

На правах рукописи



БОРОДИН Дмитрий Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НЕУСТОЙЧИВЫХ ДВИЖЕНИЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.14.02 –
Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лизалек Николай Николаевич

Официальные оппоненты: Хрущёв Юрий Васильевич
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
профессор кафедры «Электрических сетей и
электротехники»

Фёдоров Владимир Кузьмич
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Омский государственный
технический университет», Энергетический
институт, профессор кафедры «Электроснабжение
промышленных предприятий»

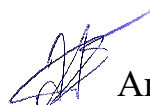
Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Защита состоится: «20» октября 2016 г. в 10-00 часов на
заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном
государственном бюджетном образовательном учреждении высшего
образования «Новосибирский государственный технический университет» по
адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского
государственного технического университета и на сайте
http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=15681

Автореферат разослан « » сентября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Анастасия Георгиевна Русина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 применяются 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 звеньев системы и оценка факторов, влияющих на их проявление, является перспективным направлением по снижению размерности задачи исследования устойчивости энергосистем.

Формализованный поиск слабых звеньев энергосистемы требует расширения постановки задачи исследования её устойчивости. Необходим переход от классической постановки задачи устойчивости, фиксирующей факт ее нарушения, к расширенной постановке – исследованию процессов распада синхронной работы системы при возмущениях с выделением сечений развивающегося асинхронного хода. 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. Исследования процессов распада синхронизма позволяет развивать прикладные методы 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 синхронной работы.

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

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

5. Разработаны методы 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 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 процесса распада её синхронной работы, содержащей в своем составе определение положения сечения 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 автоматики предотвращения нарушений устойчивости (АПНУ) в послеаварийных режимах.

Практическая ценность и реализация результатов работы

Основной практической ценностью работы является метод и алгоритм выбора управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости электростанций в режиме I-ДО в части объема и места реализации управляющих воздействий и прогнозирования сечения нарушения устойчивости.

Результаты, полученные в диссертации, учтены 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 результаты 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, включающая определение положения сечения асинхронного хода, что позволяет снизить объемность задачи оценки устойчивости энергосистем.

2. Подход к исследованию процессов распада синхронизма, основанный на выявлении иерархической структуры движения, методе площадей, законе

сохранения энергии структурно организованного движения, что позволяет рассчитать кинетическую энергию динамических подсистем и высоту потенциального барьера, препятствующего нарушению их устойчивости.

3. Энерговременные диаграммы как способ обзорного исследования слабых сечений энергосистемы и основных характеристик процессов распада синхронизма.

4. Метод выбора управляющих воздействий по реализации корректирующего управления для обеспечения динамической устойчивости в рамках ЦСПА, основанная на проведённых методических разработках.

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 исследования 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. Кощеева, Н.И. Овчаренко, А.А. Окина, Р.А. Вайнштейна, И.З. Глускина, Б.И. Иофьева и др. В этих работах отражены принципы построения систем ПА, методы выбора мест ввода и объема управляющих воздействий (УВ), подходы к математическому описанию области допустимых режимов и идентификации опасных возмущений.

В последние годы проблеме противоаварийного управления с целью обеспечения устойчивости и определения 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 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 рассмотрены принципы построения ЦСПА, методы выбора УВ, способы формирования математической модели объекта управления в рамках I-ДО. 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 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.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технической конференции «ЭНЕРГОСИСТЕМА: Исследова-

ние 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 автоматика энергосистем», организованной Российским национальным комитетом СИГРЭ и ОАО «Системный оператор Единой энергетической системы», 1 – 5 июня 2015 года в г. Сочи.

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

В полном объеме выполнены расчет и анализ результатов установившихся режимов и переходных процессов Норильско-Таймырской энергосистемы, крупных электростанций ОЭС Сибири с использованием ПВК RastWin, Мустанг, Eurostag.

Проведено обоснование целесообразности 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.

Проведён анализ 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 в части достаточности выбора управляющих воздействий по разработанному алгоритму на основании расчетов электромеханических переходных процессов с использованием общепризнанных программ расчета режимов (RastWin, Мустанг, Eurostag).

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, отражена их практическая ценность, приведены краткое изложение содержания работы и основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 выполнен обзор литературы, посвящённый методам анализа и способам обеспечения динамической устойчивости синхронных машин в сложной энергосистеме.

Представлено становление проблемы динамической устойчивости при создании объединенной энергосистемы с концентрацией мощностей крупных электростанций в ее узлах. В качестве эффективного способа по обеспечению динамической устойчивости рассмотрено управление энергосистемой: оперативно-диспетчерское и автоматическое. Разграничены задачи обозначенных видов управления энергосистемой, выявлены функциональные составляющие противоаварийной автоматики (ПА).

Рассмотрена централизованная система противоаварийной автоматики (ЦСПА) ОЭС Сибири в части решаемых задач противоаварийного управления (ПАУ) в настоящем и прошлом, принципов построения и функционального состава ЦСПА.

Сформированы следующие подходы, методы и способы по обеспечению динамической устойчивости.

1. Локального ПАУ, основанного на использовании местной информации объекта управления, и реализованного в рамках:

- комплекса фиксации тяжести короткого замыкания (ФТКЗ);
- подсистем автоматики предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ), действующих по факту отключения силовых элементов;
- автоматики разгрузки при перегрузке по мощности (АРПМ);
- автоматики ликвидации асинхронного режима (АЛАР), действующей в случае нарушения устойчивости;
- метода снижения времени возмущения посредством ускорения устройства резервного отключения выключателей (УРОВ).

2. Системного ПАУ, исполненного в рамках ЦСПА.

3. Структурных подходов, основанных на выделении слабых звеньев энергосистемы, критическое состояние которых является причиной нарушения устойчивости.

4. Подходы по реализации ПАУ в темпе процесса:

- принцип I-ДО, заключающийся в периодическом расчете режимов по актуализированной математической модели объекта управления до наступления аварийного возмущения;
- принцип I-ПОСЛЕ, заключающийся в единичном расчете режима по актуализированной математической модели объекта управления после наступления аварийного возмущения;
- использование векторных измерений режимных параметров;

- децентрализованное ПАУ.

5. Подходы, основанные на применении различных методов исследования устойчивости нелинейных систем – численном интегрировании уравнений движения, методе площадей, применении функций Ляпунова.

Выявлены следующие недостатки существующих подходов, методов и способов обеспечения динамической устойчивости: объемность и сложность требуемых расчетов, необходимость существенного расширения существующих аппаратных средств ПА, высокая времезатратность расчета и ввода УВ при обеспечении их достаточности и минимизации.

В главе 2 сформулирована постановка задачи анализа распада синхронной работы энергосистемы на основании понятий структурно организованного движения, рассматривающего разбиения синхронных машин по группам и их межгрупповые движения.

В основу методических разработок положены исследования структуры колебательных движений в сложных энергосистемах как представителей распределенных колебательных систем. Структура движения (структурная организация движения) выявляется на основе анализа колебательной структуры электромеханических переходных процессов, имеющих волновой характер. 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.

Формирование структурно организованного движения выполняется на основе иерархического описания движения синхронных машин в энергосистеме. Рассматриваются 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.

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

Структурой неустойчивости, выявляемой в ходе исследования, называется способ деления энергосистемы на подсистемы, между которыми развива-

ется асинхронный ход. Развитие асинхронного режима по тому или иному сечению будем связывать с проявлением различных структур неустойчивости, обусловленным их насыщением энергией колебаний вследствие аварийного возмущения.

Важным понятием структурно организованного движения является его траектория. Различаются возможные и действительные траектории. Возможная траектория движения удовлетворяет законам сохранения импульса относительных движений и уравнениям баланса мощности в узлах энергосистемы. Такие траектории применяются для обзорных исследований структур неустойчивости.

Действительная траектория полностью удовлетворяет уравнениям движения системы. В представленной работе основное внимание уделено исследованию процесса распада синхронизма энергосистемы, проводимому при численном расчете конкретного переходного процесса, т.е. на действительной траектории. Из расчета выделяется колебательная структура движения с целью выбора противоаварийного управления.

Так как устойчивость электромеханических колебаний определяется работами, производимыми на траектории движения, то при исследованиях рассматривается *волна смещения*, определяющая работу, совершаемую избыточными моментами в переходном процессе. Выявление *изменяющейся во времени колебательной структуры* в переходном процессе основано на основном топологическом свойстве волнового движения. 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*.

Рассмотрение колебательных структур упрощает задачу исследования устойчивости, так как прогнозирует сечение развития асинхронного хода и существенно снижает размерность задачи. Это в свою очередь повышает эффективность расчетов электрических режимов в части экономии расчетного времени.

Применение энергетического подхода (метода площадей) в задачах исследования динамической устойчивости энергосистем приводит:

- к рассмотрению пространственного рельефа потенциальной энергии системы, защищающей её от выпадения из синхронизма по одному из слабых сечений;
- к определению пространственного распределения кинетической энергии колебаний, поступающей в систему с аварийным возмущением.

Эта постановка задачи устойчивости близка к известным физическим задачам анализа процессов распада сложных многокомпонентных систем при возмущениях.

На примере рассмотрения расчетов режимов простой Норильско-Таймырской энергосистемы с применением современных средств моделирования режимов (ПК RastrWin, Мустанг) показана сложность и времязатратность выделения слабых сечений, идентификации области допустимых режимов и выявления влияющих схемно-режимных условий на устойчивость системы.

Расширенная постановка задачи исследования устойчивости посредством прогнозирования сечения нарушения устойчивости и расчета энергетических характеристик распада синхронизма позволяет снизить объемность и сложность расчетов, что устраняет названный недостаток существующих методов и способов ПАУ.

Для снижения времязатратности расчетов и ввода объема УВ с учетом всех возможных схемно-режимных условий предлагаемый способ ПАУ должен работать в рамках ЦСПА в темпе процесса (I-ДО).

С целью сохранения существующей аппаратной структуры ЦСПА разрабатываемый алгоритм должен функционировать в рамках текущего построения структуры ЦСПА, что подразумевает выбор корректирующего ПАУ по условию обеспечения динамической устойчивости после выбора УВ из условия допустимости установившегося режима.

На основании расчетов режимов по оценке устойчивости крупных электростанций ОЭС Сибири доказано наличие ограничений выдачи мощности по условию обеспечения динамической устойчивости и их зависимость от нелокальных схемно-режимных условий. Это обосновывает необходимость развития корректирующих алгоритмов для обеспечения динамической устойчивости в рамках ЦСПА ОЭС Сибири.

В **главе 3** рассматривается структурная организация электромеханических колебаний и её проявление в процессах распада синхронизма энергосистем. Дано формальное определение структурно организованного движения.

Исследование процессов распада синхронизма системы сводится к анализу колебательных движений, развивающихся в системе относительно её центра инерции. 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 колебаний*.

Движение синхронных машин представляется поступательным движением центра инерции системы и колебательными относительными движениями центра инерции подсистем и генераторов в подсистемах. Скорость вращения i -ой синхронной машины представляется в виде суммы постоянной слагающей и трех относительных процессов.

$$\Omega_{zi}(t) = \Omega_0 + \Delta\Omega_{zis}(t) + \Delta\Omega_{s0}(t) + \Delta\Omega_0(t), \quad (1)$$

$$\Omega_0 = \Omega_0(0), \quad (2)$$

$$\Delta\Omega_0(t) = \Omega_0(t) - \Omega_0, \quad \Delta\Omega_{s0}(t) = \Omega_{s0}(t) - \Omega_0(t), \quad \Delta\Omega_{zis}(t) = \Omega_{zi}(t) - \Omega_{s0}(t), \quad (3)$$

$$\Omega_0(t) = \frac{\sum_k J_k \Omega_{zk}(t)}{\sum_k J_k} = \frac{\sum_k J_k \Omega_{zk}(t)}{J_\sigma}, \quad \Omega_{s0}(t) = \frac{\sum_{k_s} J_k \Omega_{zk}(t)}{\sum_{k_s} J_k} = \frac{\sum_{k_s} J_k \Omega_{zk}(t)}{J_s}, \quad (4)$$

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_ϑ – 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 Ω_0 (высший уровень иерархии движения), $\Delta\Omega_{s0}(t)$ – 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).

Посредством аналогичных выражений вводится разложение угловых перемещений роторов генераторов. С учетом сохранения суммарного импульса движения в системах координат центров инерции

$$\sum_s J_s \Delta\Omega_{s0}(t) = 0, \quad \sum_{k_s} J_k \Delta\Omega_{zks}(t) = 0, \quad (5)$$

получены дифференциальные уравнения для относительных движений.

$$J_\vartheta \frac{d(\Delta\Omega_0)}{dt} = \Delta M_\vartheta, \quad (6)$$

$$J_s \frac{d(\Delta\Omega_{s0})}{dt} = \Delta M_s - \frac{J_s}{J_\vartheta} \Delta M_\vartheta = \Delta M_{s0}, \quad J_i \frac{d(\Delta\Omega_{zis})}{dt} = \Delta M_i - \frac{J_i}{J_s} \Delta M_s = \Delta M_{is}, \quad (7)$$

$$\sum_s \Delta M_{s0} = 0, \quad \sum_s \Delta M_s = \Delta M_\vartheta, \quad (8)$$

где ΔM – суммарный избыточный момент на валах машин, подсистеме, генераторе в зависимости от рассматриваемого уровня иерархии, J – характеристика инерционности в соответствии с иерархией движения.

Добавка кинетической энергии в переходном процессе разложена на компоненты структурно организованного движения.

$$\Delta K(t) = K_{лок}(t) + K_{рег}(t) + K_{сис}(t), \quad (9)$$

$$K_{сис}(t) = \Omega_0 J_\vartheta \Delta\Omega_0(t) + J_\vartheta \frac{\Delta\Omega_0^2(t)}{2} \quad (10)$$

$$K_{кол} = K_{рег} + K_{лок} = \sum_s J_s \frac{\Delta\Omega_{s0}^2(t)}{2} + \sum_s \sum_{k_s} J_k \frac{\Delta\Omega_{zks}^2(t)}{2} \quad (11)$$

где $K_{лок}$ – локальная составляющая кинетической энергии колебаний, $K_{рег}$ – региональная составляющая кинетической энергии колебаний, $K_{сис}$ – системная

составляющая кинетической энергии (поступательное движение), $K_{кол}$ – полная кинетическая энергия колебаний. При изменении структуры полная кинетическая энергия колебаний неизменна, меняются только соотношения между её составляющими.

Аддитивность кинетической энергии в узловом пространстве энергосистемы позволяет использовать ее для описания характеристик движения выделенных областей системы – подсистем.

Изменения кинетической энергии связаны с работами, совершаемыми при перемещении по траектории движения. Покомпонентное разделение избыточных относительных моментов позволяет перейти к работам на траекториях относительных перемещений.

$$A_{пезs} = \int_{t_0}^t d \left(J_s \frac{\Delta \Omega_{s0}^2}{2} \right) = \int_{\Delta \delta_{s0}(t_0)}^{\Delta \delta_{s0}(t)} \Delta M_{s0} d(\Delta \delta_{s0}), \quad (12)$$

$$A_{локи} = \int_{t_0}^t d \left(J_i \frac{\Delta \Omega_{zis}^2}{2} \right) = \int_{\Delta \delta_{zis}(t_0)}^{\Delta \delta_{zis}(t)} \Delta M_{is} d(\Delta \delta_{zis}). \quad (13)$$

где $A_{пезs}$ – работа по перемещению центра инерции s -ой подсистемы, $A_{локи}$ – работа по перемещению i -ого генератора в s -ой подсистеме.

Разбиения на подсистемы проводится на базе выявления *колебательной структуры переходного процесса*, в общем случае являющейся функцией времени. При этом используется структура движения, *формирующаяся во время расчета* переходного процесса.

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*.

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

$$\Delta \delta_{i0}(t, t_0) = \delta_i(t) - \delta_i(t_0) - \frac{\sum_k J_k [\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)]}{J_s}, \quad (14)$$

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.

В правой части приведённого соотношения 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).

Для выделения подсистем определим границы между ними. При этом признаком граничной связи, объединяющей две смежные подсистемы, становится *разный знак угловых смещений относительно центра инерции системы* в

узлах по её концам. Рассчитав $\Delta\delta_{i_0}$ для всех узлов системы и пометив связи, объединяющие узлы с разными знаками этих отклонений, можно 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). Описанный алгоритм позволяет определять колебательную структуру движения в системе как функцию времени $S(t)$.

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 началу развития асинхронного хода.** Интервал времени перед развитием асинхронного хода, в течение которого колебательная структура неизменна, определяет время целенаправленного ввода управляющих воздействий.

Исследование процессов распада синхронизма системы основывается на определении региональных характеристик переходного процесса в условиях переменной колебательной структуры $S(t)$ и сводится к простому *пересчету относительных скоростей, смещений и моментов для подсистем переменной колебательной структуры*.

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 времени может нарастать или убывать. В первом случае работа положительна, во втором отрицательна. Так как работа A может быть увязана с изменением потенциальной энергии, 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*). В связи с присутствием не потенциальных сил работа на траектории взаимного движения подсистем частично не преобразуется в потенциальную энергию (а расходуется на демпфирование колебаний), поэтому представление о потенциальной яме является приближённым, позволяющим повысить наглядность процессов нарушения устойчивости (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 пространственно – 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 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 её гребень, за которым лежит уже другая потенциальная яма, с другим положением равновесия (если оно существует). Результаты расчета характеристик движения подсистем вариантов структур неустойчивости позволяют оценить достаточность или нехватку работ торможения этих подсистем, приводящую к распаду синхронной работы.

Описанный метод определения структурно организованного движения с расчетом его энергетических характеристик протестирован на различных моделях энергосистем. В результате моделирования различных по тяжести возмущений сделаны 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.

Таким образом, 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.

В главе 4 рассматривается практическое применение предлагаемых теоретических заключений и постановок.

Предложен метод энерговременных диаграмм как способ наглядного представления совокупности неустойчивых движений энергосистемы, который можно использовать при разграничении задач ПАУ по сохранению устойчивости и построения структуры ПА. При этом энерговременная диаграмма (например, представленная на рисунке 1) содержит в себе информацию о пространственных (сечение асинхронного хода), временных (время выхода системы на критическое смещение), энергетических (кинетическая энергия возмущения) характеристиках нарушения устойчивости.

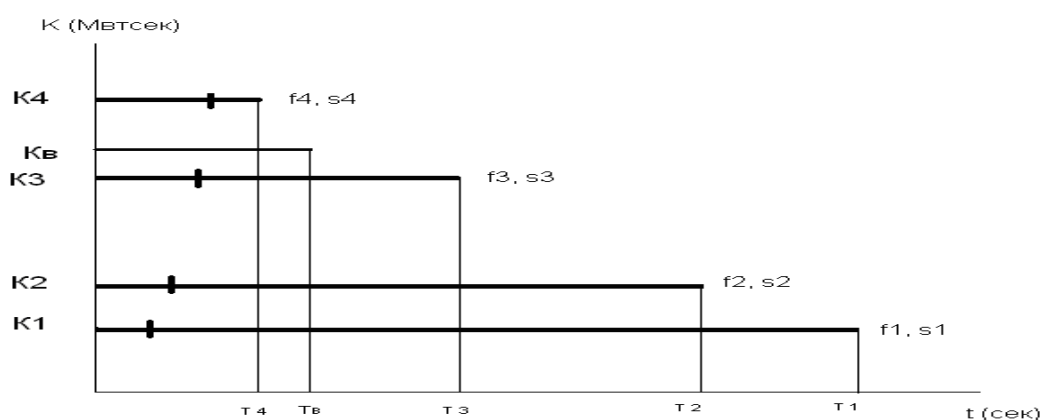


Рисунок 1 – Энерговременная диаграмма неустойчивости для одной аварийной ситуации

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 перемещений. Изменение кинетической и потенциальной энергии рассматриваются на *возможных* траекториях движения энергосистемы.

Горизонтальные отрезки прямых энерговременной диаграммы показывают энергетические уровни кинетической энергии колебаний K_1, \dots, K_4 (предельные возмущения), возбуждающие различные структуры неустойчивости (вари-

анты «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 слабых сечений этого осциллятора).

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 – $(T_1 - T_B)$.

Другим применением проведённых методических разработок является выбор корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости в рамках ЦСПА.

Идентификация неустойчивости динамического перехода происходит по фиксации расхождения взаимного угла двух смежных подсистем колебательной структуры более чем на 180° . Выражение для взаимного угла s -ой и m -ой подсистем:

$$\Delta\delta_{sm}(t, t_0) = \Delta\delta_{s0}(t, t_0) - \Delta\delta_{m0}(t, t_0) = \frac{\sum_{k_s} J_k [\delta_{ek}(t) - \delta_{ek}(t_0)]}{J_s} - \frac{\sum_{k_m} J_k [\delta_{ek}(t) - \delta_{ek}(t_0)]}{J_m}. \quad (15)$$

При идентификации неустойчивости между двумя непосредственно связанными подсистемами колебательной структуры, сформировавшейся в системе к моменту нарушения устойчивости, начинается развитие асинхронного хода. Это явление сопровождается нарастанием их взаимного углового смещения. Назовем такую пару подсистем *неустойчивой парой* (НП).

Колебания подсистем неустойчивой пары относительно её центра инерции описывается соотношениями, внешне сходными с аналогичными соотношениями для 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 действительно двух-машинной схемы).

При анализе устойчивости и выборе управления на основе метода площадей и использовании представления о неустойчивой паре нет необходимости обращаться к полной схеме замещения, состоящей из двух, полностью охватывающих систем частей, примыкающих к сечению асинхронного хода и колеблющихся относительно общесистемного центра инерции. Полное 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.

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.

Определение момента времени, в который региональное движение максимально исчерпывает возможность совершения отрицательной работы, основывается на определении моментов времени, в которые отклонения региональной скорости ускоряющейся подсистемы (после нарушения устойчивости) от скорости движения центра инерции пары достигают минимума. Далее происходит выбор момента времени, в котором кинетическая энергия регионального движения минимальна.

В момент достижения критического регионального смещения между подсистемами НП можно определить их региональную $K_{\text{вн}(1+2)}(t_{кр})$ 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 $K_{\text{лок}1}^+(t_{кр}) + K_{\text{лок}2}^-(t_{кр})$:

$$K_{\text{лок}1}^+(t_{кр}) = \sum_{k_1, \Delta\Omega_{\text{эк}1}(t_{кр}) > 0} J_k \frac{\Delta\Omega_{\text{эк}1}^2(t_{кр})}{2}, \quad K_{\text{лок}2}^-(t_{кр}) = \sum_{k_2, \Delta\Omega_{\text{эк}2}(t_{кр}) < 0} J_k \frac{\Delta\Omega_{\text{эк}2}^2(t_{кр})}{2}. \quad (16)$$

Метод выбора корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости подразумевает сформированные схемно-режимные

условия, параметры аварийного возмущения и выбранные в необходимом объеме УВ из условия допустимости послеаварийного установившегося режима с известными временами ввода воздействий t_{yc} . При этих условиях выполняется расчет электромеханического переходного процесса и выделяется колебательная структура $S(t)$. При идентификации нарушения устойчивости определяется НП. Выбегающей (избыточной) подсистеме НП далее присвоен номер 1.

Основные этапы метода выбора УВ следующие:

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 $t_{ин}$ (идентификация нарушения устойчивости) и t_{yc} (ввод УВ по условию допустимости установившегося режима) с целью идентификации цикла качаний, в котором зафиксировано нарушение устойчивости.

$\Delta\Omega_{1(1+2)}(t_{ин})\Delta\Omega_{1(1+2)}(t_{yc}) > 0$ - 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.

2. Определение времён изменения знака относительного момента. 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 $t_{изм.зн}^k$.

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

4. Определение времени наступления критического смещения $t_{кр}$. Проводится путем анализа значений кинетической энергии регионального движения НП относительно её собственного центра инерции $K_{вн(1+2)}(t)$ на множестве $t_{изм.зн}^k$.

5. Определение избыточной кинетической энергии $K_{изб}$. Выполняется путем сопоставления величин региональной и локальной кинетической энергии колебаний в момент $t_{кр}$.

6. Определение времени внесения управляющих воздействий для обеспечения динамической устойчивости $t_{yд}$. 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.

7. Определение углового смещения между подсистемами НП на интервале времени от $t_{yд}$ до $t_{кр} - \Delta\delta_{12}(t_{кр}, t_{yд})$. Определяется участок траектории движения, на котором необходимо реализовать дополнительное торможение.

8. Расчет управляющего воздействия – отключения генераторов в избыточной подсистеме 1. Отключение генераторов в избыточной подсистеме при-

водит к изменению кинетической энергии регионального движения подсистем НП в переходном процессе за счёт двух основных факторов: за счёт изменения (уменьшения) вращающейся массы; за счёт изменения площадки торможения (т.е. за счёт увеличения кинетической энергии, преобразуемой в потенциальную). Оценить первый фактор можно на основе соотношения:

$$\Delta K_{\text{вн}(1+2)} = \Delta J_1 \frac{\Delta \Omega(t_{y\partial})_{1(1+2)}^2}{2} \approx \frac{\Delta P_{m1}}{P_{m1}(t_{y\partial})} K_{\text{вн}1}(t_{y\partial}), \quad (17)$$

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

$$\Delta K_{\text{вн}(1+2)}^{\text{ном}} \approx \Delta M_{m1(1+2)} \Delta \delta_{12}(t_{\text{кр}}, t_{y\partial}) \approx \frac{\Delta M_{m1} J_2}{J_1 + J_2} \Delta \delta_{12}(t_{\text{кр}}, t_{y\partial}) \approx \frac{\Delta P_{m1} J_2}{\Omega_{\text{ном}}(J_1 + J_2)} \Delta \delta_{12}(t_{\text{кр}}, t_{y\partial}), \quad (18)$$

$$\Delta K_{\text{вн}(1+2)} + \Delta K_{\text{вн}(1+2)}^{\text{ном}} = K_{\text{изб}}, \quad (19)$$

где ΔP_{m1} – отключаемая мощность турбин в «1» подсистеме, $P_{m1}(t_{y\partial})$ – мощность турбин в «1» подсистеме в момент ввода корректирующего управления, $K_{\text{вн}1}(t_{y\partial})$ – кинетическая энергия выбегающей подсистемы «1» в тот же момент времени. Мощность турбин отключаемых генераторов в выбегающей части системы ΔP_{m1} определяется как:

$$\Delta P_{m1} \approx \frac{K_{\text{изб}}}{\frac{K_{\text{вн}1}(t_{y\partial})}{P_{m1}(t_{y\partial})} + \frac{J_2}{\Omega_{\text{ном}}(J_1 + J_2)} \Delta \delta_{12}(t_{\text{кр}}, t_{y\partial})}, \quad (20)$$

9. *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:

$$K_{\text{лок}1y}^+(t_{y\partial}) = \sum_{k_1 \in k_{1y}, \Delta \Omega_{\text{эк}1}(t_{y\partial}) > 0} J_k \frac{\Delta \Omega_{\text{эк}1}^2(t_{y\partial})}{2}. \quad (21)$$

Определяется относительный вклад управляемой и одновременно опережающей машины в эту кинетическую энергию:

$$\mu_k = \frac{J_k \Delta \Omega_{\text{эк}1}^2(t_{y\partial})}{2 K_{\text{лок}1y}^+(t_{y\partial})} \quad (22)$$

Определяется управляющее воздействие на управляемую и опережающую машину:

$$\Delta P_{m1k} = \mu_k \Delta P_{m1}. \quad (23)$$

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

На рисунке 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. Фиксация нарушения устойчивости происходит по факту превышения изменений взаимного угла между смежными подсистемами больше чем на 180^0 в момент $t_{ун}$. Выделяется движение избыточной подсистемы неустойчивой пары $\Delta\Omega_{1(1+2)}$ относительно центра инерции неустойчивой пары. По рисунку 2 очевидно, что нарушение устойчивости происходит во втором цикле качаний. Фиксация изменения знака относительного момента выдает три значения момента времени t_{uzm}^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 $\Delta\Omega_{1(1+2)}$ 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 для обеспечения динамической устойчивости.

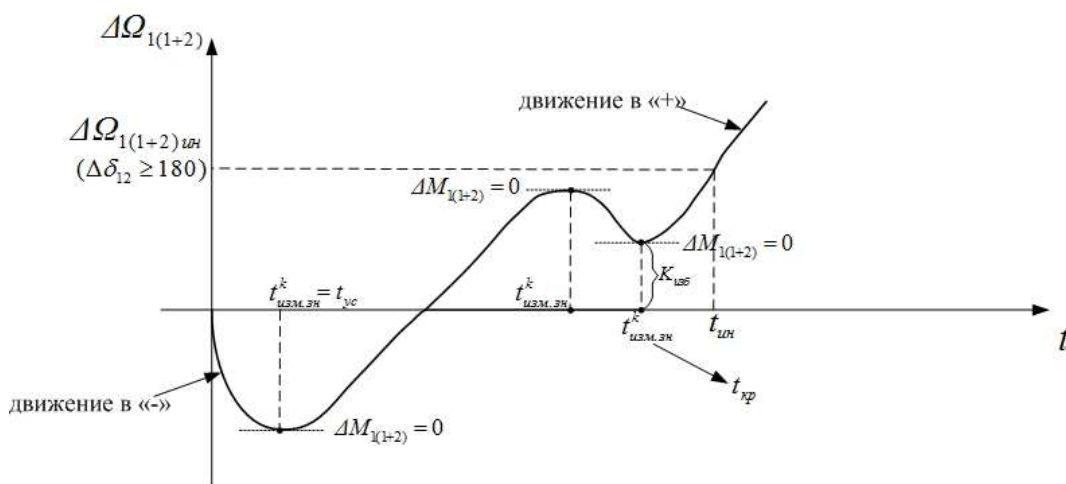


Рисунок 2 – График изменения отклонения скорости первой подсистемы неустойчивой пары относительно ее центра инерции

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

Использованы две математические модели энергосистемы: модель ОЭС Сибири в 256 узлов с упрощенными моделями регуляторов возбуждения и скорости; полная модель ОЭС Сибири (более 2000 узлов) с полными моделями всех регуляторов генераторов. Первая модель использована в модуле «Динам» и ПВК Мустанг («Мустанг без АРВ»). Вторая модель использована в ПВК Eurostag («Мустанг с АРВ») и ПВК Eurostag.

Для сформированных схемно-режимных условий введено аварийное возмущение, в результате которого зафиксировано нарушение динамической устойчивости. По представленному методу модуль выбрал ОГ-2 Братской ГЭС. Результаты расчета переходных процессов показаны на рисунке 3.

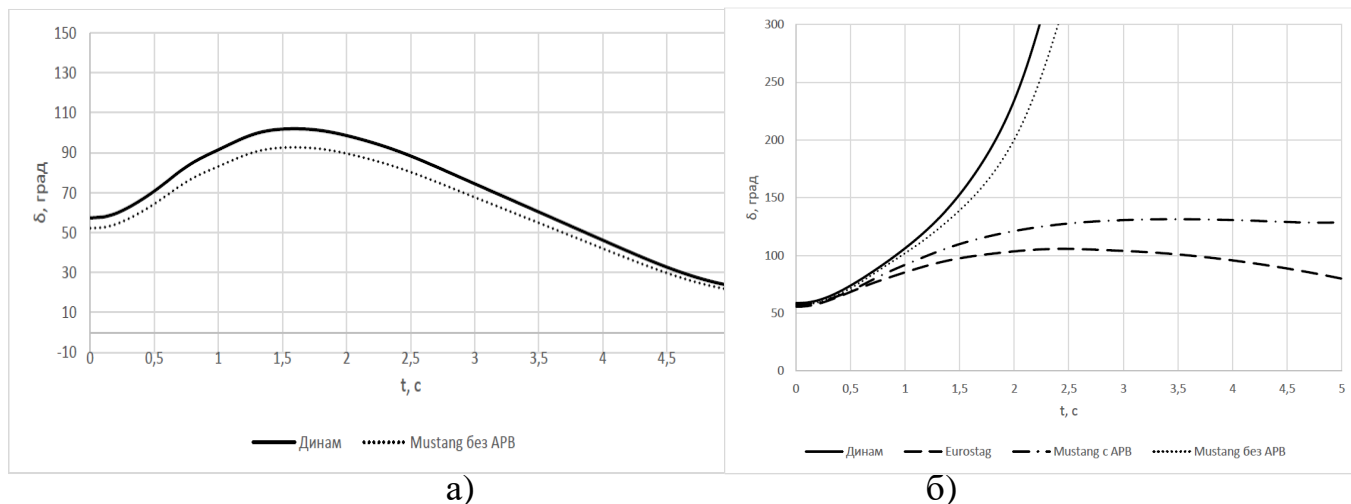


Рисунок 3 – Угол ГГ-2 БрГЭС с учетом ОГ-2 БрГЭС (а) и с учетом ОГ-1 БрГЭС (б)

Как видно из рисунка 3 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.

Разработана алгоритмическая часть метода выбора управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости в виде блок-схем: взаимодействия с блоком расчета УВ по условию допустимости установившегося режима, приближенного расчета шунтов КЗ, расчета и анализа электромеханического переходного процесса, фиксации нарушения динамической устойчивости, расчета УВ.

Сформулированы направления развития корректирующего управления по условию обеспечения динамической устойчивости энергосистем с целью его внедрения в ЦСПА ОЭС Сибири.

По результатам выполнения работы имеется акт об использовании результатов диссертационной работы в части метода выбора УВ по условию обеспечения динамической устойчивости и прогнозирования сечения асинхронного хода.

Основными результатами диссертационной работы являются:

1. Представлена расширенная постановка задачи анализа устойчивости как задачи исследования процессов распада синхронной работы системы при возмущениях, содержащей 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 энергосредственных диаграмм, отражающие пространственные, временные, энергетические параметры слабых сечений энергосистемы.

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, заключающиеся в выборе объема управляющих воздействий, полностью совпали.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Бородин Д. Н. Исследование структуры неустойчивых взаимных движений энергосистем для определения состава задач противоаварийного управления / Д. Н. Бородин, Н. Н. Лизалек, В. Ф. Тоньшев, К. С. Мочалин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – №4. – С. 233–240.

2. Бородин Д. Н. Оценка и обеспечение динамической устойчивости при управляемом переходе к послеаварийному режиму с нормированным запасом статической устойчивости / Д. Н. Бородин, Н. Н. Лизалек, А. С. Вторушин, С. Г. Аржанников // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – №4. – С. 244–249.

3. Бородин Д. Н. Особенности назначения допустимых перетоков по электропередаче 220 кВ Курейская ГЭС – Усть-Хантайская ГЭС – Норильск / Д. Н. Бородин, М. В. Данилов, В. А. Маковцев, В. О. Чершова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – №4. – С. 259–263.

4. Бородин Д. Н. Быстродействующая автоматика ограничения повышения частоты / Д. Н. Бородин, В. В. Васильев, А. А. Осинцев, Е. И. Фролова // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – №2. – С. 28–33

Работы, опубликованные в сборниках научных трудов конференций:

5. Бородин Д. Н. Подходы к оценке динамической устойчивости перехода к послеаварийному режиму с нормированным запасом статической устойчивости в контуре противоаварийного управления / Д. Н. Бородин, Н. Н. Лизалек, А. С. Вторушин, С. Г. Аржанников // Релейная защита и автоматика энергосистем : сб. докл. XXII конф. – С. 271–276.

6. Бородин Д. Н. Структурный анализ движений синхронных машин в энергосистемах / Д. Н. Бородин, Н. Н. Лизалек // Релейная защита и автоматика энергосистем : сб. докл. XXII конф. – С. 277–278.

7. Бородин Д. Н. Алгоритмы оценки динамической устойчивости энергосистемы при управляемом переходе к послеаварийному режиму / Д. Н. Бородин, Н. Н. Лизалек, А. С. Вторушин, С. Г. Аржанников // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем : сб. докл. 5-й междунар. науч.-техн. конф. – С. 266–273.

8. Бородин Д. Н. Исследование структуры неустойчивых взаимных движений энергосистем для определения состава задач противоаварийного управления / Н. Н. Лизалек, В. Ф. Тонышев, К. С. Мочалин, Д. Н. Бородин // Энергосистема: исследование свойств, управление, автоматизация : сб. докл. науч.-техн. конф. – Новосибирск : Изд-во ЗАО «ИАЭС», 2014. – С. 3–11.

9. Бородин Д. Н. Оценка и обеспечение динамической устойчивости при управляемом переходе к послеаварийному режиму с нормированным запасом статической устойчивости / Д. Н. Бородин, Н. Н. Лизалек, А. С. Вторушин, С. Г. Аржанников // Энергосистема: исследование свойств, управление, автоматизация : сб. докл. науч.-техн. конф. – Новосибирск : Изд-во ЗАО «ИАЭС», 2014. – С. 26–31.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

тел./факс. (383) 346-08-57

формат 60 X 84/16, объём 1.5 п.л., тираж 100 экз.

заказ № 1113 подписано в печать 07.07.2016 г.