

На правах рукописи

Кабанов Игорь Александрович

**ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ИНДУКЦИОННОГО  
НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ И  
ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЫ**

Специальность 05.14.02. – Электростанции и  
электроэнергетические системы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2001

Работа выполнена на кафедре «Электрические системы и сети» Санкт-Петербургского государственного технического университета

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
Смоловик С.В.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор  
Ковчин С.А.

кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник Кац П.Я.

Ведущая организация - Научно-исследовательский институт по  
передаче электрической энергии постоянным  
током высокого напряжения (ОАО НИИПТ)

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2002 г. в \_\_\_\_\_ часов на  
заседании Диссертационного совета К 212.229.02 при Санкт-Петербургском  
государственном техническом университете по адресу: 195251, Санкт-  
Петербург, Политехническая ул., 29, Главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке СПбГТУ.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2001 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

А.В. Терёшкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие электроэнергетических систем (ЭЭС) приводит к усложнению условий их эксплуатации, снижению показателей наблюдаемости и управляемости, повышению вероятности появления тяжелых электрических режимов. Неизбежно возникающие аварийные ситуации перерастают в тяжелые системные аварии, приводящие к отключению миллионов потребителей. Из-за высокой стоимости строительства линий электропередачи значительное внимание уделяется созданию и внедрению эффективных и экономичных мероприятий, обеспечивающих устойчивость ЭЭС при возмущениях различной амплитуды. Сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии (СПИН) в сравнении с конкурирующими устройствами наиболее «органичен» для ЭЭС, поскольку нужный эффект достигается без преобразования видов энергии. Соответственно очень высоки его КПД (более 90 %) и быстродействие (полная смена режима работы за сотые доли секунды). В определенных пределах возможно независимое регулирование активной и реактивной мощности. Большой накопитель (порядка 300 МВт\*ч), предназначенный для повышения плотности суточного графика нагрузки, может (особенно при завышенной мощности инвертора) использоваться одновременно как регулирующий элемент, повышающий динамическую и статическую устойчивость системы, заменяющий вращающийся резерв и т.п. Функции узла регулирования в системе может выполнять и накопитель несоизмеримо меньшей энергоемкости. Сверхпроводниковый накопитель средней энергоемкости (3 – 30 МВт\*ч) дает возможность точного отслеживания изменения нагрузки при ступенчатом вводе генерирующих мощностей в номинальном режиме. Такой СПИН может быть также быстродействующим составным элементом более крупного накопителя (например, гидроаккумулирующей электростанции), использоваться для сбора энергии от нетрадиционных источников, демпфировать воздействие крупных локальных потребителей энергии кратковременного действия.

Основой развития электроэнергетики является объединение электроэнергетических систем (ЭЭС) и использования в них синхронных генераторов больших единичных мощностей, достигающих 1000 и 1300 Мвт. Электромеханические параметры таких генераторов ухудшены, и обеспечение устойчивости и надежности работы ЭЭС обеспечивается за счет применения различных систем управления, важное место среди которых занимают системы автоматического регулирования возбуждения генераторов, частоты вращения турбин, активной мощности электрических станций и т.д. Достижение высоких демпферных свойств реализуется благодаря использованию в АРВ в качестве параметров стабилизации сигналов производной напряжения статора, отклонения частоты

напряжения статора и производной частоты. В ряде конструкций зарубежных регуляторов напряжения используются частота вращения вала и ее производная или ускоряющая мощность. Анализ существующих в мире типов АРВ показывает, что в их основе лежит единый принцип, предусматривающий пропорционально-дифференциальный (ПД) закон регулирования по отклонению напряжения в сочетании с отрицательными обратными связями по напряжению и производной тока возбуждения и стабилизацией по производным режимных параметров. В настоящее время возможности исследования качества переходных процессов и проектирования автоматических регуляторов, реализующих близкие к оптимальным адаптивные законы управления существенно возросли. В распоряжении исследователя имеются мощные пакеты для моделирования динамических систем и структур управления, в первую очередь, получившая широкое распространение система программирования MatLab. Новые возможности моделирования позволяют реализовать весьма сложные исследовательские модели и получить представления о направлениях развития систем автоматического управления, координации настроечных параметров устройств с различными характеристиками, обеспечивающих высокие показатели демпфирования маловозмущенного движения и высокие пределы устойчивости при конечных возмущениях.

Целостный взгляд на анализ динамических свойств энергообъединений позволяет оценить эффективность традиционных средств регулирования, а также определить необходимость создания принципиально новых комплексов электрооборудования – накопителей энергии, статических компенсаторов реактивной мощности, обеспечивающих как ее потребление, так и выдачу, и нелинейных реакторов различных типов. Возможность практически мгновенно реагировать на изменение режима энергосистемы существенно увеличивает технические преимущества СПИН по сравнению с традиционными противоаварийными мероприятиями, позволяя рассматривать их как одно из эффективных средств повышения динамической устойчивости ЭЭС, одновременно снижая ущербы от недоотпуска электроэнергии потребителям.

Цели и задачи работы. Целью работы являлась разработка методов математического моделирования электроэнергетической системы, включающей СПИН, и исследование показателей демпфирования колебаний за счет привлечения возможностей накопителя в различных схемно-режимных условиях, исследование переходных процессов такой энергосистемы при конечных возмущениях; разработка рекомендаций по законам управления СПИН.

Для достижения поставленных целей потребовалось:

- разработать комплексные математические модели в среде MatLab;

- выполнить сравнительное исследование различных технических комплексов, в том числе СПИН, с точки зрения демпфирования малых возмущений в ЭЭС;
- разработать рекомендации по реализации законов управления фазой и величиной эквивалентной ЭДС СПИН для демпфирования колебаний;
- выполнить исследование влияния СПИН на протекание процессов при конечных возмущениях в электроэнергетической системе;
- выполнить оценку эффективности применения СПИН для обеспечения устойчивости протяженной электропередачи переменного тока.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- в среде MatLab разработана методика математического моделирования сверхпроводникового индукционного накопителя так называемой виртуальной синхронной машиной, у которой величина и фаза ЭДС могут изменяться практически безынерционно в соответствии с заданным законом регулирования, а уравнение движения отсутствует. Возможность такого регулирования обоснована на основе подробного анализа процессов, происходящих при регулировании тиристорных преобразователей, через которые сверхпроводниковая обмотка индуктивного накопителя присоединена к сети переменного тока;
- выполнена сравнительная оценка эффективности ряда устройств, способных обеспечить высокие показатели демпфирования маловозмущенного движения электроэнергетической системы. В качестве таковых рассмотрены автоматическое регулирование возбуждения синхронного генератора (АРВ), управляемый шунтирующий реактор трансформаторного типа (УШРТ), СПИН;
- проведено исследование динамических показателей системы, оснащенной СПИН, при коротких замыканиях в высоковольтной сети;
- выполнена оценка эффективности СПИН для обеспечения устойчивости протяженной электропередачи переменного тока;
- в среде MatLab разработана методика построения областей устойчивости в пространстве заданных коэффициентов регулирования.

#### Практическая ценность и реализация результатов работы.

Разработанное программное обеспечение, полученные выводы и рекомендации могут быть использованы в проектных и эксплуатационных организациях при определении условий эксплуатации ЭЭС, расчетах режимов, запасов устойчивости и динамических переходов при авариях. Разработанное программное обеспечение используется в научной работе кафедры «Электрические системы и сети» СПбГТУ при решении задач перспективного развития энергосистем и исследования их устойчивости при малых и конечных возмущениях.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на научных семинарах кафедры «Электрические системы и

сети», а также на научно-технических конференциях, проводившихся в СПбГТУ. По теме диссертации опубликовано пять печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы из 129 наименований. Содержание работы изложено на 184 страницах, иллюстрируется 91 рисунком и 27 таблицами.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** выполнен обзор средств и способов обеспечения демпфирования малых возмущений в ЭЭС, а также типов и свойств существующих и проектируемых сверхпроводниковых накопителей. Рассмотрены некоторые наиболее известные системные аварии.

**Первая глава** посвящена обзору работ российских и зарубежных авторов, занимавшихся исследованиями статической устойчивости, и обзору технических средств обеспечения статической устойчивости объединенных электроэнергетических систем. Приведенные во введении описания системных аварий показывают, что продолжение исследований статической устойчивости и внедрение новых технических средств и алгоритмов регулирования не утрачивают своей актуальности. Выполнено сопоставление различных модификаций автоматического регулятора возбуждения сильного действия, а также применяемых в ЭЭС США и других стран системных стабилизаторов. В качестве примера современного состояния в области систем автоматического регулирования возбуждения за рубежом рассмотрена система управления напряжением и реактивной мощностью синхронных генераторов и двигателей *UNITROL M*, приведены характеристики цифрового регулятора возбуждения, рассмотрены основные направления совершенствования АРВ, которое происходит в двух основных направлениях.

Первым направлением является дальнейшее усовершенствование структуры регулятора возбуждения, направленное на повышение качества регулирования за счет оценки большего количества параметров режима при его исполнении на перспективных элементах микроэлектроники. К таким разработкам принадлежит перспективный микропроцессорный регулятор возбуждения АРВ-СДПМ, предназначенный для установки на мощных турбо- и гидрогенераторах.

Вторым направлением в развитии систем регулирования возбуждения, связанным с внедрением микропроцессорной техники, является разработка цифровых АРВ, в том числе на основе использования алгоритмов нечеткой логики и нейронных сетей. Переход к цифровым методам регулирования открывает широкие возможности в области интеграции систем регулирования различного назначения в единый комплекс автоматизированной системы управления технологическим

процессом (АСУ ТП), объединяющий в себе регуляторы различного назначения (в том числе и цифровой АРВ); цифровые системы управления различным силовым оборудованием (например, тиристорными преобразователями); средства технологической автоматики; комплекс защит, контроля и диагностики; средства сбора, хранения и обработки информации, объединенные в единую информационную систему, построенную с использованием современных компьютерных и сетевых технологий обработки информации.

Приведен обзор материалов, связанных с разработкой проектов СПИН для применения в условиях электроэнергетических систем. Рассмотрены условия и возможности регулирования активной и реактивной мощности СПИН и подходы к построению его математических моделей. Для целей исследования статической и динамической устойчивости ЭЭС наиболее приемлемым является представление СПИН в виде виртуальной синхронной машины.

В заключительной части главы выполнен обзор возможностей других технических средств повышения статической устойчивости ЭЭС, основанных на применении силовой электроники (УШР, СТК, TCSC, UPFC) и сформулированы задачи диссертации.

**Во второй главе** диссертации в среде MatLab выполнена разработка комплексной математической модели исследуемой электроэнергетической системы, включающей синхронный генератор, автоматический регулятор возбуждения, модели регулируемых силовых устройств, используемых для повышения устойчивости, модель электрической сети.

Синхронный генератор описан уравнениями Парка-Горева без учета быстропереходных процессов в статорной цепи. В продольной оси рассмотрены два контура – контур возбуждения и эквивалентный демпферный; в поперечной оси моделируются два эквивалентных демпферных контура.

В основу математического описания АРВ положены передаточные функции его отдельных элементов. Блок-схема упрощенной модели АРВ-СД имеет шестой дифференциальный порядок.

Сверхпроводниковый накопитель энергии в расчетах устойчивости представляется элементом, у которого эквивалентная ЭДС и фаза этой ЭДС по отношению к напряжению на его зажимах могут изменяться в соответствии с принятым законом регулирования. Значения ограничений по  $\delta_{СПИН}$  и  $E_{СПИН}$  устанавливаются, исходя из допустимых значений тока накопителя.

В работе обоснована модель СПИН в виде так называемой виртуальной синхронной машиной, у которой величина и фаза ЭДС могут изменяться практически мгновенно в пределах заданных ограничений в соответствии с заданным законом регулирования, а уравнение движения отсутствует. Возможность такого регулирования обоснована на основе

подробного анализа процессов, происходящих при регулировании тиристорных преобразователей, через которые сверхпроводниковая обмотка индукционного накопителя присоединена к сети переменного тока.

Исследования проводились для схемы электропередачи, представленной на рис.1. Расчетная схема включает эквивалентный генератор СГ, работающий на приемную систему неограниченной мощности через линию электропередачи переменного тока. В произвольной промежуточной точке электропередачи присоединен СПИН. Рассматривались варианты подключения СПИН к шинам генератора и к точке, соответствующей середине линии.

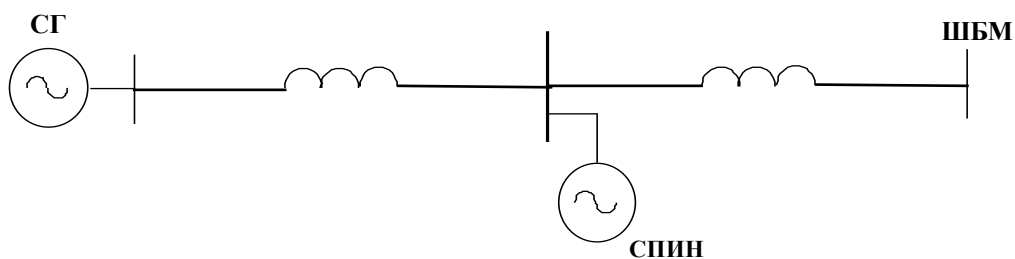


Рис. 1. Расчетная схема электропередачи.

При проведении анализа устойчивости ЭЭС использовалась модель СПИН, в которой регулирование  $\delta_{СПИН}$  и  $E_{СПИН}$  осуществлялось по скольжению и производной скольжения генератора:

$$(1+pT_{E_{СПИН}}) \cdot E_{СПИН} = K_{U1} \cdot \Delta U + K_1 \cdot \omega_C \cdot S_G + K_2 \cdot \omega_C \cdot p S_G,$$

$$(1+pT_{\delta_{СПИН}}) \cdot \delta_{СПИН} = K_{U2} \cdot \Delta U + K_3 \cdot \omega_C \cdot S_G + K_4 \cdot \omega_C \cdot p S_G,$$

при следующих ограничениях:

$$\delta_{MIN} \leq \delta_{СПИН} \leq \delta_{MAX},$$

$$E_{СПИН MIN} \leq E_{СПИН} \leq E_{СПИН MAX}.$$

В заключительной части главы описана разработанная в среде MatLab методика построения областей устойчивости и кривых равного затухания на плоскости выбранных коэффициентов регулирования. Дополняя штатные средства оценки показателей устойчивости системы MatLab, указанная методика весьма эффективна при выполнении инженерной оптимизации и координации настроек регуляторов.

**В третьей главе** приведены результаты исследований статической устойчивости энергосистем рассмотренной структуры при использовании различных устройств, способных обеспечить высокие показатели демпфирования маловозмущенного движения электроэнергетической системы. В качестве таких устройств возможно использовать:



1. Автоматический регулятор возбуждения;
2. Статический тиристорный компенсатор;
3. Управляемый шунтирующий реактор;
4. Регулируемые устройства продольной емкостной компенсации;
5. Сверхпроводниковый индукционный накопитель энергии;
6. Управляемые инверторы (УИ).

Упомянутые устройства имеют различную эффективность, различаются стоимостью и функциональными возможностями. Сравнительный анализ их эффективности с точки зрения обеспечения показателей колебательной статической устойчивости показал следующее.

В настоящее время автоматическое регулирование возбуждения генераторов является основным средством обеспечения статической устойчивости энергосистем. В условиях одиночной электропередачи при оптимальной настройке каналов стабилизации автоматического регулятора удается добиться показателей устойчивости (степени устойчивости) порядка  $\alpha = -2,5 \dots -3$  1/с, но в более сложной системе этот показатель снижается до  $\alpha = -0,6$  1/с и ниже.

В связи с появлением проектов управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа, обладающих большим быстродействием, нередко рассматривается вопрос о передаче основных функций демпфирования колебаний управляемому реактору, установленному вблизи зажимов генератора. Генератор при этом может быть оснащен медленнодействующим регулятором возбуждения, обеспечивающим только заданную величину тока возбуждения. Так, на рис. 2 представлены границы области устойчивости и кривые равного затухания в координатах коэффициентов регулирования УШР (канал регулирования по скольжению генератора и по производной скольжения), построенные методом D-разбиения для условий одиночной электропередачи: генератор, оснащенный простейшим АРВ пропорционального действия с одним каналом регулирования, с УШР, установленным на зажимах станции, - линия длиной  $x_{л} = 0,5$  - система бесконечной мощности, а в табл. 1 приведены собственные числа, иллюстрирующие демпферные свойства подобной электропередачи при оптимальных настройках регулятора управляемого реактора.

В качестве практического примера использования УШР в условиях сложной системы был рассмотрен проект межсистемной электрической передачи, предназначенной для объединения двух частей энергосистемы Бразилии, которые на данный момент не соединены друг с другом и работают изолированно: Южная (48 ГВт) и Северная (14 ГВт). Показано, что применение УШР обеспечивает высокие показатели устойчивости и эффективное демпфирование низкочастотных межсистемных колебаний. При этом УШР обеспечивают требуемую пропускную способность электропередачи – 1,1 ГВт (в пределах по линии можно передать мощность

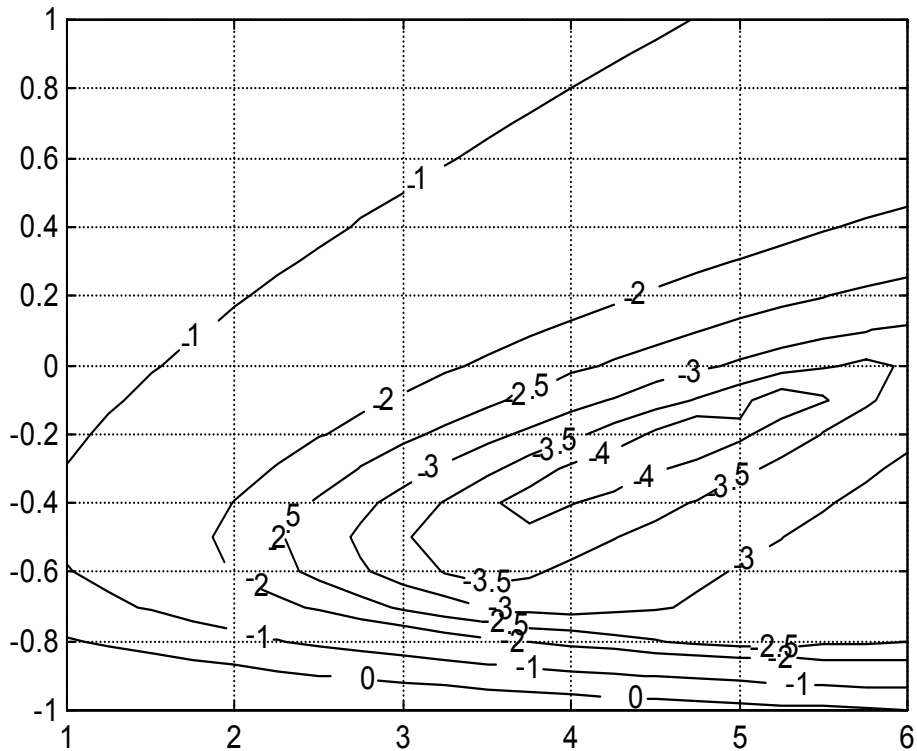


Рис.2. Граница области устойчивости и кривые равного затухания в координатах коэффициентов регулятора УШР для одиночной электропередачи с длиной линии  $x_l=0,5$ .

Таблица 1

Характеристические числа для электропередачи длиной  $x_l=0,5$  с УШР на шинах станции, при простейшем законе регулирования возбуждения.

Вещественная ч.	Мнимая ч.
-0.3567	
-1	
-4.2932	3.7537
-4.315	1.6318
-14.286	
-25.057	
-27.309	
-38.402	
-1000	

0,9 \* P<sub>н</sub> или 1200 МВт ). Приблизительная оценка стоимости позволяет говорить о том, что применение на протяженных электропередачах переменного тока высокого напряжения управляемых шунтирующих реакторов не только целесообразно с технической точки зрения, но и выгодно экономически.

Основное внимание в работе уделено исследованию эффективности работы в ЭЭС сверхпроводникового накопителя энергии. Комплекс решаемых с помощью сверхпроводниковых индукционных накопителей задач весьма широк, что позволяет рассматривать их в качестве одного из эффективных средств, направленных на повышение устойчивости системы и выполнение в энергосистемах целого ряда функций по обеспечению балансов мощности. Функциональные возможности накопителя определяется во многом местом его установки в энергосистеме, поэтому в диссертации рассмотрены два варианта:

1. работа СПИН в составе силового станционного оборудования для повышения уровня статической устойчивости и ограничения вылета углов генераторов при динамических возмущениях, а также выравнивания графиков загрузки агрегатов станции;
2. установка СПИН в промежуточной точке (точках) ВЛ СВН для поддержания напряжения в узле на требуемом уровне, обеспечения устойчивости электропередачи большой протяженности.

На рис. 3 приведены границы области устойчивости и кривые равного затухания для электропередачи длиной  $x_{л} = 0,5$ , в при установке СПИН на шинах станции, в координатах коэффициентов регулятора угла СПИН–  $k_{0dsm}$  и  $k_{1dsm}$ , при оптимальной настройке коэффициентов регулятора ЭДС СПИН-  $k_{0esm}$  и  $k_{1esm}$ . В табл. 2 приведены показатели устойчивости при оптимальном регулировании угла и ЭДС СПИН.

На рис. 4 приведены границы области устойчивости и кривые равного затухания для электропередачи длиной  $x_{л} = 1$ , секционированной посередине сверхпроводниковым накопителем, в координатах коэффициентов регулятора возбуждения -  $k_{0\omega}$  и  $k_{1\omega}$ . Как видно из этого рисунка и табл. 3 в случае, когда используются одновременно возможности АРВ-СД и регулятора СПИН, удается достигнуть очень высоких показателей устойчивости.

Для оценки возможности обеспечения статической устойчивости сверхдальних электропередач переменного тока на основе использования СПИН в среде Matlab была создана модель протяженной ЭЭС (длиной 3100 км) с генератором, оснащенный АРВ-СД, в промежуточных точках которой установлены два СПИН. В ранее выполненных работах было показано, что обеспечить работоспособность подобной электропередачи на основе применения только управляемых шунтирующих реакторов невозможно. При использовании СПИН можно не только обеспечить устойчивую работу передачи, но и добиться высоких показателей устойчи-

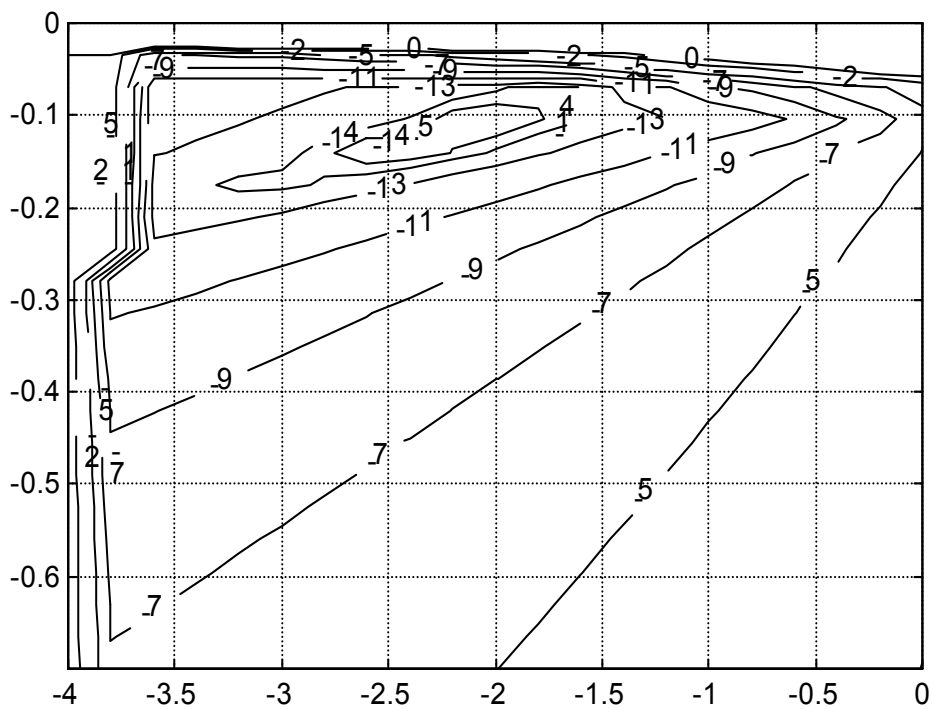


Рис.3. Граница области устойчивости и кривые равного затухания в координатах коэффициентов регулятора ЭДС СПИН  $K_{0dsm}$  и  $K_{1dsm}$  для электропередачи длиной  $x_l = 0,5$ ; СПИН установлен на шинах станции.

Таблица 2

Характеристические числа для энергосистемы длиной  $x_l = 0,5$  при оптимальных настройках регулятора СПИН; СПИН установлен на шинах станции.

Вещественная ч.	Мнимая ч.
-0.25227	
-0.43151	
-2.9765	
-6.9235	
-14.583	5.2052
-15.592	24.689
-25.157	
-54.631	
-268.07	
-1000	

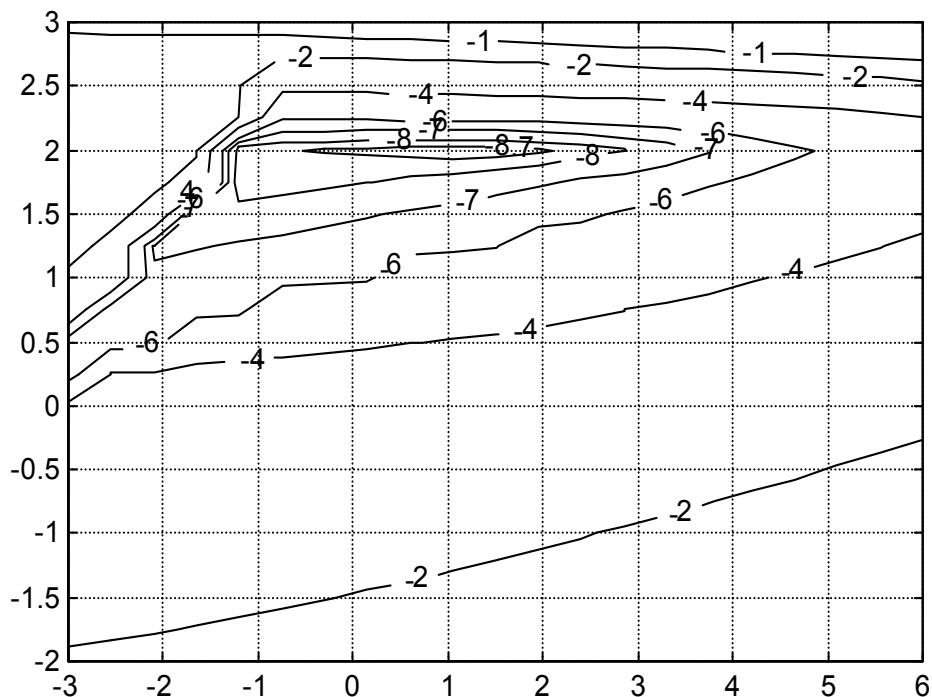


Рис 4. Граница области устойчивости и кривые равного затухания в координатах коэффициентов регулятора АРВ-СД  $K_{0\omega}$  и  $K_{1\omega}$  для электропередачи длиной  $x_l = 1$ ; СПИН установлен в середине линии.

Таблица 3

Характеристические числа для энергосистемы длиной  $x_l=1$ , в которой СПИН установлен в середине линии, при оптимальных настройках АРВ-СД и СПИН.

Вещественная ч.	Мнимая ч.
-0.20432	
-0.96686	
-3.0579	
-9.0989	15.291
-9.2637	2.2991
-9.4526	7.993
-25.395	
-64.265	
-357.92	
-1000	

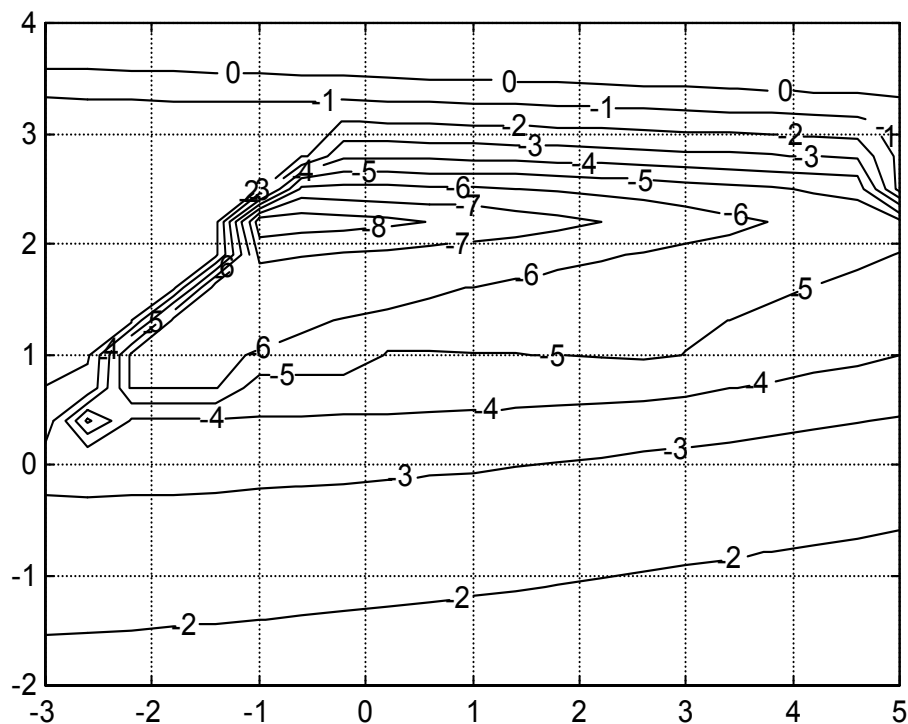


Рис 5. Граница области устойчивости и кривые равног затухания в координатах коэффициентов АРВ  $K_{0\omega}$  и  $K_{1\omega}$  для электропередачи длиной  $x_l = 3100$  км; на линии установлены два СПИН.

Таблица 4

Характеристические числа для энергосистемы длиной 3100 км при оптимальных коэффициентах АРВ и регуляторов СПИН ; два СПИН установлены в промежуточных точках линии.

Вещественная ч.	Мнимая ч.
-0.4872	
-1.0351	
-8.6573	8.402
-9.8803	16.082
-10	
-10.115	3.5478
-20	
-25.298	
-62.38	17.043
-1000	

ности (таблица 4) за счет оптимизации настроек АРВ и регуляторов индукционных накопителей методом D-разбиения (рис.5).

**В четвертой главе** приведены результаты расчетов переходных процессов при конечных возмущениях. Возможность практически мгновенно реагировать на изменение режима энергосистемы определяет технические преимущества СПИН по сравнению с традиционными противоаварийными мероприятиями, позволяя рассматривать его как одно из эффективных средств повышения динамической устойчивости ЭЭС. Целесообразность использования накопителей весьма очевидна, поскольку любое возмущение обычно приводит к появлению избыточной энергии в одной части системы и недостатку энергии – в другой. Поэтому в большинстве случаев противоаварийная автоматика действует на ограничение мощности или отключение генераторов в одной части системы и отключение потребителей в другой части, что приводит к ущербам, связанным с недоотпуском энергии потребителям. Использование накопителей позволяет изменить ситуацию.

Как и при исследовании статической устойчивости рассмотрены несколько вариантов установки СПИН: на шинах электрической станции, в промежуточном узле линии электропередачи, а также в узлах секционирования дальней ВЛ переменного тока.

Применение СПИН особенно эффективно при установке накопителя вблизи генераторов. Предел динамической устойчивости может быть увеличен до предела статической устойчивости. Для примера рис. 6 иллюстрирует изменение электромагнитной мощности генератора при двухфазном на землю коротком замыкании длительностью 0,14 с. Как видно, регулирование СПИН обеспечивает благоприятное изменение мощности и ограничивает вылет угла.

При установке СПИН в промежуточной точке протяженной электропередачи ( $x_{дл} = 1,0$ ) регулирование СПИН обеспечивает устойчивость при двухфазных и однофазных повреждениях в любой точке электропередачи.

При работе генератора на линию переменного тока протяженностью 3000 – 3200 км ситуация с динамической устойчивостью является значительно более сложной. Электропередача допускает возмущения только в два-три раза более легкие, чем однофазное короткое замыкание. Переходный процесс при возмущении режима работы характеризуется заметным повышением напряжения на шинах СПИН, ближайшего к приемной системе. Приблизительно такими же могут быть амплитуды возмущений в промежуточных точках электропередачи. Поэтому обеспечение динамической устойчивости дальних электропередач должно осуществляться на основе комбинированного применения СПИН и мероприятий, стабилизирующих движение ротора генератора.

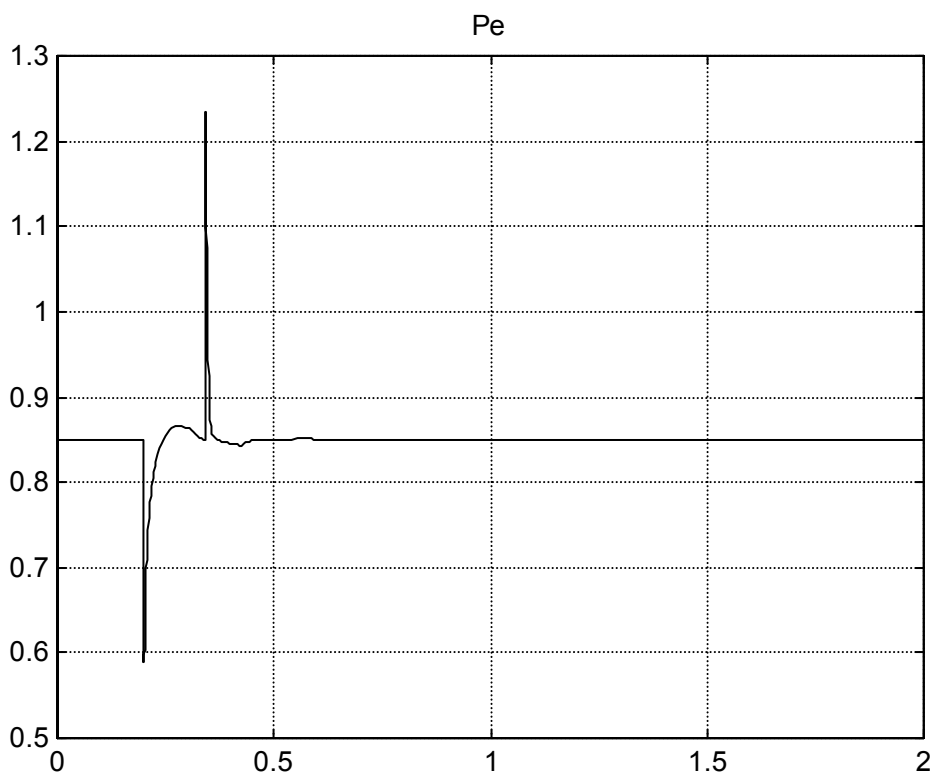


Рис. 6. Изменение электромагнитной мощности при коротком замыкании в начале линии электропередачи длительностью  $t_{к.з.} = 0,14$  с.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. В среде MatLab разработана методика математического моделирования сверхпроводникового индукционного накопителя энергии для использования данной модели при выполнении оценок статической устойчивости ЭЭС произвольной сложности и расчетах динамической устойчивости, выполняемых традиционными средствами. Обосновано применение модели виртуальной синхронной машины, у которой величина и фаза ЭДС могут изменяться практически безинерционно в соответствии с заданным законом регулирования, а уравнение движения отсутствует. Использование данной модели позволило получить оценки качества демпфирования переходных процессов в электроэнергетической системе, содержащей СПИН, и выполнить расчеты переходных процессов при конечных возмущениях.
2. В среде MatLab выполнена разработка метода оценки качества маловозмущенного движения на основе построения границ областей устойчивости и кривых равного затухания.



3. Выполнено сопоставление эффективности различных технических мероприятий с точки зрения обеспечения достаточных показателей демпфирования простейшей электрической системы. Показано, что за счет внешних по отношению к генератору устройств могут быть достигнуты такие же или более высокие показатели демпфирования, чем обеспечиваемые АРВ. В частности, при установке на зажимах генератора управляемого шунтирующего реактора с соответствующим законом управления, обеспечиваются более высокие показатели демпфирования, чем при использовании АРВ-СД ( $\alpha = -4 \dots -5$  1/с). Регулятор возбуждения при этом может быть настроен на поддержание постоянства тока возбуждения.
4. Показано, что применение УШР может оказаться более эффективным, чем использование установок продольной емкостной компенсации (УПК) на ВЛ 500 кВ значительной протяженности ( $\lambda = 75$  эл. градусов). При использовании закона регулирования подобного применяющемуся в АРВ-СД, УШР эффективно подавляет низкочастотные межсистемные колебания, обеспечивая степень устойчивости около - 1 1/с.
5. Наиболее высокие показатели демпфирования обеспечиваются при установке на зажимах генератора сверхпроводникового индукционного накопителя энергии. В случае совместной оптимизации настроек АРВ-СД и регулятора СПИН обеспечивается показатель демпфирования  $\alpha = -14,5$  1/с. В случае применения на генераторе простейшего АРВ пропорционального типа за счет действия СПИН обеспечивается показатель демпфирования  $\alpha = -6,9$  1/с.
6. В случае установки СПИН в промежуточной точке электропередачи ( $x_{л} = 2 \times 0,5 = 1$ ) при совместной оптимизации настроек АРВ-СД и регулятора СПИН обеспечиваются показатели устойчивости на уровне  $\alpha = -9$  1/с.
7. Показано, что СПИН эффективно обеспечивает статическую устойчивость протяженной электропередачи при волновых длинах, превышающих 180 эл. градусов. В случае совместной оптимизации настроек АРВ-СД генератора и регуляторов СПИН обеспечиваются показатели демпфирования на уровне  $\alpha = -8,5$  1/с.
8. Показано, что в условиях жесткой связи с приемной системой СПИН способен существенно повысить показатели динамической устойчивости параллельной работы при коротких замыканиях. Результаты исследований показали, что СПИН способен существенно улучшить качество протекания переходных процессов в ЭЭС различной конфигурации, создавая эффективную альтернативу другим мерам повышения динамической устойчивости.

9. В условиях протяженных ( $x_{л} = 1$  с установкой СПИН в промежуточной точке электропередачи) электропередач применение СПИН обеспечивает динамическую устойчивость при однофазных и двухфазных коротких замыканиях.
10. Обеспечение динамической устойчивости дальних электропередач переменного тока должно выполняться на основе комбинированного применения СПИН и различных мероприятий по повышению динамической устойчивости (отключения части генераторов, регулирования первичных двигателей, электрического торможения).

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Кабанов И.А., Смолвик С.В. Сопоставление эффективности технических средств обеспечения статической устойчивости ЭЭС // Фундаментальные исследования в технических университетах. Конференция 10-11 июня 1999 года, СПбГТУ.
2. Кабанов И.А., Смолвик С.В. Сравнение эффективности различных способов демпфирования колебаний в ЭЭС // Фундаментальные исследования в технических университетах. Конференция 8-9 июня 2000 года, СПбГТУ.
3. Кабанов И.А., Смолвик С.В. Эффективность сверхпроводникового индукционного накопителя энергии для обеспечения устойчивости энергосистемы // Фундаментальные исследования в технических университетах. Конференция 7-8 июня 2001 года, СПбГТУ.
4. Кабанов И.А., Тарараксин И.Л. Эффективность демпфирования колебаний в ЭЭС различными силовыми устройствами // Фундаментальные исследования в технических университетах. Межвузовская научная конференция 27 ноября - 02 декабря 2000 года, СПбГТУ.
5. Беляев А.Н., Кабанов И.А., Смолвик С.В., Шхати С.В. Сравнение современных подходов к моделированию электроэнергетических систем // Материалы Всероссийской научно-технической конференции ВятГТУ. – Киров, 2001.