПИСОК ТЕРМИНОВ.....	147
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ А. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНОЧНЫХ РАСЧЕТОВ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ САЯНО- ШУШЕНСКОЙ ГЭС.....	162
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. БЛОК СХЕМЫ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УВ ПО УСЛОВИЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ.....	168
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ.....	173

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Актуальность задачи сохранения динамической устойчивости в рамках современных сложных многокольцевых энергосистем постоянно возрастает в связи с повышением загрузки межсистемных сечений и вводом новых блоков большой единичной мощности. Анализ динамической устойчивости энергосистем является существенной частью задачи расчета режимов их работы и сводится к идентификации многомерной области допустимых режимов работы энергосистемы.

Для проведения анализа динамической устойчивости энергосистем используется две группы методов. Первая группа использует результаты численного интегрирования уравнений движения системы. На основании моделирования различных возмущений в различных точках энергосистемы оценивается реакция системы и устойчивость взаимного движения синхронных машин. Второй группой являются качественные методы исследования устойчивости.

Недостатком первой группы методов является фрагментарность получаемых результатов. Только на основе массовых расчетов переходных процессов формируется общее представление об устойчивости рассматриваемой системы. Недостатком второй группы расчетных методов является трудность их применения для энергосистем любой структуры и размера, ограничения на сложность применяемой математической модели. В результате, в проектной и эксплуатационной практике не используются программные разработки для качественного анализа устойчивости.

Нарушение устойчивости связано с достижением критических состояний при взаимном движении объектов, выделяющихся в структурно неоднородной системе. Использование методов расчетов режимов, в методологию которых входит формализованная идентификация слабых элементов системы и факторов, влияющих на проявление различных слабых звеньев, является

перспективным направлением по снижению размерности задачи исследования устойчивости энергосистем.

Формализованный поиск слабых элементов системы требует расширения постановки задачи исследования устойчивости энергосистемы. Необходим переход от классической постановки задачи исследования устойчивости, фиксирующей факт ее нарушения, к расширенной постановке – исследованию процессов распада синхронной работы системы при возмущениях. Анализ этих процессов может быть основан на исследованиях структуры движения системы в электромеханическом переходном процессе, имеющем волновой характер. Процессы распада синхронизма могут описываться энергетическими показателями, отражающими взаимопревращение кинетической и потенциальной энергии в узловом пространстве энергосистемы; пространственными характеристиками, показывающими расположение сечения асинхронного хода; временными (темповыми) характеристиками развития неустойчивости. Эти показатели позволяют наглядно описать всю совокупность возможных структур нарушения устойчивости в энергосистеме.

Проведение расчетных исследований структурных динамических свойств энергосистемы с использованием расширенной постановки задачи исследования устойчивости с помощью специализированных инструментальных средств позволяет провести полные исследования её слабых звеньев и определить структуру и состав задач по управлению ею с целью обеспечения устойчивости. Важным промежуточным результатом является прогнозирование положений сечения асинхронного хода в системе при нарушениях устойчивости.

На основании расширенной постановки задачи исследования устойчивости энергосистем и набора количественных характеристик процессов распада возможно построение прикладных методов выбора и осуществления противоаварийного управления.

**Целью работы** является разработка:

-методов исследования структуры движения и процессов распада синхронной работы энергосистемы при возмущениях;

-методов и алгоритмов определения управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости электростанций в сложной энергосистеме в рамках централизованной системы противоаварийного управления (ЦСПА).

Для достижения цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Проведен обзор существующих методов и подходов по обеспечению динамической устойчивости в сложных энергосистемах

2. Сформулирована расширенная задача устойчивости энергосистемы как задача исследования процессов распада её синхронизма.

3. Развита методы и алгоритмы анализа и выявления структур движения в сложных энергосистемах.

4. Предложены методы и алгоритмы исследования процессов распада сложных энергосистем при аварийных возмущениях.

5. Разработаны методики выбора места и объема корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости в рамках существующей практики выбора управления ЦСПА.

6. Проведены расчетные исследования устойчивости и выбора управления по её обеспечению с применением названных методических разработок.

**Предмет исследования** – методы анализа и способы обеспечения динамической устойчивости синхронных машин в сложной многокольцевой энергосистеме.

**Объект исследования** – сложная энергосистема с развивающейся системой противоаварийного управления с целью обеспечения устойчивости.

**Методы исследования.** Полученные в работе результаты основываются на применении теоретических методов исследования в предметной области, базируются на положениях фундаментальных и прикладных наук, таких как

математическое моделирование, теория устойчивости, теоретические основы механики, электротехники и электроэнергетики.

**Достоверность** и обоснованность основных научных положений и выводов работы подтверждаются теоретическими обоснованиями, совпадением результатов по выбору управляющих воздействий для обеспечения динамической устойчивости электростанций, полученных известным способом и на основе предложенной методики.

#### **Научная новизна работы**

1. Предложена новая постановка задачи исследования динамической устойчивости энергосистемы как процессов распада синхронизма, содержащая в своем составе определение положения сечений асинхронного хода.

2. Предложен способ выявления иерархической структуры движения и определения пространственной структуры процессов взаимопревращения кинетической и потенциальной энергии колебаний, ответственных за распад синхронизма системы.

3. Предложен способ наглядного представления всей совокупности слабых сечений энергосистемы посредством энерговременных диаграмм. Эти диаграммы отражают пространственные, энергетические и временные характеристики слабых сечений.

4. Разработан метод и алгоритм расчёта объема и места реализации корректирующих управляющих воздействий по условию сохранения динамической устойчивости энергосистемы при действии АПНУ в послеаварийных режимах.

#### **Практическая ценность и реализация результатов работы**

Результаты исследований, проведенных в диссертационной работе, использованы в научно-исследовательской работе «Разработка программного (автономного) модуля под ОС Windows расчета управляющих воздействий по условиям обеспечения динамической устойчивости электростанций для ЦСПА ОЭС Сибири», Инв. № СО-ДН-1/15.



В настоящее время разработки НИР применяются в работе по титулу «Модификация программного обеспечения ПТК верхнего уровня ЦСПА ОЭС Сибири с целью обеспечения возможности подключения дополнительных низовых устройств ЛАПНУ и реализации возможности выбора управляющих воздействий с учетом сохранения динамической устойчивости в послеаварийных режимах», Инв. № ОДУ-ЦСПА-16/2.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Полученные соискателем основные научные результаты соответствуют пункту 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Расширенная постановка задачи исследования устойчивости, содержащей определение положения сечения асинхронного хода, что позволяет снизить объемность задачи оценки устойчивости электрических станций.

2. Подход к исследованию процессов распада синхронизма, основанный на выявлении иерархической структуры движения, методе площадей, законах сохранения импульса и энергии структурно организованного движения, что позволяет рассчитать кинетическую энергию возмущения и высоту потенциального барьера, препятствующего нарушению устойчивости.

3. Методика исследования устойчивости на основе энерговременных диаграмм, которые являются наглядным способом по отражению всех возможных слабых сечений энергосистемы и демонстрируют пространственные, временные, энергетические характеристики распада синхронизма в энергосистеме.

4. Методика выбора управляющих воздействий по реализации корректирующего управления по обеспечению динамической устойчивости в рамках ЦСПА, основанная на понятиях структурно организованного движения

и методе площадей, позволяет выбрать достаточный объем управляющих воздействий для сохранения динамической устойчивости электростанций.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технической конференции «ЭНЕРГОСИСТЕМА: Исследование свойств, Управление, Автоматизация», организованной ЗАО «Институт автоматизации энергетических систем», 30 сентября – 2 октября 2014 года в г. Новосибирске; на международной выставке и XXII научно-практической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем», организованной ОАО «Системный оператор Единой энергетической системы», 27 – 29 мая 2014 года в г. Москве; на 5-ой международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем», организованной Российским национальным комитетом СИГРЭ и ОАО «Системный оператор Единой энергетической системы», 1 – 5 июня 2015 года в г. Сочи.

**Степень разработанности темы.** Проблеме устойчивости энергосистем посвящены труды В.А. Веникова, П.С. Жданова, А.А. Горева, С.А. Лебедева, С.А. Ульянова и др. Их работы содержат фундаментальные основы теории устойчивости энергосистем в части критериев и методов, математических моделей элементов энергосистемы.

Вопросы автоматического противоаварийного управления как метода повышения устойчивости параллельной работы энергосистем рассматриваются в работах следующих авторов: Л.А. Кошечев, Н.И. Овчаренко, А.А. Окина, Р.А. Вайнштейна, И.З. Глушкина, Б.И. Иофьева и др. В этих работах отражены принципы построения систем ПА, методы выбора мест ввода и объема УВ, подходы к математическому описанию области допустимых режимов и идентификации опасных возмущений.

В последние годы проблеме противоаварийного управления с целью обеспечения устойчивости и идентификации области допустимых режимов

посвящены труды А.Г. Фишова, А.К. Ландмана, А.М. Петрова, П.И. Бартоломея, Е.И. Сацука, А.А. Лисицына, Б.А. Осака и др.

Влияние на подходы к осуществлению централизованного противоаварийного управления (ЦСПА) оказали А.А. Лисицын, П.Я. Кац, Н.Г. Шульгинов, В.Л. Прихно, А.С. Вторушин, Д.С. Лоцман, М.А. Эдлин, А.В. Жуков и др. В работах этих учёных отражены принципы построения ЦСПА, методы выбора УВ, способы формирования математической модели объекта управления в рамках I-ДО. Однако оценка динамической устойчивости выполняется на основе классического двухмашинного эквивалента энергосистемы и практически не рассматриваются другие подходы.

Рассмотрению понятий структурного анализа энергосистем и формирования групповых движений синхронных машин в энергосистемах посвящены работы следующих авторов: Н.Н. Лизалека, Н.И. Воропая, Н.А.Абраменковой, С.В. Шиловского и др. Представленные работы рассматривают методы и способы группировки машин в задачах эквивалентирования математических моделей энергосистем или теоретические аспекты группировки. При этом вопросы противоаварийного управления в части обоснования места и объема управляющих воздействий, прогнозирования сечения асинхронного хода при конкретных возмущениях не рассматриваются.

### **Краткое содержание глав диссертации.**

В главе 1 выполнен обзор литературы по текущим методам и подходам обеспечения динамической устойчивости в сложных энергосистемах в рамках противоаварийного управления. Выявлены их недостатки.

В главе 2 проведена постановка задачи исследования структуры неустойчивых движений электроэнергетических систем на основании понятий структурно организованного движения и исследования рельефа многомерной потенциальной функции системы, защищающей систему от выпадения из синхронизма по одному из слабых сечений. Выполнен оценочный расчет устойчивости ОЭС Сибири с целью доказательства необходимости расчета УВ из условия обеспечения динамической устойчивости в рамках ЦСПА ОЭС

Сибири. Выполнен расчет устойчивости простой энергосистемы с целью выявления структуры неустойчивых движений на основе математического моделирования возмущений – «традиционного» подхода.

В главе 3 рассматривается структурная организация электромеханических колебаний и её проявления в процессах распада синхронизма энергосистем. Выводятся соотношения для импульса и энергии структурно организованного движения. Представлена идея метода выделения колебательных структур и прогнозирования на их основе сечения нарушения устойчивости. Излагается подход к оценке необходимых ресурсов для предотвращения распада синхронной работы на основании расчетов пространственных и временных характеристик взаимопревращений кинетической и потенциальной энергии системы в переходном процессе.

В главе 4 рассматривается прикладное применение разработанных теоретических методов и способов. Предлагается метод энерговременных диаграмм как способ представления структуры неустойчивых движений энергосистем с отражением пространственных, временных, энергетических характеристик распада синхронизма. Представлен метод выбора корректирующих УВ по условию обеспечения динамической устойчивости электростанций.

### **Публикации**

По результатам исследований опубликовано 9 печатных работ, в том числе 4 научных статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендованных изданий ВАК РФ; 5 статей в сборниках международных и всероссийских конференций.

### **Личный вклад соискателя**

Проведён анализ и развитие методов исследования структуры движения и его энергетических характеристик, их использования для описания процессов распада синхронизма; предложены алгоритмы выбора корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости.

Проведено тестирование и сопоставление выбора управляющих воздействий по разработанному алгоритму с использованием общепризнанных программ расчета режимов (RastWin, Мустанг, Eurostag).

В полном объеме выполнены расчет и анализ результатов установившихся режимов и переходных процессов Норильско-Таймырской энергосистемы, крупных электростанций ОЭС Сибири с использованием ПК RastWin, Мустанг, Eurostag. На основе расчетных исследований обоснована целесообразность учета динамической устойчивости в рамках ЦСПА ОЭС Сибири; сформулированы требования и задачи выбора корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости в рамках ЦСПА ОЭС Сибири.

### **Объём и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 100 наименований, списка принятых сокращений, списка терминов и трех приложений. Общий объем работы составляет 175 страниц, включая 1 таблицу и 30 рисунков.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.т.н., профессору Н.Н. Лизалеку за постоянную и неоценимую помощь в работе над диссертацией на всех этапах, к.т.н., заведующему лабораторией ЗАО «ИАЭС» Вторушину А.С, и старшему научному сотруднику ЗАО «ИАЭС» Аржанникову С.Г. за помощь в проведении программирования и реализации представленного подхода в виде программного модуля по выбору управляющих воздействий противоаварийной автоматики для обеспечения динамической устойчивости.

## ГЛАВА 1 УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. ИСТОРИЯ ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ПУТИ ЕЁ РЕШЕНИЯ

### 1.1 Нарушение устойчивости энергосистемы и автоматическое управление режимом ее работы

Устойчивости параллельной работы синхронных машин в энергосистемах и методов по управлению ими с целью сохранения устойчивости параллельной работы посвящен ряд научных работ различных ученых, таких как: В.А. Веников, П.С. Жданов, А.А. Горев, С.А. Лебедев, Л.Г. Мамиконянц, Н.И. Соколов, Л.В. Цукерник, М.М. Ботвинник, Э.С. Лукашев, Д.А. Арзамасцев, Н.И. Воропай, Н.А. Абраменкова, Н.Н. Лизалек, Р.М. Anderson, А.А. Fouad и многих других ученых.

Процесс создания единой энергетической системы России [79] складывался в несколько этапов: от объединения нескольких изолированно работающих электростанций между собой на параллельную работу до образования территориальных объединенных энергосистем (ОЭС) крупных промышленных районов и объединения ОЭС между собой – созданию единой энергетической системы (ЕЭС).

За период создания современной энергосистемы России произведено строительство множества электростанций с постепенным увеличением их установленной мощности; повышение единичной мощности вводимых генераторов; освоение новых классов напряжения основной системообразующей сети; организация диспетчерского управления в связи с масштабностью и сложностью энергосистемы; создание специализированных средств связи; внедрение средств линейной и технологической автоматики; использование новых типов быстродействующих релейных защит и ввод средств повышения наблюдаемости режима работы энергосистемы.

Преимуществами объединения электростанций на параллельную работу является извлечение системного эффекта [64,80]: сглаживание графика

нагрузки объединенной энергосистемы; снижение оперативного резерва и повышение надежности работы энергосистемы; оптимизация режимов работы разных типов электростанций с учетом пропускной способности сети, повышение надежности электроснабжения потребителей. Главным преимуществом является существенное увеличение экономичности работы энергосистемы.

Вместе с преимуществами возникли и новые проблемы: необходимость оценки устойчивости синхронной работы энергосистемы – статической и динамической; сложность и многообразие процессов нарушения нормальной работы энергосистемы из-за повышения количества степеней свободы системы; возможность цепочечного или каскадного развития аварий.

Таким образом, с ростом единичной мощности блоков электростанций, концентрации мощностей генерации в узлах энергосистемы и их объединения в единую систему возникла проблема обеспечения динамической устойчивости их параллельной работы.

Нарушение синхронной работы энергосистемы вследствие потери устойчивости [42,10,67,35,63] завершается возникновением асинхронного режима, приводящего к колебаниям режимных параметров вблизи электростанций и значительным броскам токов. Это крайне негативно влияет на ресурс силового оборудования энергосистемы.

Аварийный избыток мощности [89] в отправной системе может вызвать значительное повышение частоты, что является недопустимым режимом работы для тепловых турбин и действия технологической автоматики. В приемной энергосистеме значительный небаланс мощности может вызвать лавину частоты или напряжения. Эти же эффекты могут проявиться вследствие аварийного деления энергосистемы на несбалансированные части.

Из многолетнего опыта эксплуатации сложных и протяженных энергосистем выявлено, что наиболее эффективным средством предотвращения негативных последствий аварий является совершенствование управления

энергосистемой. Управление в энергосистеме подразделяется на два вида: оперативно-диспетчерское и автоматическое.

Целью оперативно-диспетчерского управления [14] являются ликвидация нарушений заданного режима работы энергосистемы, отвечающего требованиям бесперебойного электроснабжения потребителей, качества электроэнергии экономичности и надежности, недопущение возникновения аварий и минимизация ущерба от возникновения отклонений от заданного режима работы энергосистемы.

Введение автоматического управления [84,46,59] основано на невозможности быстрого реагирования на развитие процессов другими способами. Различают несколько способов автоматического управления: релейная защита, сетевая автоматика, противоаварийная автоматика, режимная автоматика, автоматика регистрации аварийных событий и процессов, технологическая автоматика.

Релейная защита предназначена для выявления различных замыканий и других ненормальных режимов работы силового оборудования и действия на его отключение. Функциями режимной автоматики являются измерение и обработка режимных параметров энергосистемы, передача этой информации и команд управления с их реализацией при отсутствии аварийных возмущений (плавное регулирование частоты, напряжения, активной и реактивной мощности генераторов). Задачей технологической автоматики является обеспечение технологических функций силового оборудования – собственных нужд электростанций, оперативного тока, управления коммутационными аппаратами и многое другое. К сетевой автоматике относятся устройства повторного включения, ввода резерва и опережающего деления системы.

Задачей противоаварийной автоматики является [69] обеспечение допустимой работы объекта управления при возникновении аварийного возмущения и сохранения функционирования энергосистемы в послеаварийном режиме [42]. Значительная экономическая эффективность использования противоаварийного управления в виде разности стоимости усиления сети и



стоимости оборудования противоаварийного управления, обусловила ее широкое распространение в рамках объединенной энергосистемы.

По функциональному назначению противоаварийную автоматику возможно разделить на четыре составляющие [5,63]: пусковые органы, логические органы, система сбора и передачи информации, исполнительные органы.

Задачей пусковых органов является идентификация аварийного возмущения посредством фиксации отключения силовых элементов (сигнал РЗ, положение выключателей) или изменения режимных параметров энергосистемы (ток, напряжение, мощность). При этом поиск аварийных возмущений, относящихся к опасным, и техническое воплощение пусковых органов решается на этапе выполнения проектной документации.

Система сбора и передачи информации предназначена для сбора доаварийной информации о режиме работы системы с целью определения степени близости рабочей точки к недопустимой области и передачи информации (срабатывание пусковых органов, выбранный объем управляющих воздействий) к различным устройствам.

Оценка степени опасности аварийного возмущения, тяжести доаварийного режима и выбор места и объема управляющих воздействий осуществляется в логическом органе. Технологический алгоритм логического органа позволяет выполнять обозначенную оценку в пассивном режиме (настройка типа «если–то») и в темпе процесса (работа с моделью энергосистемы с периодическим перерасчетом режимов).

Исполнительное устройство реализует выбранные управляющие воздействия с функцией их распределения для обеспечения наибольшей близости расчетных и исполняемых отключений [33].

Обеспечение устойчивости в рамках системы противоаварийного управления осуществляется в системе автоматического предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ). Основной задачей АПНУ [5,69] является гашение избыточной кинетической энергии, накопленной роторами вследствие

аварийного возмущения, и обеспечение нормативных запасов статической устойчивости. Применение АПНУ позволяет повысить пропускную способность линий связи энергосистемы.

Идея централизованной системы противоаварийного управления (ЦСПА) возникла в связи с началом масштабного развития энергосистем, строительством крупных электростанций и отставания темпов сетевого строительства [26]. В результате системообразующая сеть эксплуатировалась на пределе возможностей по устойчивости. Это привело к необходимости учета режима работы удаленных электросетей и множества других факторов, которые наиболее целесообразно было собрать в рамках одного комплекса.

Выделяется три поколения ЦСПА, которые различаются по технологическим алгоритмам выбора объема управляющих воздействий.

ЦСПА первого поколения работали по способу настройки II-ДО, когда на основе построения множества областей устойчивости производится аппроксимация последних и задание их в виде настройки срабатывания в зависимости от контролируемых схемно-режимных условий.

В ЦСПА второго поколения уже использовался принцип I-ДО, когда на основании математической модели и заданным аварийным возмущениям в темпе процесса производится оценка необходимости и объема ввода управляющих воздействий по условию обеспечения статической устойчивости и допустимой токовой загрузки силового оборудования.

Отличительной особенностью ЦСПА третьего поколения по сравнению со вторым является учет условия обеспечения динамической устойчивости в рамках технологического алгоритма ЦСПА.

Основными задачами, решаемыми при эксплуатации и настройке ЦСПА в режиме I-ДО, являются следующие [26,58,7,28,8,49,25,6,27]:

1. Развитие системы телекоммуникации для передачи информации о схемно-режимных условиях, срабатывании пусковых органов низовых устройств, передачи текущей настройки ЦСПА.

2. Составление адекватной математической модели районов управления энергосистемой, отражающей все влияющие факторы и связи, необходимые для выбора достаточного объема управляющих воздействий.

3. Верификация телеметрических данных с целью отбрасывания недостоверных замеров, формирования псевдо измерений с целью идентификации текущего состояния энергосистемы.

4. Обеспечение скорости алгоритма расчета управляющих воздействий, особенно по условию обеспечения динамической устойчивости, достаточной для сохранения актуальности настройки низовых устройств ЦСПА при краткосрочной изменчивости режима энергосистемы.

5. Оценка достаточности контроля режима энергосистемы, выполняемая на основе ручных расчетов режимов энергосистемы: поиск опасных сечений, поиск опасных возмущений и их соответствие пусковым органам, достаточность объема управляющих воздействий. Основная цель оценки – расширение технических средств по контролю новых условий и параметров.

6. Состав и распределение задач противоаварийного управления между низовыми устройствами ЦСПА и локальными комплексами АПНУ с целью обеспечения максимальной эффективности.

7. Составление технологического алгоритма выбора места реализации и объема управляющих воздействий с учетом таких особенностей как: наличие неустойчивых послеаварийных режимов, в которых затруднительны оценки требуемых запасов по устойчивости; определение вектора утяжеления режима.

## **1.2 Обзор существующих подходов по обеспечению динамической устойчивости синхронных машин в энергосистемах**

### **1.2.1 Подходы локального противоаварийного управления**

Проблема динамической устойчивости зачастую проявляется при возникновении замыканий вблизи мощных электростанций. Для решения подобных задач в рамках комплексов локальной противоаварийной автоматики используется фиксация тяжести коротких замыканий (ФТКЗ) [31,36]. Контроль тяжести замыканий основан на измерении сброса суммарной активной мощности электростанции и остаточного напряжения прямой последовательности на шинах станции. В связи с возможностью возникновения затяжных коротких замыканий, связанных с отказом действия силового выключателя, вводятся различия разгрузки при близких замыканиях нормальной длительности и затяжных коротких замыканий.

Описанный подход широко применяется в рамках единой энергетической системы России, например на Богучанской и Саяно-Шушенской ГЭС [61,70].

На Саяно-Шушенской ГЭС устройство ФТКЗ используется в качестве пускового органа, передающего степень тяжести замыкания автоматике дозировки воздействий (АДВ). АДВ на основании контроля доаварийного режима осуществляет выбор управляющих воздействий. В качестве управляющих воздействий в зависимости от текущих схемно-режимных условий применяются ступени, действующие на отключение генераторов ГЭС, и в качестве балансирующего воздействия применяются ступени на отключение нагрузки в ОЭС Сибири.

Существует адаптивный вариант настройки ФТКЗ по способу I-ДО [90]. Алгоритм выбора объема управляющих воздействий основан на представлении защищаемого объекта по модели станция – шины бесконечной мощности и построении семейства моментно – угловых характеристик для линий схемы

выдачи мощности станции с использованием метода площадей для оценки достаточности объема управляющих воздействий.

Другим возможным решением задачи сохранения динамической устойчивости электростанций является снижение времени возмущения [86,17,45] или ускорение ввода управляющих воздействий.

Существуют различия между динамической устойчивостью для полной и ремонтной схемы для основной системообразующей сети 500 кВ. Наибольшие ограничения по условию обеспечения динамической устойчивости в полной схеме проявляются при возмущениях III группы [77] – затянутых замыканиях с действием устройств резервного отключения выключателей (УРОВ) при возмущениях вблизи распределительного устройства 500 кВ электростанции.

Выдержка времени УРОВ определяется условием селективности действия, зависящего от времени действия оборудования (силового выключателя и реле времени) и запасом по времени. В связи с применением нового, более быстродействующего оборудования, и переходом с аналоговых на микропроцессорные устройства релейной защиты, стало возможным снижение времени выдержки УРОВ.

Другим способом снижения выдержки УРОВ и, следовательно, снижения тяжести возмущения является сигнал на ускорение действия УРОВ, вырабатываемый в рамках алгоритма функционирования ФТКЗ [86].

Еще одним из способов настройки противоаварийной автоматики из условия обеспечения динамической устойчивости является настройка пусковых органов, срабатывающих по факту отключения силовых элементов [72,82]. На основе моделирования множества схемно-режимных условий и аварийных возмущений производится выбор областей режимов, в которых существует ограничение по условию обеспечения динамической устойчивости. В дальнейшем это используется для настройки логических органов противоаварийной автоматики – например, подсистем АПНУ.

Другим примером использования принципов локального противоаварийного управления является использование системы аварийной

разгрузки при перегрузке по мощности (АРПМ) [75]. Ограничение по динамической устойчивости связано с торможением значительной части двигательной нагрузки, неуспешным самозапуском и ее отключением. Полученный аварийный толчок активной мощности на связях схемы выдачи мощности крупных электростанций вызывает нарушение динамической устойчивости. Использование АРПМ со ставкой срабатывания равной допустимому наброску активной мощности по сечению позволяет разгрузить электростанцию и сохранить ее динамическую устойчивость.

В случае наступления ненормативного возмущения, согласно [77], при нарушении устойчивости в действие вступает автоматика ликвидации асинхронных режимов (АЛАР) [31,30]. АЛАР обеспечивает прекращение асинхронного режима путем ресинхронизации или деления электрической сети. Деление электрической сети происходит только по связям, на которых присутствует электрический центр качаний.

Настройка АЛАР происходит путем моделирования реакций энергосистемы на ненормативные возмущения. Целью расчетов является исследование перемещения электрического центра качаний и определение годографов сопротивлений.

### **1.2.2 Подходы системного противоаварийного управления**

В энергосистемах России системное противоаварийное управление реализуется в рамках централизованной системы противоаварийного управления (ЦСПА).

Основной целью создания ЦСПА в любой ОЭС является минимизация объемов управляющих воздействий (УВ), реализуемых системой ПА при аварийных ситуациях в системообразующей сети энергосистемы. Для этого выбор УВ в ЦСПА выполняется на основании оценки устойчивости энергообъединения по достоверной расчетной модели в реальном времени [81].

ЦСПА ОЭС выполняется двухуровневой:

- верхний уровень ЦСПА, который включает в себя ПТК верхнего уровня, устанавливаемый в диспетчерском центре ОАО «СО ЕЭС». Основная задача ПТК верхнего уровня ЦСПА – это расчет таблиц УВ для заданного набора пусковых органов с использованием текущей расчетной модели энергосистемы (принцип I-ДО) и передача данных таблиц по каналам межмашинного обмена на низовой уровень ЦСПА;

- низовой уровень ЦСПА, который состоит из одного или нескольких низовых устройств ЦСПА (комплексов локального противоаварийного управления – ЛАПНУ), принимающих таблицы УВ от верхнего уровня. Центром каждого комплекса ЛАПНУ является устройство автоматической дозировки воздействий (АДВ).

ЦСПА ОЭС Сибири предназначена для обеспечения противоаварийного управления в Западной и Центральной части ОЭС Сибири, т.е. территориально от связей с ЕЭС Казахстана на западе до Братской ГЭС на востоке с выделением нескольких районов противоаварийного управления.

Технологические алгоритмы функционирования ЦСПА ОЭС Сибири в настоящее время позволяют производить выбор управляющих воздействий по следующим условиям:

- обеспечения нормативных запасов статической аperiodической устойчивости;

- обеспечения допустимых токовых нагрузок ЛЭП и оборудования.

Условия обеспечения динамической устойчивости электростанций при рассматриваемых аварийных возмущениях в алгоритмах ЦСПА ОЭС Сибири в настоящее время не оцениваются и не учитываются при выборе управляющих воздействий. В то же время для перспективных комплексов ЛАПНУ, которые будут использоваться в качестве низовых устройств, в соответствующих проектных работах определены аварийные возмущения и соответствующие пусковые органы, управляющие воздействия для которых должны выбираться по условиям обеспечения устойчивого динамического перехода в послеаварийный режим. Данные обстоятельства могут привести к

необходимости вывода таких пусковых органов из цикла расчета существующей ЦСПА ОЭС Сибири, так как ее алгоритмы не позволяют провести выбор необходимых УВ, что в целом снижает функциональность и эффективность ЦСПА в части задачи минимизации управляющих воздействий в ОЭС Сибири.

В данных условиях актуально решение вопросов развития ЦСПА ОЭС Сибири в части разработки и реализации алгоритма расчёта управляющих воздействий по условиям обеспечения динамической устойчивости.

В текущих условиях проблема динамической устойчивости решается локально. Так как нарушение динамической устойчивости возможно вследствие выбега углов роторов синхронных машин электростанций, то при сохранении индивидуальной динамической устойчивости каждой из электростанций обеспечивается общесистемная динамическая устойчивость.

В настоящее время происходит совершенствование технологических алгоритмов и технического оснащения ЦСПА. Одно из основных отличий ЦСПА нового поколения состоит в выборе управляющих воздействий с учетом динамической устойчивости.

При разработке ЦСПА нового поколения были выставлены следующие требования [47,81]: использование традиционных расчетных методов; максимальная универсальность метода выбора управляющих воздействий с возможностью применения алгоритма в сетях любой конфигурации; повышение быстродействия алгоритма путем применения параллельного расчета пусковых органов.

Одним из традиционных подходов выбора противоаварийного управления по условию обеспечения динамической устойчивости является представление модели энергосистемы двухмашинном эквивалентом относительно сечения асинхронного хода [55,81,87].

На основе расчета переходного процесса при заданных схемно-режимных условиях, месте и виде возмущения производится фиксация факта нарушения устойчивости и сечение асинхронного хода. Выделение сечения выполняется



на основе выделения связей, разность углов напряжения между которыми составляет более  $180^{\circ}$ . Происходит преобразование модели энергосистемы до двухмашинного эквивалента суммированием уравнений движений всех синхронных машин, входящих в каждую несинхронную часть. На основании двухмашинного эквивалента и метода площадей осуществляется выбор управляющих воздействий и их распределение по конкретным управляемым объектам. Для проверки правильности выбора противоаварийного управления производится повторный расчет переходного процесса с оценкой достаточности и избыточности управляющих воздействий.

### **1.2.3 Структурный анализ устойчивости энергосистем**

В сложных энергосистемах, имеющих в своем составе множество электростанций и разветвленную радиально-многокольцевую системообразующую сеть, зачастую задача расчета устойчивости энергосистемы выглядит нетривиальной. Все осложняется многомерностью области допустимых режимов и множественностью влияющих на нее схемно-режимных условий.

Перспективной в этом контексте является применение методов расчета, снижающих их сложность по оценке устойчивости энергосистем путем отбрасывания избыточной информации. Примером обозначенного подхода является структурный анализ.

Суть структурного анализа состоит в выделении слабых звеньев (элементов) энергосистемы путем преобразования и упрощения ее математической модели с использованием различных приемов [68]. Под слабыми элементами энергосистемы понимаются те, критическое состояние которых при приближении к границе устойчивости энергосистемы является причиной ее нарушения. Дальнейшее их ослабление является определяющей аварией по условию обеспечения устойчивости.

Выделение слабых элементов энергосистемы принципиально может быть выполнено двумя способами: на основе рассмотрения установившихся режимов и их систем уравнений или на основе рассмотрения уравнений движения при расчете электромеханических переходных процессов.

Одним из примеров структурного анализа является подход [1-4,12]. Методической основой является выделение количественной характеристики структурной связности  $W_{ij}$  между генераторами  $i$  и  $j$ , являющейся идеальным пределом угловой характеристики мощности простой двухмашинной системы:

$$W_{ij} = E_i E_j Y_{ij}, \quad (1.1)$$

где  $E_i$  и  $E_j$  - модули ЭДС генераторов  $i$  и  $j$ ;  $Y_{ij}$  - эквивалентная взаимная проводимость между генераторами  $i$  и  $j$ . Введенная величина позволяет произвести анализ электрической связности генераторов и выделить сильно связанные подсистемы.

Также предложены численные коэффициенты, характеризующие степень слабости слабых связей или наиболее загруженных сечений энергосистемы. По ранжированным значениям связности формируются подсистемы и вычисляется полная обменная мощность подсистем [1-4]  $W_{o_i}$ :

$$W_{o_i} = \sum W_{ij\text{внутр}} + \sum W_{ij\text{внешн}}, \quad (1.2)$$

где  $\sum W_{ij\text{внутр}}$  - сумма электрических связностей  $W_{ij}$  по генераторам, принадлежащим рассматриваемой подсистеме;  $\sum W_{ij\text{внешн}}$  - сумма электрических связностей  $W_{ij}$  между генераторами рассматриваемой подсистемы и другими генераторами, не входящими в рассматриваемую подсистему. Коэффициент электрической независимости подсистемы [1-4]  $R_{\mathcal{U}_i}$ :

$$R_{\mathcal{U}_i} = \sum W_{ij\text{внешн}} / W_{o_i}, \quad (1.3)$$

Значимость связи между двумя подсистемами [1-4]  $H$ , характеризующая долю пропускной способности, приходящуюся на рассматриваемую связь:

$$H_i = W_{ij} / W_{o_i}, H_j = W_{ij} / W_{o_j}. \quad (1.4)$$

При  $R_{\mathcal{U}} < 0,5$  связи между генераторами внутри подсистемы сильнее, чем внешние связи между подсистемой и другими генераторами. При этом соотношении выделенная подсистема является концентрированной и не содержит внутри себя структурно-слабых связей. Численная характеристика значимости связи позволяет отбросить малозначительные связи и выбрать связи, аварийное отключение которых вызовет наибольшее ослабление опасного сечения.

Возможно построение подсистем с использованием динамических характеристик энергосистемы. Аналогично связности по матрице собственных и взаимных проводимостей, оценивается связность генераторов попарно на основании двух подходов. Первый подход определяет связность  $W_{ij}^\delta$  на основе применения к уравнению движения пары генераторов функции Ляпунова в виде интеграла энергии для неустойчивого положения[4]:

$$d^2 \delta_{ij} / dt^2 = p_{ij} - d_{ij} \sin \delta_{ij}, \quad (1.5)$$

$$W_{ij}^\delta = p_{ij} (2\delta_{ij}^0 - \pi) - 2d_{ij} \cos \delta_{ij}^0, \quad (1.6)$$

где  $\delta_{ij}^0$  – доаварийная точка баланса мощности генератора и турбины. Второй подход основан на применении второй формы критерия устойчивости Горева в виде[4]:

$$\int_{\delta_{ij}^0}^{\delta_{ij}^S} (p_{ij} - r_{ij} \sin \delta_{ij}) d\delta_{ij} + 0.5 \left( \frac{d\delta_{ij}}{dt} \right)^2 \leq 0, \quad (1.7)$$

где  $r_{ij}$  – это вершина угловой характеристики пары генераторов,  $\delta_{ij}^S$  – критическая точка угловой характеристики. Тогда связность  $W_{ij}^\delta$  можно оценить как [4]:

$$W_{ij}^\delta = \frac{S_{\text{торм}}^{ij}}{2r_{ij}}, \quad (1.8)$$

где площадка торможения  $S_{\text{торм}}^{ij}$  вычисляется на основании (1.7).

Другим примером структурного анализа, основанного на построении матриц собственной и взаимной проводимости, анализе Якобиана [39], является подход [9]. Основная идея подхода основана на применении сингулярного (собственные числа матрицы) и спектрального анализа матриц при введении множества аварийных возмущений с целью выявления сенсорных элементов и слабых мест энергосистемы.

Выделение элементов со сходными состояниями или реакциями на задаваемые возмущения позволяет сформировать значимые факторы и получить эквивалентную модель энергосистемы в виде совокупности подсистем. Это позволяет выявить статические свойства энергосистемы при проведении минимума расчетов режимов ее работы.

В качестве оценки свойств динамических характеристик энергосистемы, используются свойства когерентности – степени близости реакций элементов системы на возмущения. На основе расчета электромеханического переходного процесса производится группировка синхронных машин. Численными мерами когерентности для пар генераторов выступают: относительные углы роторов, относительные скорости роторов, относительные ускорения роторов, энергетические характеристики движений – площадки взаимных торможений и ускорений с учетом производных от них инструментов, модуля ускорения в конце площадки торможения, соотношению взаимной проводимости к инерционности роторов.

Еще один из подходов, относящихся к группе структурного анализа, является [93-96,98,99]. Основной идеей подхода является рассмотрение реакции энергосистемы на возмущения в виде спектра гармонических колебаний. Выделение гармонического спектра колебаний основано на решении системы линеаризованных уравнений движения в виде (1.10) [94].

$$\frac{(T_{ji} \cdot P_{ni})}{\omega_0} \cdot \frac{d^2 \Delta \delta_i}{dt^2} = - \sum_{r=2}^n \frac{dP_i}{d\delta_{1r}} \cdot \Delta \delta_{1r}, \quad (1.9)$$

$$\Delta\delta_i(t) = \sum_{k=1}^{n-1} \Delta\delta_{ik} \cdot \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (1.10)$$

$$P_i = \sum_{\substack{r \neq i \\ r=1}}^n E_i \cdot E_r \cdot Y_{ir} \cdot \sin \delta_{ir} \quad (1.11)$$

где  $T_{ji}$  – постоянная инерции  $i$ -ого генератора,  $P_{ni}$  – номинальная мощность  $i$ -ого генератора,  $\Delta\delta_i$  – малое отклонение вектора ЭДС  $i$ -ого генератора,  $P_i$  – текущая активная мощность  $i$ -ого генератора,  $\delta_{1r}$  – взаимный угол между векторами ЭДС первого и  $r$ -ого генератора,  $n$  – множество генераторных узлов.

Каждая точка многомерной области устойчивости характеризуется спектром частот собственных колебаний [97]. Если рассматривать возмущение как источник энергии колебаний, то распределение этой энергии по гармоническим составляющим можно оценить по выражению [98]:

$$\Delta E_{ik} = 0.5 \cdot \omega_k^2 \cdot J_i \cdot (\Delta\delta_{ik})^2 \quad (1.12)$$

На основании ранжировки распределения энергии колебаний по гармоническим составляющим возможно отбросить слабо возбужденные составляющие и выделить основные. Выделенные составляющие в свою очередь характеризуются волновыми структурами – эквивалентным представлением энергосистемы совокупностью подсистем в рамках одной гармонической составляющей, связанных слабыми связями [97]. Критическая величина энергии колебаний, которая может быть передана через слабые связи определяется по выражению [98]:

$$\Delta E_{ijk} = \frac{1}{100\pi} \int_{\delta_{ij}^{ucx}}^{\delta_{ij}^{crum}} [E_i \cdot E_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_{ij}) - P_{ij}^{ucx}] d\delta_{ij}, \quad (1.13)$$

Формируя подсистемы по выделенным структурно слабым связям и суммируя энергии ускорения и торможения по выражениям (1.12, 1.13) делается заключение об устойчивости переходного процесса.

#### **1.2.4 Подходы по определению области устойчивости объекта управления в темпе процесса**

Выбор управляющих воздействий в темпе процесса возможно выполнить по двум принципам: I-ДО и I-ПОСЛЕ. Принцип I-ДО предполагает выбор управляющих воздействий на основе периодических расчетов устойчивости в рамках технологического алгоритма автоматике до возникновения аварийного события. Реализация I-ДО широко распространена в рамках энергосистемы России и представлена в методах и алгоритмах работы противоаварийной автоматике [61,55,45,92].

Принцип работы I-ПОСЛЕ предполагает выбор управляющих воздействий по результатам расчета устойчивости после поступления сигнала об аварийном возмущении. Применение принципа ограничено технической возможностью быстрого оценивания тяжести режима и выбора управляющих воздействий для сработавшего пускового органа.

Пример увеличения скорости оценивания состояния системы и расчета переходного процесса рассмотрен в [13]. Основная идея подхода заключается в упрощении модели энергосистемы при расчете переходного процесса и введении параллельного счета по отдельным синхронным генераторам для снижения общего времени расчета.

Другим направлением реализации оценивания состояния энергосистемы и настройки противоаварийной автоматике является применение системы векторных измерений режимных параметров.

Нарушение устойчивости в энергосистеме сопровождается асинхронным режимом, факт возникновения которого можно наблюдать по проворотам векторов напряжений в узлах энергосистемы. Значительная разность углов напряжений по концам связей является одним из критериев идентификации слабых сечений энергосистемы [94].

Контроль векторов режимных параметров позволяет приблизиться к физической сущности нарушения устойчивости. Физически, активная

мощность передается от узла с опережающим вектором напряжения к узлу с отстающим вектором напряжения – переток активной мощности является следствием фазовых сдвигов по концам связей.

Примером использования векторных измерений для систем противоаварийного управления является методика [57], основанная на измерениях углов и скольжений роторов генераторов. Основная идея методики заключается в применении локальных функционалов, являющихся подобием целевой функции по оптимизации перехода к желаемому режиму от текущего в координатах фазовых плоскостей. На основании минимизации локального функционала возможно построение закона непрерывного адаптивного управления мощностью объекта управления. На основании асимптотического принципа оптимальности для локального функционала и применения его к уравнению движения синхронных машин производится поиск закона независимого управления мощностью  $i$ -ого генератора [57]:

$$U_i(t) = P_T^i - P_{\mathcal{G}}^i(t) + T_J^i(\delta_i(t) - \bar{\delta}_i) / 2qk_i + s_i(t)qT_J^i / 2, \quad (1.14)$$

где  $P_T^i$  – механическая мощность турбины,  $P_{\mathcal{G}}^i(t)$  – электрическая мощность турбины,  $T_J^i$  – постоянная инерции,  $\delta_i(t)$  – угол ротора генератора,  $\bar{\delta}_i$  – угол ротора генератора в положении равновесия в доаварийном режиме,  $q$  и  $k_i$  – коэффициенты, учитывающие влияние отклонения угла ротора от положения равновесия,  $s_i(t)$  – скольжение генератора.

Другим способом применения векторных измерений при решении задач противоаварийного управления является идентификация матрицы собственных и взаимных проводимостей [88,91,92,78]. На основании матрицы собственных и взаимных проводимостей и контроля топологии сети производится построение угловых характеристик мощности по схеме «генератор–ШБМ». Применяя метод площадей и метод утяжеления режима возможно рассчитать численные характеристики устойчивости и выбрать требуемый объем управляющих воздействий.

Еще одним способом применения векторных измерений является использование относительного угла по концам связей, входящих в опасное сечение [44,11,66]. Объем управляющих воздействий  $U(t)$  рассчитывается по выражению:

$$U(t) = K_{\delta 0} \cdot \int_0^t (\delta_{л} - \delta_{л.уст}) dt + K_{\delta} (\delta_{л} - \delta_{л.уст}) + K_S \cdot S + K_{S1} \frac{dS}{dt}, \quad (1.15)$$

где  $\delta_{л}$  – относительный угол по концам линии связи опасного сечения,  $\delta_{л.уст}$  – ставка регулятора по относительному углу,  $S$  – скольжение вектора напряжения на шинах станции,  $K_{\delta 0}$  – коэффициент регулирования по интегралу отклонения относительного угла,  $K_{\delta}$  – коэффициент регулирования по отклонению относительного угла от ставки,  $K_S$  – коэффициент регулирования по отклонению частоты,  $K_{S1}$  – коэффициент регулирования по скорости отклонения частоты.

Еще одним направлением использования системы векторных измерений является система мониторинга переходных процессов (СМПР) [15,38,71,29]. В СМПР выполняются следующие функции: измерение и вычисление режимных параметров энергосистемы, обеспечивающих большую наблюдаемость; контроль выхода режимных параметров из допустимого диапазона; диагностика некоторых систем силового оборудования; визуализация процессов, протекающих в энергосистеме в режиме реального времени (например, распространения возмущений в энергосистеме). В настоящее время СМПР используется для сбора данных, необходимых для противоаварийного и диспетчерского управления [29].

Важным направлением ведения режима является мониторинг запасов устойчивости в опасных сечениях энергосистемы с учетом текущих ресурсов противоаварийного управления [19]. На основании верификации математической модели по телеизмерениям, в том числе и векторным измерениям, происходит оценка режима по заданному перечню траекторий



утяжеления. В результате обозначенных действий происходит расчет предельных режимов с определением максимально допустимых перетоков по заданным опасным сечениям.

Помимо обеспечения функций наблюдаемости режима энергосистемы и реализации режимных ограничений с учетом ресурсов противоаварийной автоматики другой важной задачей автоматики является разграничение задач противоаварийного управления.

Кроме локального, использующего только местную информацию об объекте управления, и централизованного системного подхода, использующего одно логическое устройство по выбору объема воздействий и несколько низовых исполнительных устройств, выделяется подход децентрализованного противоаварийного управления. Отличие от централизованного управления заключается в отсутствии единого логического органа по выбору воздействий.

Примером децентрализованного противоаварийного управления является подход, основанный на применении мультиагентной системы [22,74]. Идея заключается в применении в рамках объекта управления агента по реализации задач противоаварийного управления, обладающего свойствами реагирования на изменения в энергосистеме, динамического изменения поведения по реализации стратегии управления и взаимодействия с другими агентами. Каждый из агентов имеет свою цель управления при отсутствии общесистемной задачи противоаварийного управления.

Другим подходом настройки ПА в режиме I-ДО является упрощение математической модели объекта управления и методов определения границы допустимых режимов при сохранении приемлемой точности [34]. Это актуально для элементов энергосистемы, для которых сильно выражено влияние нескольких локальных схемно-режимных условий.

В методе [34] упрощение заключается в использовании линеаризации угловой характеристики для расчета изменения углов напряжений в районе управления и набросов мощности на защищаемые линии в послеаварийном режиме. Далее производится поиск линий (сечений), по которым переток в

послеаварийном режиме превышает уставку. По этой же методике оценивается снижение перетока от введения УВ. Объем УВ выбирается из условия снижения перетока по линии (сечению) ниже уставки срабатывания, эффективность УВ – по наибольшей разгрузке линии (сечения).

### **1.2.5 Подходы, основанные на применении теоретических методов исследования устойчивости нелинейных систем**

Построение математической модели [21,76], которую используют для исследования динамической устойчивости энергосистемы, основано на уравнениях: движения ротора, регуляторов возбуждения и скорости вращения турбины, связи режимных параметров и рассчитанных движений генераторов [20,37,56]. Решение составленной системы уравнений может быть основано на двух подходах – количественного и качественного.

Количественный подход основан на численном интегрировании уравнений движения энергосистемы [20,37,39,73] и реализован во многих программах расчетов режимов (ПВК Мустанг, Eurostag [100]). В результате решения уравнений получают численные изменения режимных параметров энергосистемы. На основании построения графиков переходных процессов возможно идентифицировать факт нарушения динамической устойчивости, сечение асинхронного хода и сформировавшиеся группы однотипного движения синхронных машин. В настоящее время представленный подход широко используется в практике расчета режимов для распределения состава задач противоаварийного управления, обоснования структуры автоматики, выбора состава пусковых органов и контроля доаварийной информации, обоснования места реализации и объема управляющих воздействий.

Другая группа подходов, основанная на приближенных или линеаризованных математических моделях энергосистемы, называется качественными подходами. Примером качественного подхода является метод

площадей с построением различных угловых характеристик в координатах «мощность-угол ротора» [20,37].

Примером использования угловых характеристик и метода площадей является методика [41]. В ней на основании эквивалентной модели «генератор-ШБМ» рассматривается семейство угловых характеристик и оценка координат ее вершины от различных схемно-режимных условий.

Другой подход по использованию угловых характеристик представлен в [90]. В нём на основе доаварийной информации рассчитываются угловые характеристики мощности для различных вариантов отключения линий схемы выдачи мощности защищаемой электростанции. Для каждой рассчитанной угловой характеристики в доаварийном режиме рассчитываются площадки торможения и ускорения для идентификации состояния, требующего ввода управляющих воздействий. На основании фиксации сброса активной мощности и отключения линии происходит выбор одной из рассчитанных угловых характеристик и параметров ввода управляющих воздействий.

Еще одним качественным подходом исследования устойчивости энергосистемы является использование функций Ляпунова [24,62] или различных производных от них инструментов [23].

Для применения функции Ляпунова требуется преобразовать исходные уравнения движения к уравнениям возмущенного движения [62]. Пусть дана некоторая система дифференциальных уравнений:

$$\frac{dy_i}{dt} = Y_i(t, y_1, \dots, y_n). \quad (1.16)$$

Пусть  $y_i=f_i(t)$  является частным решением системы (1.16). Будем считать его невозмущенным, остальные же движения будут возмущенными. Тогда чтобы исследовать его на устойчивость нужно составить уравнения возмущенного движения. Обозначим  $x_i=y_i-f_i(t)$  возмущение выбранного движения. Тогда:

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{dy_i}{dt} - \frac{df_i}{dt} = Y_i(t, x_1 + f_1, \dots, x_n + f_n) - Y_i(t, f_1, \dots, f_n) = X_i(t, x_1, \dots, x_n) \quad (1.17)$$

Каждому движению изначальной системы будет соответствовать решение новой. При этом невозмущенному решению будет соответствовать решение  $x_1 = \dots = x_n = 0$ .

Для выражения (1.17) возможно ввести функцию Ляпунова. Функцией Ляпунова называется некоторая функция  $V(x_1, \dots, x_n)$ , принимающая вещественные значения и имеющая следующие свойства: функция однозначна, непрерывна вместе со своими частными производными и имеет тривиальное решение  $V(0, \dots, 0) = 0$ .

Если функция Ляпунова  $V$  является локально положительной и ее производная по времени является локально отрицательной в некоторой окрестности рассматриваемой точки, то рассматриваемая точка равновесия является локально асимптотически устойчивой.

Преимуществом использования функций Ляпунова является отсутствие необходимости нахождения решений дифференциальных уравнений, благодаря чему можно исследовать сложные нелинейные системы. Однако, нахождение подходящей функции Ляпунова всегда являлось очень сложной задачей, требующей сложных математических вычислений и преобразований.

Следует ввести различия между методом функций Ляпунова и методом площадей. Метод площадей основан на оценке траектории движения генераторов после ввода возмущения и идентификации неустойчивости с применением энергетического подхода. Отличие метода функции Ляпунова заключается в оценке удаленности возмущенного состояния генератора от предельной точки режима по условию динамической устойчивости.

### **1.3 Недостатки имеющихся методов сохранения динамической устойчивости**

Традиционным подходом настройки режима работы противоаварийной автоматики П-ДО является проведение множества расчетов режимов на основе применения современных расчетных программ с использованием непосредственного интегрирования уравнений движений для оценки реакции на аварийные возмущения. Недостатками представленного подхода является объемность расчетов и необходимость проведения экспертной оценки для группировки реакций и формирования состава задач противоаварийной автоматики, оценки значимости схемно-режимных условий, идентификации сформировавшихся групп генераторов относительно сечения асинхронного хода.

Схожими недостатками обладают подходы настройки элементов АПНУ (АРОЛ, АРОДЛ), АРПМ, ФТКЗ [19].

Основной сложностью настройки ФТКЗ является необходимость получения расчетных характеристик сброса мощности и остаточного напряжения на шинах станции при различных схемно-режимных условиях и местах замыкания – в том числе при различных точках замыкания по длине линии схемы выдачи мощности.

Общим недостатком применения устройств ФТКЗ является то, что выбор управления осуществляется на основе локальной информации – выдачи активной мощности станции, загрузки ближайших сечений станции, контроль состояния схемы выдачи мощности.

Недостатком в применении способов ускорения действия релейной защиты, УРОВ или ввода управляющих воздействий является трудность технической реализации снижения времен выдержек. Как правило, необходимость снижения обозначенных времен связана с невозможностью обеспечения динамической устойчивости станции даже при применении максимально доступного объема управляющих воздействий этой станции.

Главным преимуществом настройки противоаварийной автоматики в режиме I-ДО, несмотря на необходимость организации сложной системы сбора и передачи информации, актуализации математической модели, разработки технологического алгоритма выбора управляющих воздействий, является контроль множества схемно-режимных условий и обеспечение тем самым минимизации объема управляющих воздействий.

Недостатками представленного подхода в рамках методики выбора управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости и перехода к двухмашинному эквиваленту являются неточность оценки сечений асинхронного хода; отсутствие возможности идентификации цикла нарушения устойчивости.

Следующим шагом развития способа настройки автоматики в режиме I-ДО является I-ПОСЛЕ. Недостатками этого способа являются: увеличение времени ввода управляющих воздействий, так как добавляется время проведения расчетов режимов и поиска оптимального объема управляющих воздействий, повышенные требования к надежности функционирования системы противоаварийной автоматики. В настоящее время ввиду технологической сложности организации подхода I-ПОСЛЕ в практике противоаварийного управления он не используется.

Система векторных измерений и основанные на этой технологии устройства в настоящее время находят все более широкое применение в практике ведения режима работы энергосистемы. Контроль углов узловых напряжений и углов роторов генераторов позволяет более точно фиксировать границы допустимого режима. Однако необходимость внедрения технических средств для реализации векторных измерений является недостатком этого направления.

Децентрализованный мультиагентный подход связан с решением ряда проблем: контролем функционирования и однозначности при реализации индивидуальных задач каждого из агентов, созданием специальных программных средств разработки мультиагентных систем, математическим

описанием задач противоаварийного управления в рамках каждого агента и выбором критерия оптимизации целевой функции, организацией связи между агентами.

Применению качественных методик исследования устойчивости на примере использования угловых характеристик мощности может препятствовать большая погрешность модели.

Структурные подходы, основной целью которых является снижение объема задачи исследования устойчивости, обладают также рядом недостатков. Недостатками описанных структурных подходов является их громоздкость, сложность их применения в рамках технологических алгоритмов противоаварийной автоматики без экспертной оценки сформированных упрощенных представлений о подсистемах, их качественный характер.

Таким образом, все представленные недостатки можно объединить в три группы: недостатки, связанные с вычислительной объемностью; аппаратные, связанные с необходимостью применения специальных устройств; недостатки, связанные с дефицитом времени (необходимостью снижения времени расчета и ввода управляющих воздействий).

## **Выводы**

Существующие теоретические и практические подходы по обеспечению динамической устойчивости энергосистемы обладают рядом недостатков – расчетными (объемность и сложность), аппаратными (значительное расширение технических устройств), временными (обуславливающими необходимость увеличения объема УВ при их более позднем вводе).

Перспективным является создание нового способа по расчету требуемого объема управляющих воздействий с целью обеспечения динамической устойчивости энергосистемы, лишённого обозначенных недостатков.

Для этого он должен работать с текущей архитектурой построения противоаварийной автоматики и не вносить значительные изменения в состав

пусковых, логических, исполнительных органов. Также способ должен содержать в себе подход по прогнозированию сечения нарушения устойчивости (структурно слабое сечение) с целью снижения размерности задачи. Для снижения времени ввода управляющих воздействий и минимизации управляющих воздействий посредством учета множественности схемно-режимных условий способ должен иметь возможность работать в режиме I-ДО.



## ГЛАВА 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ РАСПАДА СИНХРОННОЙ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ

### 2.1 Исследования устойчивости сложных энергосистем

#### 2.1.1 Выявление структурных свойств сложной энергосистемы

Традиционным подходом исследования устойчивости сложных энергосистем является математическое моделирование режимов работы энергосистемы [40]. Существует множество постановок задач по расчету режимов работы электроэнергетических систем. Целью расчетов режимов могут быть: планирование режимов работы энергосистемы с назначением допустимых перетоков по сечениям энергосистемы, определение задач и принципов действия противоаварийной автоматики, обоснование схемы выдачи электростанции и многие другие.

Одной из основных задач расчета режимов является определение ограничений режима согласно [31,83] по условиям статической и динамической устойчивости, токовой загрузки силового оборудования, допустимости режима напряжений системообразующей сети. Помимо определения наличия ограничений требуется также определить наиболее значимые схемно-режимные условия, от которых зависит степень проявления выявленных ограничений – влияющие факторы. Влияющими факторами могут быть [69]: состав введенных в работу генерирующего оборудования электростанций, загрузка и выдача мощности блоков электростанций, загрузка межсистемных и локальных сечений энергосистемы, состав и выдача источников реактивной мощности, степень ослабления сети (ремонтные схемы и аварийные отключения) и другие.

Влияющие факторы отражают проявление различных структурно слабых элементов энергосистемы. Состав и взаимовлияние слабых звеньев системы могут изменяться при изменениях её схемы и режима. Изменения состава и

структуры слабых звеньев может сопровождаться сменой положения сечения асинхронного хода или изменением допустимого перетока активной мощности одного выделенного сечения.

Группировка реакций на возмущения в сложной энергосистеме позволяет структурировать описание поведения энергосистемы [69,53,18]. Этот способ группировки представляет структуру неустойчивых движений в сложной энергосистеме и позволяет исследовать архитектуру неустойчивости и процессов распада синхронизма. Однако, ввиду объемности расчетной задачи, такой способ описания совокупности неустойчивых движений в энергосистеме, может быть слишком усложнённым и недостаточно наглядным.

Общим недостатком анализа устойчивости энергосистемы на основе исследования её режимов является фрагментарность получаемых результатов. Только на основе массовых расчетов в голове исследователя формируется общее представление об устойчивости рассматриваемой системы, что в случаях сложных энергосистем требует значительных временных затрат и экспертного заключения.

Характерной энергосистемой, в которой присутствуют множество влияющих факторов является сравнительно простая Норильско-Таймырская энергосистема. Принципиальная схема энергосистемы приведена на рисунке 2.1.

Норильско-Таймырская энергосистема является мощной изолированной энергосистемой с высшей ступенью напряжения 220 кВ. Основная часть нагрузки энергосистемы сосредоточена в Норильском энергоузле. В Норильском энергоузле имеются три ТЭЦ общей установленной мощностью 1205 МВт. На значительном удалении от Норильского энергоузла (от 400 до 200 км) располагаются Курейская ГЭС (КГЭС), установленной мощностью 600МВт, и Усть-Хантайская ГЭС (УХГЭС), установленной мощностью 441 МВт. Связь между ГЭС и Норильским энергоузлом осуществляется по линиям 220 кВ.

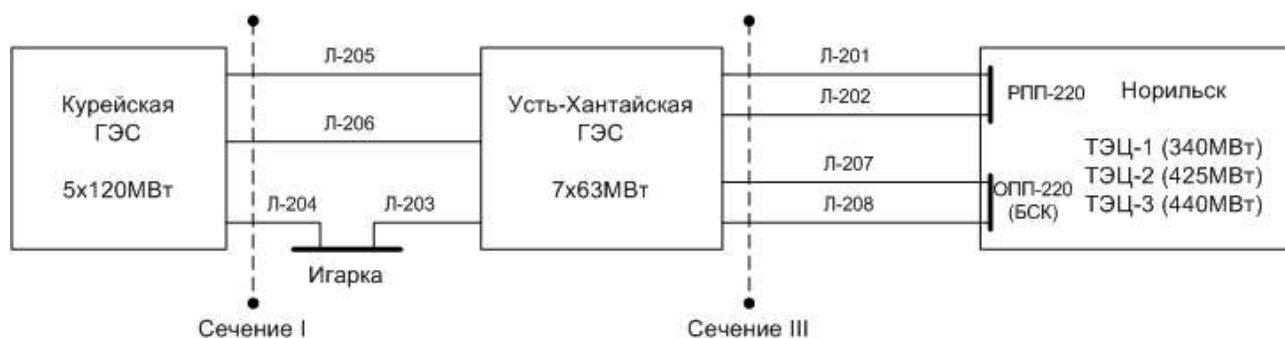


Рисунок 2.1 Схема энергоснабжения Норильско-Таймырской энергосистемы

Основной целью ведения режима Норильско-Таймырской энергосистемы является выдача максимальной мощности КГЭС и УХГЭС. Ограничивающими выдачу мощности станций условиями являются условия обеспечения статической и динамической устойчивости и допустимой токовой загрузки оборудования по связям между упомянутыми ГЭС и Норильской энергосистемой. При этом на значение максимально-допустимого перетока оказывают влияние множество факторов.

К значимым схемно-режимным условиям (СРУ) были отнесены следующие:

1. Режимы сезонных изменений нагрузки энергосистемы (3 режима);
2. Состояние (работа, ремонт) ВЛ 220 кВ (14 схем);
3. Число включенных в работу гидроагрегатов на Курейской и Усть-Хантайской ГЭС и их загрузка (20 составов генераторов);
4. Число включенных в работу генераторов на ТЭЦ Норильского энергоузла номинальной мощностью 100 МВт (от 4 до 9 ТГ), по 3 состава;
5. Число включенных в работу БСК на ПС ОПП-220 (9 штук).

Расчет переходных процессов с целью оценки динамической устойчивости энергосистемы производились при возмущениях вблизи шин КГЭС и УХГЭС. Особенностью учета ограничения перетоков активной мощности по условию сохранения динамической устойчивости является тот факт, что не все вышеперечисленные факторы, влияющие на допустимые

перетоки по условию статической устойчивости, оказывают влияние на допустимые перетоки по условию динамической устойчивости. Так, на уровень допустимых перетоков по условию сохранения динамической устойчивости не оказывает влияние число включенных в работу генераторов на ТЭЦ ОАО «НТЭК» номинальной мощностью 100 МВт и число включенных в работу БСК на ПС ОПП-220. Это обстоятельство означает, что при различных СРУ ограничивающим фактором будет условие сохранения или динамической или статической устойчивости.

Другой особенностью расчета динамической устойчивости энергосистемы является учет действий УВК АДВ, установленных на КГЭС и УХГЭС. Данные комплексы противоаварийной автоматики применяются для сохранения динамической и статической устойчивости Норильско-Таймырской энергосистемы и в качестве управляющих воздействий выполняют отключение генераторов КГЭС и/или УХГЭС.

Особенностью настройки УВК АДВ на УХГЭС и КГЭС такова, что они имеют разные уставки срабатывания и в качестве управляющих воздействий имеют разный объем отключения генераторов в пределах одного состояния схемы сети (полная схема, вывод в ремонт ВЛ 220 кВ). Помимо этого, время реализации управляющих воздействий для каждого из упомянутых устройств также является разным.

В результате, область возможных перетоков активной мощности по сечениям I,III является разделенной на участки, в каждом из которых выполняется определенное действие противоаварийной автоматики.

Ввиду большого количества полученных комбинаций СРУ таблично-графическая информация о допустимых режимах оказывается чрезвычайно большого объема: 3 таблицы по 840 строк и соответствующие им 840 рисунков. Помимо этого, определение допустимых перетоков осуществляется на основе вычисления ограничений по условиям обеспечения статической, динамической устойчивости и допустимой токовой загрузки по упрощенным выражениям и

выбора наименьшего из них. Число включенных в работу БСК на ПС ОПП-220 учитывается с помощью поправочных коэффициентов.

Такого размера таблицы и такое количество графиков требует огромного количества расчетов режимов, что является основополагающей проблемой расчета режимов сложных энергосистем. Для упрощения задачи поиска влияющих факторов требуется разработка новых подходов оценивания режимов работы энергосистем, нацеленных на выявление системных свойств энергосистемы.

Таким образом, задача выявления структурных свойств сложных энергосистем, отражающаяся в задаче поиска влияющих факторов на область допустимых режимов, связана с огромным количеством необходимых расчетов режимов и применением их экспертной оценки.

Ручной подход по определению всей совокупности структур неустойчивых движений в сложной энергосистеме затруднителен без специальных методических разработок, направленных на снижение объема расчетных исследований.

### **2.1.2 Оценка динамической устойчивости сложной энергосистемы, оснащённой АПНУ послеаварийных режимов**

Оценка динамической устойчивости выполнена с целью обоснования необходимости применения корректирующего управления для обеспечения устойчивости динамического перехода к существующему послеаварийному режиму в сложной энергосистеме на примере ОЭС Сибири.

В ОЭС Сибири действует двухуровневая ЦСПА. Основной задачей ЦСПА является ввод и минимизация управляющих воздействий для обеспечения существования и допустимости послеаварийного режима с нормируемым запасом устойчивости. Эта цель достигается путем контроля всех схемно-режимных факторов на основе расчета режимов с помощью математической модели энергосистемы с периодическим пересчетом

необходимости ввода и объема управляющих воздействий (режим работы противоаварийной автоматики «I-ДО»).

При наличии в контуре противоаварийного управления алгоритма по выбору управляющих воздействий для обеспечения динамической устойчивости, появляется возможность более полного учета схемно-режимных условий системообразующей сети, которые присутствуют в рамках сложной энергосистемы.

Необходимость ввода в работу алгоритма выбора управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости в сложной энергосистеме может быть обусловлена: наличием больших (определяющих), чем по другим условиям, ограничений режима по динамической устойчивости; влиянием не локальных схемно-режимных факторов.

Стоит отметить, что в рамках существующей ЦСПА, задача обеспечения динамической устойчивости перехода к послеаварийному режиму рассматривается как подзадача дальнейшего развития АПНУ за счет применения корректирующего, при необходимости, управления, обеспечивающего динамическую устойчивость. Под корректирующим управлением понимается управление, обеспечивающее динамическую устойчивость на фоне ввода управляющих воздействий, выбранных из условия допустимости послеаварийного установившегося режима. Именно в такой постановке и проводились исследования в настоящей работе.

Ограничения режима по динамической устойчивости могут проявиться при следующих условиях:

- тяжелые возмущения в полной схеме вблизи шин мощных электростанций – для сети 500 кВ это двухфазные замыкания на землю с действием УРОВ;

- сильные изменения топологии сети в схеме выдачи мощности крупных электростанций – ремонт одной линии 500 кВ и аварийное отключение другой линии 500 кВ;

- нарушение динамической устойчивости в цикле успешного АПВ.

Описанные схемно-режимные условия, как правило, требуют наибольшего объема управляющих воздействий для обеспечения динамической устойчивости. Дискретизация управляющих воздействий определяется возможностью дробления объема управляющих воздействий и совокупностью ряда влияющих факторов, от которых зависит устойчивость конкретных электростанций.

Структура противоаварийной автоматики крупных электростанций направлена на контроль локальных параметров станции – состав и выдача блоков, состояние отходящих линий 500 кВ, напряжение прямой последовательности на шинах станции. Безусловно, представленные факторы являются наиболее влияющими на динамическую устойчивость. Но существуют и другие факторы, не локальные, а системные, которые также влияют на устойчивость. Этими факторами могут быть: ослабление системообразующей сети, состав и выдача электрически наиболее близких электростанций, нагрузка системных сечений, нагрузка энергосистемы.

Произведем оценку влияния не локальных схемно-режимных условий, влияющих на динамическую устойчивость в рамках ОЭС Сибири. В качестве примера рассмотрим Саяно-Шушенскую ГЭС, основная сеть которой отражена на рисунке 2.2.

Схема выдачи мощности Саяно-Шушенской ГЭС контролируется комплексом ЛАПНУ, установленным на данной станции. Комплекс ЛАПНУ на Саяно-Шушенской ГЭС обеспечивает противоаварийное управление на электропередаче «Выдача мощности СШГЭС».

Комплекс ЛАПНУ на Саяно-Шушенской ГЭС обеспечивает функции автоматической разгрузки при отключении линии (АРОЛ), автоматической разгрузки при отключении двух линий (АРОДЛ), автоматики разгрузки при близких (АРБКЗ) и затянутых коротких замыканиях (АРЗКЗ), а также автоматики балансирующей разгрузки при аварийном отключении блока (АРОБ). В качестве основного управляющего воздействия используется ОГ на Саяно-Шушенской ГЭС, для балансировки ОГ используются воздействия на

ОН в Кузбассе, в Хакасии (ХАЗ и СаАЗ), в Красноярске (КРАЗ), в Новосибирске и в Барнауле.

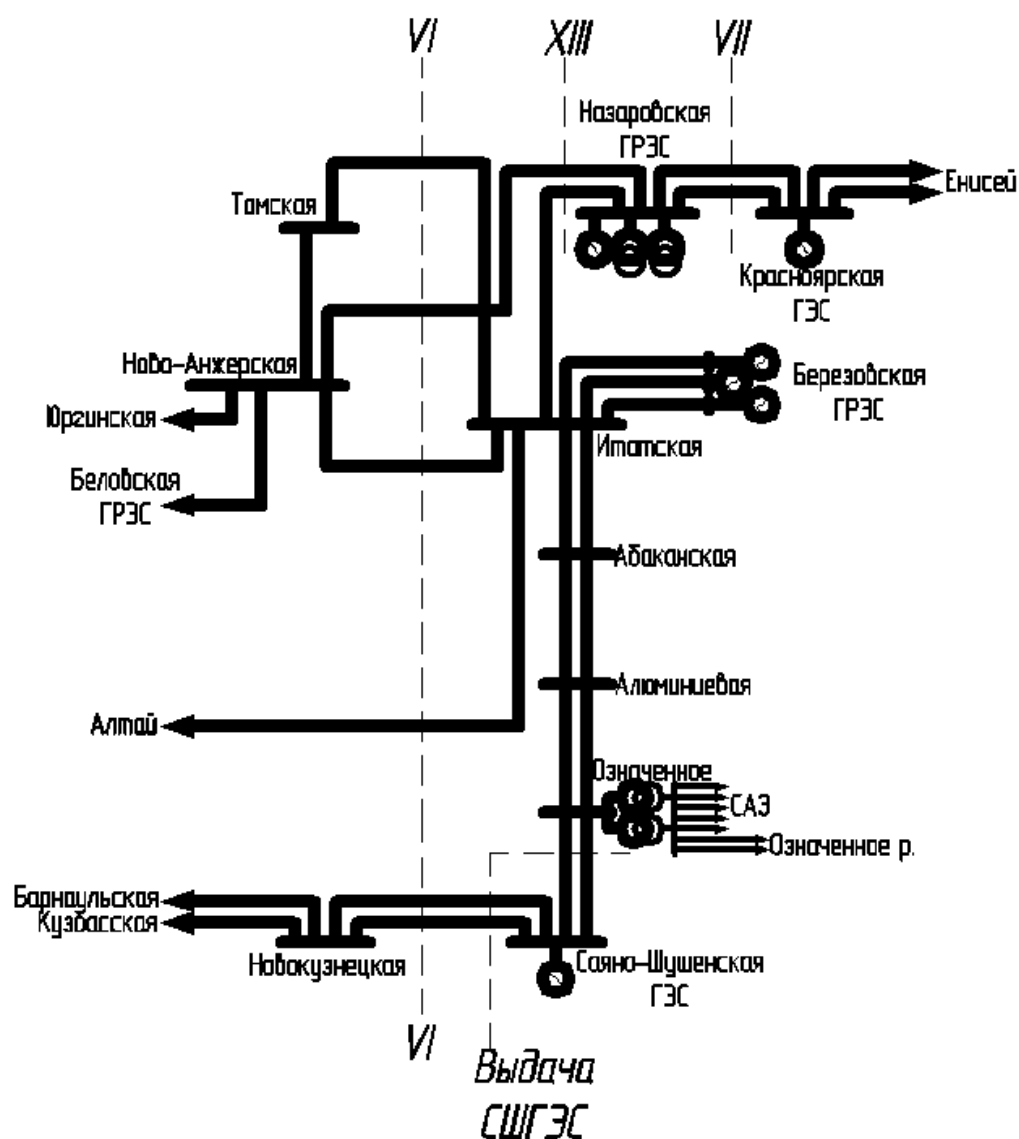


Рисунок 2.2 Схема системообразующей сети 500 кВ вблизи Саяно-Шушенской ГЭС

Предусматривается интеграция комплекса ЛАПНУ Саяно-Шушенской ГЭС в ЦСПА ОЭС Сибири. Таким образом, ЦСПА ОЭС Сибири должна обеспечивать выбор управляющих воздействий для пусковых органов ЛАПНУ с учетом всех необходимых условий обеспечения устойчивости послеаварийного режима.



Результаты расчетных исследований устойчивости Саяно-Шушенской ГЭС приведены в Приложении А.

Выполненные расчеты устойчивости Саяно-Шушенской ГЭС при возмущениях в прилегающей сети 500 кВ позволяют сделать следующие выводы:

1. Выявлены схемно-режимные условия и аварийные возмущения, для которых допустимый переток по обеспечению статической устойчивости послеаварийного режима больше, чем предельный переток по обеспечению динамической устойчивости. Это подтверждает необходимость ввода корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости в рамках ЦСПА.

2. Для аварийных ситуаций (отключение ВЛ-543 в схеме ремонта ВЛ-544 и отключение ВЛ-547 в схеме ремонта ВЛ-548 и ВЛ-541) условия обеспечения динамической устойчивости являются определяющими даже при отключении рассматриваемого элемента сети без КЗ (простой динамический переход). При этом расчеты с учетом КЗ показывают, что предел мощности практически не зависит от тяжести КЗ. Это означает, что выбор УВ для пусковых органов, действующих по факту отключения обозначенных линий при определенных схемно-режимных условиях, необходимо выполнять с учетом условий сохранения динамической устойчивости. Это подтверждает необходимость ввода корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости в рамках ЦСПА.

Для данных аварийных ситуаций в зависимости от режима нагрузки энергосистемы, состава и выдачи Березовской ГРЭС, загрузки сечения Красноярск, Хакасия – Запад (сечение VI) пределы выдачи мощности СШГЭС по условию обеспечения динамической устойчивости могут изменяться на 200-300 МВт, что необходимо учитывать для исключения излишних УВ.

3. Отключение КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Новокузнецкая в полной схеме вследствие двухфазного КЗ на землю с действием УРОВ может приводить к нарушению динамической устойчивости Саяно-Шушенской ГЭС и

требует реализации управляющих воздействий. Для реализации ПАУ при данном возмущении в составе ЛАПНУ Саяно-Шушенской ГЭС предусмотрена АРЗКЗ, которая фиксирует тяжесть возникшего КЗ и действует на отключение необходимого числа генераторов. Уровень динамической устойчивости Саяно-Шушенской ГЭС зависит от режима внешней сети. Наиболее влияющими внешними факторами являются уровень нагрузки энергосистемы, состав и выдача мощности Березовской ГРЭС, загрузка сечения Красноярск, Хакассия – Запад (сечение VI). Предел выдачи Саяно-Шушенской ГЭС при рассмотренном аварийном возмущении в зависимости от режима внешней сети меняется на 350 МВт.

4. Для аварийного отключения КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Означенное №2 (ВЛ-544) в схеме ремонта КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Означенное №1 (ВЛ-543) была определена допустимая выдача Саяно-Шушенской ГЭС по условию обеспечения нормативных коэффициентов запаса статической устойчивости и обеспечению устойчивого переходного процесса в зависимости от числа отключаемых генераторов средствами ПА. Было выявлено, что объем УВ, обеспечивающий нормативные запасы статической устойчивости в послеаварийной схеме, недостаточен для обеспечения устойчивого переходного процесса к послеаварийному режиму. Обеспечение динамической устойчивости требует увеличения объемов УВ.

Таким образом, определены схемно-режимные условия, которые носят не локальный характер и оказывают влияние на допустимую выдачу электростанции в сложной энергосистеме по условию обеспечения динамической устойчивости. Контроль нелокальных влияющих факторов в настоящее время осуществляется в рамках ЦСПА, что вызывает необходимость разработки алгоритма оценки динамической устойчивости в рамках сложной энергосистемы. Это подтверждает необходимость ввода корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости в рамках ЦСПА.

## 2.2 Структурный анализ движения синхронных машин в энергосистемах

Анализ динамической устойчивости энергосистем является существенной частью задач расчета их режимов. В рамках настоящей работы динамическая устойчивость рассматривается с позиции межгрупповых движений синхронных машин. Эти группы определяют некоторую структуру движения, которая в дальнейшем принимается к рассмотрению. Структура движения определяется не только структурой сети, но и такими факторами как распределение инерции по системе, местом и видом возмущения, временем, прошедшим после аварии. При исследовании производится поиск ответов на такие вопросы: как формируется разбиение синхронных машин на подгруппы, т.е. возникает динамическая структура; как развиваются эти структуры; как происходит взаимодействие отдельных групп между собой; как изменяются эти структуры при приближении к неустойчивости. Структурный анализ здесь не сводится к анализу структуры системы и связей между её узлами, что близко к схемной надежности энергосистемы, а имеет целью выявление структуры движений синхронных машин в энергосистеме, что близко к её режимной надежности. В результате, на основании изучения структур движения синхронных машин в энергосистеме, производится заключения об её общих динамических свойствах.

Практической стороной таких исследований является получение знаний о динамических свойствах энергосистемы и использование этих знаний для выбора структуры противоаварийного управления и расчета управляющих воздействий.

Для проведения анализа динамической устойчивости энергосистем используются две группы методов. Первая группа использует результаты численного интегрирования уравнений движения системы [48,100]. На основании моделирования различных возмущений в различных точках энергосистемы оценивается реакция системы и устойчивость взаимного движения синхронных машин [32,56]. Второй группой являются качественные методы исследования устойчивости [4].

Недостатком первой группы методов является фрагментарность получаемых результатов. Только на основе массовых расчетов переходных процессов формируется общее представление об устойчивости рассматриваемой системы. Недостатком второй группы расчетных методов является трудность их применения для энергосистем любой структуры и размера, ограничения на сложность применяемой математической модели. В результате, в проектной и эксплуатационной практике не используются программные разработки для качественного анализа устойчивости.

Для исследования устойчивости сложных систем необходимо применение обоих групп методов. При этом качественные методы должны прорисовывать общую ситуацию с устойчивостью системы, а методы численного интегрирования – уточнять результаты, полученные качественными методами. Качественные методы должны быть ориентированы на характеристику всей совокупности неустойчивых движений энергосистемы и определение взаимосвязей между элементами этой совокупности. По сути, они должны позволять исследовать структуру совокупности неустойчивых движений энергосистемы.

В основу предполагаемых методических разработок можно положить исследования структуры взаимных колебательных движений в сложных энергосистемах как представителей распределенных колебательных систем [4, 51,52]. Структура движения (структурная организация движения) выявляется на основе анализе колебательной структуры электромеханических переходных процессов, имеющих волновой характер [50]. При этом под колебательной структурой электромеханического переходного процесса понимается разбиение энергосистемы на подсистемы, в которой все вектора ЭДС соседних подсистем в системе координат центра инерции системы движутся в противоположных направлениях. В результате распространения волн возмущения происходит изменение колебательных структур.

Исследование структурно организованного движения выполняется на основе иерархического описания движения синхронных машин в энергосистеме

[85,50]. Рассматривается поступательное движение центра инерции системы и два типа колебательных движений: центров инерции подсистем относительно центра инерции системы (региональные процессы) и каждой синхронной машины относительно центра инерции подсистемы, в которую она входит (локальные процессы).

При аварийном возмущении происходит накачка кинетической энергии в поступательную и колебательные степени свободы системы. Вследствие текущих динамических характеристик (загрузка и состав синхронных машин, загрузка системообразующей сети и т.п.) энергосистемы и свойств аварийного возмущения (место и тяжесть) происходит возбуждение некоторого свободного движения синхронных машин.

Вся возможная совокупность разбиения энергосистемы на подсистемы [51,43], выделяемые на основе анализа угловых приращений векторов узловых напряжений при *малых колебаниях*, соединенных между собой сечениями энергосистемы, называется пространственными *осцилляторами* энергосистемы. При конкретных схемно-режимных условиях и аварийном возмущении происходит насыщение кинетической энергией некоторых осцилляторов, что определяет конкретную форму структурной организации движения.

Наложение нескольких «возбужденных» осцилляторов, колебания которых распространяются по системе с разными скоростями и степенью затухания, приводит к развитию наблюдаемой колебательной структуры во времени [85].

Структуры осцилляторов системы наиболее полно представляют её слабые звенья и их взаимодействие в рассматриваемом режиме [51,52]. Эволюция этих структур при изменении режима определяет изменения в положениях слабых звеньев и их взаимодействиях.

На основе структурного подхода к движению синхронных машин возможна постановка задачи исследования устойчивости межгрупповых движений, рассматриваемых во всём их разнообразии – задача структурного анализа устойчивости. При этом в связи с простотой и обозримостью структур

межгрупповых движений, к исследованию устойчивости последних могут успешно применяться качественные методы [4,50].

Здесь стоит отметить, что возможно построение комплексных методов проведения анализа устойчивости на основе двух вышеописанных групп методов. Так, интегрирование уравнений движения системы может сопровождаться качественной оценкой процесса распада синхронизма системы. Примером такого комплексного алгоритма может быть алгоритм, в котором в ходе расчета переходного процесса фиксируется не только факт нарушения устойчивости, но и сечение, по которому устойчивость была нарушена. Примерами алгоритмов качественного типа могут служить алгоритмы определения предельных возмущений на основе энергетических диаграмм.

Структурой неустойчивости [43], выявляемой в ходе исследования динамической устойчивости энергосистем, будем называть способ разделения энергосистемы на подсистемы, каждая из которых стремится выделиться из системы, реализуя процесс нарушения устойчивости. Наступление асинхронного режима будем связывать с реализацией различных структур неустойчивости, которые насыщаются энергией колебаний вследствие аварийного возмущения.

Проведение расчетных исследований структурных динамических свойств энергосистемы с помощью специализированных инструментальных средств [51,52] позволяет провести полные исследования её слабых звеньев и определить структуру и состав задач по управлению ею с целью обеспечения устойчивости. Важным промежуточным результатом является прогнозирование положений сечения асинхронного хода в системе при нарушениях устойчивости.

В зависимости от того, движение какого объекта имеет неустойчивый характер [43]: подсистемы в системе или синхронной машины в подсистеме, можно наблюдать региональный процесс нарушения устойчивости (между подсистемами) или локальный процесс нарушения устойчивости (внутри подсистемы относительно ее центра инерции).

Важным понятием структурно организованного движения является его траектория. Действительная траектория движения [51,52] представляет собой угловой путь, проделанный отдельной синхронной машиной или их группой, который удовлетворяет законам сохранения импульса, уравнениям баланса мощности в узлах энергосистемы и уравнениям движения. Это понятие в дальнейшем используется при расчете работ торможения и ускорения по методу площадей [65] и оценки достаточности объема управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости.

### **2.3 Постановка задачи исследования структуры неустойчивых движений электроэнергетических систем**

Возможны две постановки задачи исследования процессов распада синхронизма энергосистемы:

1. *Прогноз возможных вариантов распада синхронизма* на некоторой совокупности возмущающих воздействий с целью общего обзора задач устойчивости. Энергосистема рассматривается как объект, синхронная работа которого может распадаться по-разному, для чего используется информация об её осцилляторах [52,65,54].

2. *Идентификация распада синхронизма* на основе расчета переходного процесса и выделения его колебательной структуры при *конкретных схемно-режимных условиях* с целью выбора противоаварийного управления.

В настоящей работе преимущественно рассматривается вторая из этих задач.

Так как устойчивость электромеханических колебаний определяется работами, производимыми на траектории движения, то для их исследования необходимо рассматривать *волну смещения*, определяющую работу, совершаемую избыточными моментами в переходном процессе [52,16]. Выявление *изменяющейся во времени колебательной структуры* в переходном процессе может быть основано на основном топологическом свойстве

волнового движения, а именно на том, что его *гребни и впадины в пространстве соседствуют*. Границы между гребнями и впадинами наиболее вероятно могут входить в сечения асинхронного хода, по которым происходит нарушение устойчивости и *распад синхронизма*. Исследование структурной организации колебаний, проводимое путем выделения региональных объектов (подсистем), позволяет определять пространственно-временные характеристики взаимопревращений кинетической и потенциальной энергии системы в переходном процессе.

Рассмотрение колебательных структур [52,16] упрощает задачу исследования устойчивости так как прогнозирует сечение развития асинхронного хода и существенно снижает размерность задачи.

Одно из возможных слабых сечений системы, выявленных при определении колебательной структуры при конкретном возмущении, совпадает с сечением нарушения устойчивости [52,51,85], то есть в конечном итоге в ходе эволюции колебательных структур при приближении системы к потере синхронизма одно из слабых сечений становится сечением асинхронного хода.

Исследование процессов распада синхронизма и выявление структуры неустойчивости приводит к расширению постановки задачи устойчивости, в которую входит не только фиксация факта нарушения устойчивости, но и другие параметры [52,51,85]:

- пространственное положение сечения асинхронного хода и как оно изменяется в зависимости от схемно-режимных условий и свойств возмущения;
- момент прохождения критического смещения и избыточная кинетическая энергия, которую требуется погасить на предшествующей траектории движения для сохранения динамической устойчивости;
- эволюция структуры движения при приближении к критическому смещению и после его прохождения;
- предельные параметры возмущения;
- время развития неустойчивого движения (достижения критического смещения).



Последнее означает, что возникает задача поиска слабого звена, которое первым достигнет критического смещения и будет являться причиной нарушения устойчивости.

Для оценки энергетических характеристик нарушения устойчивости используется метод площадей. Посредством преобразования уравнений движений и введения системы относительных движений с использованием законов сохранения энергии и импульса возможно ввести понятия высоты потенциального барьера и кинетической энергии колебаний (возмущения).

Применение энергетического подхода в задачах исследования динамической устойчивости энергосистем вводит задачу исследование рельефа многомерной потенциальной функции системы [52,51,85], защищающей систему от выпадения из синхронизма по одному из слабых сечений, и определения пространственного распределения кинетической энергией колебаний, поступающей в систему с аварийным возмущением.

Объявленная постановка задачи устойчивости близка к физической задаче анализа процессов распада сложных многокомпонентных систем при возмущениях.

Анализ траекторий движения энергосистемы в связи со сложностью математического и алгоритмического описания целесообразно поручить машине с автоматическим определением обозначенных черт распада синхронизма для введенного возмущения. Использование понятий структурно организованного движения и энергетической оценки возмущения с использованием метода площадей позволяет уклониться от экспертных систем ввода управляющих воздействий и выполнить детальное формализованное математическое описание требуемых характеристик воздействий.

## Выводы

Определение многомерной области допустимых режимов, выполняемых в ходе расчетов режимов или выбора стратегии противоаварийного управления, сталкивается с группой проблем:

- объемность и взаимосвязанность влияющих на область допустимых значений факторов;
- сложность аналитического задания области допустимых значений и логического разграничения задач противоаварийного управления в рамках систем противоаварийной автоматики;
- обоснованием выбора оптимальных места и объема управляющих воздействий.

В рамках традиционных методов расчета режимов решение этих проблем потребует значительного количества человеко-часов и применения экспертной оценки для выявления всех структур неустойчивости и их группировки в рамках единой стратегии противоаварийного управления. Применение других подходов, упрощающих задачу оценки устойчивости, является перспективным решением.

Рассмотрение структурно организованного движения, сводящего задачу оценки устойчивости к анализу взаимного движения динамических подсистем (формирующихся во время движения), является искомым упрощением.

С использованием энергетического метода (площадей) становится возможным оценить различные характеристики процессов распада синхронизма.

Этот методический подход позволяет создать способы и алгоритмы формализованного описания процессов распада синхронизма и оценивать необходимый объем и место реализации управляющих воздействий.

В связи с наличием влияющих на динамическую устойчивость факторов в сложной энергосистеме, которые затруднительно использовать в рамках

локальной противоаварийной автоматики, целесообразно использовать алгоритм в рамках технологического алгоритма работы ЦСПА.

## ГЛАВА 3 СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И ПРОЦЕССЫ РАСПАДА СИНХРОНИЗМА ЭНЕРГОСИСТЕМ

### 3.1 Представление о структурно организованном движении

Синхронное движение системы в любом переходном процессе представлено движением её центра инерции. Это означает, что исследование процессов распада синхронизма системы сводится к анализу колебательных движений, развивающихся в системе относительно её центра инерции. Расчетные и аналитические исследования показывают, что колебания синхронных машин системы относительно её центра инерции имеют *волновой характер*. Это проявляется в образовании областей системы, движущихся относительно центра инерции *противоположным* образом, т.е. волновое движение приводит к *структурной организации* колебательных движений (формируется *наблюдаемая колебательная структура* относительного движения). По сути, эти области системы представляют собой *положительные и отрицательные полуволны*. Эти полуволны могут представлять пространственное распределение ускорений, скоростей или смещений.

Для исследований колебательных структур введем общее представление о *структурно организованном движении* энергосистемы [85,65]. Разобьем множество узлов энергосистемы на некоторое количество подмножеств. Узлы, входящие в одно из таких подмножеств, будем относить к некоторой *подсистеме*. Разбиение на подсистемы будем производить таким образом, чтобы каждый узел системы входил только в одну подсистему и, кроме того, пусть все узлы подсистемы образуют односвязную область на сетевом графе системы. Связи системы, объединяющие узлы подсистемы между собой – внутренние. Связи, соединяющие узлы из разных подсистем – межсистемные. В частности, разбиения на подсистемы могут определяться колебательной структурой движения.

Получившееся разбиение системы на подсистемы и объединяющие их межсистемные связи представляет некоторое *структурное отображение* (структурную модель) системы. Для упрощения, структурную модель будем называть «структурой»  $S$  системы (которую необходимо отличать от обычной сетевой структуры). Количество подсистем, входящих в структуру, дает ее размерность  $R(S)$ . Понятно, что одна и та же система может представляться множеством ее структурных отображений (структур).

Пусть движение системы известно, т.е. известны все параметры системы как функции времени. Представим скорость вращения  $i$ -ой синхронной машины в виде суммы постоянной слагающей (частоты вращения в исходном режиме) и трех относительных процессов [85,65]

$$\Omega_{zi}(t) = \Omega_0 + \Delta\Omega_{zis}(t) + \Delta\Omega_{s0}(t) + \Delta\Omega_0(t), \quad (3.1)$$

$$\Omega_0 = \Omega_0(0), \quad (3.2)$$

$$\Delta\Omega_0(t) = \Omega_0(t) - \Omega_0, \quad (3.3)$$

$$\Delta\Omega_{s0}(t) = \Omega_{s0}(t) - \Omega_0(t), \quad (3.4)$$

$$\Delta\Omega_{zis}(t) = \Omega_{zi}(t) - \Omega_{s0}(t), \quad (3.5)$$

$$\Omega_0(t) = \frac{\sum_k J_k \Omega_{zk}(t)}{\sum_k J_k} = \frac{\sum_k J_k \Omega_{zk}(t)}{J_g}, \quad (3.6)$$

$$\Omega_{s0}(t) = \frac{\sum_{k_s} J_k \Omega_{zk}(t)}{\sum_{k_s} J_k} = \frac{\sum_{k_s} J_k \Omega_{zk}(t)}{J_s}, \quad (3.7)$$

Здесь введены следующие обозначения:  $\Omega_0(t)$  – скорость перемещения центра инерции системы,  $\Omega_{s0}(t)$  – скорость перемещения центра инерции подсистемы, к которой отнесена данная синхронная машина,  $k, k_s$  – множества активных (генераторных) узлов во всей системе и в  $s$ -ой подсистеме,  $J_k$  – момент инерции  $k$ -ой синхронной машины,  $J_g$  – суммарный момент инерции

системы,  $J_s$  – суммарный момент инерции  $s$ -ой подсистемы,  $\Delta\Omega_0(t)$  – отклонение скорости перемещения центра инерции системы в момент  $t$  от исходной частоты стационарного режима  $\Omega_0$  (высший уровень иерархии движения),  $\Delta\Omega_{s_0}(t)$  – синхронное движение подсистемы – *региональный процесс*, определяемый движением центра инерции подсистемы относительно центра инерции системы (средний уровень иерархии движения),  $\Delta\Omega_{zis}(t)$  – индивидуальное движение – *локальный процесс* движения синхронной машины в  $s$ -ой подсистеме относительно ее центра инерции (низший уровень иерархии движения).

Движение системы, описываемое с помощью введенной иерархической системы относительных процессов, будем называть организованным на структуре  $S$  или, проще, структурно организованным [85,65]. В зависимости от рассматриваемой структуры системы, одно и то же движение системы будет структурно организовано различным образом (будет обладать *разными формами* структурной организации). Структура рассматриваемого движения однозначно определяется выбранной структурой системы  $S$ . Как видно из приведенных выше соотношений, составляющая перемещения центра инерции системы от её структуры не зависит.

Можно, также, говорить о представлении абсолютного перемещения ротора синхронной машины  $\theta_{zi}(t)$  за время  $t$  в виде суммы четырех составляющих процессов (перемещений) [85,65]

$$\begin{aligned} \theta_{zi}(t) &= \theta_{zi}(0) + \Omega_0 t + \int_0^t \Delta\Omega_0(t) dt + \int_0^t \Delta\Omega_{s_0}(t) dt + \int_0^t \Delta\Omega_{zis}(t) dt = \\ &= \theta_{zi}(0) + \theta_0(t) + \int_0^{\Delta\delta_0(t)} d\Delta\delta_0 + \int_0^{\Delta\delta_{s_0}(t)} d\Delta\delta_{s_0} + \int_0^{\Delta\delta_{zis}(t)} d\Delta\delta_{zis} = \\ &= \theta_{zi}(0) + \theta_0(t) + \Delta\delta_0(t) + \Delta\delta_{s_0}(t) + \Delta\delta_{zis}(t), \end{aligned} \quad (3.8)$$

где  $\theta_{zi}(0)$  – начальное значение,  $\theta_0(t)$  – смещение центра инерции системы при неизменности скорости его перемещения,  $\Delta\delta_0(t)$  – дополнительное

перемещение центра инерции системы за счет изменения скорости его движения на интервале  $(0-t)$ ,  $\Delta\delta_{s0}(t)$  – угловое смещение центра инерции подсистемы относительно центра инерции системы,  $\Delta\delta_{zis}(t)$  – угловое смещение синхронной машины в  $s$ -ой подсистеме относительно центра инерции этой же подсистемы.

### 3.2 Импульс и энергия структурно организованного движения

В составе динамической модели системы присутствуют уравнения движения роторов синхронных машин. Кинетическая энергия системы ограничивается кинетической энергией вращающихся масс (роторов синхронных машин). Сумма приложенных к ротору сил дается разностью ускоряющего момента турбины и тормозного электромагнитного момента. Для  $i$ -ой машины:

$$J_{pi} \frac{d\Omega_{mex.zi}}{dt} = M_{mi} - M_{zi} = \Delta M_{mex.i} = \frac{P_{mi} - P_{zi}}{\Omega_{mex.zi}} = \frac{\Delta P_i}{\Omega_{mex.zi}}, \quad (3.9)$$

$$J_{pi} \Omega_{mex.zi} d\Omega_{mex.zi} = d \left( \frac{J_{pi} \Omega_{mex.zi}^2}{2} \right) = dK_i = \Delta P_i dt, \quad (3.10)$$

где  $K_i$  – кинетическая энергия вращающейся массы машины,  $\Delta M_{mex.i}$  – избыточный механический момент на валу машины,  $\Delta P_i$  – небаланс мощности,  $J_{pi}$  – момент инерции вращающихся частей машины (ротора),  $\Omega_{mex.zi}$  – угловая скорость вращения ротора. Последнее выражение представляет одну из форм записи теоремы об изменении кинетической энергии – изменение кинетической энергии равно работе по перемещению массивного тела.

В представленных соотношениях фигурируют угловые скорости  $\Omega_{mex.zi}$  механического вращения роторов синхронных машин. Так как номинальные скорости вращения роторов синхронных машин  $\Omega_{mex.ном}$  могут отличаться друг от друга при неизменной номинальной частоте тока в статорной цепи  $\Omega_{ном}$  (за

счет различного числа полюсов  $p\Omega_{\text{мех.ном}} = \Omega_{\text{ном}}$ , где  $p$  – число пар полюсов ротора,  $\Omega_{\text{ном}} = 2\pi f_{\text{ном}} = 100\pi$  – номинальная скорость вращения магнитных полей ротора и статора), то уравнения движения записываются в несколько иной форме:

$$\frac{H_i}{\Omega_{\text{ном}}^2} \frac{d\Omega_{zi}}{dt} = J_i \frac{d\Omega_{zi}}{dt} = \Delta M_i = \frac{P_{mi} - P_{zi}}{\Omega_{zi}} = \frac{\Delta P_i}{\Omega_{zi}}. \quad (3.11)$$

Здесь:  $\Omega_{zi} = p\Omega_{\text{мех.зи}}$  – уже скорость вращения магнитного поля ротора, пропорциональная механической скорости вращения ротора,  $H_i = J_{pi}\Omega_{\text{мех.ном}}^2 = P_{номi}T_{ji}$  – удвоенная кинетическая энергия машины при номинальной скорости вращения ротора  $\Omega_{\text{мех.ном}}$  (это соотношение и определяет известный параметр машины – постоянную инерции  $T_{ji}$ ). Отношение

$\frac{H_i}{\Omega_{\text{ном}}^2} = \frac{J_{pi}}{p^2} = J_i$  дает момент инерции машины, приведённый к номинальной

скорости вращения поля ротора. То же относится и к избыточному моменту  $\Delta M_i$ , который также приведён к скорости вращения поля ротора формулой для

его расчета  $\Delta M_i = \frac{\Delta M_{\text{мех.и}}}{p} = \frac{\Delta P_i}{\Omega_{zi}}$ . Кругом далее, под моментом инерции и

избыточным моментом, будем подразумевать их приведённые значения.

Переход к приведенным моментам инерции и приведённым избыточным

моментам не изменяет дифференциалы кинетической энергии  $dK_i$  и работы

$\Delta P_i dt$  (а, значит, и их интегралы). Для простоты,  $\Omega_{zi}$  будем называть

скоростью движения ротора.

Изменение импульса  $dI_i$  синхронной машины непосредственно описывается уравнением движения

$$dI_i = J_i d\Omega_{zi} = \Delta M_i dt, \quad \int_{t_0}^t dI_i = I_i(t) - I_i(t_0) = \int_{t_0}^t \Delta M_i dt. \quad (3.12)$$



Кинетическая энергия группы машин определяется суммированием. Изменение кинетической энергии любой совокупности машин также вычисляется простым суммированием, т.е. теорема об изменении кинетической энергии применима к произвольной части системы – подсистеме или системе в целом

$$\sum_{k_s} dK_k = dK_s = \sum_{k_s} \Delta P_k dt = \Delta P_s dt, \quad (3.13)$$

$$\int_{t_0}^t dK_s = K_s(t) - K_s(t_0) = \sum_{k_s} \int_{t_0}^t \Delta P_k dt = \int_{t_0}^t \Delta P_s dt, \quad (3.14)$$

где  $k_s$  – совокупность узлов  $s$ -ой подсистемы,  $K_s$  – кинетическая энергия  $s$ -ой подсистемы,  $\Delta P_s$  – суммарный небаланс мощности на валах синхронных машин в подсистеме.

Изменение суммарного импульса совокупности машин также определяется суммированием изменений их импульсов

$$\sum_{k_s} dI_k = \sum_{k_s} J_k d\Omega_{zk} = dI_s = \sum_{k_s} \Delta M_k dt = \Delta M_s dt, \quad (3.15)$$

$$\int_{t_0}^t dI_s = I_s(t) - I_s(t_0) = \int_{t_0}^t \Delta M_s dt, \quad (3.16)$$

где  $\Delta M_s$  – суммарный небаланс моментов на валах синхронных машин в подсистеме. Соотношения (3.13, 3.14) могут быть представлены в виде

$$dK_s = \sum_{k_s} \Delta M_k \Omega_{zk} dt = \sum_{k_s} \Delta M_k d\delta_{zk}, \quad (3.17)$$

$$\int_{t_0}^t dK_s = K_s(t) - K_s(t_0) = \sum_{k_s} \int_{t_0}^t \Delta M_k \Omega_{zk} dt = \sum_{k_s} \int_{\delta_{zk}(t_0)}^{\delta_{zk}(t)} \Delta M_k d\delta_{zk}. \quad (3.18)$$

Из (3.17) видно, что изменение кинетической энергии подсистемы равно сумме работ, совершаемых небалансами моментов на абсолютных угловых перемещениях роторов (относительно неподвижной оси). Интеграл работ из (3.18) представляет собой интеграл по траектории движения. Аддитивность кинетической энергии и импульса в узловом пространстве энергосистемы

позволяет использовать их для описания характеристик движения выделенных областей системы – подсистем.

### 3.2.1 Соотношения для импульсов и скоростей их изменения

Из введенных определений следует, что, вне зависимости от способа разбиения системы на подсистемы, в любой момент времени справедливы соотношения для суммарных импульсов относительных движений (закон сохранения импульса относительных движений в системах отсчета, жёстко связанных с центрами инерции) [85,65]

$$\sum_s J_s \Delta \Omega_{s0}(t) = 0, \quad \sum_{k_s} J_k \Delta \Omega_{2ks}(t) = 0. \quad (3.19)$$

Дифференцирование и интегрирование (3.19) от нуля до произвольного момента времени  $t$  дает соответствующие соотношения для относительных ускорений и относительных угловых смещений [85,65]

$$\sum_s J_s \frac{d(\Delta \Omega_{s0})}{dt} = 0, \quad \sum_{k_s} J_k \frac{d(\Delta \Omega_{2ks})}{dt} = 0, \quad (3.20)$$

$$\sum_s \int_0^t J_s \Delta \Omega_{s0} dt = \sum_s J_s \Delta \delta_{s0} = 0, \quad (3.21)$$

$$\sum_{k_s} \int_0^t J_k \Delta \Omega_{2ks} dt = \sum_{k_s} J_k \Delta \delta_{2ks} = 0 \quad (3.22)$$

Эти соотношения, справедливые для произвольного  $t$ , показывают, что движения  $\Delta \Omega_{s0}(t)$  и  $\Delta \Omega_{2ks}(t)$  определяют *колебательные в пространствах подсистем и узлов процессы* в системе. Действительно, их выполнение, в общем случае при неравенстве нулю хотя бы некоторых величин  $\Delta \Omega_{s0}(t)$  и  $\Delta \Omega_{2ks}(t)$ , возможно только при *различных знаках* входящих в них отклонений скоростей. То же относится и к производным отклонений угловых скоростей по времени. Смещения относительно центров инерции системы  $\Delta \delta_{s0}(t)$  и

подсистем  $\Delta\delta_{zks}(t)$  также будут происходить в противоположных направлениях в разных частях системы (подсистемы).

Уравнение движения  $i$ -ой синхронной машины при его разложении на три относительных процесса запишется

$$J_i \left( \frac{d(\Delta\Omega_0)}{dt} + \frac{d(\Delta\Omega_{s0})}{dt} + \frac{d(\Delta\Omega_{zis})}{dt} \right) = \Delta M_i. \quad (3.23)$$

Учет соотношений для суммарных импульсов в системах координат центров инерции системы и подсистем позволяет получить уравнения, определяющие изменения импульсов для отдельных составляющих движения (т.е., собственно дифференциальные уравнения структурно организованного движения). Движение центра инерции системы отвечает уравнению [85,65]

$$J_s \frac{d(\Delta\Omega_0)}{dt} = \Delta M_s, \quad (3.24)$$

где  $\Delta M_s$  – суммарный избыточный момент на валах машин в системе.

Уравнение относительного движения центра инерции  $s$ -ой подсистемы [85,65]

$$J_s \frac{d(\Delta\Omega_{s0})}{dt} = \Delta M_s - \frac{J_s}{J_s} \Delta M_s. \quad (3.25)$$

Величина  $\Delta M_{s0} = \Delta M_s - \frac{J_s}{J_s} \Delta M_s$  представляет собой избыточный момент, определяющий относительное движение центра инерции подсистемы около центра инерции системы. Из определения  $\Delta M_{s0}$  следует:  $\sum_s \Delta M_{s0} = 0$ . Отметим, что суммарный избыточный момент  $\sum_s \Delta M_s = \Delta M_s$  не равен нулю. Избыточные моменты  $\Delta M_s$  действуют на подсистемы в их абсолютном движении.

Уравнение движения синхронной машины относительно центра инерции подсистемы, в которую она входит [85,65]

$$J_i \frac{d(\Delta\Omega_{zis})}{dt} = \Delta M_i - \frac{J_i}{J_s} \Delta M_s. \quad (3.26)$$

Величина  $\Delta M_{is} = \Delta M_i - \frac{J_i}{J_s} \Delta M_s$  представляет собой избыточный момент, определяющий относительное движение синхронной машины около центра инерции подсистемы, в которую она входит. Для сумм  $\Delta M_{is}$  и  $\Delta M_i$  по всем машинам подсистемы, выполняются соотношения  $\sum_{k_s} \Delta M_{ks} = 0, \sum_{k_s} \Delta M_k = \Delta M_s$ .

Избыточные моменты  $\Delta M_i$  действуют на синхронные машины в их абсолютном движении.

Движение синхронной машины относительно центра инерции системы  $\Delta\Omega_{zi0}(t)$ , определяемое суммой двух процессов  $\Delta\Omega_{zi0}(t) = \Delta\Omega_{s0}(t) + \Delta\Omega_{zis}(t)$ , описывается уравнением

$$J_i \frac{d(\Delta\Omega_{zi0})}{dt} = J_i \left( \frac{d(\Delta\Omega_{s0})}{dt} + \frac{d(\Delta\Omega_{zis})}{dt} \right) = \Delta M_i - \frac{J_i}{J_s} \Delta M_s = \Delta M_{i0}. \quad (3.27)$$

Величина  $\Delta M_{i0} = \Delta M_i - \frac{J_i}{J_s} \Delta M_s$  представляет собой избыточный момент, определяющий относительное движение синхронной машины около центра инерции системы. При суммировании избыточных моментов  $\Delta M_{i0}$  по всей системе и подсистеме получим:  $\sum_k \Delta M_{k0} = 0, \sum_{k_s} \Delta M_{k0} = \Delta M_{s0}$ . Для относительных скоростей  $\Delta\Omega_{zi0}(t)$  сохраняется суммарный нулевой импульс:

$$\sum_k J_k \Delta\Omega_{zk0}(t) = 0. \quad (3.28)$$

Так же выполняются и соответствующие соотношения для производных и интегралов. Уравнения (3.24) – (3.27) остаются справедливыми при любом характере действующих в системе моментов: синхронных и асинхронных.

Если уравнения относительного движения двух синхронных машин вида (3.27) просуммировать, то в результате будет получено уравнение относительного движения подсистемы, составленной из этих двух машин. В

левой части получающегося уравнения будет фигурировать производная угловой скорости центра инерции образовавшейся подсистемы относительно центра инерции системы. В правой части образуется суммарный относительный избыточный момент, определяющий движение центра инерции образованной подсистемы из двух машин относительно центра инерции системы:

$$J_{i+j} \frac{d\Delta\Omega_{(i+j)0}}{dt} = \Delta M_{i+j} - \frac{J_{i+j}}{J_s} \Delta M_s, \quad (3.29)$$

$$J_{i+j} = J_i + J_j, \quad (3.30)$$

$$\Delta M_{i+j} = \Delta M_i + \Delta M_j, \quad (3.31)$$

$$\Delta\Omega_{(i+j)0} = \frac{J_i \Delta\Omega_{zi0} + J_j \Delta\Omega_{zj0}}{J_i + J_j} = \frac{J_i \Omega_{zi0} + J_j \Omega_{zj0}}{J_i + J_j} - \Omega_0. \quad (3.32)$$

Импульс относительного движения образованного объекта будет равен сумме импульсов относительных движений входящих в него частей. Ясно, что вместо отдельных синхронных машин в таких выкладках могут участвовать и две подсистемы, сливаемые в одну (в этом случае  $i$  и  $j$  - номера сливаемых подсистем). Этими свойствами будут обладать и суммы из большего числа слагаемых. Для расчета относительных моментов, действующих на подсистемы, и относительных скоростей подсистем удобно использовать соотношения:

$$\Delta M_{s0} = \sum_{k_s} \Delta M_{k0} \quad (3.33)$$

$$\Delta\Omega_{s0} = \frac{\sum_{k_s} J_k \Delta\Omega_{zk0}}{J_s} \quad (3.34)$$

Из дифференциальных уравнений видно, что относительные движения отдельных объектов на двух нижних уровнях иерархии, локальном (синхронные машины в подсистемах) и региональном (подсистемы в системе), определяются действующими на них относительными избыточными моментами. Уравнения относительных движений синхронной машины в

подсистеме и подсистемы в системе по форме совпадают. Можно сформулировать утверждения, описывающие свойства относительных движений и их уравнений [52]:

-движения каждой из подсистем как целого относительно центра инерции системы определяются избыточными моментами относительного движения подсистем в системе;

-движения каждой из синхронных машин в подсистеме относительно ее центра инерции определяется избыточным моментом относительного движения машины в подсистеме;

-суммы избыточных моментов относительных движений всех подсистем в системе и всех синхронных машин в подсистемах всегда равны нулю (вне зависимости от математической модели системы), что отражает законы сохранения импульсов в системах координат, связанных с центрами инерции системы и подсистем;

-уравнения относительных движений подсистем формируется на основе операций сложения относительных моментов, воздействующих на объекты, объединяемые в подсистему.

### 3.2.2 Энергетические соотношения

Полная кинетическая энергия системы  $K(t)$  в момент времени  $t$  равна кинетической энергии в стационарном режиме  $K_0$  плюс добавка кинетической энергии  $\Delta K(t)$ , произошедшая на интервале переходного процесса  $(0-t)$ , т.е.  $K(t) = K_0 + \Delta K(t)$ . Добавка кинетической энергии системы  $\Delta K(t)$  складывается из вкладов отдельных синхронных машин  $\Delta K_i(t)$ :  $\Delta K(t) = \sum_k \Delta K_k(t)$ . При суммировании (с учетом соотношений (3.19)) получим кинетическую энергию системы в переходном процессе, выраженную через переменные, описывающие структурно организованное движение [52]:

$$K(t) = K_0 + \Delta K(t) = K_0 + \sum_s \sum_{k_s} J_k \frac{\Delta \Omega_{zks}^2(t)}{2} + \sum_s J_s \frac{\Delta \Omega_{s0}^2(t)}{2} + J_3 \frac{\Delta \Omega_0^2(t)}{2} + \Omega_0 J_3 \Delta \Omega_0(t) \quad (3.35)$$

Добавка суммарной кинетической энергии  $\Delta K(t)$ , которую приобретает вся система вследствие переходного электромеханического процесса, разбивается на составляющие, представленные в (3.35)

$$\Delta K(t) = \sum_s K_{локс}(t) + \sum_s K_{регс}(t) + K_{сис}(t) = K_{лок}(t) + K_{рег}(t) + K_{сис}(t), \quad (3.36)$$

где  $K_{лок}$ ,  $K_{рег}$ ,  $K_{сис}$  – полные кинетические энергии локальных относительных колебательных процессов в подсистемах, региональных относительных колебательных процессов в системе и общего движения в поступательной степени свободы. Последняя составляющая представлена соотношением

$$K_{сис}(t) = \Omega_0 J_3 \Delta \Omega_0(t) + J_3 \frac{\Delta \Omega_0^2(t)}{2} \quad (3.37)$$

Составляющие  $K_{лок}$ ,  $K_{рег}$  характеризуют процессы, обусловленные колебательными степенями свободы, они равны нулю при синхронном движении во всей системе. Сумма составляющих

$$K_{кол} = K_{рег} + K_{лок} = \sum_s J_s \frac{\Delta \Omega_{s0}^2(t)}{2} + \sum_s \sum_{k_s} J_k \frac{\Delta \Omega_{zks}^2(t)}{2} \quad (3.38)$$

определяет полную *кинетическую энергию колебаний* системы. Составляющие  $K_{локс}$  характеризует интенсивность внутренних движений в подсистемах, их “нагрев”. Составляющие  $K_{регс}$  определяет долю кинетической энергии колебаний, отправляемую на колебательное движение соответствующего региона, рассматриваемого как целое. Последнее соотношение может интерпретироваться как *покомпонентное разложение* кинетической энергии колебаний.

Так как полная кинетическая энергия системы в переходном процессе и ее составляющая, определяемая поступательным движением, от выбора

структурирования системы не зависят, то и сумма  $K_{кол} = K_{лок} + K_{рег}$  также не зависит от разбиения системы на подсистемы. Действительно, кинетическая энергия колебаний может быть также определена через относительные скорости движения машин около центра инерции системы. При любом разбиении на подсистемы, выполняется соотношение:

$$K_{кол}(t) = \sum_k J_k \frac{\Delta\Omega_{zk0}^2(t)}{2} = \sum_s J_s \frac{\Delta\Omega_{s0}^2(t)}{2} + \sum_s \sum_{k_s} J_k \frac{\Delta\Omega_{zks}^2(t)}{2}. \quad (3.39)$$

Из него видно, что суммарная (полная) кинетическая энергия колебаний системы в переходном процессе равна разности между полной кинетической энергией движения и кинетической энергией поступательного движения:

$$K_{кол}(t) = \frac{1}{2} \sum_k J_k \Omega_{zk}^2(t) - \frac{1}{2} J_0 \Omega_0^2(t) = \frac{1}{2} \sum_k J_k [\Omega_{zk}(t) - \Omega_0(t)]^2 = \sum_k J_k \frac{\Delta\Omega_{zk0}^2(t)}{2}. \quad (3.40)$$

При вариации структуры системы будет меняться только отношение между кинетическими энергиями локальных и региональных процессов  $K_{лок}$ ,  $K_{рег}$ . Изменение полной кинетической энергии переходного процесса на интервале  $(t_0-t)$ , исходя из (3.35), определится:

$$\begin{aligned} K(t) - K(t_0) &= \\ &= \int_{t_0}^t d(\Omega_0 J_0 \Delta\Omega_0) + \int_{t_0}^t d\left(J_0 \frac{\Delta\Omega_0^2}{2}\right) + \int_{t_0}^t d\left(\sum_s J_s \frac{\Delta\Omega_{s0}^2}{2}\right) + \int_{t_0}^t d\left(\sum_s \sum_{k_s} J_k \frac{\Delta\Omega_{zks}^2}{2}\right) = \\ &= (\Omega_0 J_0 \Delta\Omega_0(t) - \Omega_0 J_0 \Delta\Omega_0(t_0)) + J_0 \left(\frac{\Delta\Omega_0^2(t)}{2} - \frac{\Delta\Omega_0^2(t_0)}{2}\right) + \\ &+ \sum_s J_s \left(\frac{\Delta\Omega_{s0}^2(t)}{2} - \frac{\Delta\Omega_{s0}^2(t_0)}{2}\right) + \sum_s \sum_{k_s} J_k \left(\frac{\Delta\Omega_{zks}^2(t)}{2} - \frac{\Delta\Omega_{zks}^2(t_0)}{2}\right). \end{aligned} \quad (3.41)$$

Изменения кинетической энергии связаны с работами, совершаемыми при перемещении по траектории движения. Рассмотрим теперь вычисление работы, совершаемой при перемещении синхронной машины на интервале  $(t_0-t)$  по некоторой траектории  $\delta_{ei}(t)$  при действии на нее, во время движения по этой траектории, момента  $\Delta M_i(t)$



$$A_i = \int_{\delta_{zi}(t_0)}^{\delta_{zi}(t)} \Delta M_i(t) d\delta_{zi} = \int_{t_0}^t \Delta M_i(t) \frac{d\delta_{zi}}{dt} dt, \quad (3.42)$$

где запись дифференциала перемещения через его производную по времени умноженную на дифференциал времени  $dt$  указывает на необходимость обеспечения одновременности вычисления момента и смещения. Пусть траектория задана в виде суммы перемещений:

$$\delta_{zi}(t) = \delta_{zi}(0) + \Omega_0 t + \Delta\delta_{s0}(t) + \Delta\delta_{zis}(t). \quad (3.43)$$

Это означает, что дифференциал  $d\delta_{zi}$  представляет собой сумму дифференциалов (приращений) составляющих перемещений, произошедших за интервал времени  $dt$ , т.е.

$$d\delta_{zi} = \Omega_0 dt + \frac{d(\Delta\delta_{s0})}{dt} dt + \frac{d(\Delta\delta_{zis})}{dt} dt, \quad (3.44)$$

причем для их региональных и локальных составляющих выполняются соотношения, следующие из (3.21, 3.22):

$$\sum_s J_s d(\Delta\delta_{s0}) = 0, \quad \sum_{k_s} J_k d(\Delta\delta_{zks}) \neq 0. \quad (3.45)$$

Интеграл работы запишется

$$A_i = \int_{t_0}^t \Delta M_i(t) \Omega_0 dt + \int_{t_0}^t \Delta M_i(t) \frac{d(\Delta\delta_{s0})}{dt} dt + \\ + \int_{t_0}^t \Delta M_i(t) \frac{d(\Delta\delta_{zis})}{dt} dt, \quad (3.46)$$

При суммировании работ по всей системе получим

$$\sum_k \int_{\delta_{zk}(t_0)}^{\delta_{zk}(t)} \Delta M_k d(\delta_{zk}) = \int_{t_0}^t \Delta M_3(t) \Omega_0 dt + \int_{t_0}^t \Delta M_3(t) \frac{d(\Delta\delta_{s0})}{dt} dt + \sum_s \int_{t_0}^t \Delta M_s(t) \frac{d(\Delta\delta_{s0})}{dt} dt + \\ + \sum_s \sum_{k_s} \int_{t_0}^t \Delta M_k(t) \frac{d(\Delta\delta_{zks})}{dt} dt \quad (3.47)$$

Если теперь учесть соотношения между абсолютными и относительными избыточными моментами

$$\Delta M_s = \Delta M_{s0} + \frac{J_s}{J_\vartheta} \Delta M_\vartheta, \quad \Delta M_i = \Delta M_{is} + \frac{J_i}{J_s} \Delta M_s \quad (3.48)$$

то, используя (3.19), суммарную работу можно записать в виде

$$\begin{aligned} \sum_k \int_{\delta_{2k}(t_0)}^{\delta_{2k}(t)} \Delta M_k d(\delta_{2k}) &= \int_{t_0}^t \Delta M_\vartheta(t) \Omega_0 dt + \\ &+ \int_{t_0}^t \Delta M_\vartheta(t) \frac{d(\Delta \delta_0)}{dt} dt + \sum_s \int_{t_0}^t \Delta M_{s0}(t) \frac{d(\Delta \delta_{s0})}{dt} dt + \sum_s \sum_{k_s} \int_{t_0}^t \Delta M_{ks}(t) \frac{d(\Delta \delta_{2ks})}{dt} dt. \end{aligned} \quad (3.49)$$

В этом соотношении вместо абсолютных избыточных моментов участвуют уже относительные моменты. Или, переходя к интегралам работ избыточных относительных моментов на соответствующих перемещениях, получим:

$$\begin{aligned} \sum_k \int_{\delta_{2k}(t_0)}^{\delta_{2k}(t)} \Delta M_k d(\delta_{2k}) &= \int_{t_0}^t \Delta M_\vartheta \Omega_0 dt + \int_{\Delta \delta_0(t_0)}^{\Delta \delta_0(t)} \Delta M_\vartheta d(\Delta \delta_0) + \sum_s \int_{\Delta \delta_{s0}(t_0)}^{\Delta \delta_{s0}(t)} \Delta M_{s0} d(\Delta \delta_{s0}) + \\ &+ \sum_s \sum_{k_s} \int_{\Delta \delta_{2ks}(t_0)}^{\Delta \delta_{2ks}(t)} \Delta M_{ks} d(\Delta \delta_{2ks}). \end{aligned} \quad (3.50)$$

В соответствии с теоремой об изменении кинетической энергии величины, определяемые выражениями (3.41) и (3.50) равны между собой.

Тот же результат можно получить на основе уравнений для относительных движений, из которых непосредственно следуют соотношения между работами и изменениями участия в полной кинетической энергии отдельных объектов: *система – подсистемы – синхронные машины* [85,65]

$$\int_{t_0}^t d \left( J_\vartheta \frac{\Delta \Omega_0^2}{2} \right) = \int_{\Delta \delta_0(t_0)}^{\Delta \delta_0(t)} \Delta M_\vartheta d(\Delta \delta_0), \quad (3.51)$$

$$\int_{t_0}^t d \left( J_s \frac{\Delta \Omega_{s0}^2}{2} \right) = \int_{\Delta \delta_{s0}(t_0)}^{\Delta \delta_{s0}(t)} \left( \Delta M_s - \frac{J_s}{J_\vartheta} \Delta M_\vartheta \right) d(\Delta \delta_{s0}) = \int_{\Delta \delta_{s0}(t_0)}^{\Delta \delta_{s0}(t)} \Delta M_{s0} d(\Delta \delta_{s0}), \quad (3.52)$$

$$\int_{t_0}^t d \left( J_i \frac{\Delta \Omega_{zis}^2}{2} \right) = \int_{\Delta \delta_{zis}(t_0)}^{\Delta \delta_{zis}(t)} \left( \Delta M_i - \frac{J_i}{J_s} \Delta M_s \right) d(\Delta \delta_{zis}) = \int_{\Delta \delta_{zis}(t_0)}^{\Delta \delta_{zis}(t)} \Delta M_{is} d(\Delta \delta_{zis}). \quad (3.53)$$

из которых видно, что для вычисления работы при движении объектов двух нижних уровней иерархии должны использоваться небалансы моментов относительного движения (а не абсолютного).

Таким образом, отдельные составляющие изменения полной кинетической энергии системы могут быть вычислены через работы на составляющих перемещений, удовлетворяющих уравнениям движения:

$$\left. \begin{aligned} \int_{t_0}^t d \left( \sum_{k_s} J_k \frac{\Delta \Omega_{zks}^2}{2} \right) &= \sum_{k_s} \int_{\Delta \delta_{zks}(t_0)}^{\Delta \delta_{zks}(t)} \Delta M_{ks} d(\Delta \delta_{zks}), \\ \int_{t_0}^t d \left( \sum_s J_s \frac{\Delta \Omega_{s0}^2}{2} \right) &= \sum_s \int_{\Delta \delta_{s0}(t_0)}^{\Delta \delta_{s0}(t)} \Delta M_{s0} d(\Delta \delta_{s0}), \\ \int_{t_0}^t d \left( J_0 \frac{\Delta \Omega_0^2}{2} \right) &= \int_{\Delta \delta_0(t_0)}^{\Delta \delta_0(t)} \Delta M_0 d(\Delta \delta_0), \\ \int_{t_0}^t d (\Omega_0 J_0 \Delta \Omega_0) &= \int_{t_0}^t d (\Omega_0 \Delta I_0) = \Omega_0 \int_{t_0}^t \Delta M_0 dt, \end{aligned} \right\} \quad (3.54)$$

где  $\Delta I_0 = J_0 \Delta \Omega_0$  – полное изменение импульса системы как целого в ее общем движении. Суммируя все составляющие из (3.54) получим соотношение между работами и изменениями кинетической энергии для всей системы в целом.

При получении соотношений (3.54) не использовались никакие допущения о характере действующих в системе моментов. Также не оговаривался способ разбиения системы на подсистемы (кроме того, что он должен быть корректным, т.е. каждая синхронная машина может входить только в одну подсистему). Первые три соотношения из (3.54) содержат в правых частях интегралы работ действующих в системе моментов на отдельных составляющих перемещений. Однако сами эти моменты зависят от суммарных перемещений. Если расчет переходных процессов проводится без учета изменения частоты, то эти моменты зависят от суммы региональных и локальных смещений. При учете изменения частоты добавляется их

зависимость от частоты системы (или, в более полной модели, от локальных частот). Интеграл в правой части четвертого соотношения из (3.54) отражает работу небаланса моментов системы на перемещении  $\Omega_{ot}$ , определяемом движением системы с неизменной частотой исходного невозмущенного режима  $\Omega_0$ .

Первые три соотношения из (3.54) можно записать и в другой форме (3.55). Вычисления элементарных работ в (3.55) проводится на основе расчета произведений моментов и скоростей (по размерности – мощностей), умноженных на дифференциал времени. Интегралы работ представляют собой определенные интегралы с временными пределами интегрирования.

$$\left. \begin{aligned} \int_{t_0}^t d \left( \sum_{k_s} J_k \frac{\Delta \Omega_{k_s}^2}{2} \right) &= \sum_{k_s} \int_{t_0}^t \Delta M_{k_s} \Delta \Omega_{k_s} dt, \\ \int_{t_0}^t d \left( \sum_s J_s \frac{\Delta \Omega_{s0}^2}{2} \right) &= \sum_s \int_{t_0}^t \Delta M_{s0} \Delta \Omega_{s0} dt, \\ \int_{t_0}^t d \left( J_0 \frac{\Delta \Omega_0^2}{2} \right) &= \int_{t_0}^t \Delta M_0 \Delta \Omega_0 dt. \end{aligned} \right\} \quad (3.55)$$

Из соотношений (3.51) – (3.55) непосредственно видно, что любые действия в системе, не приводящие к изменению суммарного избыточного момента  $\Delta M_0$ , не изменят ее общего движения и соответствующей составляющей кинетической энергии в поступательной степени свободы. Кинетическая энергия колебательных степеней свободы при этом может меняться. Аналогично, манипуляции, сохраняющие неизменной величину  $\Delta M_{s0}$ , не изменят региональную составляющую кинетической энергии от данной подсистемы.

### 3.3 Выделение колебательных структур и их разновидности

В зависимости от того, движение какого объекта исследуется на устойчивость: подсистемы в системе или синхронной машины в подсистеме, можно говорить о *межсистемных (между подсистемами) и локальных (внутри*

*подсистем) нарушениях устойчивости.* Такая квалификация неустойчивости имеет условный характер, так как один и тот же процесс нарушения устойчивости может быть отнесен к тому или иному уровню иерархии в зависимости от принятого деления на подсистемы.

Выбор структуры региональных движений, анализируемых на устойчивость, может производиться различным образом. Например, разбиения на подсистемы могут формироваться на основе расчета стационарного режима с оценкой запасов устойчивости по разным направлениям его утяжеления. Разбиения на подсистемы может также проводиться на базе выявления *колебательной структуры переходного процесса*, в общем случае являющейся функцией времени. Первый вариант оперирует с некоторой *фиксированной* для данного расчета переходного процесса структурой системы, выбранной из каких-либо внешних соображений. Второй – использует структуру движения, *формирующуюся во время расчета* переходного процесса.

Понятие колебательной структуры возникает на основе наблюдения за перемещениями векторов напряжения в различных узлах системы. При этом проявляется *естественная структурная организация* электромеханических колебаний энергосистем, приводящая к формированию *наблюдаемых колебательных структур*.

Наблюдаемый эффект и его объяснение представляются следующим образом. Колебания происходят в виде *противоположно направленных движений смежных областей* системы, что объясняется тем, что *топологическая структура* колебательных движений определена их *волновым* характером.

Нарушения устойчивости, если они происходят, проявляются развитием асинхронного хода по сечениям системы, лежащим между такими противоположно движущимися областями.

В основе структурной организации движения лежит образование групп синхронных машин, движущихся относительно центра инерции системы сходным образом. Такие группы (ядра подсистем) *формируют вокруг себя*

области системы, вектора напряжений в узлах которых перенимают характер движения группы.

Выберем, например, в качестве группового признака для синхронных машин, лежащих внутри выделяемой области, знак отклонения скорости их вращения от скорости вращения центра инерции системы  $\Delta\Omega_{zi0}(t)$ . Это значит, что *знак* всех переменных

$$\Delta\Omega_{zi0}(t) = \Omega_{zi}(t) - \Omega_0(t) \quad (3.56)$$

в момент времени  $t$  должен быть *одним и тем же* для всех машин группы, образующих ядро подсистемы. Узлы системы, попадающие под влияние группы, будем определять на основе аналогичного требования к знакам отклонений  $\Delta\Omega_{i0}(t)$  их индивидуальных частот  $\Omega_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt}$  от частоты вращения центра инерции системы  $\Omega_0(t)$  (относительных индивидуальных частот)

$$\Delta\Omega_{i0}(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt} - \Omega_0(t), \quad (3.57)$$

где  $\theta_i(t)$  угол вектора напряжения в узле относительно *неподвижной оси*. При расчете электромеханических переходных процессов измерение углов векторов напряжения и роторов синхронных машин проводится относительно так или иначе выбранной *общей оси отсчета, обычно вращающейся*. Производные по времени для *измеряемых таким образом углов* вычисляются по соотношениям вида:

$$\frac{d\delta_i(t)}{dt} = \Omega_i(t) - \Omega_{omc}(t) \quad (3.58)$$

где  $\Omega_{omc}(t)$  - угловая скорость оси отсчета,  $\delta_i(t)$  - угол *относительно неё*.

Тогда, при таком измерении углов, получим:

$$\Delta\Omega_{i0}(t) = \Omega_i(t) - \Omega_0(t) = \frac{d\delta_i(t)}{dt} + \Omega_{omc}(t) - \Omega_0(t). \quad (3.59)$$

К одной подсистеме будем относить все узлы системы, индивидуальные частоты в которых *либо выше, либо ниже частоты вращения центра инерции системы.*

Для выделения подсистем определим границы между ними. При этом признаком граничной связи, объединяющей *две смежные подсистемы,* становится *разный знак отклонений индивидуальной частоты в узлах по её концам.* Если все такие связи системы в момент времени  $t$  считать отключенными и провести топологический анализ системы на предмет выделения *несвязных* подсистем, то получившиеся подсистемы будут иметь *общий признак – одинаковый знак отклонений индивидуальных частот внутри подсистемы,* а любые *смежные из подсистем* будут характеризоваться *разными знаками этих отклонений.* Описанный алгоритм позволяет определять колебательную структуру движения в системе как функцию времени  $S(t)$ . Эта колебательная структура описывает пространственное *распределение относительных скоростей движения по системе как электромеханическую волну,* выделяя чередующиеся области, опережающие или отстающие от центра инерции системы.

При определении структуры движения можно использовать и относительные смещения. Перемещение вектора напряжения узла относительно центра инерции системы, накопленное на интервале  $(t_0 - t)$   $\Delta\delta_{i0}(t, t_0)$  с учетом (3.59) определится:

$$\Delta\delta_{i0}(t, t_0) = \int_{t_0}^t \Delta\Omega_{i0} dt = \delta_i(t) - \delta_i(t_0) - \int_{t_0}^t (\Omega_0 - \Omega_{omc}) dt. \quad (3.60)$$

Интеграл в правой части можно вычислить так:

$$\begin{aligned}
\int_{t_0}^t (\Omega_0 - \Omega_{omc}) dt &= \int_{t_0}^t \left( \frac{\sum_k J_k \Omega_{zk}}{\sum_k J_k} - \frac{\sum_k J_k \Omega_{omc}}{\sum_k J_k} \right) dt = \\
&= \frac{\sum_k J_k \int_{t_0}^t (\Omega_{zk} - \Omega_{omc}) dt}{\sum_k J_k} = \frac{\sum_k J_k [\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)]}{J_\sigma},
\end{aligned} \tag{3.61}$$

где  $\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)$  – изменение угла  $k$ -ой синхронной машины на интервале  $(t_0 - t)$ , а суммирование идет по всем синхронным машинам системы. Таким образом, получим соотношение:

$$\Delta \delta_{i0}(t, t_0) = \delta_i(t) - \delta_i(t_0) - \frac{\sum_k J_k [\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)]}{J_\sigma}, \tag{3.62}$$

в правой части которого участвуют углы векторов напряжения и углы роторов синхронных машин, измеренные относительно используемой в расчете оси отсчета. При этом, замена оси отсчета не приведет к изменению смещений относительно центра инерции (инвариантность к выбору оси отсчета).

Рассчитав  $\Delta \delta_{i0}$  для всех узлов системы и пометив связи, объединяющие узлы с разными знаками этих отклонений, можно, аналогично предыдущему, выявить колебательную структуру движения системы. Здесь используются накопленные на конечном интервале времени относительные смещения, представляя результат движения системы распределенной в узловом пространстве *электромеханической волной смещений*. Чередующиеся области системы смещены относительно вектора, жёстко связанного с центром инерции системы, в положительную или отрицательную стороны (полуволны относительных смещений).

По формуле, аналогичной (3.62), можно определить перемещение ротора синхронной машины относительно центра инерции системы на интервале  $(t_0 - t)$



$$\Delta\delta_{zi0}(t, t_0) = \delta_{zi}(t) - \delta_{zi}(t_0) - \frac{\sum_k J_k [\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)]}{J_s}. \quad (3.63)$$

Региональное относительное смещение  $s$ -ой подсистемы  $\Delta\delta_{s0}$  на интервале  $(t_0-t)$  также определяется через углы синхронных машин относительно оси отсчета

$$\begin{aligned} \Delta\delta_{s0}(t, t_0) &= \int_{t_0}^t \Delta\Omega_{s0} dt = \int_{t_0}^t [(\Omega_{s0} - \Omega_{omc}) - (\Omega_0 - \Omega_{omc})] dt = \\ &= \frac{\sum_{k_s} J_k [\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)]}{J_s} - \frac{\sum_k J_k [\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)]}{J_s} \end{aligned} \quad (3.64)$$

Локальное смещение синхронной машины  $\Delta\delta_{zis}$  на интервале  $(t_0-t)$  относительно центра инерции подсистемы, в которую она входит

$$\begin{aligned} \Delta\delta_{zis}(t, t_0) &= \int_{t_0}^t \Delta\Omega_{zis} dt = \int_{t_0}^t [(\Omega_{zi} - \Omega_{omc}) - (\Omega_{s0} - \Omega_{omc})] dt = \\ &= \delta_{zi}(t) - \delta_{zi}(t_0) - \frac{\sum_{k_s} J_k [\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)]}{J_s}. \end{aligned} \quad (3.65)$$

Отклонения  $\Delta\delta_{s0}$  для смежных подсистем противоположны по знаку. Из (3.63–3.65) видно, что  $\Delta\delta_{zi0} = \Delta\delta_{s0} + \Delta\delta_{zis}$  и для этих смещений справедливы законы сохранения суммарных импульсов (3.21–3.22).

Мгновенные скорости перемещений вычисляются по формулам:

$$\Delta\Omega_{zi0}(t) = \Omega_{zi}(t) - \frac{\sum_k J_k \Omega_{zk}(t)}{J_s}, \quad (3.66)$$

$$\Delta\Omega_{s0}(t) = \frac{\sum_{k_s} J_k \Omega_{zk}(t)}{J_s} - \frac{\sum_k J_k \Omega_{zk}(t)}{J_s}, \quad (3.67)$$

$$\Delta\Omega_{zis}(t) = \Omega_{zi}(t) - \frac{\sum_{k_s} J_k \Omega_{zk}(t)}{J_s}. \quad (3.68)$$

Соотношения (3.62–3.65) можно представить в виде

$$\Delta\delta_{i0}(t, t_0) = \delta_{i0}(t) - \delta_{i0}(t_0), \quad (3.69)$$

$$\Delta\delta_{zi0}(t, t_0) = \delta_{zi0}(t) - \delta_{zi0}(t_0), \quad (3.70)$$

$$\Delta\delta_{s0}(t, t_0) = \delta_{s0}(t) - \delta_{s0}(t_0), \quad (3.71)$$

$$\Delta\delta_{zis}(t, t_0) = \delta_{zis}(t) - \delta_{zis}(t_0), \quad (3.72)$$

$$\delta_{i0}(t) = \delta_i(t) - \frac{\sum_k J_k \delta_{zk}(t)}{J_s}, \quad (3.73)$$

$$\delta_{zi0}(t) = \delta_{zi}(t) - \frac{\sum_k J_k \delta_{zk}(t)}{J_s}, \quad (3.74)$$

$$\delta_{s0}(t) = \frac{\sum_{k_s} J_k \delta_{zk}(t)}{J_s} - \frac{\sum_k J_k \delta_{zk}(t)}{J_s}, \quad (3.75)$$

$$\delta_{zis}(t) = \delta_{zi}(t) - \frac{\sum_{k_s} J_k \delta_{zk}(t)}{J_s}. \quad (3.76)$$

Из (3.74–3.76) видно, что  $\delta_{zi0}(t) = \delta_{s0}(t) + \delta_{zis}(t)$  и для этих смещений справедливы законы сохранения суммарных импульсов (3.21–3.22). Соотношения (3.73–3.76), по сути, представляют угловые смещения в системах координат движущегося центра инерции системы и движущихся центров инерции подсистем (вместо общей оси отсчета углов).

Для различения структур, полученных по относительным скоростям и относительным смещениям, будем их называть  $\omega$  и  $\delta$  структурами соответственно ( $S_\omega(t)$  и  $S_\delta(t)$ ). Соотношение (3.62) можно использовать как при выделении  $\delta$ –структур, так и  $\omega$ –структур. Просто, для  $\delta$ –структур, длина интервала  $(t_0-t)$  должна быть существенно больше, чем для  $\omega$ –структур. Для  $\omega$ –структур длина интервала снижена до величины, пригодной для численной оценки скоростей изменения углов (их численного дифференцирования).

В зависимости от способа образования интервала ( $t_0-t$ ) можно различать интервальную и интегральную схему выделения колебательной структуры как функции времени. Интервальная схема вычислений использует постоянную длину интервала ( $t-t_0$ ). В этом случае изменение  $t$  сопровождается таким же изменением  $t_0$ , длина интервала при этом остается неизменной (перемещающееся по оси времени неизменное по ширине окно идентификации колебательной структуры). К этому типу, естественно, относится алгоритм выделения  $\omega$  – структуры (для чего используется окно малой ширины). Интегральная схема использует постоянное значение времени  $t_0$ , т.е. длина интервала идентификации колебательной структуры постоянно нарастает.

Изменения колебательной структуры во времени могут иметь различную глубину. Минимальные изменения структуры происходят при сохранении ядер подсистем. Более глубокое изменение связано с коррекцией ядер подсистем при сохранении топологии колебательной структуры. Соответственно, изменение топологии колебаний наиболее кардинально (например, изменение числа подсистем или переход от звездообразной структуры к цепочечной). Так как колебательные структуры связаны с движениями больших масс, то их эволюция проходит достаточно медленно и можно выделить интервалы времени, в течение которых колебательная структура неизменна. Процесс эволюции колебательной структуры во времени связан с не установившимся волновым процессом, т.е. с *бегущими волнами в существенно неоднородной системе. Наибольший интерес представляют структуры, сложившиеся в системе к моменту начала развития асинхронного хода.* Интервал времени перед развитием асинхронного хода, в течение которого колебательная структура неизменна, определяет время целенаправленного ввода управляющих воздействий.

В колебательных структурах, изменяющихся во времени, могут появляться подсистемы с нулевой инерционной массой. Это может происходить при близких к нулю региональных характеристиках движения (некоторых региональных относительных скоростей или смещений). Такие структуры

могут быть преобразованы на основе операции слияния подсистем. Так, например, подсистема с нулевой массой может быть слита с инцидентной подсистемой большей массы. После исключения “нулевых” подсистем некоторые из смежных подсистем могут характеризоваться отклонениями частот или смещений одного знака. Эти подсистемы также могут быть слиты. Такой алгоритм преобразования колебательной структуры приводит её к стандартной форме, а именно, структура состоит из массивных подсистем, любые смежные из которых имеют противоположные знаки относительных скоростей или смещений.

Свойство колебательных структур – любые смежные подсистемы имеют противоположные знаки определяющей переменной – скорости или смещения, определяет характер этих структур. Они могут быть цепочечными, цепочечными с ветвлениями (частным случаем которых являются звездообразные структуры), а также содержать кольца с четным числом подсистем. Колебательную структуру представляют числовые характеристики – число подсистем  $R$ , число связей между подсистемами  $L$ , число подсистем, включенных в структуру с помощью одной связи  $R_1$  (конечных подсистем). Если  $L = R - 1$ , то колебательная структура не имеет колец. При  $L > R - 1$  структура содержит кольцевые образования. Если  $R_1 = R - 1$  (при  $R > 2$ ), то колебательная структура имеет звездообразный характер.

### **3.4 Исследование процессов распада синхронизма системы при возмущениях на основе энергетических соотношений**

Соотношения для определения кинетической энергии региональных движений и её полной производной по времени для переменной колебательной структуры имеют вид:

$$K_{\text{рез}}(S(t)) = \sum_{s(t)} J_s \frac{\Delta \Omega_{s0}^2(t)}{2}, \quad (3.77)$$

$$\frac{dK_{pez}}{dt}(S(t)) = \sum_{s(t)} \Delta M_{s0}(t) \Delta \Omega_{s0}(t). \quad (3.78)$$

Из них видно, что определение региональных характеристик переходного процесса в условиях переменной колебательной структуры сводится к простому *пересчету относительных скоростей и моментов для подсистем*. Эти соотношения можно интерпретировать как способ осмысления скоростных, силовых и энергетических характеристик переходного процесса *на всем его временном протяжении* в контексте структуры  $S(t)$ , сложившейся к моменту времени  $t$ .

Особенно простые соотношения для структурно организованного движения возникают при числе подсистем, равном двум. Для траекторий их движения выполняются соотношения (3.79 – 3.90).

$$J_1 \frac{d(\Delta \Omega_{10})}{dt} = \Delta M_1 - \frac{J_1}{J_1 + J_2} (\Delta M_1 + \Delta M_2) = \Delta M_{10}, \quad (3.79)$$

$$J_2 \frac{d(\Delta \Omega_{20})}{dt} = \Delta M_2 - \frac{J_2}{J_1 + J_2} (\Delta M_1 + \Delta M_2) = \Delta M_{20}, \quad (3.80)$$

$$K_{pez} = K_{1pez} + K_{2pez} = J_1 \frac{\Delta \Omega_{10}^2}{2} + J_2 \frac{\Delta \Omega_{20}^2}{2} \quad (3.81)$$

$$\frac{dK_{pez}}{dt} = \Delta M_{10} \Delta \Omega_{10} + \Delta M_{20} \Delta \Omega_{20} \quad (3.82)$$

$$\Delta M_{10} + \Delta M_{20} = 0 \quad (3.83)$$

$$\int_{t_0}^t dK_{pez} = \int_{t_0}^t \Delta M_{10} \Delta \Omega_{10} dt + \int_{t_0}^t \Delta M_{20} \Delta \Omega_{20} dt = \int_{\Delta \delta_{12}(t_0)}^{\Delta \delta_{12}(t)} \Delta M_{10} d(\Delta \delta_{12}), \quad (3.84)$$

$$d(\Delta \delta_{12}) = (\Delta \Omega_{10} - \Delta \Omega_{20}) dt = \Delta \Omega_{12} dt, \quad (3.85)$$

$$J_1 \Delta \Omega_{10} + J_2 \Delta \Omega_{20} = 0, \quad (3.86)$$

$$\Delta \delta_{10}(t, t_0) = \frac{\sum_{k_1} J_k [\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)]}{J_1} - \frac{\sum_k J_k [\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)]}{J_2} \quad (3.87)$$

$$\Delta\delta_{20}(t,t_0) = \frac{\sum_{k_2} J_k [\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)]}{J_2} - \frac{\sum_k J_k [\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)]}{J_3} \quad (3.88)$$

$$J_1 \Delta\delta_{10}(t,t_0) + J_2 \Delta\delta_{20}(t,t_0) = 0 \quad (3.89)$$

$$K_{кол}(t) = \sum_k J_k \frac{\Delta\Omega_{zk0}^2(t)}{2} \quad (3.90)$$

Из (3.86) следует, что знаки отклонений скоростей всегда противоположны, и более того, отношение отклонений скоростей постоянно (т.е. они пропорциональны). Из (3.83) видно, что избыточные моменты относительного движения подсистем равны по модулю и противоположны по знаку. В этом случае слагаемые в правой части (3.82) всегда будут иметь одинаковые знаки и, если знак одного из них в какой то момент времени изменился, то знак второго в этот же момент времени и знак производной  $\frac{dK_{pez}}{dt}$  также изменятся на противоположные. Соотношения (3.84) и (3.85) определяют возможность расчета изменения региональной составляющей кинетической энергии через работу *при взаимном перемещении* центров инерции подсистем. С помощью (3.90) определяется полная энергия колебаний в системе (не зависящая от её разбиения на подсистемы).

Малое количество подсистем в колебательных структурах и их топологическая простота позволяют легко получать их двухмашинные представления на основе операций слияния подсистем. Каждое из этих представлений содержит две подсистемы, образованные слиянием подсистем, лежащих по различным сторонам того или иного межсистемного сечения колебательной структуры. Эти представления могут рассматриваться как *варианты структуры неустойчивости (распада синхронизма)*, развивающейся (развивающегося) между двумя подсистемами (объектами).

Кинетическая энергия объекта на интервале  $(t_0-t)$  может нарастать (при возрастании отклонения скорости по модулю) или убывать (при снижении модуля относительной скорости). В первом случае работа, определяемая

интегралами в правой части (3.84), положительна, во втором отрицательна. Так как работа  $A$  может быть увязана с изменением потенциальной энергии  $\Delta U$  (в соответствии с определением последней как  $\Delta U = -A$ ), то *положительная работа* (и возрастание кинетической энергии) соответствует уменьшению потенциальной энергии (*спуск в потенциальную яму*). *Отрицательная работа* и снижение кинетической энергии – увеличению потенциальной энергии (*подъём из потенциальной ямы*). Следует отметить, что представление о потенциальной яме в связи с присутствием не потенциальных сил в энергосистеме не является строгим, но оно позволяет повысить наглядность физической картины колебаний и нарушения устойчивости (ясно, что осью абсцисс на рисунках потенциальных ям выступает взаимное смещение двух подсистем структуры неустойчивости).

Колебания возникают тогда, когда процессы спуска в потенциальную яму и подъёма из неё чередуются во времени, объект совершает колебания около положения равновесия, лежащего на дне потенциальной ямы (в точке минимума потенциальной энергии). Тогда, при прохождении положения равновесия, объект имеет максимальную кинетическую энергию и максимальную по модулю относительную скорость. Подъём из потенциальной ямы, снижающий кинетическую энергию и относительную скорость до нуля (до полной остановки объекта в его относительном движении), сопровождается максимальным отклонением объекта от положения равновесия и характеризуется максимальной положительной величиной его потенциальной энергии по отношению к положению равновесия. *Исследование структурной организации колебаний, проводимое путем выделения региональных объектов (подсистем), позволяет определять пространственные и временные характеристики взаимопревращений кинетической и потенциальной энергии системы в переходном процессе.*

Физической причиной нарушения устойчивости в переходном процессе является недостаточность ресурсов по торможению расходящихся объектов

(подсистем). Применительно к случаю структурно организованного движения это, в частности, означает, что кинетическая энергия регионального движения чрезмерно велика и синхронизирующие моменты своей работой не в состоянии остановить разбегающиеся подсистемы. Используя представление об объекте, движущемся в потенциальной яме, можно сказать, что нарушение устойчивости связано с выходом этого объекта на гребень потенциальной функции, за которым лежит уже другая потенциальная яма, с другим положением равновесия (если оно существует). Результаты расчетов характеристик движения подсистем вариантов структур неустойчивости позволяют оценить достаточность или нехватку работ торможения этих подсистем, приводящую к распаду синхронной работы.

### **3.5 Траектории устойчивого и неустойчивого движения и их характеристики**

Проявления эффектов структурной организации движения можно наблюдать уже по графикам изменения *полной (суммарной) кинетической энергии колебаний* энергосистемы во время устойчивого (рисунки 3.1 и 3.2) и неустойчивого (рисунки 3.3–3.8) переходного процесса. На рисунках приведены расчеты аварий в одном и том же месте одной и той же системы (содержащей 33 синхронные машины), отличающиеся своей тяжестью – длительностью проходящего короткого замыкания (0.13, 0.15 и 0.35 сек.).

Во всех случаях в *суммарной* кинетической энергии присутствует *малое число низкочастотных колебаний*, появление которых можно *объяснить только естественно развивающимся процессом структурной организации движения*.

Из обзорного рисунка 3.1 устойчивого процесса при КЗ длительностью 0.13 сек. видно, что в системе образуются, предположительно, три группы машин, совершающие взаимные колебания, которые и определяют главное энергетическое содержание переходного процесса (вклад локальных движений



невелик). Начальная стадия этого же устойчивого процесса представлена на рисунке 3.2.

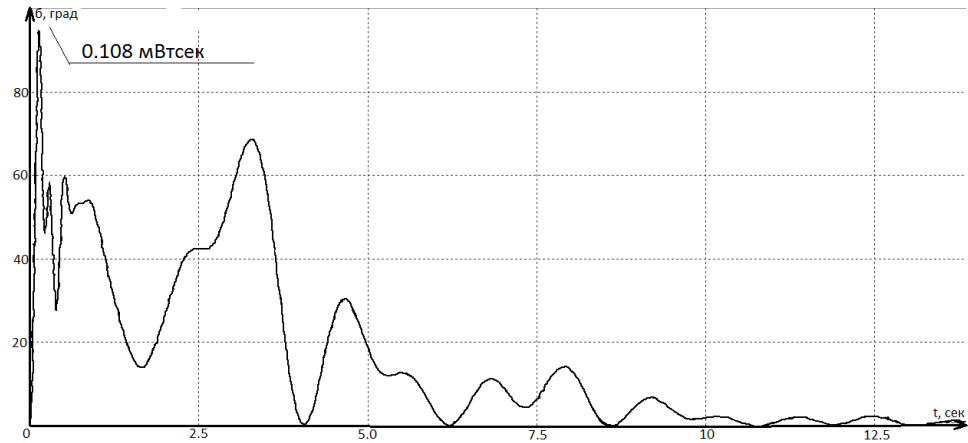


Рисунок 3.1 Кинетическая энергия колебаний системы в устойчивом переходном процессе при КЗ длительностью 0.13 сек

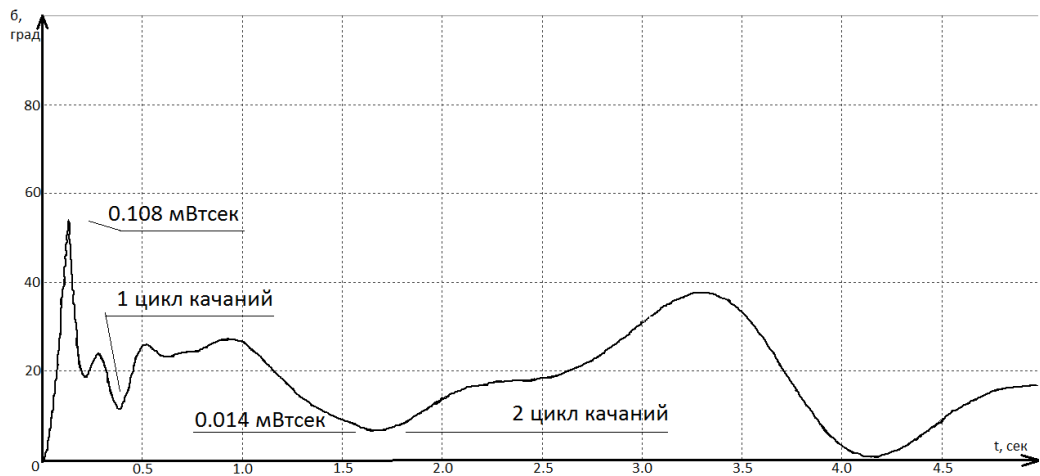


Рисунок 3.2 Кинетическая энергия колебаний системы на начальной стадии устойчивого переходного процесса при КЗ длительностью 0.13 сек

На рисунке 3.3 показано начало неустойчивого процесса при КЗ длительностью 0.15 сек., интервал обзора уменьшен в связи с резким ростом кинетической энергии колебаний после 2.5 секунд процесса. Масштабы по оси ординат на рисунках 3.2 и 3.3 совпадают. На этих двух рисунках отмечены моменты наступления локальных минимумов кинетической энергии колебаний

на первом и втором циклах качаний (моменты максимальной реализации работ торможения).

Повышенное значение непогашенной работами торможения кинетической энергии на рисунке 3.3 во втором цикле качаний по сравнению с идентичной величиной на рисунке 3.2 и приводит к развитию неустойчивости. Таким образом, нарушение устойчивости в рассматриваемом переходном процессе происходит во втором цикле качаний.

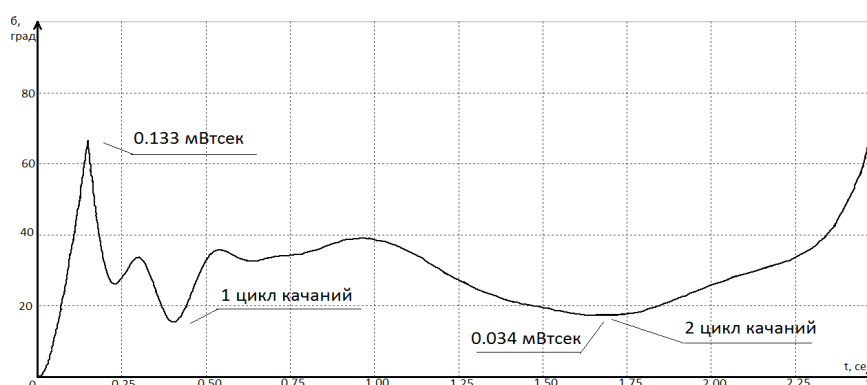


Рисунок 3.3 Кинетическая энергия колебаний системы на начальной стадии неустойчивого переходного процесса при КЗ длительностью 0.15 сек

Обзорный график неустойчивого процесса при КЗ длительностью 0.15 сек. приведен на рисунке 3.4, его начальная стадия в связи с резким ростом кинетической энергии при нарушении устойчивости и развитии асинхронного хода после 2.5 секунд становится не различимой (при использовании одного масштаба на всем временном интервале).

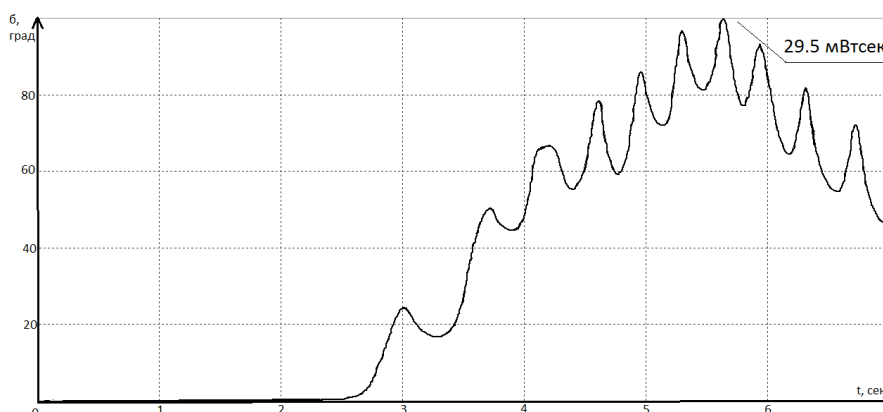


Рисунок 3.4 Кинетическая энергия колебаний в неустойчивом переходном процессе при КЗ длительностью 0.15 сек. (обзорный график процесса)

При увеличении длительности проходящего короткого замыкания до 0.35 сек. и более происходит *существенное изменение положения сечения асинхронного хода*, развивающегося в системе. Нарушение устойчивости развивается раньше, его можно квалифицировать как нарушение устойчивости в первом цикле качаний. Начальная стадия процесса представлена на рисунке 3.5. Выпадающая из синхронизма часть системы в этом случае намного меньше подсистемы, теряющей синхронизм в предыдущей аварийной ситуации, сечение асинхронного хода приближено к месту аварии.

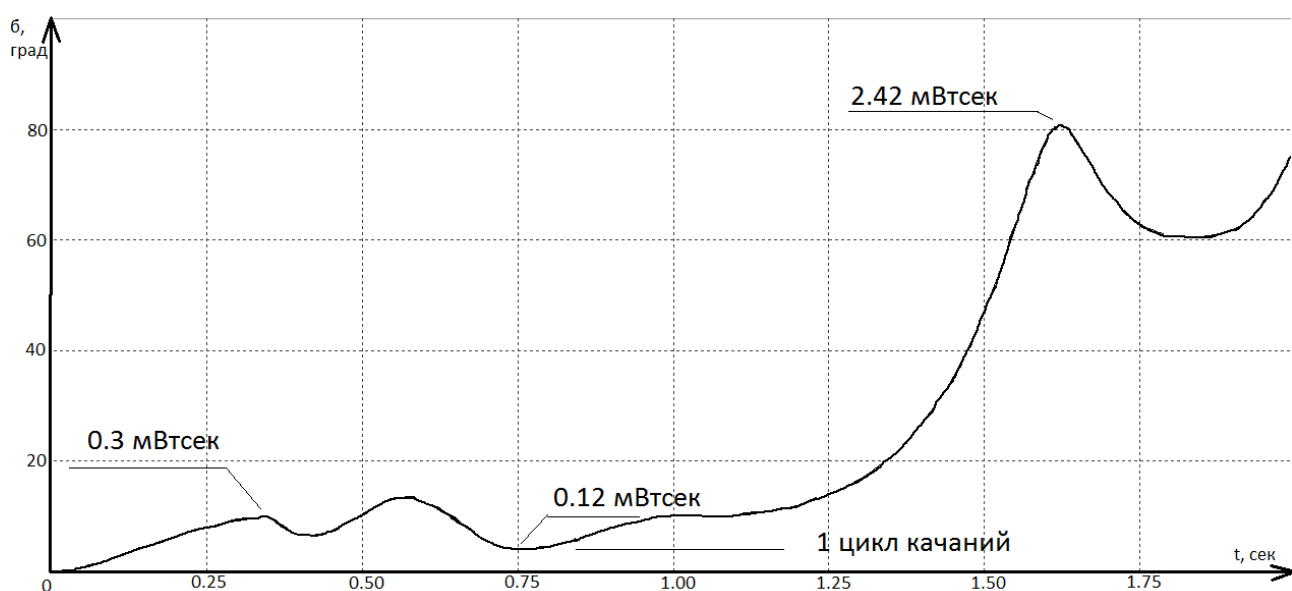


Рисунок 3.5 Кинетическая энергия колебаний системы на начальной стадии неустойчивого переходного процесса при КЗ длительностью 0.35 сек. и изменённом положении сечения асинхронного хода

Обзорный график неустойчивого процесса при КЗ длительностью 0.35 сек. приведен на рисунке 3.6. Величина максимальной кинетической энергии колебаний при развитии асинхронного хода значительно меньше, чем представленная на рисунке 3.4, а именно 4.7 мВтсек, а не 29.5 мВтсек, что связано с меньшей инерционной массой выпадающей из синхронизма подсистемы.

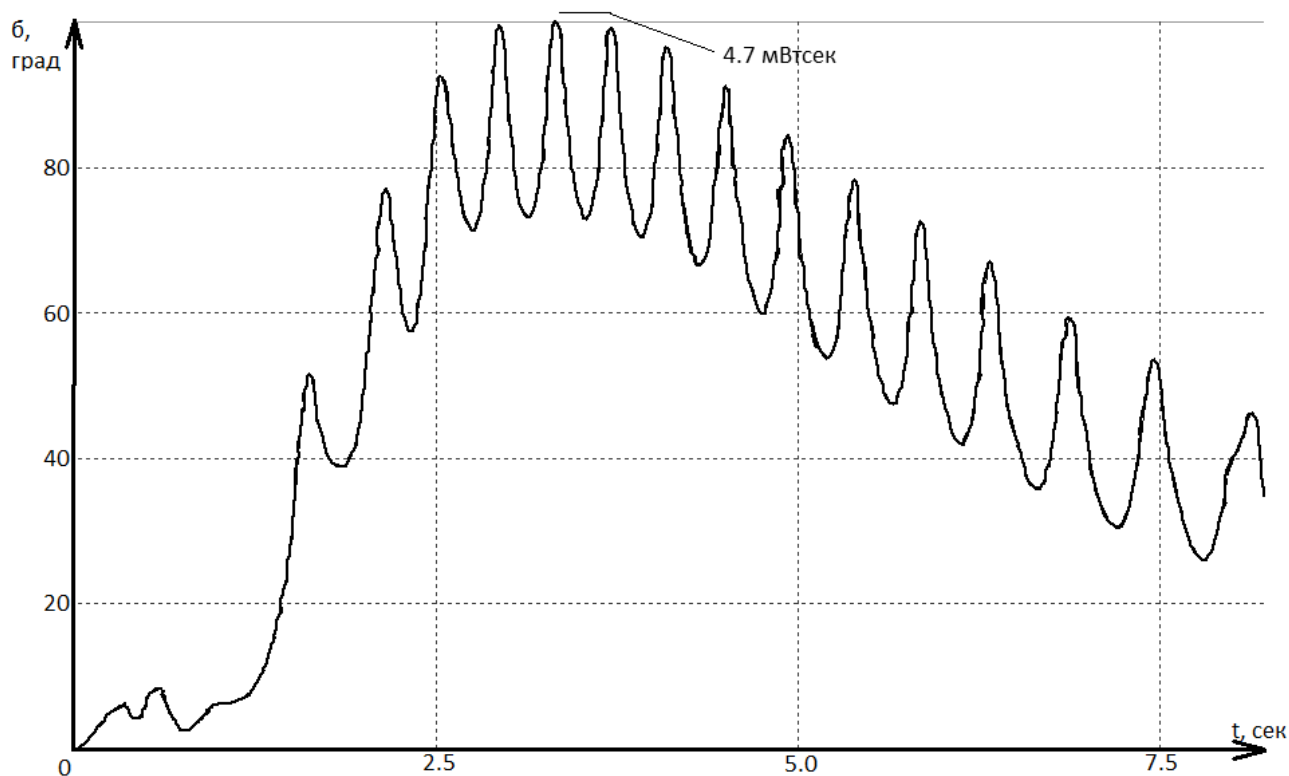


Рисунок 3.6 Кинетическая энергия колебаний системы при КЗ  
длительностью 0.35 сек. и изменённом положении сечения асинхронного хода  
(обзорный график процесса)

На рисунках 3.7 и 3.8 результаты расчета переходного процесса в энергосистеме представлены годографами векторов напряжения в различных узлах системы (изображен только фрагмент ее схемы).

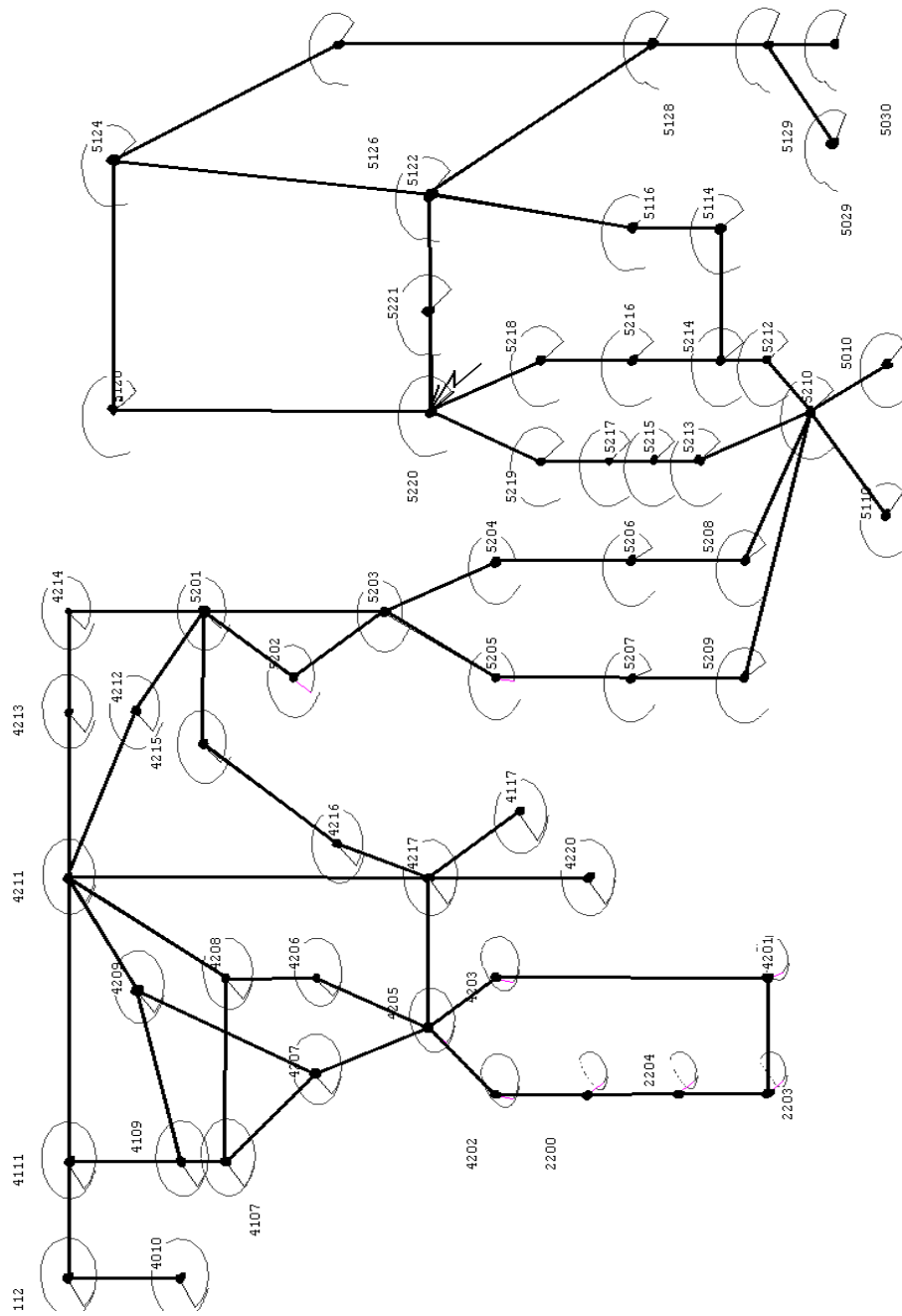


Рисунок 3.7 Нарушение устойчивости в системе при коротком замыкании в узле 5220 длительностью 0.15 сек

Переходный процесс вызван включением шунта короткого замыкания в узле 5220 в течение 0.15 сек. Из рассмотрения годографов видно, что в системе развивается асинхронный ход по сечению, образованному линиями 2200–4202 и 4201–4203. Так как узлы 4202 и 4203 практически находятся в центрах качаний, то сечением асинхронного хода можно также полагать линии 4205–

4202 и 4205–4203. Изображенное на рисунке состояние достигнуто через 3.3 сек. после включения шунта короткого замыкания.

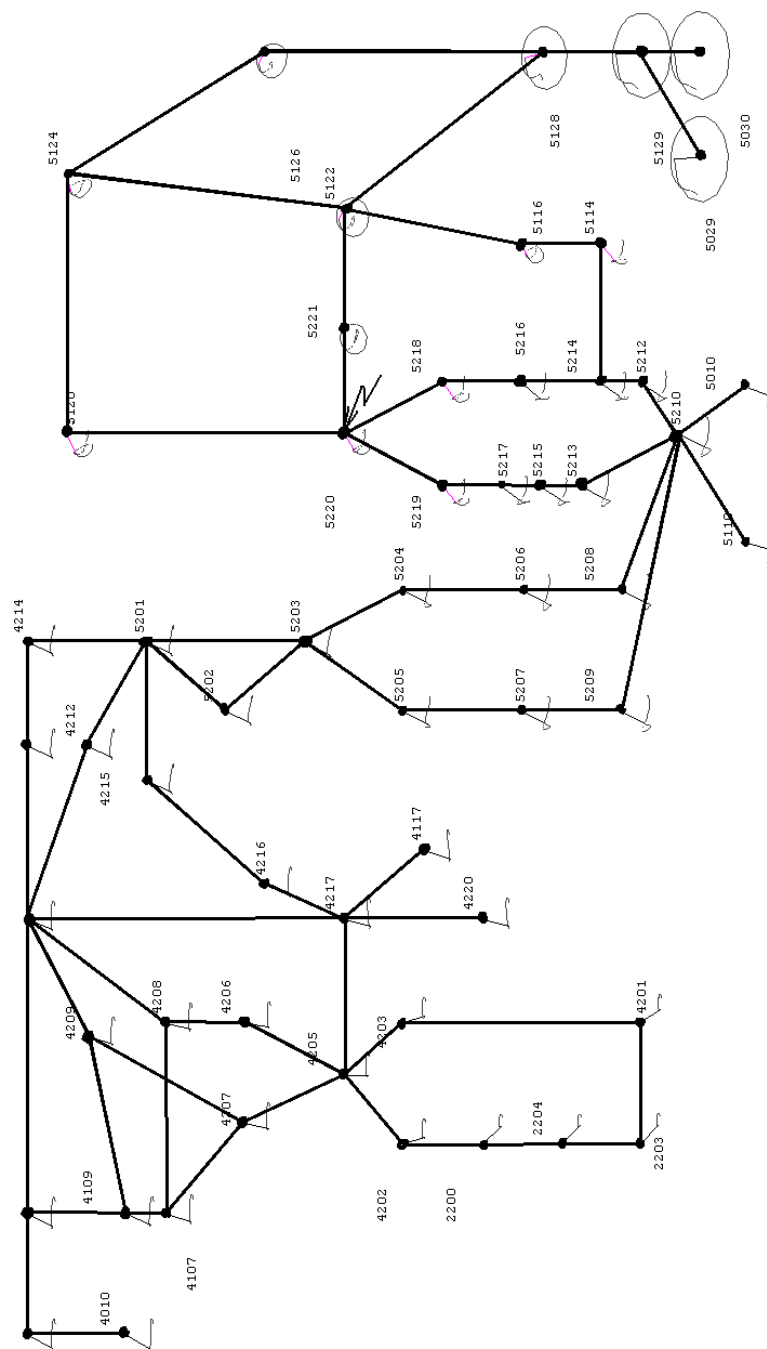


Рисунок 3.8 Нарушение устойчивости в системе при коротком замыкании в узле 5220 длительностью 0.35 сек

На рисунке 3.8 представлен результат расчета переходного процесса в той же схеме (и исходном режиме) при коротком замыкании в том же узле при его длительности 0.35 сек. В системе развивается асинхронный ход по сечению,

составленному из линий 5128–5122 и 5128–5126 (или 5122–5124 и 5126–5124). Зафиксированное на рисунке состояние возникло через 1.1 сек. после включения шунта короткого замыкания. В обоих приведенных примерах вектора напряжения в выпадающей из синхронизма части системы совершили чуть больше одного полного оборота относительно общей оси отсчета углов (за которую принята продольная ось ротора самой мощной синхронной машины в системе).

Рассматривая движения векторов напряжения до нарушения устойчивости легко установить, что в первом случае это нарушение происходит во втором цикле качаний, а во втором – в первом. При промежуточном значении длительности короткого замыкания (между 0.15 и 0.34 сек.) сечение асинхронного хода не меняет своего положения и совпадает с первым из приведенных случаев. При длительности короткого замыкания меньше 0.15 сек. нарушения устойчивости не наблюдается.

По приведённым расчетным результатам можно сделать следующие выводы:

- структурная организация электромеханических колебаний проявляется в энергетических характеристиках переходного процесса,
- нарушения устойчивости при возмущениях разной тяжести в одном и том же месте системы могут происходить в разных циклах качаний и по различным сечениям,
- нарушения устойчивости связаны со структурой движения и его энергетическими характеристиками, определяющими пространственное расположение сечения асинхронного хода.

Представленные примеры изменений суммарной кинетической энергии колебаний в устойчивом и неустойчивом переходном процессах характерны для различных систем и аварий.

Использование приведенных соотношений для выявленной структуры неустойчивого движения позволяет определять региональные параметры движения. Так, для этой структуры движения можно определить эти параметры

в случае сниженного аварийного возмущения, при котором нарушение устойчивости ещё не происходит. Характерный вид устойчивого процесса представлен на рисунке 3.9.

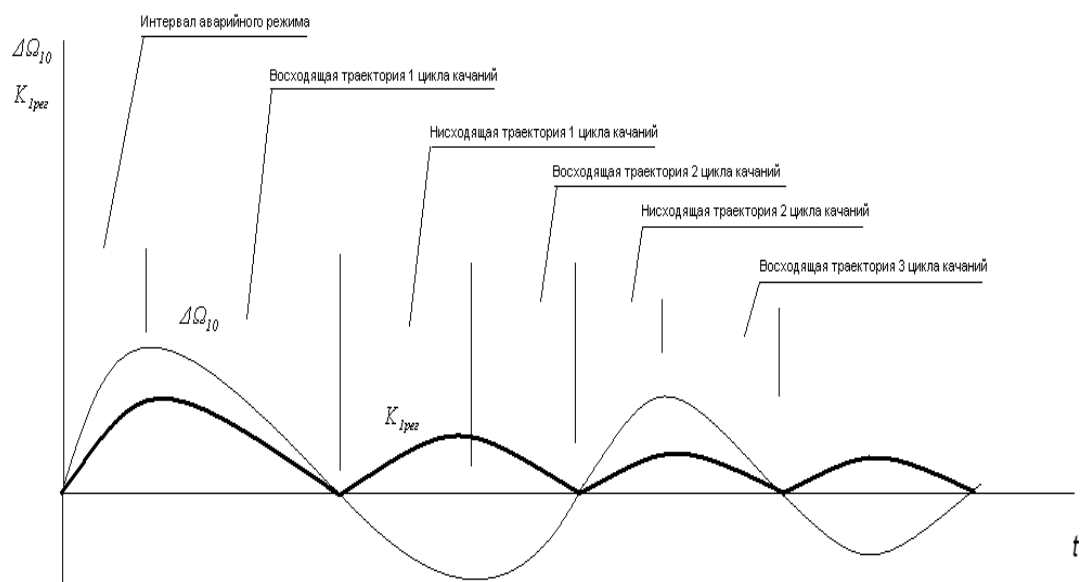


Рисунок 3.9 Отклонение угловой скорости и кинетическая энергия 1 подсистемы при устойчивом переходном процессе

Неустойчивые процессы разнообразны. Характерные случаи представлены на рисунках 3.10 – 3.13.

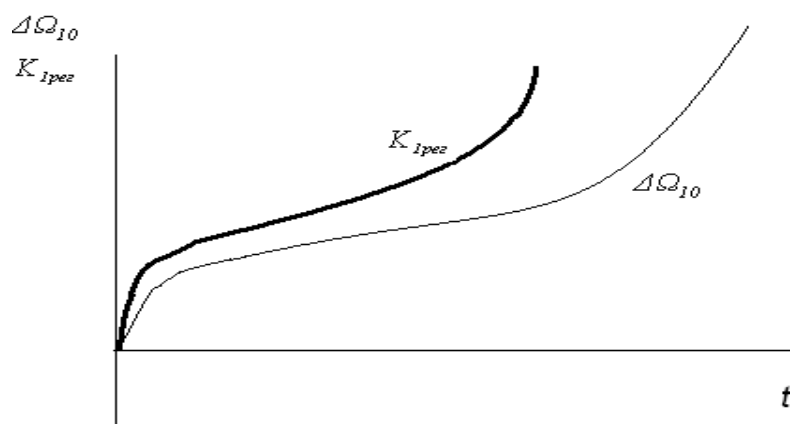


Рисунок 3.10 Неустойчивость, связанная с отсутствием послеаварийного режима или с чрезмерно поздним введением управления, обеспечивающего его существование



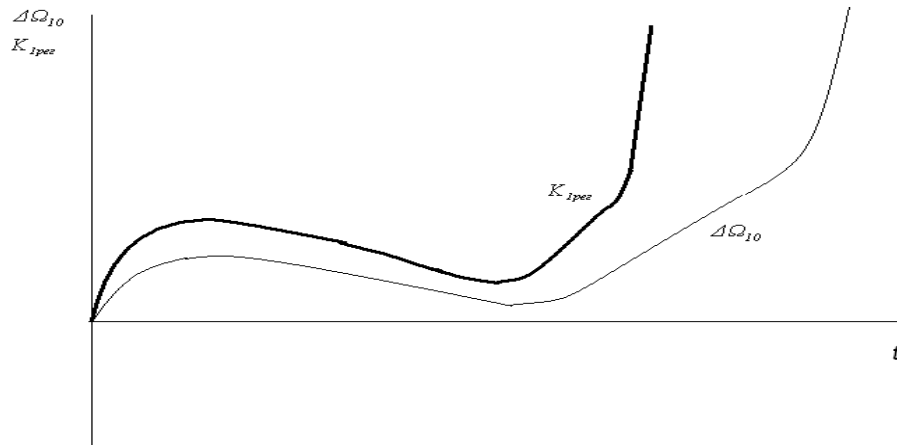


Рисунок 3.11 Неустойчивость, связанная с недостаточностью работы торможения в первом цикле качаний

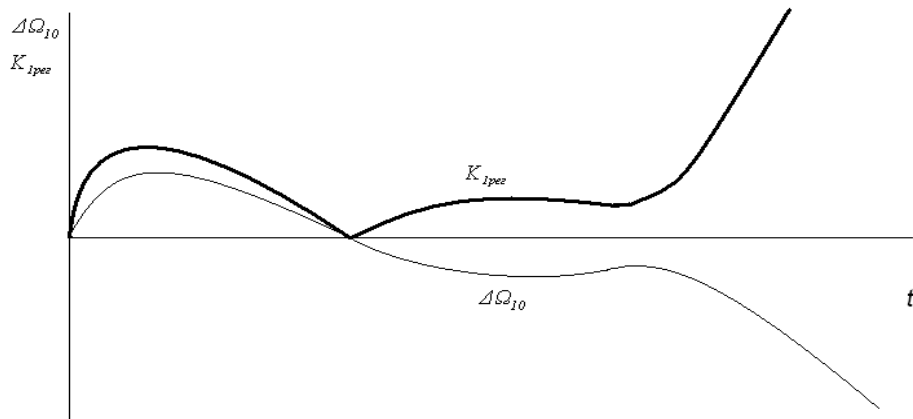


Рисунок 3.12 Неустойчивость, связанная с недостаточностью работы торможения во втором цикле качаний

Случай, представленный на рисунке 3.13, связан с эффектом совместного действия региональных и локальных движений. Так как моменты, воздействующие на подсистемы как целое, зависят от региональных и локальных перемещений, то при больших региональных перемещениях (в окрестности точки неустойчивого равновесия), локальные перемещения могут привести к изменению знака относительного момента и прохождению подсистем за эту точку.

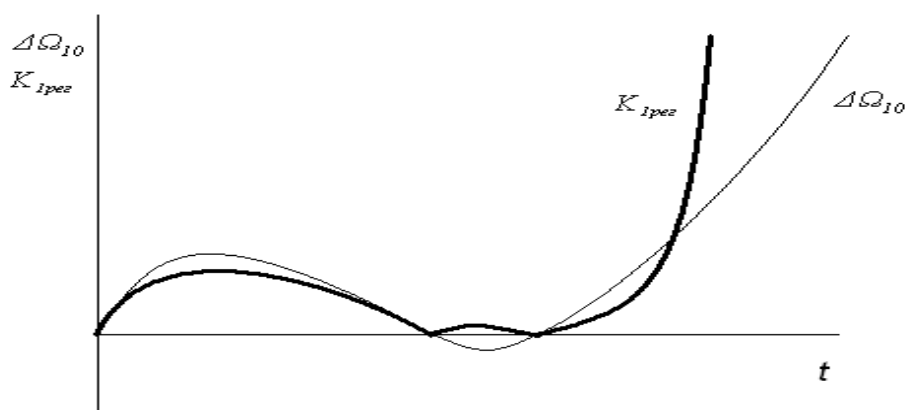


Рисунок 3.13 Неустойчивость, связанная с недостаточностью работы торможения в первом цикле качаний, обусловленная локальными процессами в подсистемах структуры неустойчивости

На рисунках 3.14–3.16 приведены результаты расчета региональных характеристик неустойчивого движения в энергосистеме. Работает АПНУ, обеспечивающая существование послеаварийного режима с нормируемым запасом устойчивости. Однако в системе происходит нарушение динамической устойчивости, связанное с недостаточностью торможения в первом цикле качаний, обусловленной, в том числе, локальными процессами в подсистемах структуры неустойчивости. По оси абсцисс отложен номер шага интегрирования.

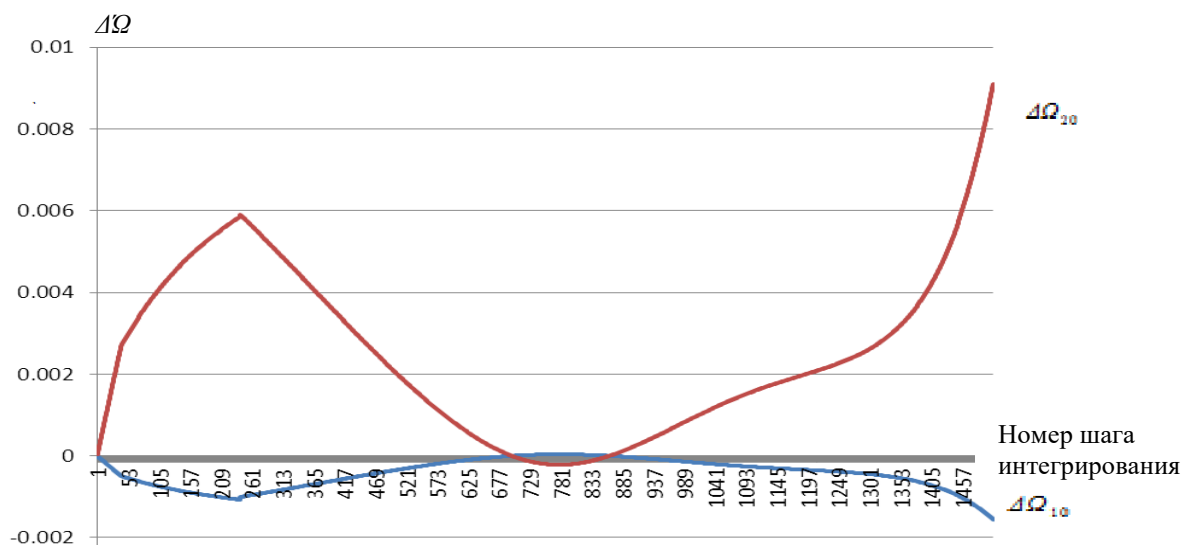


Рисунок 3.14 Изменение региональных относительных угловых скоростей

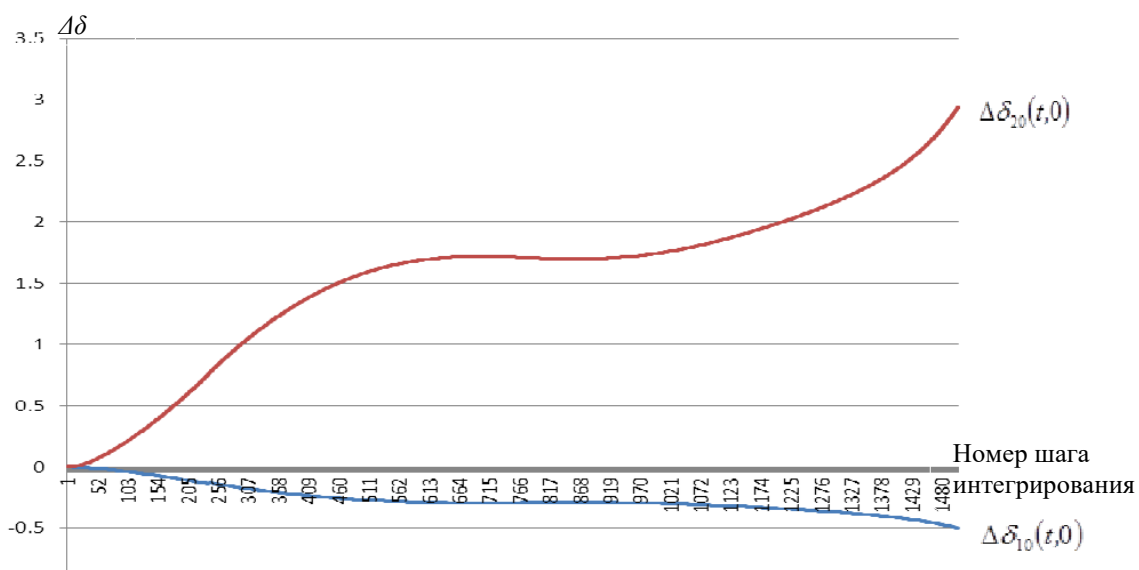


Рисунок 3.15 Изменение региональных относительных смещений

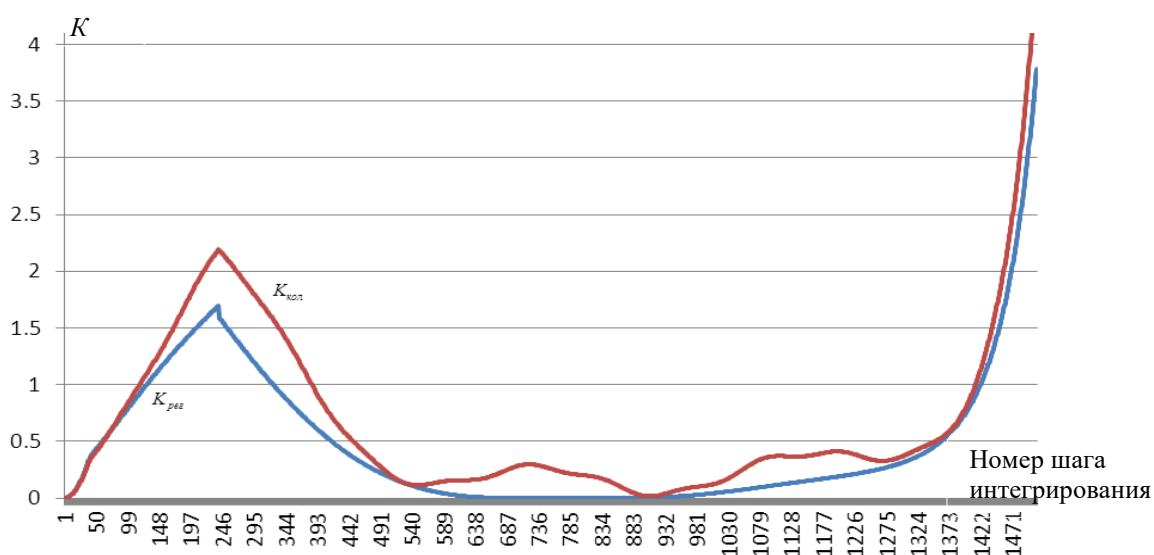


Рисунок 3.16 Изменение региональной и полной кинетической энергии колебаний

Различные случаи развития неустойчивости, изображенные на рисунках 3.10–3.13, составляют основу алгоритмов опознания качественно отличающихся процессов распада синхронизма системы.

## Выводы

Построение систем противоаварийного управления требует модификации классической постановки задач устойчивости как задач исследования процессов распада синхронизма системы при возмущениях. При этом вопрос о положении сечения асинхронного хода становится неотъемлемой частью расчетных алгоритмов.

Анализ процессов распада синхронизма сложных энергосистем можно проводить на основе расчета кинетической энергии колебаний с выделением её региональных и локальных составляющих для определения дефицита работ торможения при движении крупных регионов системы. Возможность таких расчетов для сложных энергосистем связана с упрощением описания колебательных движений в них на основе понятия структурно организованного движения.

Для разбиения на подсистемы могут использоваться колебательные структуры, формирующиеся в переходном процессе. Простая топология колебательной структуры позволяет свести рассмотрение устойчивости движения к ряду задач устойчивости для двухмашинных схем, являющихся представлениями возможных структур неустойчивости данной колебательной структуры.

Выбор структуры неустойчивости из этого ряда, для которой выполняются признаки нарушения устойчивости, позволяет определить сечение асинхронного хода.

## **ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НЕУСТОЙЧИВОГО ДВИЖЕНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

Построение систем противоаварийного управления требует проведения многочисленных расчетов устойчивости энергосистемы в различных режимах ее работы. Главная цель таких исследований - прогнозирование путей развития аварий, связанных с нарушениями устойчивости, с последующим выбором противоаварийных мероприятий, обеспечивающих как можно более раннее их прерывание.

Одним из прикладных применений понятий о структурно организованном движении является метод энерговременных диаграмм, применяемый для описания всей совокупности слабых сечений и оценки опасных возмущений для сложной энергосистемы.

Другим возможным применением является оценка динамической устойчивости для выявленной структурной организации движения синхронных машин в энергосистеме с применением метода площадей и последующим выбором объема управляющих воздействий с целью сохранения динамической устойчивости.

### **4.1 Обзорные исследования структуры неустойчивых движений с помощью энерговременных диаграмм**

Сложность электромеханических переходных процессов в энергосистемах проявляется в сложности и многообразии процессов нарушения устойчивости параллельной работы синхронных машин системы. Известно много разновидностей нарушений устойчивости. Наиболее широко встречающимися являются неустойчивые процессы при «малых» (апериодическая статическая устойчивость) и «больших» (динамическая устойчивость) возмущениях.

Обычно каждый процесс нарушения устойчивости рассматривается отдельно как уникальное событие. Однако при построении системной автоматики предотвращения нарушений устойчивости (АПНУ) процессы нарушения устойчивости группируются в некоторые совокупности, объединяемые в рамках иерархических систем управления. Эта группировка, в той или иной степени, связана с естественными динамическими свойствами объекта управления.

Действительно, энергосистема, как единый динамический объект, должна проявлять себя таковым и в процессах нарушения устойчивости. Это означает, что правомерна постановка задачи исследования совокупности процессов нарушений устойчивости в сложной энергосистеме и выявления связей между отдельными её представителями, обусловленных динамическими свойствами системы. Изучение этих связей позволяет перейти к описанию структурных составляющих (архитектуры) этой совокупности неустойчивых взаимных движений энергосистемы.

Электромеханические переходные процессы, в том числе и процессы нарушения устойчивости параллельной работы синхронных машин системы, самым тесным образом связаны с физическими эффектами, наблюдающимися при колебательных движениях. Наблюдать их можно, в основном, во время выполнения расчётных исследований. Два из них наиболее существенны для рассматриваемой задачи.

Первый эффект формулируется на основе наблюдения за перемещениями векторов напряжения в различных узлах системы, если их углы измеряются относительно общей оси отсчёта, вращающейся со скоростью центра инерции системы. Оно формулируется следующим образом: колебания проходят в виде противоположно направленных движений смежных областей системы, что объясняется волновым характером колебательных движений.

Второй качественный результат связан с изменением пространственного положения сечения первично развивающегося асинхронного хода при дальнейшем увеличении тяжести возмущения, уже приводящего к нарушению

устойчивости. Этот эффект естественно связать с происходящими при утяжелении изменениями в соотношениях между условиями развития движения по предельным (по устойчивости) траекториям в протяжённой энергосистеме, содержащей множество слабых звеньев, проявляющихся в разных её местах. Эти слабые звенья проявляют себя развитием неустойчивости при разной величине предельного возмущения в рассматриваемом месте системы через различное время. Оказывается, что наблюдаемая структура первично развивающегося асинхронного хода определяется местоположением слабого звена, достигающего критического по устойчивости состояния первым.

При постановке задачи обзорного исследования структуры неустойчивых движений в энергосистемах использовано понятие об осцилляторах системы, как способе описания её слабых звеньев. Нарушения устойчивости при малых или больших возмущениях происходят при превышении кинетической энергии колебаний некоторых пределов, определяемых глубинами потенциальных ям для взаимных колебаний. Изменение кинетической и потенциальной энергии движений рассматриваются на *возможных* траекториях движения энергосистемы. На возможной траектории удовлетворяются только уравнения баланса мощности в узлах и уравнение сохранения суммарного импульса относительных региональных движений. Импульсы локальных процессов обнуляются.

Все эти соображения лежат в основе предложенного в [85] способа исследования электромеханических переходных процессов с помощью энерговременных диаграмм неустойчивости при аварийных ситуациях, обусловленных проходящими возмущениями. Рассматриваемая аварийная ситуация характеризуется её длительностью. После перехода к послеаварийной схеме, система свободно движется в послеаварийном режиме.

В упрощенном виде энерговременная диаграмма для конкретной (одной) аварийной ситуации, в общем случае, имеет вид, представленный на рисунке 4.1.

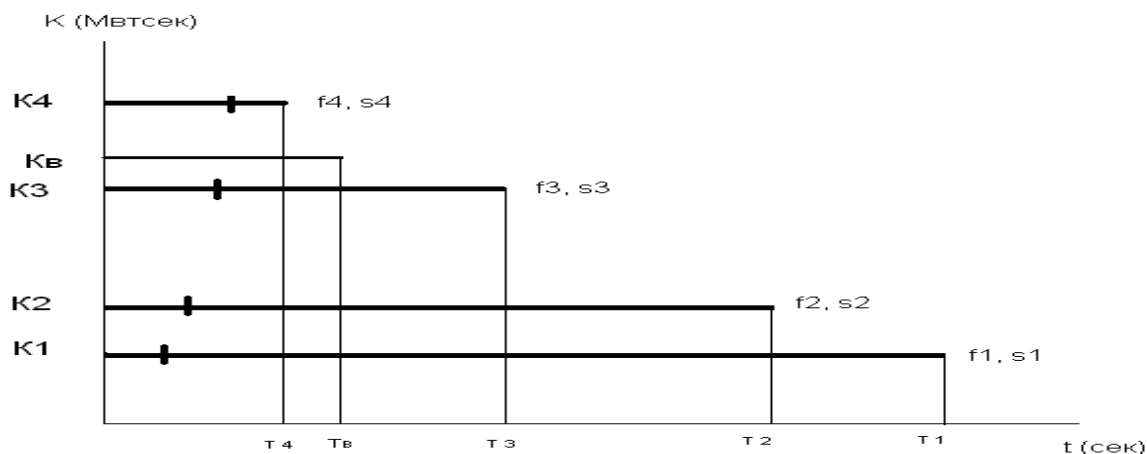


Рисунок 4.1 Энерговременная диаграмма неустойчивости для одной аварийной ситуации

Горизонтальные отрезки прямых показывают энергетические уровни кинетической энергии колебаний  $K_1, \dots, K_4$  (предельные возмущения), возбуждающие различные структуры неустойчивости (варианты «распада» системы) при аварии. Длина этих отрезков  $T_1, \dots, T_4$  равна времени после начала аварии, в течение которого система, при этом предельном возмущении, достигнет точки невозврата (критических взаимных смещений внутри системы). Для каждого уровня это время складывается из длительности предельного по устойчивости аварийного возмущения (отмеченного вертикальной меткой) и времени выхода системы на критические смещения в её свободном движении в послеаварийном режиме. Каждому уровню соответствует осциллятор с именем  $f_i$  и сечение асинхронного хода  $s_i$  (являющееся одним из сечений этого осциллятора). Для некоторых аварий нижние энергетические уровни могут определять неустойчивость во втором цикле качаний.

Отметим, что обнаружение нарушения устойчивости, например, при временном отключении линий, может использоваться для выявления нарушения устойчивости и в случае безвозвратной их потери. Это обстоятельство позволяет выявлять случаи отсутствия устойчивого послеаварийного режима при отключениях связей, рассматриваемые как частный случай нарушения динамической устойчивости.



Энерговременная диаграмма для конкретной аварии уже позволяет определить некоторые черты противоаварийного управления, предназначенного для обеспечения устойчивости при её возникновении. Для примера, рассмотрим возмущающее воздействие с энергией возмущения  $K_B$  (зависящей от длительности существования аварийного режима), превышающей  $K_3$  ( $K_B > K_3$ ). Предположим, что величина  $K_B$  становится известной системе управления в момент времени  $T_B$  после возникновения аварии (время идентификации и оценки тяжести аварии). Если  $T_B < T_3$ , то к моменту готовности системы управления к принятию решений нарушения устойчивости еще не произойдет. Избыток энергии возмущения  $K_B - K_3$  характеризует объём управляющего воздействия, обеспечивающего сохранение устойчивости по структуре неустойчивости с номером "3". Величины  $K_3 - K_2$  и  $K_2 - K_1$  определяют объёмы противоаварийных воздействий, обеспечивающих последовательное сохранение устойчивости по структурам "2" и "1". Ресурсы времени на их осуществление составляют: на третьем энергетическом уровне:  $(T_3 - T_B)$ , на втором –  $(T_2 - T_B)$ , на первом –  $(T_1 - T_B)$ . В основу построения, в общем случае иерархического, управления для обеспечения динамической устойчивости переходного процесса при рассматриваемой аварии можно положить временные и пространственные соотношения между развитием неустойчивости по разным структурам. На верхних уровнях иерархии оказываются управления, ориентированные на медленно развивающиеся типы (структуры) неустойчивости, как правило, содержащие динамические подсистемы наибольших пространственных масштабов. Нижние уровни иерархии предназначены для предотвращения быстро развивающихся процессов нарушения устойчивости по структурам неустойчивости с динамическими подсистемами меньшего масштаба, являющиеся частями подсистем из верхних уровней иерархии.

Таким образом, единообразие физических характеристик неустойчивого движения, достигаемое при его энерговременном описании, позволяет формировать ансамбль аварийных ситуаций, сопровождающихся нарушениями

устойчивости, из однотипных, сопоставимых между собой записей. Кластерный анализ этого ансамбля по различным задаваемым признакам позволяет исследовать архитектуру неустойчивых движений сложной энергосистемы.

#### **4.2 Идентификация распада синхронизма при конкретных аварийных ситуациях**

Численное интегрирование уравнений электромеханического переходного процесса энергосистемы при рассматриваемом возмущении дает совокупность изменяющихся во времени режимных параметров системы (поле траекторий элементов системы). Эти траектории, удовлетворяющие уравнениям движения, можно назвать *действительными*. Суждения об устойчивости динамического перехода и о структуре развивающегося асинхронного хода необходимо делать на базе анализа этих траекторий.

Идентификация нарушения динамической устойчивости с последующим развитием асинхронного хода и определение положения его сечения должна производиться автоматически. Алгоритмы такого анализа должны быть встроены в программу расчета переходного процесса. По сути, эти алгоритмы должны определять основные черты (характеристики) процесса распада синхронной работы энергосистемы при данном возмущении (если нарушение устойчивости происходит). Характеристиками процесса распада могут выступать: время, по истечении которого в системе развивается асинхронный ход, сечение асинхронного хода (или сечения при многочастотном асинхронном ходе), избыток кинетической энергии, обусловивший развитие асинхронного хода по данному сечению и др. Если устойчивость сохраняется, то алгоритм должен позволять установить это также автоматически.

### 4.2.1 Выявление неустойчивой пары

Для колебательных структур без колец разрыв любой межсистемной связи приводит к делению системы на две части, которые в свою очередь могут рассматриваться как подсистемы, между которыми возможно развитие асинхронного хода (возможные структуры неустойчивости). Внутри кольца деление на две части происходит при разрыве двух межсистемных связей. Для идентификации неустойчивости (установления факта нарушения устойчивости и определения сечения асинхронного хода) необходимо выделить межсистемную связь (межсистемные связи) колебательной структуры, по которой (которым) собственно и происходит развитие асинхронного хода.

Для выделения такой связи можно воспользоваться вычислениями изменений взаимных углов между *смежными подсистемами* колебательной структуры. Для смежных подсистем,  $s$ -ой и  $m$ -ой, изменение взаимного угла  $\Delta\delta_{sm}(t, t_0)$  на интервале  $(t_0-t)$  определяется как:

$$\Delta\delta_{sm}(t, t_0) = \Delta\delta_{s0}(t, t_0) - \Delta\delta_{m0}(t, t_0) = \frac{\sum_{k_s} J_k [\delta_{2k}(t) - \delta_{2k}(t_0)]}{J_s} - \frac{\sum_{k_m} J_k [\delta_{2k}(t) - \delta_{2k}(t_0)]}{J_m}, \quad (4.1)$$

где  $k_s$  и  $k_m$  – множества генераторных узлов  $s$ -ой и  $m$ -ой подсистем. При этом выявление межсистемной связи, по которой возникает асинхронный ход, можно проводить по признаку:

$$|\Delta\delta_{sm}(t, t_0)| \geq 180^\circ. \quad (4.2)$$

Если отключение выявленной межсистемной связи приводит к делению системы на две отдельные части, то определение сечения асинхронного хода на этом завершается. При наличии колец такого деления может не происходить. В этом случае проверка выполнения соотношения (4.2) по другим межсистемным связям должна продолжаться, с проверкой деления системы на две части при каждом выполнении (4.2) хотя бы для одной вновь определенной из них. Завершение определения сечения асинхронного хода происходит при

установлении факта деления системы на две части совокупностью межсистемных связей, для которых одновременно выполняются соотношения (4.2).

Практические расчеты показывают, что колебательные структуры по смещениям, возникающие в системе *непосредственно перед асинхронным* ходом и на начальной стадии его развития, предельно упрощаются. Часто их размерность равна двум, более редки структуры с тремя и четырьмя подсистемами (образующим звездообразную структуру). Случаи кольцевых образований вообще *пока не наблюдались*.

Кроме нарушений устойчивости с асинхронным ходом по некоторому сечению системы возможны случаи развития асинхронного режима отдельной синхронной машины. При этом центр качаний заведомо находится внутри машины. Выявить такие ситуации можно на основе расчета изменений на интервале  $(t_0-t)$  угловых смещений роторов синхронных машин относительно векторов напряжения на их шинах (т.е. изменений внутренних углов  $\Delta\delta_{\text{вн}}(t, t_0)$ ).

$$\Delta\delta_{\text{вн}}(t, t_0) = \Delta\delta_{\text{сi0}}(t, t_0) - \Delta\delta_{\text{i0}}(t, t_0) = [\delta_{\text{сi}}(t) - \delta_{\text{сi}}(t_0)] - [\delta_{\text{i}}(t) - \delta_{\text{i}}(t_0)]. \quad (4.3)$$

Идентификация неустойчивости может проводиться по соотношению аналогичному (4.2).

В соответствии с описанным алгоритмом идентификации неустойчивости между двумя непосредственно связанными подсистемами колебательной структуры, сформировавшейся в системе к моменту нарушения устойчивости, начинается развитие асинхронного хода, сопровождающееся нарастанием их взаимного углового смещения. Назовем такую пару подсистем *неустойчивой парой* (НП).

В зависимости от количества подсистем колебательной структуры НП может охватывать часть системы или всю систему в целом. Последнее имеет место при числе подсистем колебательной структуры равном 2. Для упрощения записи будем полагать, что подсистемы, входящие в НП, имеют номера 1 и 2.

#### 4.2.2 Силовые и энергетические соотношения для неустойчивой пары

Определим относительную скорость центра инерции подсистемы, содержащей обе подсистемы НП, относительно центра инерции системы  $\Delta\Omega_{(1+2)0}$  на основе соотношения:

$$J_1\Delta\Omega_{10} + J_2\Delta\Omega_{20} = (J_1 + J_2)\Delta\Omega_{(1+2)0}. \quad (4.4)$$

Если в колебательной структуре всего 2 подсистемы, то  $\Delta\Omega_{(1+2)0} = 0$ . В любом другом случае эта относительная скорость не равна нулю. По сути, введена подсистема, состоящая из двух подсистем НП, образованная их слиянием. Отклонения скоростей подсистем от скорости собственного центра инерции НП  $\Delta\Omega_{1(1+2)}$  и  $\Delta\Omega_{2(1+2)}$  равны:

$$\Delta\Omega_{1(1+2)} = \Delta\Omega_{10} - \Delta\Omega_{(1+2)0}, \quad (4.5)$$

$$\Delta\Omega_{2(1+2)} = \Delta\Omega_{20} - \Delta\Omega_{(1+2)0}, \quad (4.6)$$

где  $\Delta\Omega_{(1+2)0}$  – отклонение скорости центра инерции НП относительно центра инерции системы;  $J_1$  и  $J_2$  – моменты инерции подсистем 1 и 2 соответственно;  $\Delta\Omega_{1(1+2)}(t)$  и  $\Delta\Omega_{2(1+2)}(t)$  – отклонения скоростей первой и второй подсистемы НП соответственно относительно центра инерции НП;  $\Delta\Omega_{10}(t)$  и  $\Delta\Omega_{20}(t)$  – отклонения скоростей первой и второй подсистем НП соответственно относительно центра инерции системы.

Для этих отклонений скорости будет всегда выполняться соотношение:

$$J_1\Delta\Omega_{1(1+2)} + J_2\Delta\Omega_{2(1+2)} = 0. \quad (4.7)$$

Уравнение движения собственного центра инерции НП относительно центра инерции системы:

$$(J_1 + J_2) \frac{d(\Delta\Omega_{(1+2)0})}{dt} = \Delta M_1 + \Delta M_2 - \frac{J_1 + J_2}{J_s} \Delta M_s. \quad (4.8)$$

Два уравнения движения подсистем НП относительно её собственного центра инерции будут иметь вид:

$$J_1 \frac{d(\Delta\Omega_{1(1+2)})}{dt} = \frac{\Delta M_1 J_2 - \Delta M_2 J_1}{J_1 + J_2} = \Delta M_{1(1+2)}, \quad (4.9)$$

$$J_2 \frac{d(\Delta\Omega_{2(1+2)})}{dt} = \frac{\Delta M_2 J_1 - \Delta M_1 J_2}{J_1 + J_2} = \Delta M_{2(1+2)}, \quad (4.10)$$

где  $\Delta M_1$  и  $\Delta M_2$  – абсолютные избыточные моменты подсистем 1 и 2,  $\Delta M_1 = \sum_{k_1} \Delta M_k$ ,  $\Delta M_2 = \sum_{k_2} \Delta M_k$ ,  $\Delta M_k = \frac{\Delta P_k}{\Omega_{zk}}$ ,  $\Delta P_k$  – избыточная мощность на валу машины,  $k_1$ ,  $k_2$  – множества узлов, входящих в 1 и 2 подсистемы,  $\Delta M_{1(1+2)}$  и  $\Delta M_{2(1+2)}$  – относительные избыточные моменты подсистем 1 и 2, определяющие их относительные движения около собственного центра инерции НП, причем  $\Delta M_{1(1+2)} + \Delta M_{2(1+2)} = 0$ .

Кинетическая энергия региональных колебаний  $K_{pez(1+2)}$  НП определяется как сумма кинетической энергии двух подсистем:

$$K_{pez(1+2)} = J_1 \frac{\Delta\Omega_{10}^2}{2} + J_2 \frac{\Delta\Omega_{20}^2}{2} = (J_1 + J_2) \frac{\Delta\Omega_{(1+2)0}^2}{2} + J_1 \frac{\Delta\Omega_{1(1+2)}^2}{2} + J_2 \frac{\Delta\Omega_{2(1+2)}^2}{2}. \quad (4.11)$$

Видно, что часть кинетической энергии связана с общим движением НП, а также имеется составляющая, определяемая *внутренними региональными колебаниями подсистем НП около её собственного центра инерции*  $K_{вн(1+2)}$ :

$$K_{вн(1+2)} = J_1 \frac{\Delta\Omega_{1(1+2)}^2}{2} + J_2 \frac{\Delta\Omega_{2(1+2)}^2}{2}. \quad (4.12)$$

Так как отклонения скоростей  $\Delta\Omega_{1(1+2)}$  и  $\Delta\Omega_{2(1+2)}$  в любой момент времени связаны соотношением:

$$\Delta\Omega_{2(1+2)} = -\frac{J_1}{J_2} \Delta\Omega_{1(1+2)}, \quad (4.13)$$

то составляющую региональных внутренних колебаний НП можно определить и так:

$$K_{\text{вн}(1+2)} = J_1 \frac{\Delta\Omega_{1(1+2)}^2}{2} \left( \frac{J_1 + J_2}{J_2} \right). \quad (4.14)$$

Из уравнений движения подсистем НП относительно её собственного центра инерции следует, что изменение этой составляющей кинетической энергии определяется интегралами мощностей процессов взаимопревращения кинетической энергии и работы. Так как  $\Delta M_{2(1+2)} = -\Delta M_{1(1+2)}$ , то:

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^t dK_{\text{вн}(1+2)} &= \int_{t_0}^t \Delta M_{1(1+2)} \Delta\Omega_{1(1+2)} dt + \int_{t_0}^t \Delta M_{2(1+2)} \Delta\Omega_{2(1+2)} dt = \\ &= \int_{t_0}^t \Delta M_{1(1+2)} (\Delta\Omega_{1(1+2)} - \Delta\Omega_{2(1+2)}) dt. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Или, иначе, изменение кинетической энергии равно сумме интегралов работ относительных моментов:

$$\int_{t_0}^t dK_{\text{вн}(1+2)} = \int_{\Delta\delta_{1(1+2)}(t_0)}^{\Delta\delta_{1(1+2)}(t)} \Delta M_{1(1+2)} d(\Delta\delta_{1(1+2)}) + \int_{\Delta\delta_{2(1+2)}(t_0)}^{\Delta\delta_{2(1+2)}(t)} \Delta M_{2(1+2)} d(\Delta\delta_{2(1+2)}) \quad (4.16)$$

на смещениях подсистем относительно собственного центра инерции НП. Обозначив  $\Delta\Omega_{12} = \Delta\Omega_{1(1+2)} - \Delta\Omega_{2(1+2)}$  вместо двух интегралов можно ограничиться одним интегралом работы избыточного относительного момента  $\Delta M_{1(1+2)}$  на взаимном перемещении подсистем НП:

$$\int_{t_0}^t dK_{\text{вн}(1+2)} = \int_{\Delta\delta_{12}(t_0)}^{\Delta\delta_{12}(t)} \Delta M_{1(1+2)} d(\Delta\delta_{12}), \quad (4.17)$$

где  $d(\Delta\delta_{12}) = \Delta\Omega_{12} dt$ . К аналогичным энергетическим соотношениям приводит известный прием преобразования дифференциальных уравнений относительного движения, применённый для НП. Первое из них умножается на  $J_2$ , второе на  $J_1$ , затем из первого вычитается второе. Так как

$\Delta M_{2(1+2)} = -\Delta M_{1(1+2)}$ , то получим *одно* дифференциальное уравнение *взаимного движения* подсистем:

$$\frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2} \frac{d(\Delta\Omega_{1(1+2)} - \Delta\Omega_{2(1+2)})}{dt} = \frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2} \frac{d(\Delta\Omega_{12})}{dt} = \Delta M_{1(1+2)}. \quad (4.18)$$

Избыточный момент в правой части, определяющий *взаимное движение* подсистем, *совпадает* с избыточным моментом, действующим на первую подсистему в её *относительном движении около собственного центра инерции* НП. Величина  $J_{\text{вз}} = \frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2}$  – *момент инерции взаимного движения* (в литературе, приведенный момент инерции). Переход к описанию взаимного движения подсистем НП сводит задачу к *одномерной задаче исследования устойчивости движения синхронной машины с моментом инерции  $J_{\text{вз}}$  при действии на неё избыточного момента  $\Delta M_{1(1+2)}$ , определяющего движение подсистем около собственного центра инерции НП. Кинетическая энергия взаимного движения, описываемого этим уравнением:  $J_{\text{вз}} \frac{\Delta\Omega_{12}^2}{2}$ . Оказывается, что при учете приведённого выше соотношения между  $\Delta\Omega_{1(1+2)}$  и  $\Delta\Omega_{2(1+2)}$ , эта кинетическая энергия равна  $K_{\text{вн}(1+2)}$ :*

$$J_{\text{вз}} \frac{\Delta\Omega_{12}^2}{2} = J_1 \frac{\Delta\Omega_{1(1+2)}^2}{2} \left( \frac{J_1 + J_2}{J_2} \right) = K_{\text{вн}(1+2)}. \quad (4.19)$$

где  $K_{\text{вн}(1+2)}(t)$  – кинетическая энергия *регионального движения* НП относительно её *собственного центра инерции*;  $\Delta\Omega_{12}(t)$  – отклонение *взаимной скорости* первой и второй подсистем НП. *Т.е., кинетическая энергия взаимного движения подсистем НП равна суммарной кинетической энергии колебаний подсистем НП относительно её собственного центра инерции.*

Заметим, что тот же прием, применённый к уравнениям движения подсистем НП относительно *центра инерции системы*, даёт соотношение:



$$J_1 J_2 \frac{d(\Delta\Omega_{10} - \Delta\Omega_{20})}{dt} = J_1 J_2 \frac{d(\Delta\Omega_{12})}{dt} = J_2 \Delta M_{10} - J_1 \Delta M_{20} = J_2 \Delta M_1 - J_1 \Delta M_2, \quad (4.20)$$

которое, после деления правой и левой части на  $J_1 + J_2$ , становится тем же дифференциальным уравнением взаимного движения:

$$\frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2} \frac{d(\Delta\Omega_{12})}{dt} = \frac{J_2 \Delta M_1 - J_1 \Delta M_2}{J_1 + J_2} = \Delta M_{1(1+2)}, \quad (4.21)$$

совпадающим с приведенным выше. Понятно, что это совпадение связано с тем, что разница скоростей подсистем не зависит от того общего, относительно чего они измеряются:

$$\Delta\Omega_{12} = \Delta\Omega_{1(1+2)} - \Delta\Omega_{2(1+2)} = \Delta\Omega_{10} - \Delta\Omega_{20}. \quad (4.22)$$

То же относится и к взаимному угловому смещению подсистем НП на интервале  $(t_0, t)$   $\Delta\delta_{12}(t, t_0)$ , которое можно вычислить так:

$$\Delta\delta_{12}(t, t_0) = \Delta\delta_{10}(t, t_0) - \Delta\delta_{20}(t, t_0) = \frac{\sum_{k_1} J_k [\delta_{ck}(t) - \delta_{ck}(t_0)]}{J_1} - \frac{\sum_{k_2} J_k [\delta_{ck}(t) - \delta_{ck}(t_0)]}{J_2}. \quad (4.23)$$

где  $\delta_{ck}$  – угловое смещение генераторов. Кроме регионального движения подсистем НП синхронные машины этих подсистем участвуют в локальных колебаниях, описываемых дифференциальными уравнениями их движения относительно центра инерции подсистемы, в которую они входят:

$$\Delta\Omega_{1(1+2)} = \Delta\Omega_{10} - \Delta\Omega_{(1+2)0}, \quad (4.24)$$

$$J_k \frac{d(\Delta\Omega_{ck1})}{dt} = \Delta M_k - \frac{J_k}{J_1} \Delta M_1 = \Delta M_{k1}, \quad (4.25)$$

$$J_k \frac{d(\Delta\Omega_{ck2})}{dt} = \Delta M_k - \frac{J_k}{J_2} \Delta M_2 = \Delta M_{k2}, \quad (4.26)$$

$$\Delta\Omega_{ck1}(t) = \Omega_{ck}(t) - \Omega_{10}(t) = \Delta\Omega_{ck0}(t) - \Delta\Omega_{10}(t), \quad (4.27)$$

$$\Delta\Omega_{ck2}(t) = \Omega_{ck}(t) - \Omega_{20}(t) = \Delta\Omega_{ck0}(t) - \Delta\Omega_{20}(t), \quad (4.28)$$

$\Omega_{ck}(t_{kp})$  – скорость движения генератора в абсолютном выражении;  $\Delta\Omega_{ck0}(t_{kp})$  – изменение скорости генератора относительно центра инерции системы.

Величины  $\Delta M_{k_1}, \Delta M_{k_2}$  представляет собой избыточные моменты, определяющие относительные движения синхронных машин около центра инерции подсистем.

Кинетическая энергия локальных колебаний внутри подсистем:

$$K_{лок1}(t) + K_{лок2}(t) = \sum_{k_1} J_k \frac{\Delta \Omega_{zk1}^2(t)}{2} + \sum_{k_2} J_k \frac{\Delta \Omega_{zk2}^2(t)}{2}, \quad (4.29)$$

В каждой подсистеме будут присутствовать синхронные машины, скорости вращения которых будут либо больше, либо меньше скорости перемещения центра инерции подсистемы. Это означает, что эти подсистемы, вообще говоря, также можно разбить на отдельные части. Ограничимся разбиением синхронных машин подсистем на две группы, опережающие и отстающие от центра инерции подсистемы, не решая топологическую проблему пространственной конфигурации (структуры) движения внутри подсистемы. Тогда величины  $K_{лок1}(t)$  и  $K_{лок2}(t)$  можно представить в виде сумм:

$$K_{лок1}(t) = K_{лок1}^+(t) + K_{лок1}^-(t) = \sum_{k_1, \Delta \Omega_{zk1}(t) > 0} J_k \frac{\Delta \Omega_{zk1}^2(t)}{2} + \sum_{k_1, \Delta \Omega_{zk1}(t) < 0} J_k \frac{\Delta \Omega_{zk1}^2(t)}{2}, \quad (4.30)$$

$$K_{лок2}(t) = K_{лок2}^+(t) + K_{лок2}^-(t) = \sum_{k_2, \Delta \Omega_{zk2}(t) > 0} J_k \frac{\Delta \Omega_{zk2}^2(t)}{2} + \sum_{k_2, \Delta \Omega_{zk2}(t) < 0} J_k \frac{\Delta \Omega_{zk2}^2(t)}{2}, \quad (4.31)$$

*собирающих в одном слагаемом синхронные машины, опережающие по скорости центр инерции подсистемы, а в другом – машины, отстающие от него.*

Таким образом, колебания подсистем неустойчивой пары относительно её центра инерции описывается соотношениями, внешне сходными с аналогичными соотношениями для простой двухмашинной схемы. Отличие сводится к тому, что *избыточный момент, определяющий взаимное движение подсистем, зависит от полных траекторий движения (региональных плюс локальных) синхронных машин всей системы (как вне, так и внутри неустойчивой пары, а не только от регионального взаимного смещения*

$\Delta\delta_{12}(t, t_0)$ , как это было бы для простой двухмашинной схемы). В частности, влияние остальной части системы, окружающей неустойчивую пару, проявляется в изменении скорости движения её собственного центра инерции и в величинах избыточных моментов  $\Delta M_1$  и  $\Delta M_2$ .

При анализе устойчивости и выборе управления на основе метода площадей и использовании представления о неустойчивой паре *нет необходимости обращаться к глобальной схеме замещения, состоящей из двух, полностью охватывающих систем частей, примыкающих к сечению асинхронного хода и колеблющихся относительно общесистемного центра инерции*. Глобальное представление, с аналогичной по характеру зависимостью действующего взаимного момента от полных траекторий движения синхронных машин всей системы, в этом отношении качественно не отличается от схемы замещения, составленной из двух подсистем неустойчивой пары.

#### **4.2.3 Энергетические соотношения около вершины потенциального барьера для региональных движений**

*Недостаточность отрицательной работы, совершаемой при взаимном движении подсистем неустойчивой пары (недостаточная глубина потенциальной ямы или, иначе, недостаточная высота потенциального барьера), выступает физической причиной развития асинхронного хода*. Ограниченная (не бесконечная) высота потенциального барьера приводит к тому, что, при достаточно большой кинетической энергии колебаний подсистем НП, они достигают в своём перемещении его вершины с непогашенной относительной скоростью, переваливают через неё, и продолжают движение уже в сторону понижения потенциальной энергии, всё более и более удаляясь от первоначального положения равновесия. Количественной оценкой недостаточности высоты потенциального барьера может выступать величина непогашенной (не превращенной в отрицательную работу и не запасенной в

системе потенциальной энергии) *избыточной кинетической энергии  $K_{изб}$* , которой обладают подсистемы НП *в момент перевала через его вершину*.

При выходе на вершину потенциального барьера изменения смещений, обусловленных взаимным региональным движением подсистем, уменьшаются. Так как моменты, определяющие региональные движения зависят как от региональных, так и локальных перемещений не только подсистем НП, но и других, окружающих её подсистем, то в окрестности вершины потенциального барьера значимость локальных колебаний НП и внешних движений возрастает. Можно говорить, что высота потенциального барьера изменяется локальными колебаниями НП и внешними движениями. Энергетической характеристикой этих изменений выступают колебания региональной кинетической энергии НП на вершине (окрестности вершины) потенциального барьера, а также кинетическая энергия локальных колебаний НП.

Это означает, что задача управления по обеспечению устойчивости, сводимая к анализу энергетических соотношений для региональных движений только двух подсистем (на участках траектории, удалённых от вершины), осложняется при прохождении вершины потенциального барьера. Можно представить подход, позволяющий в этих условиях решать задачи устойчивости. Он состоит в выборе управляющих воздействий, обеспечивающих устойчивость регионального движения, с некоторым *запасом путем отступа от вершины* потенциального барьера на величину, определяемую энергетическими характеристиками изменчивости высоты потенциального барьера. При этом управление должно обеспечивать достаточную удалённость траекторий регионального движения от вершины потенциального барьера, т.е. от *критического смещения*. Величина критического смещения должна определяться с учетом изменчивости, определяемой внешними движениями и локальными колебаниями.

Для этого необходимо предложить алгоритмы фиксации критического смещения и алгоритм определения закладываемого запаса. Определение

момента времени, в который региональное движение максимально исчерпывает возможность совершения отрицательной работы, можно основать на определении моментов времени, в которые отклонения региональной скорости ускоряющейся, после нарушения устойчивости, подсистемы от скорости движения центра инерции пары достигают минимума, с последующим выбором того из них, в котором кинетическая энергия регионального движения минимальна. В момент достижения критического регионального смещения между подсистемами НП можно определить их региональную  $K_{\text{вн}(1+2)}(t_{\text{кр}})$  и локальную кинетическую энергию. При этом целесообразно выделить только ту составляющую локальной кинетической энергии, которая связана с локальным движением синхронных машин в подсистемах, происходящих в ту же сторону, что и движение подсистемы, в которую они входят. Если ускоряющаяся после нарушения устойчивости подсистема имеет номер 1, то эта составляющая локальной кинетической энергии определится как  $K_{\text{лок1}}^+(t_{\text{кр}}) + K_{\text{лок2}}^-(t_{\text{кр}})$ :

$$K_{\text{лок1}}^+(t_{\text{кр}}) = \sum_{k_1, \Delta\Omega_{\text{zk1}}(t_{\text{кр}}) > 0} J_k \frac{\Delta\Omega_{\text{zk1}}^2(t_{\text{кр}})}{2}, \quad (4.32)$$

$$K_{\text{лок2}}^-(t_{\text{кр}}) = \sum_{k_2, \Delta\Omega_{\text{zk2}}(t_{\text{кр}}) < 0} J_k \frac{\Delta\Omega_{\text{zk2}}^2(t_{\text{кр}})}{2}. \quad (4.33)$$

Пусть  $K_{\text{вн}(1+2)}(t_{\text{кр}})$  равна нулю, т.е. региональные движения НП имеет точку останова в момент  $t_{\text{кр}}$ . При этом  $K_{\text{лок1}}^+(t_{\text{кр}}) + K_{\text{лок2}}^-(t_{\text{кр}})$  будет равна нулю только при полном отсутствии локальных движений, что возможно в случае, когда обе подсистемы содержат по одной синхронной машине. Величину  $K_{\text{лок1}}^+(t_{\text{кр}}) + K_{\text{лок2}}^-(t_{\text{кр}})$  можно полагать как *неопределенность вычисления*  $K_{\text{вн}(1+2)}(t_{\text{кр}})$ . Это значит, что для исключения влияния локальных движений при управлении с целью обеспечения устойчивости, величина  $K_{\text{изб}}$

не должна приниматься равной нулю из-за равенства нулю  $K_{вн(1+2)}(t_{кр})$ . Её следует выбрать равной  $K_{лок1}^+(t_{кр}) + K_{лок2}^-(t_{кр})$ . Если  $K_{вн(1+2)}(t_{кр})$  не равна нулю, то  $K_{изб}$  можно выбирать, например, так:

$$K_{изб} = \max(K_{вн(1+2)}(t_{кр}), K_{лок1}^+(t_{кр}) + K_{лок2}^-(t_{кр})). \quad (4.34)$$

### 4.3 Метод выбора корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости

Автоматика предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) в послеаварийных режимах ориентирована на выбор управляющих воздействий, обеспечивающих (для заданного набора аварийных ситуаций) существование послеаварийного режима с запасом статической устойчивости, не меньшим заданного [5]. При этом предполагается, что динамический переход к послеаварийному режиму устойчив, и, следовательно, возможен без дополнительных мероприятий. Однако, в общем случае, необходимо удостовериться в динамической устойчивости переходного процесса, завершающегося установлением послеаварийного режима. При нарушении устойчивости в динамическом переходе необходимо ввести дополнительное управление, которое в совокупности с управлением, обеспечивающим существование послеаварийного режима с допустимым запасом, позволит его действительно осуществить.

Основные факторы, определяющие возможность нарушения динамической устойчивости управляемого АПНУ перехода к послеаварийному режиму, устойчивому по статике, связаны с недостаточностью работы, совершаемой в энергосистеме при торможении относительно движущихся объектов в ней. Дефицит работы торможения (более точно – отрицательной работы, обеспечивающей снижение кинетической энергии колебаний) может быть связан с:

- недостаточной работой торможения в первом цикле качаний даже при отсутствии необходимости ввода управления, обеспечивающего статическую устойчивость послеаварийного режима с запасом не ниже заданного;
- запаздыванием ввода управляющих воздействий;
- дополнительными (проходящими) возмущениями (например, короткими замыканиями), увеличивающими кинетическую энергию колебаний в переходном процессе, которые не могут быть учтены при выборе управления, обеспечивающего статическую устойчивость послеаварийного режима;
- недостаточными работами торможения во втором или последующих циклах качаний.

При выборе управления АПНУ послеаварийного режима по способу 1-ДО используется математическая модель стационарных состояний энергосистемы. Для анализа устойчивости динамических переходов, проводимого в рамках функционирования АПНУ по способу 1-ДО, необходимо применять динамическую математическую модель энергосистемы.

Для сформированных схемно-режимных условий вводится возмущение и управляющие воздействия, выбранные по условию обеспечения нормированного запаса по статической устойчивости в послеаварийном режиме. Производится расчет переходного процесса с вводом найденных управляющих воздействий. В случае идентификации неустойчивого переходного процесса определяются сечение асинхронного хода и дополнительные управляющие воздействия. Расчет переходного процесса повторяется с целью проверки результативности управления.

Корректирующее управление по динамической устойчивости подразумевает уже определенные объем и место управляющих воздействий по условию обеспечения статической устойчивости и допустимой токовой загрузки силового оборудования. То есть известно время ввода управляющих воздействий  $t_{yc}$ , обеспечивающих послеаварийную статику и их место реализации.

Выделение неустойчивой пары снижает размер рассматриваемой модели энергосистемы до двух подсистем. При этом часть системы, не входящая в НП, не отбрасывается, так как учитывается в движении центра инерции системы и центра инерции НП. В случае недостаточности управляющих воздействий возможна коррекция НП (путем слияния с другими подсистемами) вплоть до объединения всей энергосистемы в две подсистемы относительно сечения нарушения устойчивости.

После определения неустойчивой пары становится известным время идентификации неустойчивости  $t_{ин}$ . Здесь под временем  $t_{ин}$  понимается время фиксации факта нарушения динамической устойчивости по критерию расхождения взаимного угла двух подсистем более чем на  $180^0$ . Основные этапы алгоритма описаны ниже.

*1. Определение отклонения скоростей подсистем НП от её собственного центра инерции  $\Delta\Omega_{1(1+2)}(t)$  и  $\Delta\Omega_{2(1+2)}(t)$  в моменты  $t_{ин}$  и  $t_{yc}$  проводятся по выражениям (4.4–4.6):*

Далее будем полагать подсистему с положительным отклонением скорости в момент  $t_{ин}$  под номером 1, а с отрицательным – под номером 2.

*2. Определение цикла качаний, в котором зафиксировано нарушения устойчивости по критерию:*

$\Delta\Omega_{1(1+2)}(t_{ин})\Delta\Omega_{1(1+2)}(t_{yc}) > 0$  – нарушение устойчивости в нечетном цикле качаний,

$\Delta\Omega_{1(1+2)}(t_{ин})\Delta\Omega_{1(1+2)}(t_{yc}) < 0$  – нарушение устойчивости в четном цикле качаний.

*3. Определение времён изменения знака относительного момента.*

Проводится путем анализа его значений в различные моменты времени  $t_v$  на различных шагах интегрирования ( $V$  – номер шага интегрирования):

$$\Delta M_{1(1+2)}(t_v) = \frac{\Delta M_1(t_v)J_2 - \Delta M_2(t_v)J_1}{J_1 + J_2} \quad (4.35)$$



где  $\Delta M_{1(1+2)}(t_v)$  – избыточный момент первой подсистемы НП относительно центра инерции НП;  $\Delta M_1(t_v)$  и  $\Delta M_2(t_v)$  – избыточные моменты первой и второй подсистем НП соответственно в абсолютном выражении.

Выполнение неравенства  $\Delta M_{1(1+2)}(t_v)\Delta M_{1(1+2)}(t_{v+1}) < 0$  влечет внесение момента  $t_v$  в список времён изменения знака. При этом в обозначенном списке должны различаться случаи изменений знака с минуса на плюс (моменты наступления минимума отклонения скорости  $\Delta\Omega_{1(1+2)}$ ) и с плюса на минус (моменты наступления максимума отклонения скорости  $\Delta\Omega_{1(1+2)}$ ).

Определение моментов изменения знака избыточного момента проводится на интервале  $(0-t_{ин})$  (время, равное 0 – время аварии). Получение пустого множества времён изменения знака обозначает либо отсутствие послеаварийного режима, либо чрезмерно позднее введение управления по обеспечению его существования.

В результате получено множество возрастающих значений времён изменения знака момента  $t_{изм.зн}^k$  ( $k$  – номер элемента множества) и признаков минимума или максимума отклонений скорости в эти моменты времени.

*4. Расчет значений отклонений скорости и кинетической энергии регионального движения НП относительно её собственного центра инерции в моменты  $t_{изм.зн}^k$ .*

Проводится по выражениям (4.5, 4.19, 4.22) и формуле:

$$\Delta\Omega_{1(1+2)0}(t) = \frac{J_1\Delta\Omega_{10}(t) + J_2\Delta\Omega_{20}(t)}{J_1 + J_2}. \quad (4.36)$$

Если все  $\Delta\Omega_{1(1+2)0}(t)$  на не пустом множестве  $t_{изм.зн}^k$  положительны, то нарушение устойчивости происходит в 1 цикле качаний.

*5. Определение времени наступления критического смещения  $t_{кр}$ .*

Проводится путем анализа значений  $K_{вн(1+2)}(t)$  на множестве  $t_{изм.зн}^k$ . Для этого,

начиная с последнего элемента множества, пошагово перемещаясь к его началу (движение в сторону уменьшения времени), определяется момент времени, в который кинетическая энергия достигает минимума в точках минимума отклонения скорости (что показывает состояния максимального торможения подсистем без ввода корректирующих управляющих воздействий). Дополнительно, контролируется знак углового смещения между ускоряющейся и замедляющейся подсистемами  $\Delta\delta_{12}$ , который должен быть положительным. В частности, это может быть и для последнего элемента множества  $t_{изм.зн}^k$ .

### 6. Определение избыточной кинетической энергии $K_{изб}$ .

Проводится после сопоставления величин  $K_{вн(1+2)}(t_{кр})$  и  $K_{лок1}^+(t_{кр}) + K_{лок2}^-(t_{кр})$ . Слагаемые суммы для локальных колебаний рассчитываются по выражениям (4.27, 4.28) и формулам:

$$K_{лок1}^+(t_{кр}) = \sum_{k_1, \Delta\Omega_{ck1}(t_{кр}) > 0} J_k \frac{\Delta\Omega_{ck1}^2(t_{кр})}{2}, K_{лок2}^-(t_{кр}) = \sum_{k_2, \Delta\Omega_{ck2}(t_{кр}) < 0} J_k \frac{\Delta\Omega_{ck2}^2(t_{кр})}{2}, \quad (4.37)$$

где  $K_{лок1}^+(t_{кр})$  и  $K_{лок2}^-(t_{кр})$  – слагаемые суммы для локальных колебаний генераторов в подсистемах НП;  $\Delta\Omega_{ck1}$  и  $\Delta\Omega_{ck2}$  – изменение скорости генераторов подсистем 1 и 2 соответственно относительно центров инерции подсистем 1 и 2 НП соответственно. Избыточная кинетическая энергия, которую необходимо погасить путем ввода управляющих воздействий определяется по выражению (4.34).

### 7. Определение времени внесения управляющих воздействий для обеспечения динамической устойчивости $t_{уд}$ .

При нарушениях устойчивости в первом цикле качаний необходимо реализовывать УВ максимально быстро. При нарушении устойчивости в последующих циклах качаний управляющие воздействия необходимо реализовывать в те моменты, когда сформировалась наблюдаемая структура нарушения устойчивости.

Более оптимальным выбором времени ввода управляющих воздействий является время ввода, при котором реализуется максимальное угловое смещение  $\Delta\delta_{12}$  и, следовательно, максимальная работа торможения при минимизации объема отключения генерации.

Стоит отметить, что в данной трактовке время ввода управляющих воздействий рассматривается как оптимальное время. При учете дискретизации управляющих воздействий необходимо выбирать ближайшее меньшее к нему. Как следует из многочисленных результатов расчетов устойчивости в рамках ОЭС Сибири, нарушение динамической устойчивости наступает, как правило, в первом цикле качаний.

8. *Определение углового смещения между подсистемами НП на интервале времени от  $t_{y\delta}$  до  $t_{кр} - \Delta\delta_{12}(t_{кр}, t_{y\delta})$ .*

Проводится по выражению (4.23). Расчетное угловое смещение представляет собой путь, проделанный подсистемами НП на котором необходимо реализовать дополнительную работу торможения и компенсировать избыточную кинетическую энергию.

9. *Расчет управляющего воздействия – отключения генераторов в избыточной подсистеме 1.*

Отключение генераторов в избыточной подсистеме приводит к изменению кинетической энергии регионального движения подсистем НП в переходном процессе за счёт двух основных факторов: за счёт изменения (уменьшения) вращающейся массы; за счет изменения площадки торможения (т.е. за счёт увеличения кинетической энергии, преобразуемой в потенциальную).

Оценить первый фактор можно на основе соотношения:

$$\Delta K_{вн(1+2)} = \Delta J_1 \frac{\Delta\Omega(t_{y\delta})_{1(1+2)}^2}{2}, \quad (4.38)$$

где  $\Delta J_1$  – момент инерции отключаемой части генерации,  $\Delta\Omega(t_{y\delta})_{1(1+2)}$  – отклонение скорости выбегающей подсистемы НП относительно её центра инерции в момент ввода корректирующего управления. Или:

$$\Delta K_{\text{вн}(1+2)} = \frac{\Delta J_1}{J_1} J_1 \frac{\Delta\Omega(t_{y\delta})_{1(1+2)}^2}{2} = \frac{\Delta J_1}{J_1} K_{\text{вн}1}(t_{y\delta}) \approx \frac{\Delta P_{m1}}{P_{m1}(t_{y\delta})} K_{\text{вн}1}(t_{y\delta}), \quad (4.39)$$

где  $\Delta P_{m1}$  – отключаемая мощность турбин в «1» подсистеме,  $P_{m1}(t_{y\delta})$  – мощность турбин в «1» подсистеме в момент ввода корректирующего управления,  $K_{\text{вн}1}(t_{y\delta})$  – кинетическая энергия выбегающей подсистемы «1» в тот же момент времени.

Дополнительно преобразуемая (в потенциальную энергию), кинетическая энергия  $\Delta K_{\text{вн}(1+2)}^{\text{ном}}$  оценивается:

$$\begin{aligned} \Delta K_{\text{вн}(1+2)}^{\text{ном}} &\approx \Delta M_{m1(1+2)} \Delta\delta_{12}(t_{кр}, t_{y\delta}) \approx \frac{\Delta M_{m1} J_2}{J_1 + J_2} \Delta\delta_{12}(t_{кр}, t_{y\delta}) \approx \\ &\approx \frac{\Delta P_{m1} J_2}{\Omega_{\text{ном}} (J_1 + J_2)} \Delta\delta_{12}(t_{кр}, t_{y\delta}) \end{aligned}, \quad (4.40)$$

где:  $\Omega_{\text{ном}} = 100\pi$  и  $\Delta\delta_{12}(t_{кр}, t_{y\delta}) \geq 0$ . Тогда, полагая, что:

$$\Delta K_{\text{вн}(1+2)} + \Delta K_{\text{вн}(1+2)}^{\text{ном}} = K_{\text{изб}}, \quad (4.41)$$

определим мощность турбин отключаемых генераторов в выбегающей части системы  $\Delta P_{m1}$ :

$$\Delta P_{m1} \approx \frac{K_{\text{изб}}}{\frac{K_{\text{вн}1}(t_{y\delta})}{P_{m1}(t_{y\delta})} + \frac{J_2}{\Omega_{\text{ном}} (J_1 + J_2)} \Delta\delta_{12}(t_{кр}, t_{y\delta})}. \quad (4.42)$$

Одной из задач выбора управляющих воздействий является минимизация объема при условии их достаточности. Достаточность воздействий численно характеризуется величиной избыточной кинетической энергии  $K_{\text{изб}}$ . Минимизация объема отключения достигается при наибольшем значении знаменателя в выражении (4.42). Это в свою очередь требует выбора момента

ввода управляющих воздействий, в котором обеспечивается суммарный максимум работ торможения и выбывающей из оборота кинетической энергии.

Без учета скачкообразного изменения кинетической энергии системы (первой составляющей) мощность турбин отключаемых генераторов в выбегающей части системы  $\Delta P_{m1}$  определялась бы как:

$$\Delta P_{m1} = \Omega_{ном} \frac{(J_1 + J_2)}{J_2} \frac{K_{изб}}{\Delta \delta_{12}(t_{кр}, t_{y\delta})}. \quad (4.43)$$

#### 10. Распределение управляющего воздействия в избыточной подсистеме.

Распределение проводится между электростанциями, привлечёнными к управлению. Рассчитывается локальная кинетическая энергия управляемых синхронных машин, опережающих центр инерции выбегающей подсистемы 1 в момент ввода управления:

$$K_{лок1y}^+(t_{y\delta}) = \sum_{k_1 \in k_{1y}, \Delta \Omega_{zk1}(t_{y\delta}) > 0} J_k \frac{\Delta \Omega_{zk1}^2(t_{y\delta})}{2}. \quad (4.44)$$

Если  $K_{лок1y}^+(t_{y\delta}) = 0$  (в подсистеме только одна машина) задача распределения не рассматривается. Определяется относительный вклад управляемой и одновременно опережающей машины в эту кинетическую энергию:

$$\mu_k = \frac{J_k \frac{\Delta \Omega_{zk1}^2(t_{y\delta})}{2}}{K_{лок1y}^+(t_{y\delta})}. \quad (4.45)$$

Определяется управляющее воздействие на управляемую и опережающую машину:

$$\Delta P_{m1k} = \mu_k \Delta P_{m1}. \quad (4.46)$$

Если  $\Delta P_{m1k}$  меньше некоторого заданного значения, то это управляющее воздействие переносится на другую машину. Если  $\Delta P_{m1k}$  больше заданного, то управляющее воздействие ограничивается, избыточное управление переносится на другую машину.

Общая структура алгоритма оценки динамической устойчивости энергосистем для заданных схемно-режимных условий и месте возмущения представляется следующим образом. Для сформированных схемно-режимных условий вводится возмущение и управляющие воздействия по условию обеспечения нормированного запаса в послеаварийном режиме. При этом учитывается дискретность ввода найденных управляющих воздействий по шкале времени начиная с момента фиксации факта аварийного события соответствующим пусковым органом противоаварийной автоматики. Далее посредством вышеописанных подходов производится поиск возможных сечений нарушения динамической устойчивости и идентификация характера переходного процесса по выявленным сечениям. В случае идентификации неустойчивого переходного процесса необходима коррекция выбранных управляющих воздействий.

#### **4.4 Расчетный пример выбора управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости энергосистемы**

##### **4.4.1 Алгоритмическая часть методики выбора управляющих воздействий**

Общая структура алгоритма выглядит следующим образом. После получения, тем или иным способом УВ, необходимых для существования послеаварийного режима с заданным запасом по статической устойчивости, производится расчет значения шунта короткого замыкания и выявление доступных для данного пускового органа узлов, в которых может быть осуществлен ввод дополнительных УВ. Далее производится расчет переходного процесса и, при необходимости, расчет дополнительных УВ.

Блок-схема алгоритма взаимодействия блока, осуществляющего выбор УВ по условиям допустимости установившегося режима по способу I-ДО и блока расчета и анализа переходного процесса приведена в приложении Б на рисунке Б.1.

Расчет шунтов короткого замыкания осуществляется приближенным методом с использованием значений остаточного напряжения в точке ввода шунта короткого замыкания. Приближенный метод расчёта шунтов короткого замыкания, при недостаточной точности для релейной защиты, обеспечивает приемлемые результаты для целей анализа динамической устойчивости ЭЭС.

Предлагается следующий алгоритм приближённого расчёта шунтов короткого замыкания для анализа динамической устойчивости ЭЭС:

1. Определение начальных значений переменных (модулей и углов ЭДС генераторов, скольжений асинхронных двигателей и т.д.) в доаварийном режиме.

2. Определение уровня остаточного напряжения (или – выборка его из исходных данных) в узле ввода КЗ.

3. Задание некоторого начального значения проводимости шунта короткого замыкания.

4. Внесение значения проводимости шунта в схему сети.

5. Расчёт режима сети.

6. Удаление значения проводимости шунта из схемы сети.

7. Если достигнута заданная точность отклонения полученного напряжения в узле ввода КЗ от заданного – выход из алгоритма.

8. Корректировка значения проводимости шунта в зависимости от полученного напряжения в узле ввода КЗ.

9. Переход на п. 4.

Блок-схема алгоритма приближённого расчёта шунтов короткого замыкания приведена в приложении Б на рисунке Б.2.

Перед началом расчета переходного процесса производится ввод общих данных для расчета (шаг интегрирования, максимальное время расчета и т.д.), формирование математической модели энергосистемы: рассчитываются начальные значения векторов ЭДС синхронных машин и режимные параметры асинхронных двигателей, заполняется матрица узловых проводимостей схемы сети, необходимая для расчета режима на шаге интегрирования.

В начале каждого шага интегрирования производится расчет режима сети методом Гаусса при текущих значениях ЭДС синхронных машин  $E'$  и скольжений асинхронных двигателей.

Следующий этап – тестирование режима. Если при тестировании режима зафиксирован факт нарушения динамической устойчивости, то при необходимости расчета дополнительных УВ (состав аварийных возмущений и пусковых органов задается оперативно), производится выход из расчета переходного процесса, в противном случае расчет продолжается.

Если текущее время расчета соответствует времени ввода коммутаций (или введения УВ), то вносятся изменения в схему сети (ввод УВ) и расчет режима с новыми параметрами.

В конце шага интегрирования производится интегрирование по методу Эйлера уравнений движения синхронных машин и расчет новых значений ЭДС  $E_{qe}$ ,  $E_q$  и  $E'$ . Блок-схема алгоритма расчета и анализа динамического процесса приведена в приложении Б на рисунке Б.3.

Алгоритм фиксации нарушения динамической устойчивости может быть разделен на несколько этапов:

- определение мгновенного центра углов ЭДС системы;
- выделение областей энергосистемы (в дальнейшем называемых подсистемами) с разнонаправленным движением;
- определение мгновенного центра углов ЭДС каждой из подсистем, при этом, если количество подсистем больше двух, то производится выделение пары подсистем, связанных сечением асинхронного хода. Для каждой пары выделенных подсистем определяется разность углов между их центрами инерции, т.е., фактически, подсистемы отождествляется с некоторым эквивалентным генератором. В случае, если эта разность углов превышает 180 градусов – производится переход к следующему этапу, иначе – выход из алгоритма;



- определение подсистемы с максимальным отклонением угла от мгновенного центра углов системы в целом. В дальнейшем эта подсистема будет называться ведущей;

- если отклонение угла ведущей подсистемы от мгновенного центра углов системы в целом положительно, то для данной подсистемы следует вводить УВ типа ОГ, в противном случае – УВ типа ОН.

Блок-схема алгоритма фиксации нарушения динамической устойчивости представлена в приложении Б на рисунке Б.4.

Алгоритм расчета УВ для сохранения динамической устойчивости энергосистемы можно разделить на несколько этапов:

- определение связей, образующих сечение между выделенными подсистемами;

- определение узлов в ведущей подсистеме, в которых доступен ввод УВ необходимого типа.

Если требуемый узел найден, то производится запоминание номера этого узла и объёма УВ, в противном случае выдаётся соответствующее сообщение и вводится флаг невозможности расчета УВ для сохранения динамической устойчивости энергосистемы.

Блок-схема алгоритма расчета УВ для сохранения динамической устойчивости энергосистемы приведена в приложении Б на рисунке Б.5.

#### **4.4.2 Тестирование метода расчета управляющих воздействий**

На рисунке 4.2 приведен расчет аварии с нарушением динамической устойчивости для системы, содержащей 33 синхронные машины. На этом же рисунке 4.2 отображены некоторые этапы алгоритма выбора управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости, поясняющие процесс поиска избыточной энергии колебаний.

Для сформированных текущих схемно-режимных условий и определенного аварийного возмущения произведен расчет переходного

процесса и введены УВ по условию обеспечения допустимости установившегося режима в момент времени  $t_{yc}$ . В результате расчета получен набор изменения режимных параметров энергосистемы. Применяя описанные в п/п 4.2 выражения, выделяется движение подсистемы НП  $\Delta\Omega_{I(l+2)}$  относительно центра инерции неустойчивой пары. Фиксация нарушения устойчивости происходит по факту превышения взаимного угла больше чем на  $180^0$  в момент  $t_{ин}$ . По рисунку 4.2 очевидно, что нарушение устойчивости происходит во втором цикле качаний. Фиксация изменения знака относительного момента выдает три значения момента времени  $t_{изм}^k$ . Критическое положение НП достигается в момент времени, ближайший к точке фиксации неустойчивого движения. Дополнительно из рисунка видно, что в предполагаемой точке критического положения знак углового смещения не меняется (производная по угловому смещению – скорость  $\Delta\Omega_{I(l+2)}$  не проходит через 0). Поэтому предполагаемая точка критического смещения является искомой точкой, в которой необходимо провести расчет избыточной кинетической энергии колебаний.

Минимум кинетической энергии характеризует критическое положение системы, в котором исчерпаны все ресурсы по торможению. Величина минимума кинетической энергии характеризует необходимый объем управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости.

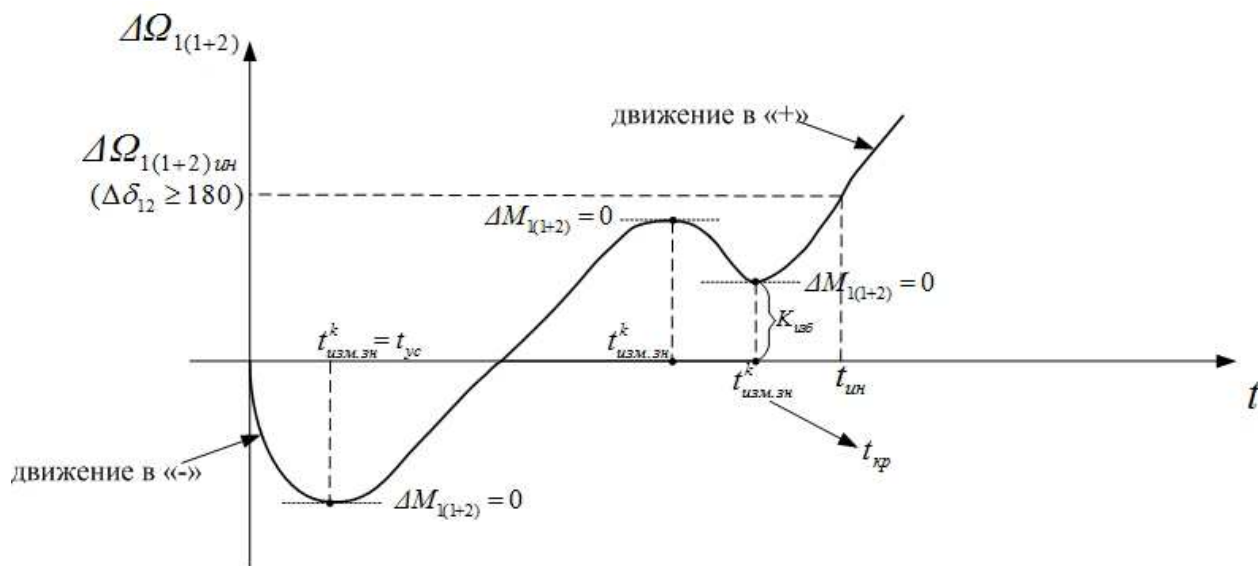


Рисунок 4.2 График изменения отклонения скорости первой подсистемы неустойчивой пары относительно ее центра инерции. Нарушение динамической устойчивости во втором цикле качаний, связанное с региональным движением подсистем

Предложенный алгоритм выбора управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости реализован в современной программной среде (полученный модуль имеет название «Динам»). Для сопоставления результатов расчета переходных процессов произведены расчеты для ОЭС Сибири в рамках ПВК Мустанг, Eurostag и созданном модуле.

Были сформированы следующие схемно-режимные условия и аварийное возмущение: отключение ВЛ 500 кВ Камала-I – Тайшет №1 и №2 вследствие однофазного КЗ вблизи шин 500 кВ ПС Камала-I в схеме ремонта ВЛ 500 кВ Красноярская – Енисей №2 и Енисей – Красноярская ГЭС №2 и Красноярская ГЭС – Назаровская ГРЭС №2. Длительность замыкания принята 100 мс, ввод управляющих воздействий на отключение генераторов с шин 500 кВ Братской ГЭС выполнен через 600 мс с момента ввода КЗ. Переток по сети 500 кВ имеет западное направление.

Загрузка сети 500 кВ и выдача крупных электростанций принята следующая: выдача Богучанской ГЭС 1796 МВт в составе 6-ти генераторов;

выдача Братской ГЭС 2848 МВт в составе 18-ти генераторов; выдача Усть-Илимской ГЭС 2316 МВт в составе 16-ти генераторов; загрузка двух цепей ВЛ 500 Камала-I – Тайшет №1 и №2 составляет 1043 МВт; загрузка ВЛ 500 кВ Ангара – Камала-I составляет 602 МВт; загрузка двух цепей ВЛ 500 кВ Камала-I - Красноярская составляет 1554 МВт.

В сформированных схемно-режимных условиях модуль «Динам» выбрал отключение двух генераторов на БрГЭС. Проверка этого переходного процесса средствами ПВК Мустанг и программой расчета переходного процесса из модуля «Динам» выдали одинаковый результат – устойчивый переходной процесс. В этих случаях была использована упрощенная модель ОЭС Сибири, содержащая в себе 256 узлов с упрощенными моделями регуляторов скорости турбин и возбуждения генераторов. При уменьшении объема УВ на одну степень в обоих случаях получен неустойчивый переходной процесс.

В случае расширения математической модели энергосистемы посредством более разветвленной модели сети (около 2000 узлов) и моделирования подробных моделей регуляторов возбуждения генераторов и скорости турбин получены устойчивые переходные процессы при уменьшенном объеме УВ.

На рисунках 4.3 – 4.7 приняты следующие условные обозначения:

«Динам» – расчет переходного процесса средствами модуля «Динам» по модели ОЭС в 256 узлов с упрощенными моделями регуляторов возбуждения и скорости;

«Мустанг без APB» – использование аналогичной математической модели, но с ее расчетом в ПВК Мустанг;

«Мустанг с APB» и «Eurostag» – расчет переходного процесса средствами ПВК Мустанг и ПВК Eurostag соответственно по полной модели ОЭС (около 2000 узлов) с точным описанием всех регуляторов электростанций.

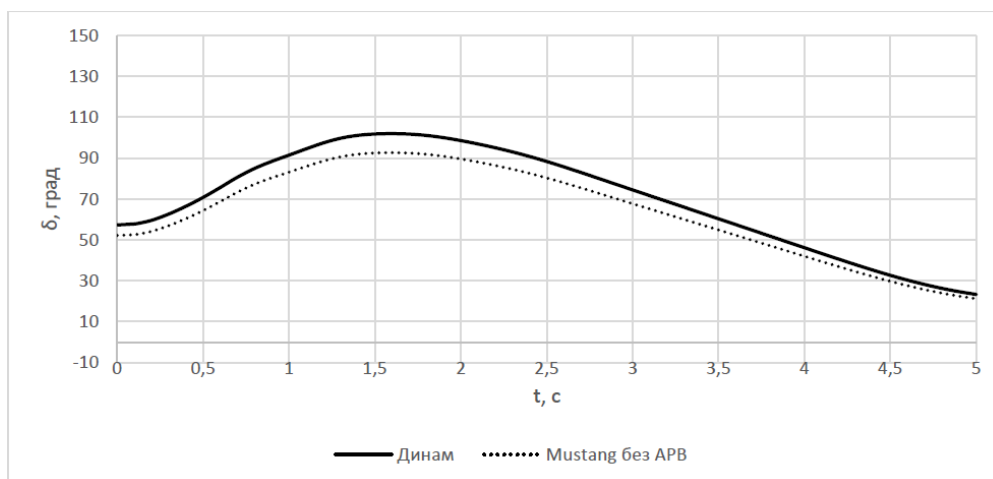


Рисунок 4.3 Угол ГГ-2 БрГЭС с учетом ОГ-2 БрГЭС

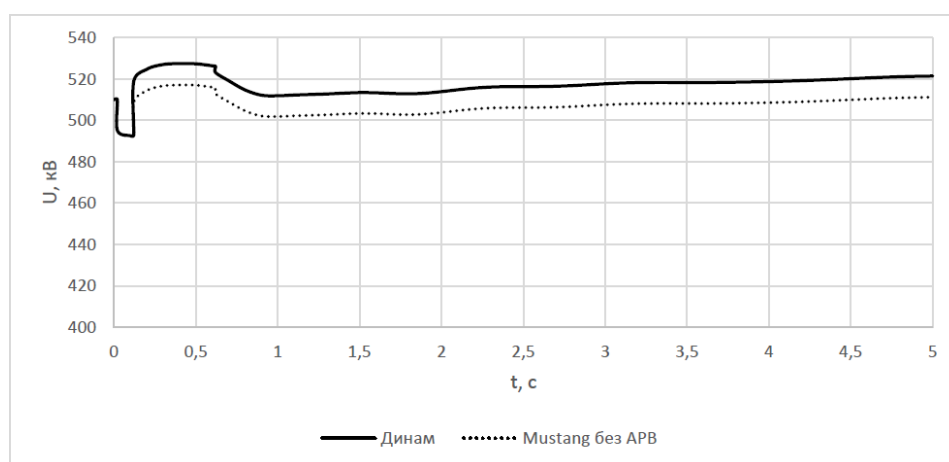


Рисунок 4.4 Напряжение на шинах 500 кВ БрГЭС с учетом ОГ-2 БрГЭС

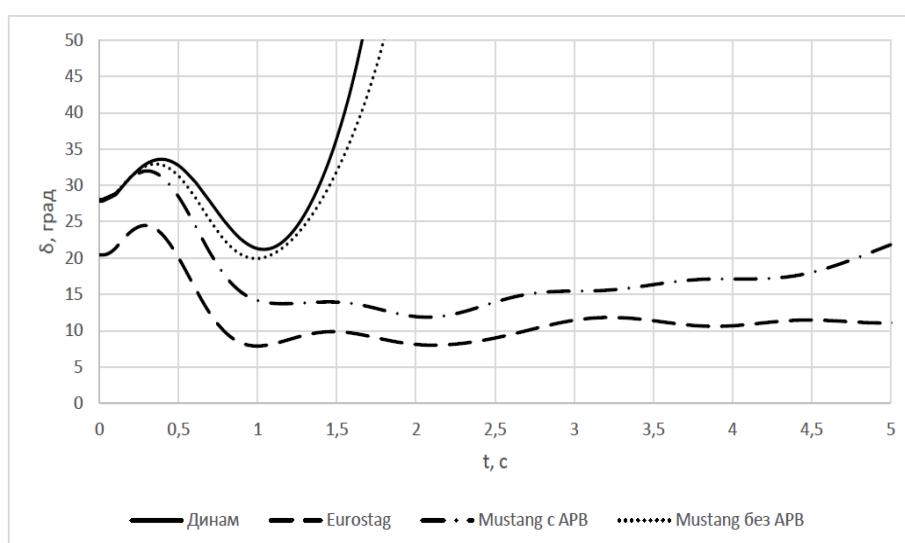


Рисунок 4.5 Угол ГГ-3 БоГЭС относительно ГГ-2 БрГЭС с учетом ОГ-1 БрГЭС

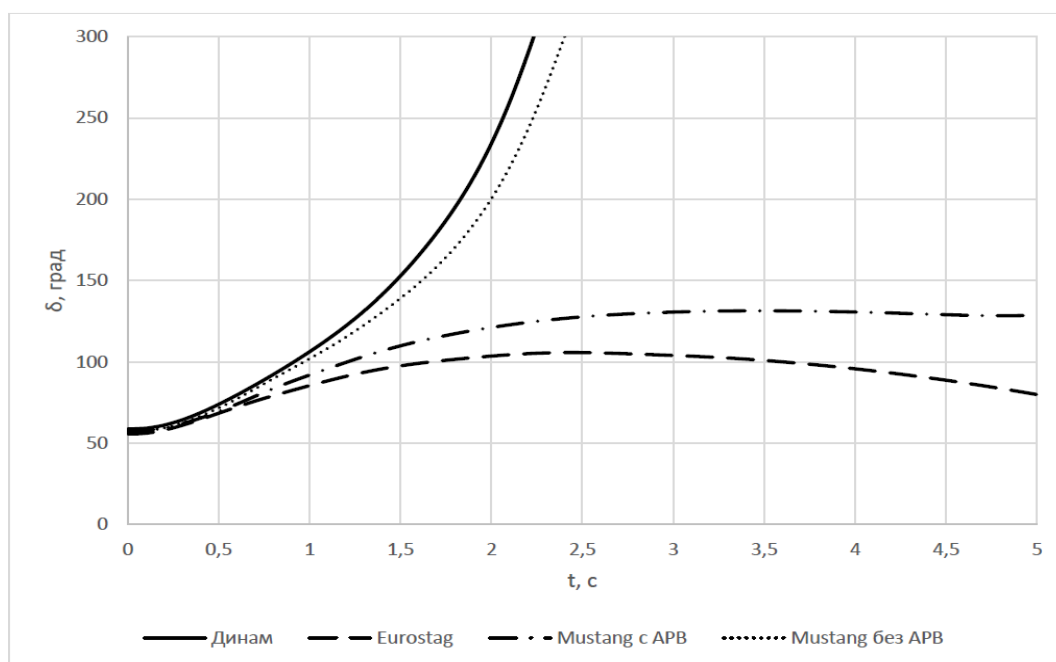


Рисунок 4.6 Угол ГГ-2 БрГЭС с учетом ОГ-1 БрГЭС

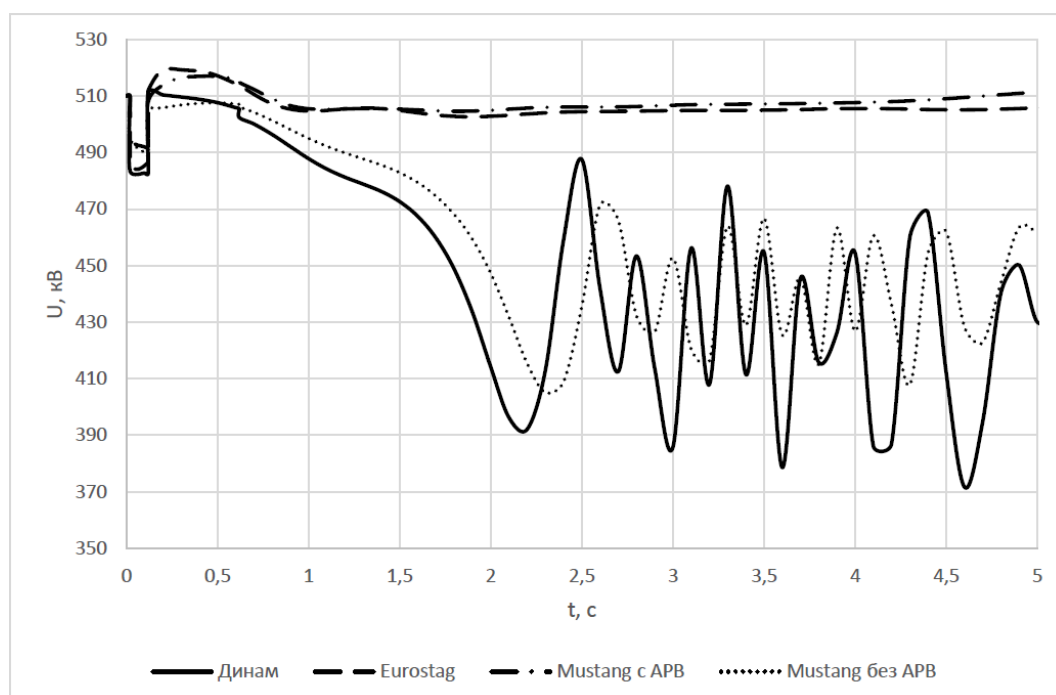


Рисунок 4.7 Напряжение на шинах 500 кВ БрГЭС с учетом ОГ-1 БрГЭС

Как видно из рисунков 4.3 – 4.7 расчет УВ зависит от полноты математической модели энергосистемы. Математическая модель используется для построения действительных траекторий движений генераторов при

конкретных схемно-режимных условиях и сформированном возмущении. Из рассчитанных движений производится идентификация нарушения устойчивости и переход к эквивалентному представлению энергосистемы. Представление математической модели является отдельной задачей и не рассматривается в рамках данной работы – обозначается только ее значимость. Правильность работы модуля доказана тем, что используя одинаковую математическую модель, модуль и ПВК Мустанг выдали одинаковый качественный характер переходного процесса с учетом выбранных УВ. При снижении УВ на одну ступень в обоих случаях зафиксировано нарушение устойчивости.

Результаты работы модуля и метода по выбору УВ из условия сохранения динамической устойчивости в рамках ЦСПА ОЭС Сибири рассмотрены экспертной комиссией и использованы в рамках научно-исследовательской работы (Инв. № СО-ДН-1/15). В приложении «В» представлен акт использования результатов диссертационной работы.

#### **4.5 Направления развития метода корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости энергосистем**

В данном пункте формируются цели, задачи, требования, которые необходимо выполнить для использования представленной методики выбора УВ по условию обеспечения динамической устойчивости электростанций в рамках ЦСПА ОЭС Сибири. Обозначенные заключения необходимо рассматривать как перспективные этапы развития методики выбора УВ.

Областью применения описанного алгоритма является расчет управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости объекта управления в рамках режима настройки противоаварийной автоматики I-ДО. Стоит отметить, что создание адаптивного алгоритма не является решением всех задач противоаварийного управления, таких как: поиск опасных возмущений с целью их фиксации пусковыми

органами; создание математической модели объекта управления и системы сбора доаварийной информации для реализации контроля всей совокупности схемно-режимных условий; оценки достаточности объема управляющих воздействий и возможных ограничения многомерной области допустимых режимов. Обозначенные задачи решаются в рамках технических решений по распределению задач противоаварийного управления и выделению объектов управления.

Приведенный алгоритм расчета управляющих воздействий по условиям обеспечения динамической устойчивости электростанций предназначен:

а) Для учета условий обеспечения устойчивого динамического перехода при выборе управляющих воздействий для пусковых органов, фиксирующих трехфазное отключение сетевых элементов – функции автоматической разгрузки при отключении одной или двух линий (АРОЛ, АРОДЛ);

б) Для учета условий обеспечения устойчивого динамического перехода при выборе управляющих воздействий для пусковых органов, фиксирующих однофазное отключение сетевых элементов в цикле автоматического повторного включения – функции АРОАПВ.

Алгоритм расчета управляющих воздействий по условиям обеспечения динамической устойчивости электростанций должен позволять определять как дополнительные управляющие воздействия к тем, которые определены по условиям обеспечения нормативных запасов статической устойчивости и допустимых токовых нагрузок, так и отдельные управляющих воздействий, в случаях, когда по другим условиям необходимость управляющих воздействий отсутствует.

Рассчитанные управляющие воздействия по условиям обеспечения динамической устойчивости для пусковых органов типа АРОЛ, АРОДЛ, АРОАПВ должны обеспечивать некоторый (регулируемый) запас по устойчивости на случай изменения реального режима работы объекта управления за время расчета.



Алгоритм расчета управляющих воздействий по условиям обеспечения динамической устойчивости электростанций должен позволять для каждого пускового органа рассчитывать управляющие воздействия с учетом возможного возникновения замыкания в разных точках сетевого элемента (например, у шин подстанции с каждой стороны линии), а также для случая аварийного отключения линии без замыкания. Помимо этого осуществлять выбор необходимого объема управляющих воздействий достаточного для всех рассмотренных случаев.

Алгоритм расчета управляющих воздействий по условиям обеспечения динамической устойчивости электростанций должен позволять для каждого пускового органа задавать характеристики расчетного аварийного возмущения (виды замыканий, длительности КЗ, цикла АПВ, КЗ при повторном включении и т.п.).

Алгоритм расчета управляющих воздействий по условиям обеспечения динамической устойчивости электростанций должен позволять для каждого комплекса ЛАПНУ задавать временные характеристики каждого из управляющих воздействий (время реализации УВ).

Для точного моделирования замыкания в составе алгоритма расчета управляющих воздействий по условиям обеспечения динамической устойчивости электростанций необходимо предусмотреть средства расчета аварийных шунтов поперечной несимметрии для схемы сети и состава генерации до и после ввода управляющих воздействий.

Для расчета управляющих воздействий для пусковых органов, связанных с возникновением продольной несимметрии (АРОАПВ), следует использовать коэффициенты увеличения сопротивления ВЛ на время существования неполнофазного режима.

Для точного моделирования переходных процессов с целью определения характеристик нарушения устойчивости и определения достаточности управляющих воздействий необходимо выполнить обоснование объемности

математической модели объекта управления в части полноты сети, моделей регуляторов возбуждения генераторов и скорости вращения турбин.

Возможными перспективными задачами противоаварийной автоматики в части вопросов обеспечения динамической устойчивости электростанций являются:

1. Определение и корректировка настроек (характеристик) срабатывания в текущей схеме локальных автоматик разгрузки при коротких замыканиях (АРБКЗ, АРЗКЗ), установленных в узлах крупных электростанциях.

2. Определение допустимых перетоков мощности по условиям обеспечения динамической устойчивости с учетом текущих ресурсов ПА.

3. Настройки срабатывания локальных автоматик разгрузки при коротких замыканиях (АРБКЗ, АРЗКЗ) могут определяться в виде характеристик (областей) устойчивости на заданном интервале вблизи текущей мощности станции в текущей схеме. Характеристики (области) устойчивости должны рассчитываться при изменении тяжести КЗ относительно нормативного возмущения. Рассчитанная настройка АРБКЗ, АРЗКЗ должна устанавливаться в комплексы ЛАПНУ (ФТКЗ) только для текущей расчетной схемы, без исключения возможности перехода на заранее заданные настройки по другой схеме сети.

4. Определение допустимых перетоков мощности по условиям обеспечения динамической устойчивости для оперативного советчика диспетчера.

### **Выводы**

Применение понятий структурно организованного движения и энергетических характеристик позволяет проводить единообразное описание неустойчивых движений энергосистем на основе энерговременных диаграмм неустойчивости и, таким образом, исследовать их структуру.

Описанные алгоритмы применимы для анализа распада системы при конкретных аварийных ситуациях на любом цикле качаний. В них используются все понятия классического метода площадей (энергетического метода): кинетической энергии, работы (площади) ускорения и торможения, характеристик мощности в аварийном и послеаварийном режиме, что позволяет обосновать алгоритм по выбору противоаварийного управления по условию обеспечения динамической устойчивости.

Преимуществами описанного алгоритма выбора управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости являются:

1. Определение сечения нарушения устойчивости осуществляется на основе анализа колебательных движений, развивающихся в системе относительно её центра инерции в пространстве и времени. Таким образом, исследованию подлежат непосредственно те процессы, которые и приводят к нарушению динамической устойчивости. Движение центра инерции, связанное с синхронным движением системы, исключается из рассмотрения. При этом поиск опасного сечения становится более формализованным.

2. При поддержании актуальности динамической модели обеспечивается адаптивность алгоритмов выбора корректирующего противоаварийного управления за счет автоматического формирования неустойчивой пары.

3. Определение управляющего воздействия проводится на основе оценки избытка кинетической энергии регионального движения, который и приводит к распаду по сечению неустойчивой пары. Величина избытка кинетической энергии регионального движения подсистем неустойчивой пары, увеличенная на добавку запаса, определяет исходные условия для выбора противоаварийного управления, обеспечивающего устойчивый динамический переход к послеаварийному режиму. При определении запаса можно использовать кинетическую энергию локальных движений.

4. Объем управляющих воздействий вида ОГ определяется с учетом изменений вращающейся массы и дополнительной работы торможения взаимного движения подсистем неустойчивой пары.

5. Выбор управляющих воздействий производится с учетом цикла качаний, в котором происходит нарушение устойчивости.

6. Распределение УВ по управляемым узлам не только по территориальному признаку (реализовывать в первую очередь в наиболее близких к опасному сечению), но и с учетом характера их относительного движения (опережающие или отстающие от центров инерции соответствующих подсистем).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие недостатки методов и подходов противоаварийного управления заключаются в следующем:

- необходимость расчетов множества режимов работы энергосистемы на специализированных вычислительных программах с целью оценки реакции на возмущения и ориентировочной настройки автоматики;

- необходимость развития технических средств для реализации выбранной стратегии противоаварийного управления;

- необходимость увеличения объема УВ при увеличении времени расчета и реализации УВ, что требует снижения времени выбора и реализации управляющих воздействий.

Введение автоматического управления требует точного формализованного описания многомерной области допустимых режимов работы энергосистемы, которая зависит от множества схемно-режимных условий.

В настоящий момент учет всех возможных схемно-режимных условий для противоаварийной автоматики реализован в ЦСПА, ведущей настройку автоматики в темпе процесса (I-ДО). Задачей ЦСПА является минимизация управляющих воздействий посредством работы с математической моделью энергосистемы.

На основании оценочных расчетов устойчивости электростанций ОЭС Сибири доказано наличие ограничений по условию обеспечения динамической устойчивости. Также доказано наличие нелокальных схемно-режимных условий, влияющих на эти ограничения. Это обосновывает целесообразность введения противоаварийного управления по условию обеспечения динамической устойчивости в рамках ЦСПА.

Разрабатываемая методика управления по обеспечению устойчивости динамического перехода должна иметь возможность работать в темпе процесса в режиме I-ДО, не вносить значительных изменений в текущую аппаратную

структуру противоаварийной автоматики, что подразумевает задачу ввода корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости, и реализовывать подходы по снижению объемности задачи оценки устойчивости.

Обозначенное снижение объемности достигается путем использования понятий о структурно организованном движении – рассмотрении группового движения синхронных машин в энергосистеме. Такие групповые движения машин являются проявлением волновых свойств энергосистемы.

Методика выделения структурно организованного движения основана на введении иерархической системы движения центров инерции. Это разделение позволяет выделить поступательное движение центра инерции системы и колебательные движения центров инерции подсистем относительно центра инерции системы и генераторов относительно центров инерции подсистем.

Применяя эту иерархическую структуру движения можно проводить анализ процессов распада синхронизма сложных энергосистем на основе расчета кинетической энергии колебаний с выделением её региональных и локальных составляющих для определения дефицита работ торможения при движении крупных регионов системы.

Для разбиения на подсистемы могут использоваться колебательные структуры, формирующиеся в переходном процессе. Простая топология колебательной структуры позволяет свести рассмотрение устойчивости движения к ряду задач устойчивости для двухмашинных схем, являющихся представлениями возможных структур неустойчивости данной колебательной структуры.

Выбор структуры неустойчивости из этого ряда, для которой выполняются признаки нарушения устойчивости, позволяет определить сечение асинхронного хода.

Исследование процессов распада синхронизма и выявление структуры неустойчивости приводит к расширению постановки задачи устойчивости, в

которую входит не только фиксация факта нарушения устойчивости, но и другие параметры:

- пространственное положение сечения асинхронного хода и как оно изменяется в зависимости от схемно-режимных условий и свойств возмущения;
- момент прохождения критического смещения и избыточная кинетическая энергия, которую требуется погасить на предшествующей траектории движения для сохранения динамической устойчивости;
- эволюция структуры движения при приближении к критическому смещению и после его прохождения;
- предельные параметры возмущения;
- время развития неустойчивого движения (достижения критического смещения).

Для оценки энергетических характеристик нарушения устойчивости используется метод площадей. Посредством введения системы относительных движений с использованием законов сохранения энергии и импульса можно ввести понятия высоты потенциального барьера и кинетической энергии колебаний объектов системы (подсистем).

Прикладным использованием разработанной методики является наглядный способ представления неустойчивых движений энергосистем на основе энергovoвременных диаграмм. Диаграммы показывают пространственные (сечения асинхронного хода), временные (время выхода на критическое смещение), энергетические (предельные возмущения) характеристики неустойчивых движений.

Другим направлением использования предложенной методики является метод выбора корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости в рамках ЦСПА. Разработанный способ позволяет для введенного возмущения прогнозировать сечение асинхронного хода и вводить управление при обосновании места реализации и объема управляющих воздействий.

Для практического применения разработанной методики корректирующего управления разработаны основные требования к алгоритму расчета управляющих воздействий по условиям обеспечения динамической устойчивости электростанций в рамках ЦСПА ОЭС Сибири.

Основными результатами диссертационной работы являются:

1. Представлена расширенная постановка задачи устойчивости, содержащая определение положения сечения асинхронного хода.

2. Предложен подход к исследованию процессов распада синхронизма, основанный на выявлении иерархической структуры движения. На основании анализа структурно организованного движения определяются возможные сечения нарушения устойчивости, что позволяет выявлять структуру неустойчивых движений энергосистемы.

3. Предложен способ представления различных структур неустойчивости посредством энерговременных диаграмм, отражающие пространственные, временные, энергетические параметры неустойчивых движений.

4. Выявлена необходимость применения алгоритма расчета управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости в рамках ЦСПА ОЭС Сибири.

5. Разработан метод выбора корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости в рамках логического органа ЦСПА в режиме I-ДО. Метод основан на анализе соотношений между кинетической энергией возмущения и высотой потенциального барьера, препятствующего нарушению устойчивости.

6. Произведено тестирование предложенного алгоритма на примере ОЭС Сибири. Результаты, полученные на основе ПВК Мустанг и разработанной методики выбора объема управляющих воздействий, полностью совпали.



**ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ**

- АДВ – автоматика дозирования воздействия
- АЛАР – автоматика ликвидации асинхронного режима
- АПВ – автоматическое повторное включение
- АРБКЗ – автоматика разгрузки при близких коротких замыканиях
- АРЗКЗ – автоматика разгрузки при затянутых коротких замыканиях
- АРОАПВ – автоматика разгрузки при ОАПВ
- АРОДЛ – автоматика разгрузки при отключении двух линий
- АРОЛ – автоматика разгрузки при отключении линии
- АРПМ – автоматика разгрузки при перегрузке по мощности
- АПНУ – автоматика предотвращения нарушения устойчивости
- БСК – батареи статических конденсаторов
- БерГРЭС – Березовская ГРЭС
- БоГЭС – Богучанская ГЭС
- БрГРЭС – Братская ГЭС
- ВЛ – воздушная линия
- ГГ – гидротурбина
- ГРЭС – главная районная электростанция
- ГЭС – гидроэлектростанция
- ЕЭС – единая энергетическая система
- КВЛ – кабельно-воздушная линия
- КГЭС – Курейская ГЭС
- КЗ – короткое замыкание
- КРАЗ – Красноярский алюминиевый завод
- КрГЭС – Красноярская ГЭС
- ЛАПНУ – локальная автоматика предотвращения нарушения устойчивости
- ЛЭП – линия электропередачи
- НТЭК – Норильско-Таймырская энергетическая компания
- НП – неустойчивая пара подсистем

ОГ – отключение генератора  
ОН – отключение нагрузки  
ОЭС – объединенная энергосистема  
ОАПВ – однофазное автоматическое повторное включение  
ПА – противоаварийная автоматика  
ПАУ – противоаварийное управление  
ПВК – программно вычислительный комплекс  
ПС – подстанция  
ПТК – программно технологический комплекс  
РЗ – релейная защита  
СаАЗ – Саяногорский алюминиевый завод  
СМНР – система мониторинга переходных процессов  
СО ЕЭС – системный оператор единой энергетической системы  
СРУ – схемно-режимные условия  
СШ – система шин  
СШГЭС – Саяно-Шушенская ГЭС  
ТАПВ – трехфазное автоматическое повторное включение  
ТГ – турбогенератор  
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль  
УВ – управляющее воздействие  
УВК – управляющий вычислительный комплекс  
УИГЭС – Усть-Илимская ГЭС  
УРОВ – устройство резервного отключения выключателей  
УХГЭС – Усть-Хантайская ГЭС  
ФТКЗ – фиксация тяжести короткого замыкания  
ХАЗ – Хакасский алюминиевый завод  
ЦСПА – централизованная система противоаварийного управления  
ШБМ – шины бесконечной мощности  
ЭДС – электродвижущая сила

## СПИСОК ТЕРМИНОВ

**Распад синхронной работы (синхронизма)** – процесс, приводящий к нарушению устойчивости параллельной работы в энергосистеме по наблюдаемому (определяемому) сечению асинхронного хода.

**Колебательная структура** – разбиение на подсистемы, выявляемое в ходе расчета электромеханического переходного процесса, в которой все вектора ЭДС соседних подсистем в системе координат центра инерции системы движутся в противоположных направлениях.

**Структурно организованное движение** – способ выделения иерархической структуры изменения режимных параметров, в ходе которого выделяются поступательное движение центра инерции системы, колебательные движения центров инерции подсистем относительно центра инерции системы, колебательные движения синхронных машин подсистем относительно центров инерции подсистем.

**Характеристики распада синхронизма** – энергетические, временные, пространственные характеристики процесса распада синхронизма энергосистемы.

**Возможная траектория движения** – способ изменения углов роторов генераторов, удовлетворяющий законам сохранения импульса относительных движений и уравнениям баланса мощности в узлах энергосистемы.

**Действительная траектория движения** – способ изменения углов роторов генераторов, удовлетворяющий законам сохранения импульса относительных движений, уравнениям баланса мощности в узлах энергосистемы и уравнениям движения роторов.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Абраменкова Н. А. Апробация методики формирования структурных моделей энергосистем на примере ОЭС Урала [Текст] / Н. А. Абраменкова, Л. В. Струкова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – №1. – С. 98–102.
2. Абраменкова Н. А. Иерархическое моделирование энергосистем для проектирования противоаварийной автоматики [Текст] / Н. А. Абраменкова // Энергосистема: управление, конкуренция, образование : сб. докл. III междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург, 2008. – Т. 1. – С. 159–164.
3. Абраменкова Н. А. Структурно-режимный анализ электроэнергетических систем для выбора принципов противоаварийного управления [Текст] : учеб. пособие / Н. А. Абраменкова, Н. И. Воропай, Т. Б. Заславская. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1995. – 63 с.
4. Абраменкова Н. А. Структурный анализ электроэнергетических систем: в задачах моделирования и синтеза [Текст] / Н. А. Абраменкова, Т. Б. Заславская. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1990. – 224 с.
5. Автоматизация электроэнергетических систем: учебное пособие для вузов [Текст] / О. П. Алексеев [и др.] ; под ред.: В. П. Морозкина, Д. Энгелаге. – М. : Энергоатомиздат, 1994. – 448с.
6. Алгоритм определения вида, места приложения и ступеней управляющих воздействий для централизованной системы противоаварийной автоматики [Текст] / С. Г. Аржанников, О. В. Захаркин, Е. Ю. Ивахненко, Д. С. Лоцман // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – №1. – С. 117–119.
7. Алгоритм оценки статической устойчивости и выбора управляющих воздействий по условию обеспечения статической устойчивости

в послеаварийном режиме [Текст] / Е. В. Исаев [и др.] // Изв. НТЦ Единой энергетической системы. – 2013. – №1. – С. 48–57.

8. Алгоритмическое обеспечение ПТК верхнего уровня ЦСПА ОЭС Сибири и перспективы его развития [Текст] / С. Г. Аржанников [и др.] // Изв. НТЦ Единой энергетической системы. – 2013. – №1. – С. 91–98.

9. Анализ неоднородностей электрических систем [Текст] / О. Н. Войтов [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1999. – 256 с.

10. Андерсон П. Управление энергосистемами и устойчивость [Текст] / П. Андерсон, А. Фуад ; пер. с англ. под ред. Я. Н. Лугинского. – М. : Энергия, 1980. – 568 с., ил.

11. Андреюк В. А. Использование абсолютного угла для управления переходными режимами энергосистемы [Текст] / В. А. Андреюк // Изв. НТЦ Единой энергетической системы. – 2013. – № 65. – С. 27–42.

12. Апиев Н. К. Использование методов и алгоритмов структурного анализа в исследованиях развития электроэнергетических систем [Текст] / Н. К. Апиев // Вестн. КРСУ.– 2008. – Т. 8, № 3. – С. 82–87.

13. Апросин К. И. Параллельный расчет электромеханического переходного процесса ЭЭС в реальном времени для нужд противоаварийной автоматики [Текст] / К. И. Апросин // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем : сб. докл. IV междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2013. – С. 55–61.

14. Барзам А. Б. Аварийные режимы энергетических систем и их диспетчерская ликвидация [Текст] / А. Б. Барзам. – М. : Энергия, 1970. – 184 с.

15. Бартоломей П. И. Определение параметров схемы замещения электрической сети по измерениям средствами векторной регистрации [Текст] / П. И. Бартоломей, А. А. Голиков, А. А. Суворов // Энергетика глазами молодёжи : сб. докл. всероссийской науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2010. – Т. 1. – С. 208–212.

16. Бушуев В. В. Динамические свойства энергообъединений [Текст] / В. В. Бушуев, Н. Н. Лизалек, Н. Л. Новиков . – М. : Энергоатомиздат, 1995 . – 317 с.
17. Вагапов Н. Р. Управляющее воздействие «Ускорение УРОВ» и динамическая устойчивость Березовской ГРЭС [Текст] / Н. Р. Вагапов // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – №1. – С. 26–28.
18. Васильев В. В. Вопросы совершенствования системной противоаварийной автоматики [Электронный ресурс] / В. В. Васильев, Н. Н. Лизалек // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем : сб. докл. 5 междунар. науч.-техн. конф., Сочи, 1–5 июня 2015 г. – Сочи, 2015. – Режим доступа: <http://cigre.ru/activity/conference/relayprotect5/participants/materials/>. – Загл. с экрана.
19. Васильев В. В. Развитие систем автоматического предотвращения нарушения устойчивости энергосистем [Текст] / В. В. Васильев, Н. Н. Лизалек // ЭЛЕКТРО. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехн. пром-ть. – 2015. – № 2. – С. 20–27.
20. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах [Текст] : учеб. для электроэнергетич. спец. вузов / В. А. Веников. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1985. – 536 с.
21. Веников В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. А. Веников. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Высш. школа, 1976. – 479 с.
22. Волошин А. А. Анализ возможностей применения мультиагентных систем для задач автоматического управления в энергосистемах [Текст] / А. А. Волошин, А. В. Жуков // Релейная защита и автоматика энергосистем : сб. докл. XXII конф., Москва, 3 апр. 2014. – М., 2014. – С. 256–263.
23. Воропай Н. И. Метод функций Ляпунова в исследованиях динамической устойчивости электроэнергетических систем: состояние

проблемы [Текст] / Н. И. Воропай // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – №1. – С. 14–17.

24. Воропай Н. И. О некоторых подходах к противоаварийному управлению электроэнергетическими системами [Текст] / Н. И. Воропай, И. Б. Ядыкин // Релейная защита и автоматика энергосистем : сб. докл. XXII конф., Москва, 3 апр. 2014. – М., 2014. – С. 223–227.

25. Вторушин А. С. Двухуровневая система противоаварийного управления ОЭС Сибири [Текст] / А. С. Вторушин, О. В. Захаркин, Е. Ю. Ивахненко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 1. – С. 140–143.

26. Вторушин А. С. Оценивание состояния энергосистем в задачах противоаварийной автоматики [Текст] / А. С. Вторушин, О. М. Грунин, А. Э. Петров // Изв. НТЦ Единой энергетической системы. – 2013. – №1. – С. 99–104.

27. Вторушин А. С. Структурированный подход к организации технологической цепочки выбора управляющих воздействий в централизованных системах противоаварийной автоматики. Опыт внедрения в ЦСПА ОЭС Сибири [Текст] / А. С. Вторушин, С. Г. Аржанников, О. В. Захаркин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 4. – С. 345–348.

28. Гайдамакин Ф. Н. Аппаратные и программные средства комплекса ЦСПА ОЭС Востока / Ф. Н. Гайдамакин, С. И. Демидов // Изв. НТЦ Единой энергетической системы. – 2013. – №1. – С. 69–78.

29. Гельфанд А. М. Проектирование систем мониторинга переходных процессов в ОЭС Урала и Сибири [Текст] / А. М. Гельфанд, В. В. Курмак, В. Г. Наровлянский // Электроэнергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы : сб. науч. тр. / под ред.: Д. Р. Любарского, В. А. Шуина / ОАО инт "Энергосетьпроект". – Иваново : ПресСто, 2012. – С. 289–296.

30. Гоник Я. Е. Автоматика ликвидации асинхронного режима [Текст] / Я. Е. Гоник, Е. С. Иглицкий. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 112 с.

31. ГОСТ Р 55105-2012 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Нормы и требования [Текст]. – Введ. 2013-07-01. – М. : Стандартинформ, 2013. – 29 с.

32. Гуревич Ю. Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах [Текст] / Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова, А. А. Окин. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.: ил.

33. Данилов М. В. Структура, назначение и варианты организации адаптивной системы специальной автоматики отключения нагрузки [Текст] / М. В. Данилов, А. Э. Петров, В. А. Чумаков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – №4. – С. 341–344.

34. Демчук А. Т. Совершенствование локальной автоматики дозировки управляющих воздействий [Текст] / А. Т. Демчук, А. В. Юдин // Вестн. УГТК-УПИ. Энергосистема: управление, качество, конкуренция : сборник докл. II всероссийской науч.-техн. конф. – Екатеринбург : Изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – №12 (42). – С. 393–397.

35. Долгов А. П. Устойчивость электрических систем [Текст]: учеб. пособие / А. П. Долгов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – 176 с.

36. Дьячков В. А. Разработка и реализация алгоритма селективной работы устройства автоматики разгрузки при близких коротких замыканиях в сложноразветвленной электрической сети [Текст] / В. А. Дьячков, А. А. Корнов, А. А. Лисицын // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем : сб. докл. IV междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2013. – С. 41–45.

37. Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем [Текст] / П. С. Жданов ; под ред. Л. А. Жукова. – М. : Энергия, 1979. – 455 с.



38. Жуков А. В. Развитие технологий мониторинга и управления в ЕЭС России на базе системы мониторинга переходных режимов [Текст] / А. В. Жуков, Е. И. Сацук, Д. М. Дубинин // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем : сб. докл. IV междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2013. – С. 23–29.

39. Жуков Л. А. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем [Текст] : методы расчетов / Л. А. Жуков, И. П. Стратан. – М. : Энергия, 1979. – 416 с., ил.

40. Закарюкин В. П. Моделирование предельных режимов электроэнергетических систем с учетом продольной и поперечной несимметрии [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Е. А. Крюков. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2006. – 139 с.

41. Захаркин О. В. Угловые характеристики мощности генератора при определении предельных режимов ЭЭС [Текст] / О. В. Захаркин, Е. Ю. Ивахненко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – №1. – С. 35–43.

42. Иофьев Б. И. Автоматическое аварийное управление мощностью энергосистем [Текст] / Б. И. Иофьев. – М. : Энергия, 1974. – 416 с.

43. Исследование структуры неустойчивого движения энергосистем при больших возмущениях [Текст] / Н. Н. Лизалек, А. Н. Ладнова, В. Ф. Тоньшев, М. В. Данилов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – №1. – С. 54–65.

44. Исследование эффективности управления режимами энергосистемы с воздействием на турбины энергоблоков электростанций по данным СМПР [Текст] / А. В. Жуков [и др.] // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. – 2012. – №4. – С. 31–35.

45. Комплексный подход к решению задачи сохранения динамической устойчивости в энергосистеме [Текст] / Н. С. Стручкова, А. Н. Федосов, О. В. Ким, Б. А. Осак // Современные направления развития систем релейной

защиты и автоматики энергосистем : аннот. докл. 5-ой междунар. науч.-техн. конф., 1-5 июня 2015, Сочи. – Сочи, 2015. – С. 33–34

46. Кощев Л. А. Автоматическое противоаварийное управление в электроэнергетических системах [Текст] / Л. А. Кощев. – Производ. изд-во. – Л. : Энергоатомиздат, 1989. – 145 с.

47. Кощев Л. А. ЦСПА на базе алгоритмов нового поколения – очередной этап в развитии противоаварийного управления в энергосистемах [Текст] / Л. А. Кощев, Н. Г. Шульгинов // Изв. НТЦ Единой энергетической системы. – 2013. – №1. – С. 7–14.

48. Куликов Ю. А. Переходные процессы в электрических системах [Текст] : учеб. пособие : Ю. А. Куликов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. – 283 с.

49. Ландман А. К. Организация межмашинного обмена информацией в иерархической системе противоаварийного управления ЦСПА ОЭС Сибири [Текст] / А. К. Ландман, А. Э. Петров, О. О. Сакаев // Изв. НТЦ Единой энергетической системы. – 2013. – №1. – С. 105–112.

50. Лизалек Н. Н. Анализ динамических свойств энергообъединений на основе волнового подхода [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.02 / Н. Н. Лизалек. – Новосибирск, 1994. – 39 с.: ил.

51. Лизалек Н. Н. Динамические свойства энергосистем (волновой подход и структурный анализ устойчивости) [Текст] : учеб. пособие. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1998. – 93 с.

52. Лизалек Н. Н. Динамические свойства энергосистем при электромеханических колебаниях. Структурная организация движений и устойчивость [Текст] : учеб. пособие / Н. Н. Лизалек, В. Ф. Тонышев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – 212 с.

53. Лизалек Н. Н. Исследование структуры задач обеспечения динамической устойчивости энергообъединения [Текст] / Н. Н. Лизалек, М. В. Данилов, А. Н. Ландова // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем. – М., 2009. – С. 49–56.

54. Лизалек Н. Н. Структурный анализ движений синхронных машин в энергосистемах [Текст] / Н. Н. Лизалек, Д. Н. Бородин // Релейная защита и автоматика энергосистем : сб. докл. XXII конф., Москва, 3 апр. 2014. – М., 2014. – С. 277-278.

55. Лисицын А. А. Алгоритм выбора управляющих воздействий по условиям динамической устойчивости [Текст] / А. А. Лисицын, М. А. Эдлин // Изв. НТЦ Единой энергетической системы. – 2013. – №1. – С. 41–47.

56. Лукашов Э. С. Длительные переходные процессы в энергетических системах [Текст] / Э. С. Лукашов, А. Х. Калюжный, Н. Н. Лизалек. – Новосибирск : Наука, 1985. – 198 с.

57. Методика выбора управляющих воздействий для обеспечения динамической устойчивости [Текст] / М. В. Данилов, И. П. Кадыков, А. К. Ландман, А. М. Петров // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. – 2012. – № 4. – С. 33–36.

58. Николаев В. А. Задача оценивания состояния в комплексе централизованного противоаварийного управления ОЭС Востока [Текст] / В. А. Николаев, В. Л. Прихно // Изв. НТЦ Единой энергетической системы. – 2013. – №1. – С. 25–39.

59. Овчаренко Н. И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем [Текст] : учебник для вузов / Н. И. Овчаренко ; под ред. А. Ф. Дьякова. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. – 504 с.: ил.

60. Опыт внедрения системы мониторинга запасов устойчивости Кола-Карельского транзита – «СМЗУ 2.0» [Текст] / А. В. Жуков [и др.] // Релейная защита и автоматика энергосистем : сб. докл. XXII конф., Москва, 3 апр. 2014. – М., 2014. – С. 299–305.

61. Опыт проектирования систем противоаварийного управления в объединенной энергетической системе Сибири на примере локальной автоматики предотвращения нарушения устойчивости: ПС 1150 кВ Итатская, Богучанской ГЭС, Саяно-Шушенской ГЭС, Харанорской ГРЭС [Текст] / А. К.

Ландман, Г. П. Попов, М. В. Данилов, В. А. Маковцев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – №4. – С. 264–269.

62. Основы автоматического регулирования и управления : учеб. пособие для электротехн. спец. вузов [Текст] / Л. И. Каргу [и др.] ; под ред.: В. М. Пономарева, А. П. Литвинова. – М. : Высшая школа, 1974. – 439 с.

63. Основы противоаварийной автоматики в электроэнергетических системах [Текст] : учеб. пособие. / Р. А. Вайнштейн, Е. А. Пономарев, В. А. Наумов, Р. В. Разумов ; ООО науч.-произв предприятие «ЭКРА». – Чебоксары : Изд. фирм, 2014. – 177 с.

64. Основы современной энергетики. Т. 2. Современная электроэнергетика [Электронный ресурс] : учебник для вузов / Ю. К. Розанов [и др.]. – 5-е изд., стер. – М. : Изд. дом МЭИ, 2010. – Режим доступа : <http://www.studentlibrary.ru/book/MPEI84.html>. – Загл. с экрана.

65. Оценка динамической устойчивости энергосистем на основе метода площадей [Текст] / Н. Н. Лизалек [и др.] // Изв. РАН Энергетика. – 2013. - №1. – С. 139–152.

66. Оценка эффективности алгоритма управления переходными режимами протяженных транзитов с использованием информации об относительных углах по данным мониторинга переходных процессов [Текст] / В. А. Андреюк, Т. А. Гущина, С. Р. Кияткина, Н. К. Семенов // Изв. НТЦ Единой энергетической системы. – 2010. – № 64. – С. 30–43.

67. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях [Текст] / под ред В. А. Веникова. – 2-е изд., доп. – М. ; Л. : Энергия, 1967. – 456 с.

68. Попов М. Г. Исследование устойчивости объединенных энергосистем на основе структурного подхода [Текст] / М. Г. Попов, Е. В. Захарова // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. – 2013. – № 3(178). – С. 110–117.

69. Противоаварийная автоматика в энергосистемах [Текст] / И. З. Глускин, Б. И. Иофьев, А. А. Меклин, Л. Н. Чекаловец. – М. : Знак, 2009. – 568 с.

70. Пташкин А. В. Разработка и внедрение мероприятий, направленных на уменьшение ограничений максимальной нагрузки Саяно-Шушенской ГЭС по условиям обеспечения устойчивости режимов работы ее генераторов и линий связи с ОЭС Сибири [Текст] / А. В. Пташкин // Передача энергии переменным током на дальние расстояния : тр. междунар. науч.-техн. конф., 15-19 сент. 2003, Новосибирск, Россия. – Новосибирск : Изд-во СИБНИИЭ, 2003. – Т. 2. – С. 170–182.

71. Развитие задач мониторинга и управления в ЕЭС России на базе системы мониторинга переходных процессов [Текст] / А. В. Жуков, Д. М. Дубинин, О. Л. Опалев, Д. Н. Уткин // Релейная защита и автоматика энергосистем : сб. докл. XXII конф., Москва, 3 апр. 2014. – М., 2014. – С. 452–462.

72. Реализация алгоритма выбора управления по способу П-ДО в устройствах ПА на базе КПА-М [Текст] / А. К. Ландман, А. М. Петров, А. Э. Петров, О. О. Сакаев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – №1. – С. 214–218.

73. Рудницкий М. П. Элементы теории устойчивости и управления режимами энергосистем [Текст] : учеб. пособие / М. П. Рудницкий. – Свердловск : Изд-во УПИ им С. М. Кирова, 1984. – 96 с.

74. Рыгалов А. Ю. Применение мультиагентных систем в электроэнергетике [Текст] / А. Ю. Рыгалов, Ю. П. Кубарьков // Тр. Кольского науч. центра РАН. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 102–105.

75. Сацук Е. И. Автоматика предотвращения нарушения динамической устойчивости в Тюменской энергосистеме при перегрузке связей с Уралом [Текст] / Е. И. Сацук, А. Н. Филинков, А. В. Юдин // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем : аннот. докл. 5-ой междунар. науч.-техн. конф., 1-5 июня 2015, Сочи. – Сочи, 2015. – С. 38.

76. Сенди К. Современные методы анализа электрических систем [Текст] : пер. с венг. / К. Сенди. – М. : Энергия, 1971. – 362 с.

77. СО 153-34.20.576-2003. Методические указания по устойчивости энергосистем [Текст] / Мин-во энергетики РФ. – Утв. приказом Минэнерго России от 30 июня 2003 г. № 277. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 10 с.

78. Соболева М. А. Определение предельных режимов электроэнергетической системы на основе матрицы собственных и взаимных проводимостей ЭДС эквивалентных генераторов [Текст] / М. А. Соболева, А. Г. Фишов // Электричество. – 2013.– № 8. – С. 9–14.

79. Совалов С. А. Режимы Единой энергосистемы [Текст] / С. А. Совалов. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 384 с., ил.

80. Современная электроэнергетика [Текст] / под ред.: А. П. Бурмана, В. А. Строева. – М. : Изд-во МЭИ, 2003. — 454 с., ил.

81. Современные системы противоаварийной автоматики в ЕЭС России [Текст] / А. В. Жуков [и др.] // Релейная защита и автоматика энергосистем : сб. докл. XXI конф., Москва, 29-31 мая 2012. – М., 2012. – С. 447–456.

82. СТО 56947007-33.040.20.142-2013. Типовые алгоритмы локальных устройств противоаварийной автоматики (ПА)(ФОЛ, ФОДЛ, ФОТ, ФОДТ, ФОБ) [Текст]. – Введ. 17.01.2013. – М. : ОАО «ФСК ЕЭС», 2013. – 37 с.

83. СТО 59012820.27.010.001 2013. Правила определения максимально допустимых и аварийно допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях диспетчерского центра ОАО «СО ЕЭС» [Текст]. – Утв. от 18.01.2013 № 10. – Введ. 26.06.2013. – М. : Изд-во ОАО «СО ЕЭС». – 59 с.

84. СТО 59012820.29.020.002-2012. Релейная защита и автоматика. Взаимодействие субъектов электроэнергетики, потребителей электрической энергии при создании (модернизации) и организации эксплуатации [Текст]. – Введ. 28.04.2012. – М., 2012. – 29 с.

85. Структура электромеханических колебаний и устойчивость энергосистем [Текст] / Н. Н. Лизалек, А. Н. Ладнова, В. Ф. Тоньшев, М. В. Данилов // Электричество. – 2011. – №6. – С. 11–19.

86. Стручкова Н. С. Ускорение действия устройств резервирования отказов выключателей как возможное мероприятие по предотвращению нарушения динамической устойчивости при затянувшихся коротких замыканиях [Текст] / Н. С. Стручкова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – №4. – С. 366–370.

87. Технологический алгоритм ЦСПА нового поколения [Текст] / Л. А. Кошечев [и др.] // Современные направления систем релейной защиты и автоматики энергосистем : сб. докл. междунар. науч.-техн. конф., 7-10 сент. 2009. – С. 511–517.

88. Тутундаева Д. В. Возможности управления режимами электроэнергетических систем [Текст] / Д. В. Тутундаева, А. Г. Фишов // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. – 2012. – №4. – С. 13–20.

89. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах [Текст] / С. А. Ульянов. – М. ; Л. : Энергия, 1964. – 704 с.

90. Федосов А. Н. Новые подходы в реализации алгоритмов фиксации тяжести короткого замыкания [Текст] / А. Н. Федосов, О. В. Ким // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – №4. – С. 284–287.

91. Фишов А. Г. Идентификация структуры эквивалентной энергосистемы с учётом взаимных движений роторов генераторов по данным СМПП [Текст] / А. Г. Фишов, К. Ю. Поляков // Энергетика глазами молодёжи : сб. докл. всероссийской науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2010. – Т. 1. – С. 117–121.

92. Фишов А. Г. Мониторинг запасов устойчивости энергосистем по данным СМПП с идентификацией и использованием собственных и взаимных проводимостей ЭДС эквивалентных генераторов [Текст] / А. Г. Фишов // Энергетика глазами молодёжи : сб. докл. всероссийской науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2010. – Т. 1. – С. 24–27.

93. Шиловский С. В. Выбор значимых факторов и способа противоаварийного управления для организации и совершенствования автоматики предотвращения нарушения устойчивости АПНУ [Текст] / С. В. Шиловский // Энергетика России в XXI веке: развитие, функционирование, управление : сб. докл. всероссийской конф. – Иркутск : ИСЭМ, 2005. – С. 167–173.

94. Шиловский С. В. Закономерности формирования спектров и структур собственных электромеханических колебаний [Текст] / С. В. Шиловский // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2008. – Т. 312, № 4. – С. 80–85.

95. Шиловский С. В. Разработка методов анализа устойчивости и управления на основе оценки динамических свойств энергообъединения [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Сергей Викторович Шиловский. – Новосибирск, 2006. – 20 с.

96. Шиловский С. В. Разработка методов спектрального анализа нерегулярных колебаний потоков активной мощности электропередачи для решения задач противоаварийного управления [Текст] / С. В. Шиловский // Передача энергии переменным током на дальние расстояния : тр. междунар. науч.-техн. конф., 15-19 сент. 2003, Новосибирск, Россия. – Новосибирск : Изд-во СИБНИИЭ, 2003. – Т. 2. – С. 142–147.

97. Шиловский С. В. Технологическая схема организации противоаварийной автоматики на принципах спектрального анализа нерегулярных колебаний потоков мощности [Текст] / С. В. Шиловский // Вестн. УГТК-УПИ. Энергосистема: управление, качество, конкуренция : сб. докл. II всероссийской науч.-техн. конф. – Екатеринбург : Изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – №12 (42). – С. 461–464.

98. Шиловский С. В. Энергетические показатели, характеризующие возможности потери устойчивости [Текст] / С. В. Шиловский // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2008. – Т. 312, № 4. – С. 85–88.

99. Шиловский С. В. Энергетические спектры электромеханических колебаний [Текст] / С. В. Шиловский, Н. Н. Лизалек // Устойчивость и



надежность электроэнергетических систем : сб. докл. междунар. научно-техн. конф. – СПб. : Изд-во ПЭИПК, 2005. – С. 129–135.

100. EUROSTAG. The reference power system dynamic simulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eurostag.be/en/products/eurostag/the-reference-power-system-dynamic-simulation/>. – Загл. с экрана.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНОЧНЫХ РАСЧЕТОВ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СШГЭС

Таблица А.1 Сравнение допустимых перетоков по условию сохранения устойчивости при отключении КВЛ 500 кВ вблизи СШГЭС

п/п	Результаты расчетов установившихся режимов и статической устойчивости						Результаты расчетов динамической устойчивости	
	Аварийное возмущение	Допустимый переток в послеаварийной схеме по критерию статической устойчивости			Допустимый переток в послеаварийной схеме по критерию токовой загрузки		Аварийное возмущение	Предельный переток по динамической устойчивости, МВт
		Предельный переток по статической устойчивости (P <sub>пр</sub> ), МВт	P <sub>пр</sub> *0,92, МВт	Переток в доаварийной схеме, соответствующий перетоку P <sub>пр</sub> *0,92, МВт	Ограничивающий элемент	Допустимый переток в доаварийной схеме, МВт		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Зимний максимум 2016 г. Контролируемое сечение – Выдача Саяно-Шушенской ГЭС. Ремонт КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Означенное №1 (ВЛ-543). В работе БГГ Саяно-Шушенской ГЭС, в работе ЗТГ Березовской ГРЭС с выдачей 2400 МВт. Переток по сечению №б: P <sub>б</sub> =3200 МВт								
2	Отключение КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Означенное №2 (ВЛ-544)	3127	2877	2877	-	-	Отключение ВЛ-544 без КЗ	2520
3							Отключение ВЛ-544 вследствие однофазного КЗ вблизи шин 500 кВ СШГЭС с неуспешным ОАПВ	2520
4							Отключение ВЛ-544 вследствие двухфазного КЗ на землю вблизи шин 500 кВ СШГЭС с неуспешным ТАПВ	2520
Зимний максимум 2016 г. Контролируемое сечение – Выдача Саяно-Шушенской ГЭС. Ремонт КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Означенное №1 (ВЛ-543). В работе БГГ Саяно-Шушенской ГЭС, в работе 1ТГ Березовской ГРЭС с выдачей 800 МВт. Переток по сечению №б: P <sub>б</sub> =1500 МВт								
6	Отключение КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Означенное №2 (ВЛ-544)	2998	2758	2758	-	-	Отключение ВЛ-544 без КЗ	2370
7							Отключение ВЛ-544 вследствие однофазного КЗ вблизи шин 500 кВ СШГЭС с неуспешным ОАПВ	2370
8							Отключение ВЛ-544 вследствие двухфазного КЗ на землю вблизи шин 500 кВ СШГЭС с неуспешным ТАПВ	2370

## Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	<p>Зимний максимум 2016 г.            Контролируемое сечение – Выдача Саяно-Шушенской ГЭС.            Ремонт КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Означенное №1 (ВЛ-543).            В работе 8ГГ Саяно-Шушенской ГЭС, в работе 1ТГ Березовской ГРЭС с выдачей 800 МВт.            Переток по сечению №6: <math>P_6=3200</math> МВт</p>							
10	-	5242	4194 <sup>1)</sup>	<b>4194<sup>1)</sup></b>	КВЛ 500 кВ Саяно- Шушенская ГЭС – Означенное №2 (ВЛ-544)	<b>4157<sup>1)</sup></b>	-	-
11	Отключение КВЛ 500 кВ Саяно- Шушенская ГЭС – Означенное №2 (ВЛ-544)	3170	2916	<b>2916</b>	-	-	Отключение ВЛ- 544 без КЗ и без ПАУ	<b>2600</b>
12	Отключение ВЛ-544 с учетом отключения одного ГГ Саяно- Шушенской ГЭС <sup>2)</sup>	3152	2900	<b>3458</b>	-	-	Отключение ВЛ- 544 без КЗ с отключением одного ГГ Саяно- Шушенской ГЭС	<b>3115</b>
13	Отключение ВЛ-544 с учетом отключения двух ГГ Саяно- Шушенской ГЭС <sup>2)</sup>	3119	2869	<b>4167</b>	-	-	Отключение ВЛ- 544 без КЗ с отключением двух ГГ Саяно- Шушенской ГЭС	<b>3580</b>
14	Отключение ВЛ-544 с учетом отключения трех ГГ Саяно- Шушенской ГЭС <sup>2)</sup>	3051	2807	<b>4475</b>	-	-	Отключение ВЛ- 544 без КЗ с отключением трех ГГ Саяно- Шушенской ГЭС	<b>4055</b>
15	Отключение ВЛ-544 с учетом отключения четырех ГГ Саяно- Шушенской ГЭС <sup>2)</sup>	2655	2443	<b>4684</b>	-	-	Отключение ВЛ- 544 без КЗ с отключением четырех ГГ Саяно- Шушенской ГЭС	<b>4440</b>

## Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
16	<p>Летний минимум 2016 г.            Контролируемое сечение – Выдача Саяно-Шушенской ГЭС.            Ремонт КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Означенное №1 (ВЛ-543).            В работе 6ГГ Саяно-Шушенской ГЭС, в работе 1ТГ Березовской ГРЭС с выдачей 400 МВт.            Переток по сечению №б: <math>P_6=3700</math> МВт</p>							
17	Отключение КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Означенное №2 (ВЛ-544)	3025	2783	2783	-	-	Отключение ВЛ-544 без КЗ	2400
Отключение ВЛ-544 вследствие однофазного КЗ вблизи шин 500 кВ СШГЭС с неуспешным ОАПВ							2400	
Отключение ВЛ-544 вследствие двухфазного КЗ на землю вблизи шин 500 кВ СШГЭС с неуспешным ТАПВ							2400	
19	<p>Летний минимум 2016 г.            Контролируемое сечение – Выдача Саяно-Шушенской ГЭС.            Ремонт КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Означенное №1 (ВЛ-543).            В работе 6ГГ Саяно-Шушенской ГЭС, в работе 1ТГ Березовской ГРЭС с выдачей 800 МВт.            Переток по сечению №б: <math>P_6=1700</math> МВт</p>							
20	Отключение КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Означенное №2 (ВЛ-544)	2991	2752	2752	-	-	Отключение ВЛ-544 без КЗ	2310
Отключение ВЛ-544 вследствие однофазного КЗ вблизи шин 500 кВ СШГЭС с неуспешным ОАПВ							2310	
Отключение ВЛ-544 вследствие двухфазного КЗ на землю вблизи шин 500 кВ СШГЭС с неуспешным ТАПВ							2310	
21	<p>Летний минимум 2016 г.            Контролируемое сечение – Выдача Саяно-Шушенской ГЭС.            Ремонт КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Означенное №1 (ВЛ-543).            В работе 8ГГ Саяно-Шушенской ГЭС, в работе 1ТГ Березовской ГРЭС с выдачей 800 МВт.            Переток по сечению №б: <math>P_6=3400</math> МВт</p>							
22	-	6540	5232 <sup>1)</sup>	5323 <sup>1)</sup>	КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Означенное №2 (ВЛ-544)	4256 <sup>1)</sup>	-	-
23								
24								
25	<p>Летний минимум 2016 г.            Контролируемое сечение – Выдача Саяно-Шушенской ГЭС.            Ремонт КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Означенное №1 (ВЛ-543).            В работе 8ГГ Саяно-Шушенской ГЭС, в работе 1ТГ Березовской ГРЭС с выдачей 800 МВт.            Переток по сечению №б: <math>P_6=3400</math> МВт</p>							
25	-	6540	5232 <sup>1)</sup>	5323 <sup>1)</sup>	КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Означенное №2 (ВЛ-544)	4256 <sup>1)</sup>	-	-



## Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Зимний максимум 2016 г. Контролируемое сечение – Выдача Саяно-Шушенской ГЭС.								
34	Ремонт КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС–Новокузнецкая №1(ВЛ-541) и Итатская–Абаканская №1(ВЛ-547). В работе 10ГГ Саяно-Шушенской ГЭС, в работе 1ТГ Березовской ГРЭС с выдачей 800 МВт. Переток по сечению №6: $P_6=3400$ МВт							
35							Отключение ВЛ-548 без КЗ	<b>4100</b>
36	Отключение ВЛ 500 кВ Итатская – Абаканская №2 (ВЛ-548)	4856	4468	<b>4468</b>	-	-	Отключение ВЛ-548 вследствие однофазного КЗ вблизи шин 500 кВ СШГЭС с неуспешным ОАПВ	<b>4100</b>
37							Отключение ВЛ-548 вследствие двухфазного КЗ на землю вблизи шин 500 кВ СШГЭС с неуспешным ТАПВ	<b>4050</b>
Летний минимум 2016 г. Контролируемое сечение – Выдача Саяно-Шушенской ГЭС.								
38	Ремонт КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС–Новокузнецкая №1(ВЛ-541) и Итатская–Абаканская №1(ВЛ-547). В работе 10ГГ Саяно-Шушенской ГЭС, в работе 1ТГ Березовской ГРЭС с выдачей 400 МВт. Переток по сечению №6: $P_6=3500$ МВт							
39							Отключение ВЛ-548 без КЗ	<b>3850</b>
40	Отключение ВЛ 500 кВ Итатская – Абаканская №2 (ВЛ-548)	4362	4013	<b>4013</b>	-	-	Отключение ВЛ-548 вследствие однофазного КЗ вблизи шин 500 кВ СШГЭС с неуспешным ОАПВ	<b>3850</b>
41							Отключение ВЛ-548 вследствие двухфазного КЗ на землю вблизи шин 500 кВ СШГЭС с неуспешным ТАПВ	<b>3850</b>
Зимний максимум 2016 г. Контролируемое сечение – Выдача Саяно-Шушенской ГЭС.								
42	Полная схема В работе 10ГГ Саяно-Шушенской ГЭС, в работе 3ТГ Березовской ГРЭС с выдачей 2400 МВт. Переток по сечению №6: $P_6=5300$ МВт							
43	Отключена КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Новокузнецкая №1 (ВЛ-541)	6330	5824	<b>5824</b>	-	-	Отключение ВЛ-541 без КЗ	<b>Более 6330</b>
44							Отключение ВЛ-541 вследствие двухфазного КЗ на землю вблизи шин СШГЭС и действия УРОВ на отключение СШ 500 кВ СШГЭС	<b>4800</b>

## Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
45	<p style="text-align: center;">Зимний максимум 2016 г. Контролируемое сечение – Выдача Саяно-Шушенской ГЭС. Полная схема В работе 10ГГ Саяно-Шушенской ГЭС, в работе 3ТГ Березовской ГРЭС с выдачей 1200 МВт. Переток по сечению №6: <math>P_6=5300</math> МВт</p>							
46	Отключена КВЛ 500 кВ Саяно- Шушенская ГЭС – Новокузнецкая №1 (ВЛ-541)	6380	5870	<b>5870</b>	-	-	Отключение ВЛ-541 без КЗ	<b>Более 6380</b>
47							Отключение ВЛ-541 вследствие двухфазного КЗ на землю вблизи шин СШГЭС и действия УРОВ на отключение СШ 500 кВ СШГЭС	<b>4950</b>
48	<p style="text-align: center;">Зимний максимум 2016 г. Контролируемое сечение – Выдача Саяно-Шушенской ГЭС. Полная схема В работе 10ГГ Саяно-Шушенской ГЭС, в работе 1ТГ Березовской ГРЭС с выдачей 800 МВт. Переток по сечению №6: <math>P_6=5300</math> МВт</p>							
49	Отключена КВЛ 500 кВ Саяно- Шушенская ГЭС – Новокузнецкая №1 (ВЛ-541)	6300	5796	<b>5796</b>	-	-	Отключение ВЛ-541 без КЗ	<b>Более 6300</b>
50							Отключение ВЛ-541 вследствие двухфазного КЗ на землю вблизи шин СШГЭС и действия УРОВ на отключение СШ 500 кВ СШГЭС	<b>4750</b>
51	<p style="text-align: center;">Зимний максимум 2016 г. Контролируемое сечение – Выдача Саяно-Шушенской ГЭС. Полная схема В работе 10ГГ Саяно-Шушенской ГЭС, в работе 1ТГ Березовской ГРЭС с выдачей 800 МВт. Переток по сечению №6: <math>P_6=3300</math> МВт</p>							
52	Отключена КВЛ 500 кВ Саяно- Шушенская ГЭС – Новокузнецкая №1 (ВЛ-541)	6430	5916	<b>5916</b>	-	-	Отключение ВЛ-541 без КЗ	<b>Более 6430</b>
53							Отключение ВЛ-541 вследствие двухфазного КЗ на землю вблизи шин СШГЭС и действия УРОВ на отключение СШ 500 кВ СШГЭС	<b>5000</b>
<p style="text-align: center;"><b>Примечания</b></p> <p>1) Ограничения получены в доаварийной схеме. Учтены коэффициенты запаса по мощности в 20% и ограничения по условию допустимой токовой загрузки для схемы с включенной ВЛ-544</p> <p>2) В данном режиме были введены управляющие воздействия на отключения генераторов СШГЭС. По условию статической устойчивости переток в доаварийной схеме, соответствующий перетоку в послеаварийной схеме с учетом коэффициента запаса в 8%, определялся следующим образом: в послеаварийной схеме выставлялся переток, соответствующий 8% коэффициенту запаса; производился переход к доаварийной схеме посредством включения ВЛ-544 и включения генераторов СШГЭС в соответствии с моделируемым управляющим воздействием. Загрузка генераторов Саяно-Шушенской ГЭС, заведенными под отключение посредством ПА, принималась 560 МВт. Предельный переток по условию обеспечения динамической определялся следующим образом: для генераторов Саяно-Шушенской ГЭС, которые будут отключены вследствие действия ПА, выставлялась нагрузка 560 МВт и при поиске предельного перетока по условию сохранения динамической устойчивости не менялась. Отключение генераторов производилось через 0,24 сек после ввода возмущения.</p>								

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

### БЛОК СХЕМЫ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УВ ПО УСЛОВИЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

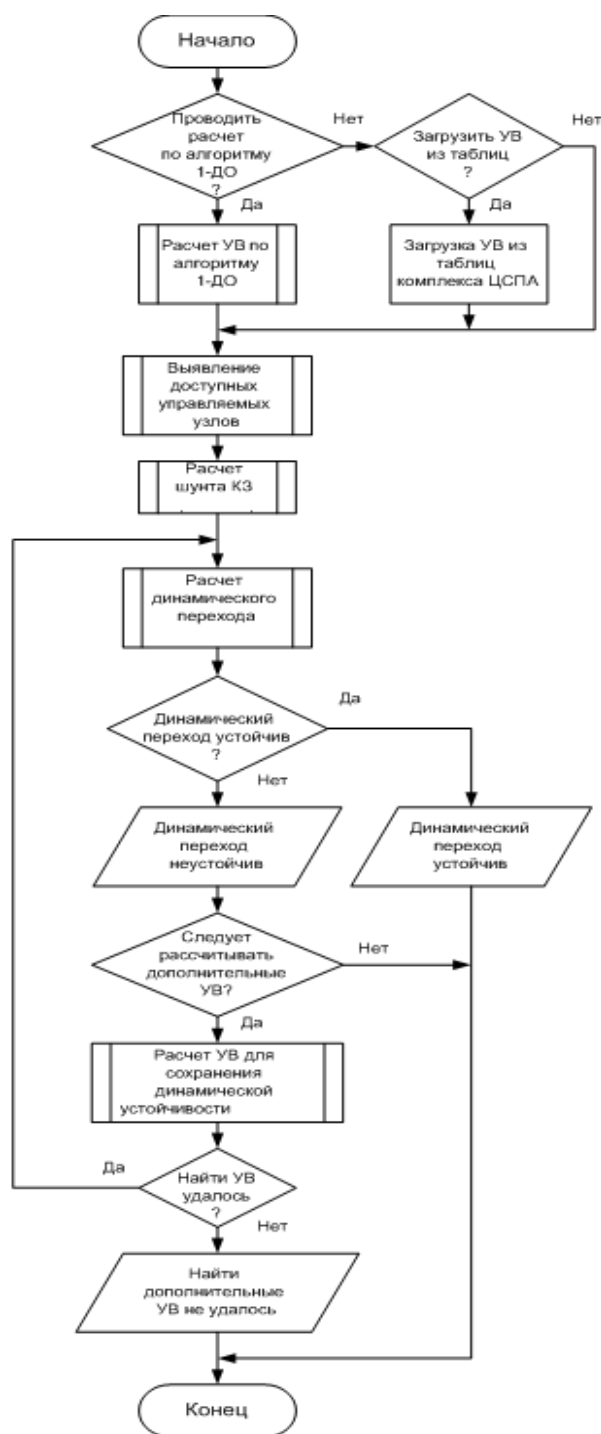


Рисунок Б.1 Блок-схема взаимодействия блока 1-ДО и блока расчета и анализа переходного процесса



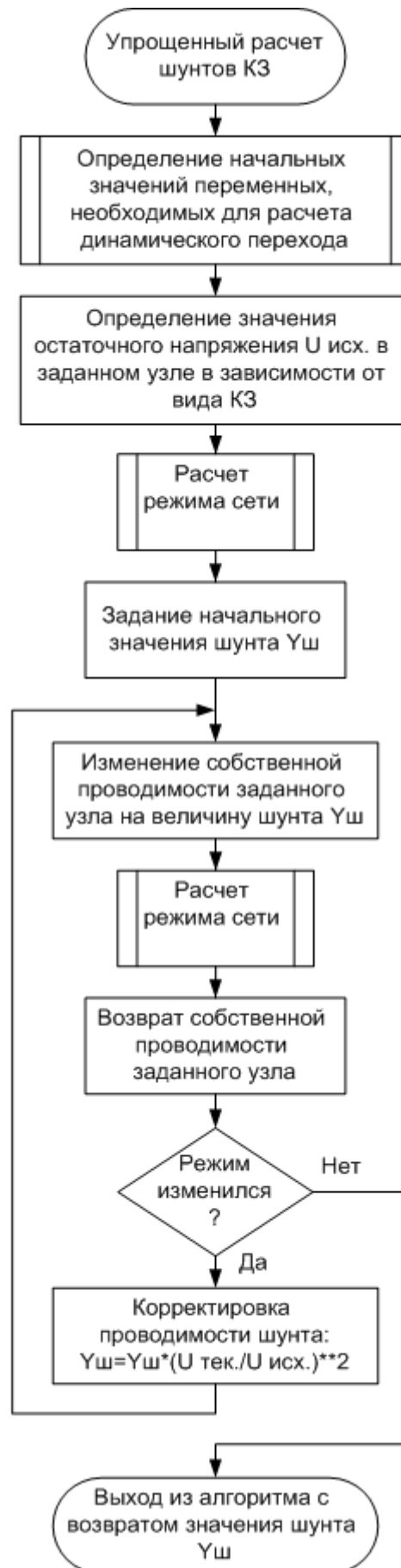


Рисунок Б.2 Алгоритм расчета шунтов КЗ

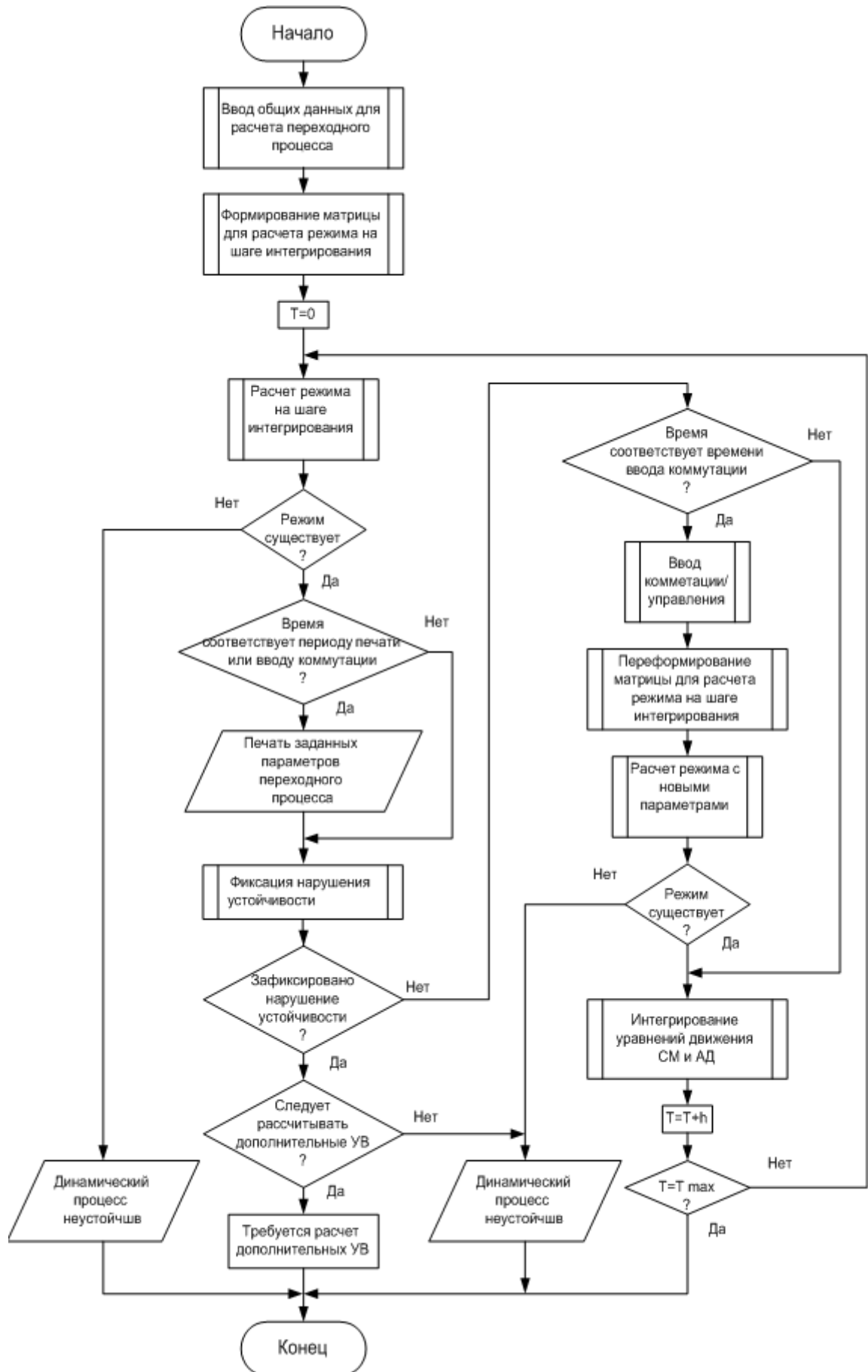


Рисунок Б.3 Алгоритм блока расчета и анализа переходного процесса

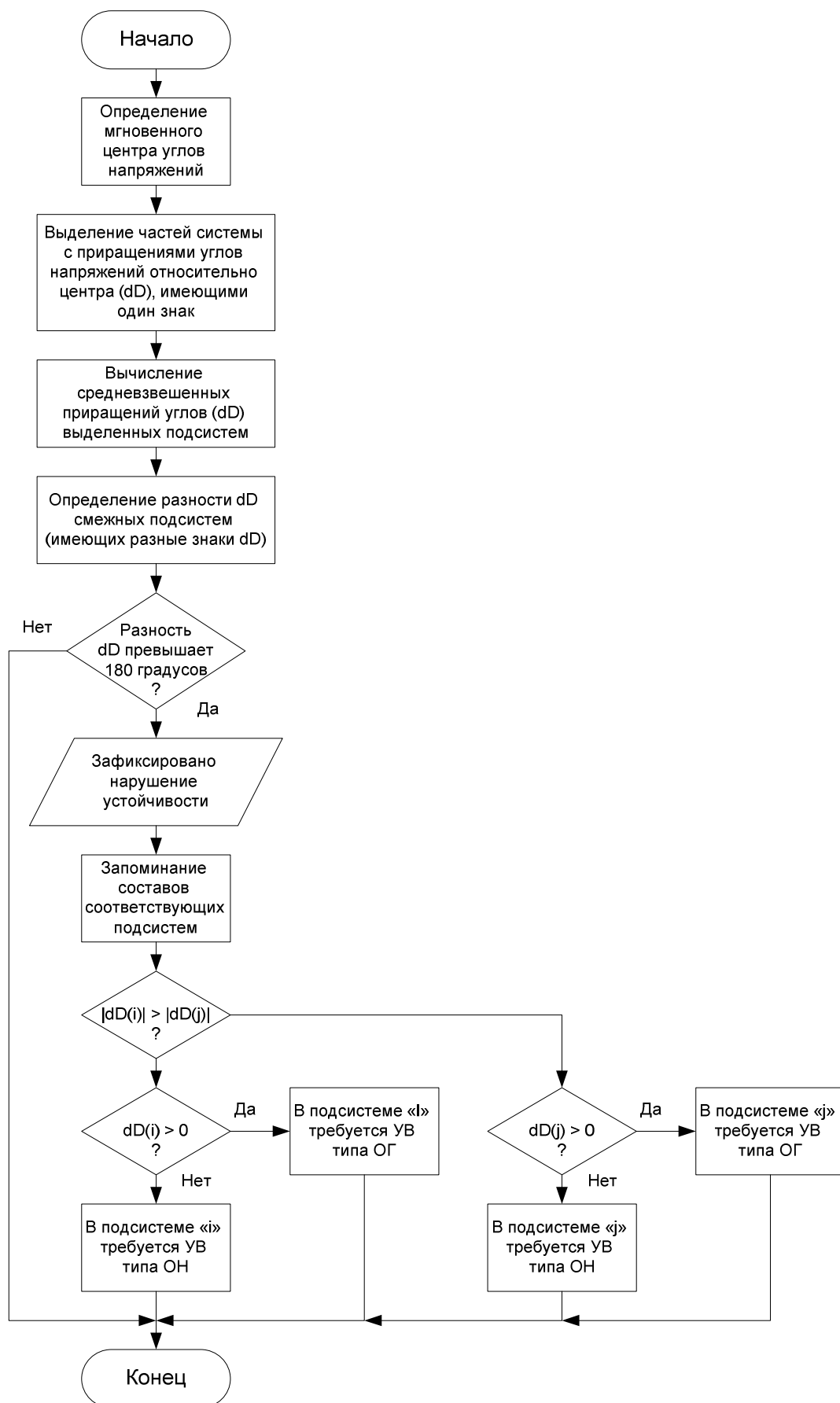


Рисунок Б.4 Алгоритм фиксации нарушения динамической устойчивости

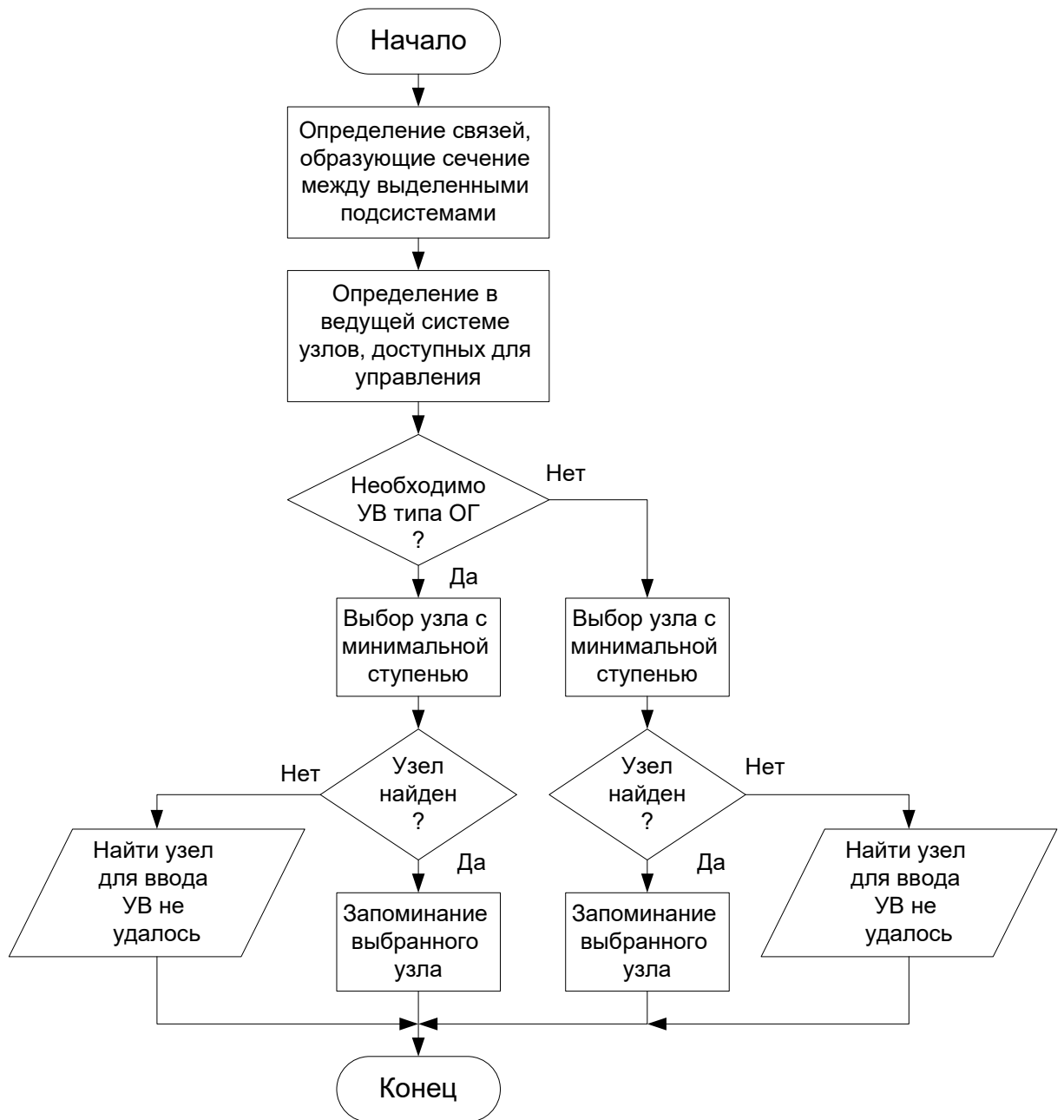


Рисунок Б.5 Алгоритм расчета UV для сохранения динамической устойчивости энергосистемы

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**

**АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРАЦИОННОЙ  
РАБОТЫ**

**УТВЕРЖДАЮ:**

Заместитель главного диспетчера по режимам

Филиала ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири

Останин А.Ю.

« 10 » \_\_\_\_\_ 2016 г.



**Акт**

**об использовании результатов кандидатской  
диссертационной работы Бородина Дмитрия Николаевича**

Экспертная комиссия в составе:

Останина А.Ю. – заместителя главного диспетчера по режимам Филиала ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири, к.т.н., председателя комиссии,

Лоцмана Д.С. – начальника службы электрических режимов Филиала ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири,

Ландмана А.К. – генерального директора ЗАО «ИАЭС», к.т.н.,

Попова Г.П. – начальника департамента проектирования ЗАО «ИАЭС»

рассмотрела результаты практического использования диссертационного исследования Бородина Д.Н. по теме: «Исследование структуры неустойчивых движений электроэнергетических систем» по вопросу применения методики выбора корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости в рамках ЦСПА ОЭС Сибири и установила следующее:

1. Положения, разработки и научно-технические рекомендации кандидатской диссертации использованы в научно-исследовательской работе «Разработка программного (автономного) модуля под ОС Windows расчета управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости электростанций для ЦСПА ОЭС Сибири», Инв. № СО-ДН-1/15. Разработанная методика внедрена в упомянутый программный модуль в части идентификации сечения нарушения устойчивости в энергосистеме, а также обоснования места, вида и объема управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости электростанций.

2. В настоящее время разработки НИР применяются в работе по титулу «Модификация программного обеспечения ПТК верхнего уровня ЦСПА ОЭС Сибири с целью обеспечения возможности подключения дополнительных низовых устройств ЛАПНУ и реализации возможности выбора управляющих воздействий с учетом сохранения динамической устойчивости электростанций в послеаварийных режимах», Инв. № ОДУ-ЦСПА-16/2.

Использование результатов работы позволяет:

- упростить задачу исследования устойчивости энергосистемы путем прогнозирования сечения асинхронного хода;

- повысить эффективность идентификации области допустимых режимов в рамках работы противоаварийной автоматики в режиме I-ДО.

Комиссия отмечает актуальность темы и считает, что работа отличается научной новизной и рассматривает ряд задач научного и практического содержания. Не вызывает сомнений целесообразность использования ее результатов при разработке технологических алгоритмов систем противоаварийного управления.

Член комиссии



Д.С. Лоцман

Член комиссии



А.К. Ландман

Член комиссии



Г.П. Попов