

На правах рукописи



КОРМИЛИЦЫН Дмитрий Николаевич

**УСТОЙЧИВОСТЬ РЕГУЛИРУЕМОЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С УПРАВЛЯЕМОЙ
ЛИНИЕЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО
НАПРЯЖЕНИЯ**

Специальность: 05.14.02 - «Электрические станции
и электроэнергетические системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2018

Работа выполнена на кафедре «Электрические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент **Голов Валерий Павлович**.

Официальные оппоненты:

Лачугин Владимир Федорович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Акционерное общество «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (АО «ЭНИИ»), заведующий лабораторией информационно-измерительных и управляющих систем;

Наволочный Александр Альбертович, кандидат технических наук, доцент, ОАО «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством» (ОАО «ВНИИР»), руководитель Центра моделирования электроэнергетических систем Департамента информационно-технологических систем.

Ведущая организация:

Акционерное общество «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» (АО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ»), г. Москва.

Защита состоится 1 марта 2019 г. в 14-30 на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Kormilicyn_D.N._0.pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте www.ispu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 201_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01



Ледуховский
Григорий Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В мировой практике имеет место тенденция к расширению производства электроэнергии в местах наибольшего сосредоточения энергоресурсов. Центры нагрузки и главные потребители обычно находятся на удалении в сотни и тысячи километров от электрических станций. Надежная передача электроэнергии на сверхдальние расстояния является необходимым фактором функционирования современной электроэнергетической системы (ЭЭС) в целом. Проблема особо актуальна для единой энергосистемы (ЕЭС) России, поскольку она является наиболее крупной в мире.

Особенностью режимов работы дальних линий электропередачи сверхвысокого напряжения (ДЛЭП СВН) является существенное изменение потока мощности по ним как в течение суток, так и сезонно. Это обуславливает необходимость повышения пропускной способности ДЛЭП СВН. Стремление повысить пропускную способность приводит к необходимости придания линиям свойств управляемых или гибких линий, изменяющих параметры в функции режима работы ЭЭС. Таким образом, электропередачи СВН из пассивных элементов преобразуются в активные и влияют на режимы работы ЭЭС. В англоязычной литературе данное направление принято называть FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems). Оно охватывает как электропередачи в целом, так и отдельные устройства, участвующие в управлении режимами работы электрических сетей (ЭС).

В настоящее время технологии FACTS уделяется всё больше внимания, поскольку очевидно, что строительство дополнительных параллельных линий для повышения пропускной способности отдельных сечений ЭЭС экономически неэффективно, а также влечет дополнительные проблемы, связанные с отчуждением больших участков земли под трассу ЛЭП, усложнением распределительных устройств на подстанциях, повышенными значениями напряжения по длине линии в режимах, приближенных к холостому ходу и др.

В мировой практике широко используются устройства FACTS различного типа. Мировыми производителями оборудования FACTS являются Siemens, Areva, ABB и др. Отечественными заводами разработаны и внедрены управляемые шунтирующие реакторы (УШР) управляемые подмагничиванием постоянным током (ОАО «ЭЛУР», ОАО «ХК Электрозавод», ООО «ЭСКО») с номинальным напряжением до 500 кВ и мощностью до 180 Мвар, а также УШР трансформаторного типа (НПЦ «Энерком-Сервис») с номинальным напряжением 220 кВ и мощностью 25 Мвар. Также при научно-техническом сопровождении ОАО «НТЦ электроэнергетики», филиалом ОАО «Силовые машины» – «Электросила» изготовлены два асинхронизированных синхронных компенсатора (АСК) мощностью по 100 Мвар и установлены на ПС 500кВ «Бескудниково» Московского энергетического кольца.

В таких странах как США, Швеция, Бразилия, Индия и Китай уже имеется практический опыт эксплуатации управляемых устройств продольной компенсации (УУПК). Применение УПК в России в настоящий момент практически заморожено, поскольку имеется всего лишь один пример успешного применения данных устройств на электропередаче Самара - Москва. Однако работы, выполненные ОАО «Институт «Энерго-Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ исследований на тему “Электроэнергетическая система с управляемой продольной компенсацией”, выполняемых ИГЭУ в рамках задания 2017/13 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России проект номер 13.7824.2017/БЧ.

сетьпроект» и ОАО «ВНИИЭ» в 2007 г. показали, что применение УУПК является наиболее эффективным способом повышения пропускной способности электропередачи 500 кВ «Саяно-Шушенская ГЭС» – ПС «Новокузнецкая», «Кузбасская».

Создание управляемых электропередач на основе применения УУПК требует решения комплекса задач, связанных, в частности, с комплексной настройкой регулируемых устройств, входящих в ЭЭС с целью повышения пропускной способности, а также увеличения пределов статической и динамической устойчивости. При выборе законов регулирования управляемых устройств необходимо также учитывать возможные режимы работы при малой нагрузке ДЛЭП СВН, поскольку при таких условиях возможны перенапряжения на линии. В данном случае является актуальным применение УУПК, позволяющих снижать степень компенсации при уменьшении протекающего по ДЛЭП СВН тока.

Исходя из вышесказанного, необходимо проанализировать режимы работы ЭЭС, содержащей как УУПК, так и другие типы управляемых устройств и оценить их взаимное влияние, что говорит об актуальности работы и целесообразности её выполнения. Данная работа является логическим продолжением цикла работ по улучшению устойчивости ЭЭС, содержащих ДЛЭП СВН на основе элементов гибких электропередач с УУПК, проводимых на кафедре «Электрические системы» ИГЭУ.

Степень разработанности темы исследований. Решению вопросов повышения пропускной способности и устойчивости электропередач посвящено достаточно большое количество публикаций, как в России, так и за рубежом. В нашей стране наибольший вклад в развитие теории управляемых линий электропередачи внесли такие ученые, как Веников В.А., Строев В.А., Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Зарудский Г.К., Рыжов Ю.П. и др.

Многие авторы в своих работах проводят сравнительную оценку применения различных устройств FACTS, в том числе УПК и УУПК на показатели устойчивости и режимы работы ЭЭС. Результаты данных исследований различаются ввиду отличий в структуре рассматриваемой ЭЭС, представлении отдельных элементов данной сети и принятых допущениях. В большинстве публикаций рассматривается только сама ДЛЭП СВН без учета активных сопротивлений и поперечных ветвей, подключенная к двум системам неизменного напряжения. В результате в некоторых публикациях сделан вывод о том, что мощность устройств FACTS и для последовательного, и для параллельного типа включения будет одинакова при одинаковом их влиянии на устойчивость и режимы сети. В других же работах, с более полным представлением элементов сети, указывается на явные преимущества применения УУПК или ОПРМ как наиболее перспективных устройств.

В большинстве работ, посвященных влиянию УУПК на режимы и устойчивость ЭЭС, исследования производится только для управляемой ДЛЭП СВН, подключенной к двум шинам бесконечной мощности. Также во многих случаях рассматривается простейшая система, подключенная к шинам бесконечной мощности. Наиболее точными являются исследования, представляющие процессы в генераторах с использованием уравнений Парка-Горева, поскольку представление генератора упрощенными моделями имеет крайне ограниченную область применения.

Одним из наиболее распространенных устройств FACTS в России является УШР. Наибольший интерес представляют работы, в которых рассматриваются различные законы регулирования УШР и их влияние на режимы и устойчивость системы.

Как показал анализ литературы, совместному выбору настроечных параметров устройств регулирования, взаимному влиянию и учету совместного действия управляемых устройств друг на друга уделяется очень скромное внимание. В основном исследования касаются совместной установки УУПК и УШР. Наличие же комплексного подхода к анализу режимов с учетом автоматических регуляторов скорости (АРС), автоматических регуляторов возбуждения (АРВ), УУПК и УШР не наблюдается даже в простейшей системе.

Целью работы является повышение устойчивости ЭЭС, содержащей управляемые ДЛЭП СВН, на основе совершенствования управления УУПК и УШР и выбора настроечных параметров данных устройств совместно с устройствами регулирования генераторов.

Основные задачи, решаемые в работе:

1. Разработка математических моделей электроэнергетической системы, учитывающих все основные факторы, влияющие на устойчивость и содержащих УУПК, УШР и устройства регулирования генераторов,.

2. Исследование характеристик установившихся и переходных режимов исследуемой электроэнергетической системы при различных законах регулирования УУПК и УШР.

3. Анализ влияния УУПК, УШР и АРВ генераторов, а также характеристик нагрузки на апериодическую и колебательную статическую устойчивость ЭЭС.

4. Разработка методики определения областей устойчивости исследуемой электроэнергетической системы в зависимости от параметров УУПК, УШР и АРВ генераторов.

5. Исследование переходных процессов на имитационных моделях в целях выявления основных факторов, влияющих на переходные параметры, и обоснование допустимых упрощений имитационных моделей при сохранении основных результатов.

6. Выбор параметров законов регулирования УУПК и УШР с учетом возможных ограничений при сохранении положительного влияния данных устройств.

7. Анализ влияния характеристик УУПК, УШР и АРВ на показатели динамической устойчивости.

Объект и предмет исследований. Объектом являются ЭЭС, содержащие ДЛЭП СВН с устройствами УУПК, УШР, АРВ и их устройства управления. Предметом исследования является устойчивость ЭЭС с управляемой ЛЭП с УУПК, УШР и АРВ.

Методология и методы научных исследований. Для решения поставленных задач в работе использовались методы, базирующиеся на теории электрических цепей, фундаментальных положениях теории электромагнитных и электромеханических переходных процессов, теории автоматического регулирования, а также на расчетных методах исследования, математическом и имитационном моделировании.

Научную новизну работы представляют:

1. Математические модели ЭЭС, состоящей из двух электрических станций с комплексом управляемых устройств, позволяющие проводить расчеты с целью анализа статической и динамической устойчивости.

2. Методика определения областей устойчивости исследуемой ЭЭС при различной детализации математического описания в плоскостях и пространстве настроечных параметров УУПК, УШР и АРВ генераторов.

3. Выбор законов регулирования УУПК и УШР и настроечных параметров управляемых устройств, для улучшения статической и динамической устойчивости регулируемой ЭЭС.

4. Результаты исследований на имитационных моделях влияния характеристик нагрузки на изменение настроечных параметров управляемых устройств и форму областей устойчивости.

5. Методика исключения явлений нарушения колебательной статической устойчивости исследуемой ЭЭС при улучшении аperiodической статической и динамической устойчивости с использованием УУПК, УШР и АРВ генераторов.

Теоретическая значимость работы

1. Изложены результаты исследования влияния на устойчивость и режимы системы настроечных параметров управляемых устройств, входящих в ЭЭС (УУПК, УШР и АРВ).

2. Изложены основные принципы методики построения областей устойчивости регулируемой ЭЭС, содержащей управляемые устройства.

3. Доказана целесообразность использования упрощенной модели для выбора коэффициентов регулирования АРВ для обеспечения сохранения колебательной устойчивости.

Практическая значимость результатов работы заключается в следующих основных положениях:

1. Сформированы рекомендации по выбору эффективных законов регулирования УУПК, УШР и АРВ с целью улучшения устойчивости ЭЭС.

2. Предложена методика выбора настроечных параметров управляемых устройств при обеспечении устойчивости исследуемой системы.

3. Представленные выводы и результаты, полученные в работе, могут использоваться для создания реальных устройств регулирования УПК с необходимыми характеристиками, а также при проектировании ДЛЭП СВН повышенной пропускной способности.

4. Теоретические и практические результаты работы использованы в учебном процессе в ИГЭУ в дисциплине «Моделирование режимов электроэнергетических систем», а также используются в учебном процессе подготовки магистров и бакалавров по профилям 13.04.02:05 - Электроэнергетические системы и сети и 13.03.02:05 - Электроэнергетические системы и сети соответственно.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечиваются за счет корректного применения теории электромеханических переходных процессов в ЭЭС, теории автоматического регулирования, согласованностью результатов диссертационной работы, с результатами исследований других авторов, опубликованными в зарубежных и отечественных литературных источниках, а также сравнением результатов с использованием моделей различной степени детализации.

Внедрение результатов исследований:

Научные и практические результаты работы используются в учебном процессе на кафедре «Электрические системы» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели управляемой ЭЭС с комплексом регулируемых устройств, позволяющие оценивать статическую и динамическую устойчивость системы.

2. Результаты исследований влияния настроечных параметров управляемых устройств на пределы передаваемой мощности и аperiodической устойчивости.

3. Методы определения областей устойчивости исследуемой ЭЭС для выбора настроечных параметров управляемых устройств с целью устранения режимов колебательной неустойчивости в плоскостях и пространстве настроечных параметров.

4. Влияние характеристик нагрузки на изменение настроечных параметров управляемых устройств и форму областей устойчивости.

5. Результаты оценки возможности применения упрощенных моделей для анализа колебательной устойчивости и построения адекватных областей устойчивости.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, разработке и формировании математических моделей отдельных элементов управляемой ЭЭС для исследования установившихся и переходных режимов ЭЭС в целях выбора коэффициентов регулирования управляемых устройств с максимальным их влиянием на устойчивость системы, разработке методов построения областей устойчивости, как по упрощенным, так и по более детальным моделям, сравнении результатов и оценки применимости таких методов, теоретическом обоснования явления резонансного перехода как нежелательного явления, наблюдаемого в управляемой ЭЭС, в подготовке публикаций по теме диссертации.

Соответствие диссертации формуле специальности: в соответствии с формулой специальности 05.14.02 в диссертационной работе объектом исследований являются регулируемые ЭЭС, содержащие ДЛЭП СВН с устройствами УУПК и УШР и их устройства управления, предметом исследований – свойства регулируемых ЭЭС с ДЛЭП СВН с УУПК, УШР и АРВ.

Соответствие диссертации области исследования специальности: представленные в диссертации результаты соответствуют области исследования специальности 05.14.02, а именно:

– п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 соответствуют разработка математических имитационных моделей ЭЭС, содержащую управляемую ДЛЭП СВН для исследования режимов, а также статической и динамической устойчивости;

– п. 7 «Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем» соответствуют разработанные методы получения областей устойчивости по упрощенным и более полным математическим моделям.

Апробация результатов исследований. Результаты исследований обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: 2018 4nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) / IV международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг - 2018» (Москва, 2018), международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013», «Энергия-2014», «Энергия-2015», «Энергия-2016», «Энергия-2017», «Энергия-2018» (Иваново, 2013-2018 г.), международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи - 2015» (Иваново, 2015 г.), «Электроэнергетика глазами молодежи - 2016» (Казань, 2016 г.), «Электроэнергетика глазами молодежи - 2017» (Самара, 2017 г.), Двадцать вторая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2016).

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 25 печатных работах: в 1 монографии, 5 статьях в изданиях по перечню ВАК, в том числе 1 работе – в журнале, переводная версия которого индексируется в международной базе SCOPUS, 3 статьях в прочих журналах, 14 тезисах и полных текстах докладов конференций, а также получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 156 источников, списка сокращений и условных обозначений, приложений. Общий объем диссертации составляет 192 страницы, из них основной текст – 156 страниц, список литературы – 18 страниц, приложения – 18 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, дана общая характеристика работы.

В главе 1 разработаны и систематизированы математические модели элементов исследуемой изолированной электроэнергетической системы в комплексе с управляемыми устройствами – АРВ, АРС, УШР и УУПК. Исследуемая ЭЭС представлена на рис. 1.

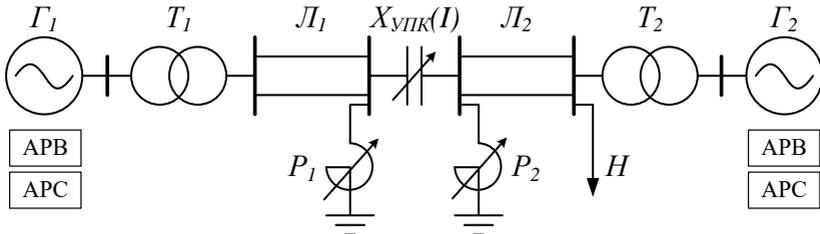


Рисунок 1 – Исследуемая изолированная электроэнергетическая система

Исследование рассматриваемой системы кардинально отличается от систем, содержащих шины бесконечной мощности, поскольку в данном случае баланс активной и реактивной мощности выполняется не всегда и, соответственно, возможны режимы, при которых частота значительно отличается от синхронной, а напряжение в различных точках сети самопроизвольно снижается (имеют место явления лавины частоты и напряжения).

Модели элементов сети учитывают как электромагнитные переходные процессы в элементах ЭЭС, так и электромеханический переходный процесс. Модели отдельных элементов могут быть представлены, как набором отдельных уравнений, так и в компактной матричной форме (1). Управляемые устройства также представлены соответствующими уравнениями.

$$p[\psi_{cm}] = \omega_0 \left(-[u_{cm}] - r_a [i_{cm}] - \frac{\omega}{\omega_0} [\gamma][\psi_{cm}] \right), \quad (1)$$

где, $[\psi_{cm}] = \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix}$, $[u_{cm}] = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$, $[i_{cm}] = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$, $[\gamma] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$, ω_0 – синхронная угловая частота вращения, r_a – активное сопротивление обмоток статора, ω – угловая частота вращения генератора, ψ_d, ψ_q – потокосцепления контуров статора по продольной и поперечной оси соответственно, u_d, u_q – напряжения контуров статора по продольной и поперечной оси соответственно, i_d, i_q – токи контуров статора по продольной и поперечной оси соответственно.

Сформированная модель позволяет рассчитывать как установившиеся, так и переходные режимы системы при наличии комплексного управления регулирующими устройствами, входящими в рассматриваемую ЭЭС.

Вторая глава посвящена исследованию статической устойчивости изолированной системы с различным набором управляемых устройств. Рассмотрено совместное влияние УУПК с различным количеством ступеней УШР на предел передаваемой мощности и уровни напряжения, построением характеристик установившихся режимов. Показано, что увеличение числа включенных в работу ступеней УШР снижает предел передаваемой мощности, однако стабилизирует уровни напряжения (рис. 2).

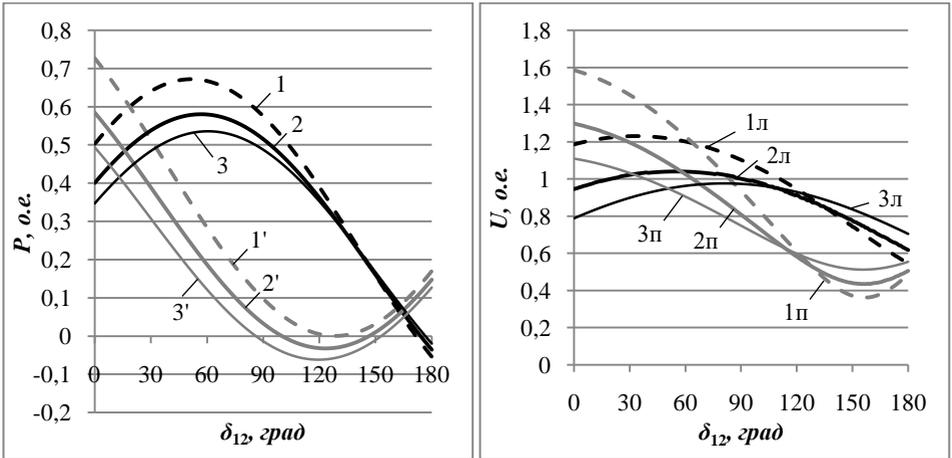


Рисунок 2 – Угловые характеристики активной мощности генераторов и напряжения на выводах УПК: 1, 1' – включение по 1 ступени УШР на выводах УПК; 2, 2' – включение по 3 ступени УШР; 3, 3' – включение по 5 ступеней УШР

Исследование аperiodической устойчивости производилось по упрощенной линеаризованной модели, описывающей электромеханический переходный процесс в исследуемой системе с УУПК, а также электромагнитные переходные процессы в контурах возбуждения генераторов. Выявлено, что совместная работа УУПК и с различным количеством ступеней УШР позволяет увеличить предел аperiodической устойчивости по сравнению с нерегулируемой передачей, что положительно влияет на вынужденные и послеаварийные режимы (рис. 3). Большой коэффициент регулирования $K_{2УПК}$ положительно сказывается как на режимах, так и устойчивости ЭЭС.

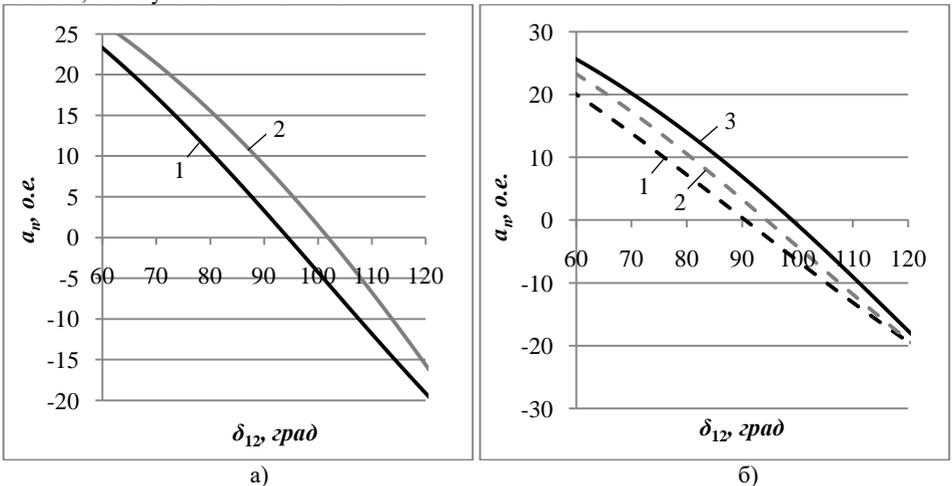


Рисунок 3 – Зависимость свободного члена характеристического уравнения:

- а) $K_{2УПК} = 4$; 1 – включение по 3 ступени УШР на выводах УПК; 2 – включение по 5 ступеней УШР; б) включение по 3 ступени УШР на выводах УПК: 1 – $K_{2УПК} = 0$; 2 – $K_{2УПК} = 4$; 3 – $K_{2УПК} = 6$

Однако выбирать произвольное значение коэффициентов регулирования нельзя, поскольку при больших значениях коэффициента $K_{2УПК}$ возможно возникновение явления резонансного перехода и потери устойчивости ЭЭС (рис. 4).

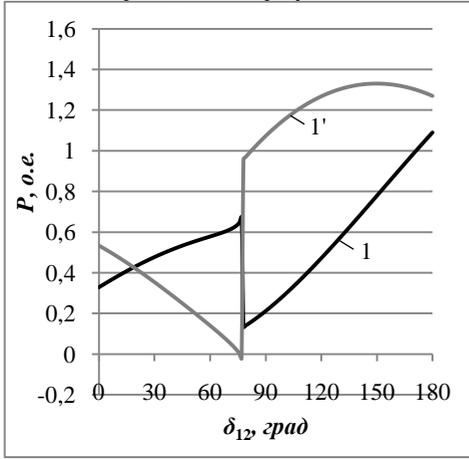


Рисунок 4 – Угловые характеристики активной мощности генераторов при включении по 4 ступени УШР на выводах УПК: 1, 1' – $K_{2УПК} = 8$

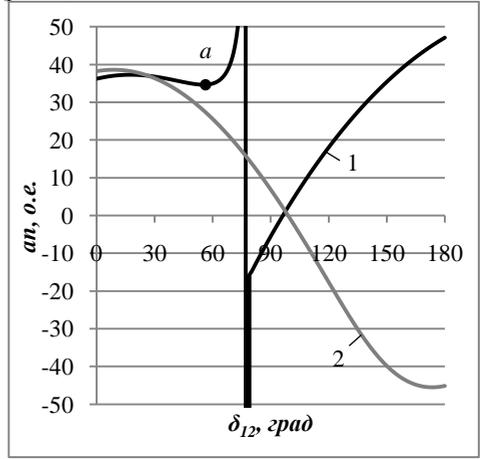


Рисунок 5 – Зависимость свободного члена характеристического уравнения при включении по 4 ступени УШР на выводах УПК:

$$1 - K_{2УПК} = 8, 2 - K_{2УПК} = 6$$

Выявлено, что приближение к точке возникновения резонансного перехода можно контролировать, оценивая изменение свободного члена характеристического уравнения, поскольку при отсутствии резонансного перехода значение a_n плавно снижается (рис. 5). В работе подробно рассмотрены теоретические положения и причины появления данного нежелательного явления в ЭЭС. В случае необходимости проведения расчетов для построения петлеобразных угловых характеристик, в точке a требуется переходить от утяжеления по углу к утяжелению по току УУПК.

Произведена оценка влияния таких факторов как число включенных ступеней реакторов на выводах УУПК, полная мощность и характеристика нагрузки, а также степень компенсации индуктивного сопротивления линии в исходном режиме на форму и тип областей устойчивости в зависимости от коэффициента $K_{2УПК}$. Области устойчивости построены по методу D -разбиения по одному параметру с использованием линеаризованной модели рассматриваемой ЭЭС. После линеаризации и записи характеристического определителя получено характеристическое уравнение системы. В данной модели коэффициент регулирования $K_{2УПК}$ будет непосредственно входить в характеристическое уравнение:

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) K_{2УПК} + b_0 p^n + b_1 p^{n-1} + \dots + b_n = 0, \quad (2)$$

где, $a_0, a_1 \dots a_n$ – коэффициенты составляющих характеристического уравнения при коэффициенте регулирования $K_{2УПК}$; $b_0, b_1 \dots b_n$ – коэффициенты составляющих характеристического уравнения без коэффициента регулирования $K_{2УПК}$.

Впервые показано, что тип области устойчивости (с внешней или внутренней штриховкой) не влияет на диапазон допустимых значений коэффициента регулирования $K_{2УПК}$, принадлежащего оси действительных чисел (рис. 6). Только этот диапазон коэффициента регулирования УУПК имеет физический смысл, поскольку настроечный параметр не может являться комплексным числом или быть отрицательным.

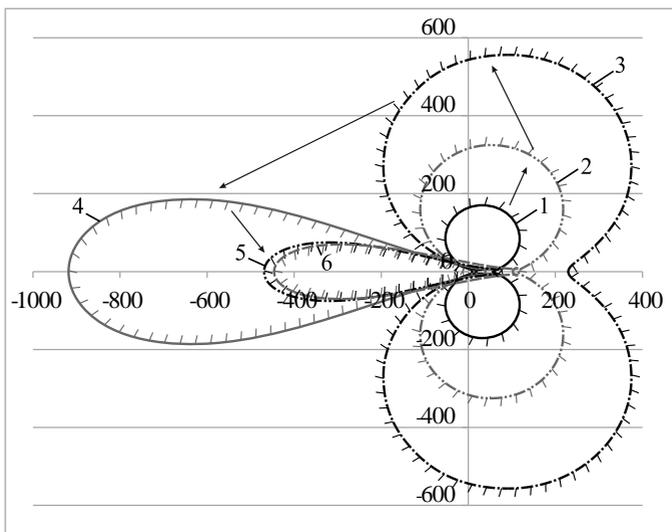


Рисунок 6 – Области устойчивости при вариации мощности нагрузки:

1 – $|S_{нагр}| = 6000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$; 2 – $|S_{нагр}| = 4000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$; 3 – $|S_{нагр}| = 3000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$;

4 – $|S_{нагр}| = 1500 \text{ МВ}\cdot\text{А}$; 5 – $|S_{нагр}| = 1000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$; 6 – $|S_{нагр}| = 400 \text{ МВ}\cdot\text{А}$

Снижение полной мощности нагрузки приводит к изменению вида и типа области устойчивости. Однако поскольку интересующий диапазон изменения коэффициента $K_{2УПК}$ находится на оси действительных чисел, то на рис. 7 представлены те же зависимости, что и на рис. 6, но с увеличенным масштабом. Выявлено, что форма области устойчивости в области оси $K_{2УПК}$ не изменяется. Анализ показал, что снижение полной мощности нагрузки приводит к планомерному увеличению диапазона допустимого значения коэффициента $K_{2УПК}$, что свидетельствует о необходимости выбора данного коэффициента при максимальной мощности нагрузки.

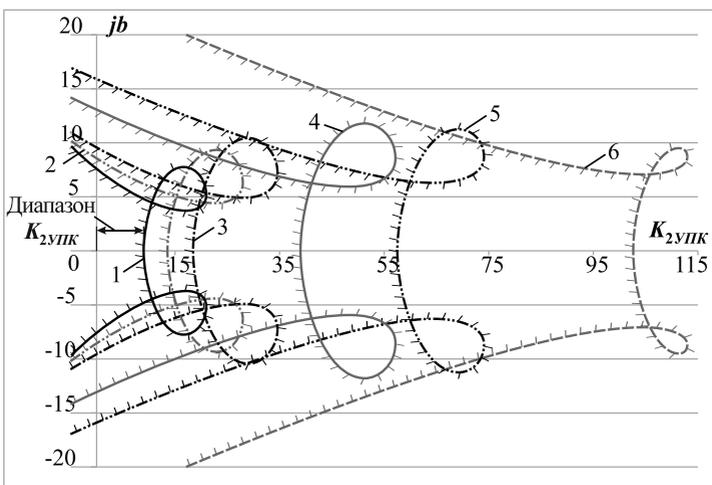


Рисунок 7 – Диапазоны изменения параметра регулирования $K_{2УПК}$ при вариации мощности нагрузки: 1 – $|S_{нагр}| = 6000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$; 2 – $|S_{нагр}| = 4000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$;

3 – $|S_{нагр}| = 3000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$; 4 – $|S_{нагр}| = 1500 \text{ МВ}\cdot\text{А}$; 5 – $|S_{нагр}| = 1000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$;

6 – $|S_{нагр}| = 400 \text{ МВ}\cdot\text{А}$

На основании полученных областей устойчивости для разных условий работы ЭЭС определены диапазоны изменения коэффициента регулирования УУПК, допустимого с точки зрения сохранения колебательной устойчивости, а также граница смены типа области устойчивости (рис. 8).

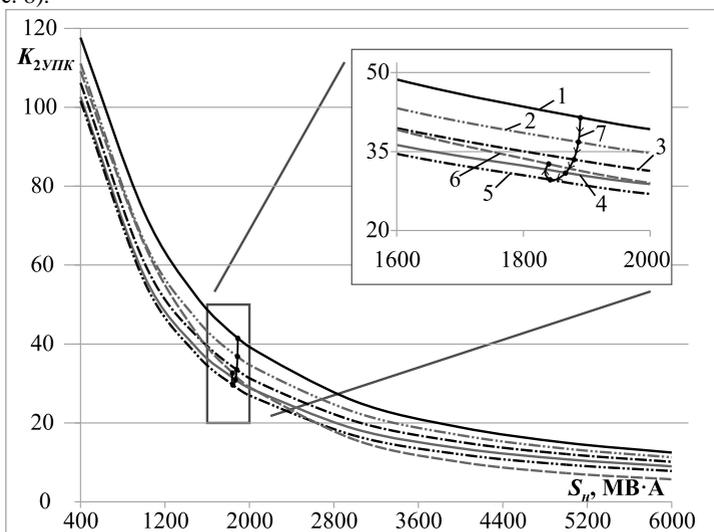


Рисунок 8 – Зависимости диапазона изменения коэффициента $K_{2УПК}$ от характеристики и мощности нагрузки и граница смены типа областей устойчивости при степени компенсации 80%: 1 – $\cos(\varphi_{нагр}) = 0$; 2 – $\cos(\varphi_{нагр}) = 0.2$; 3 – $\cos(\varphi_{нагр}) = 0.4$; 4 – $\cos(\varphi_{нагр}) = 0.6$; 5 – $\cos(\varphi_{нагр}) = 0.8$; 6 – $\cos(\varphi_{нагр}) = 1$; 7 – граница смены типа области устойчивости

Анализ зависимостей, представленных на рис. 8 показывает, что при одном и том же значении коэффициента $K_{2УПК}$ можно передать больше полной мощности, при увеличении реактивной составляющей нагрузки. Связано это с распределением реактивной мощности в данной изолированной системе. ДЛЭП генерирует большое количество реактивной мощности, что приводит к повышению уровней напряжения во всей системе. Если нагрузка имеет большую реактивную составляющую, то большая часть реактивной мощности, генерируемой линией, компенсируется нагрузкой, что приводит к необходимости увеличения ЭДС генераторов для поддержания напряжения на выводах станций на уровне $1,05 \cdot U_n$. Ток через УПК будет меньше и, соответственно, коэффициент регулирования УПК на границе устойчивости может быть больше.

Исследованы вопросы аperiodической устойчивости при использовании плавного регулирования УШР. Комплексное управление устройством компенсации и управляемыми шунтирующими реакторами дает наибольшее увеличение запаса системы по критерию аperiodической статической устойчивости, ввиду того, что предельные режимы (т.е. переход значения свободного члена характеристического уравнения через ноль) наблюдаются при значениях угла δ_{12} больших более чем на 10° , по сравнению с нерегулируемой передачей, а также позволяет увеличивать предел передаваемой мощности до 20%.

Третья глава посвящена разработке способов определения коэффициентов регулирования АРВ, УУПК и УШР при сохранении положительного влияния этих устройств на показатели устойчивости и режимы ЭЭС. В связи со сложностью процедуры совместного выбора коэффициентов регулирования АРВ на обеих станциях, УУПК и УШР поставленная задача

разбита на два этапа: совместный выбор коэффициентов при наличии управляемой ДЛЭП СВН в простейшей ЭЭС, а затем в изолированной ЭЭС.

Разработана методика выявления областей колебательной устойчивости по результату протекания переходного процесса при кратковременном «малом» возмущении в ЭЭС. Для выявления границы колебательной устойчивости производится серия расчетов при планомерном увеличении одного из коэффициентов регулирования АРВ и фиксации второго. Результат протекания переходного процесса рассматривается на зависимостях взаимного угла и мощности генерирующей станции в функции времени. На границе колебательной устойчивости имеют место незатухающие колебания этих параметров.

Показаны области устойчивости, полученные с использованием данного метода. Анализ рис. 9 показывает, что увеличение коэффициента регулирования УУПК приводит к сокращению области колебательной устойчивости генераторов, что говорит о необходимости учета наличия управляемых устройств в ЭЭС при настройке автоматических регуляторов возбуждения.

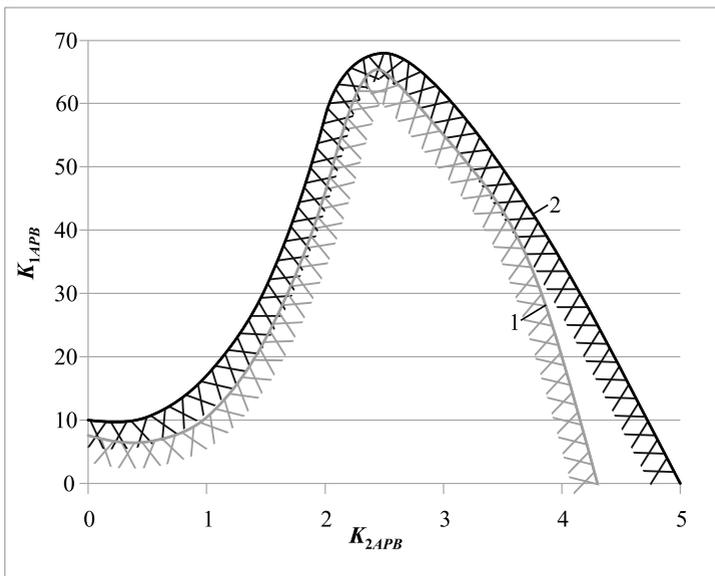


Рисунок 9 – Области колебательной устойчивости при $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 0$, $K_{OU} = 20$:
1 – $K_{2,УПК} = 2$; 2 – $K_{2,УПК} = 0.5$

Нахождение областей устойчивости по детальной модели с учетом переходных процессов в каждом элементе сети связано с продолжительными расчетами исходя из сложности математического описания модели ЭЭС, а также необходимостью проведения большого количества последовательных расчетов переходного процесса в ЭЭС для нахождения границы устойчивости. Рассмотрена возможность применения упрощенных моделей для анализа колебательной устойчивости и построения областей устойчивости по методу D-разбиения по двум и трем параметрам (рис. 10). В диссертации показано, что коэффициенты регулирования АРВ, выбранные при использовании упрощенной модели, входят в область устойчивости, полученную при более детальном математическом описании. Следовательно, для выбора коэффициентов регулирования применение упрощенной модели допустимо. Для более точного выявления границы устойчивости, а также для анализа колебательной устойчивости в уже существующей ЭЭС необходимо использование более полной математической модели.

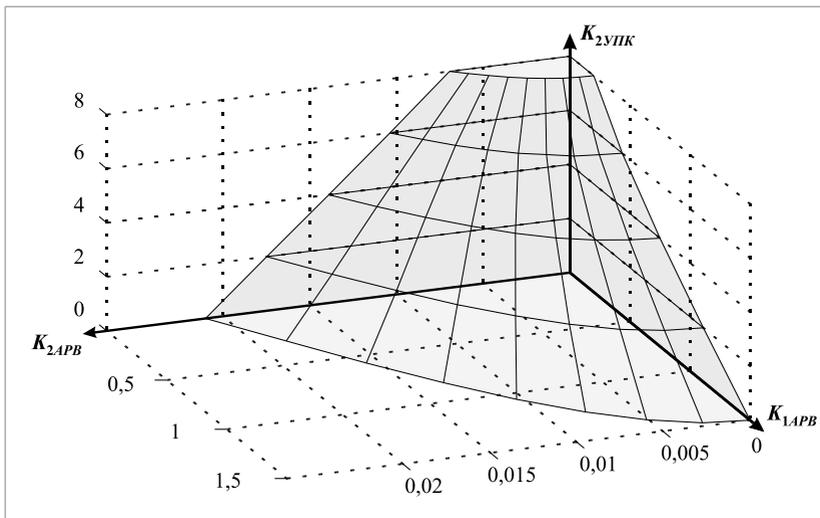


Рисунок 10 – Область устойчивости в координатах коэффициентов регулирования УПК и АРВ

Следует отметить, что при увеличении коэффициента регулирования УПК область возможных значений коэффициентов регулирования АРВ становится меньше.

На основе анализа простейшей управляемой системы проведено исследование для изолированной системы с использованием разработанной методики определения областей колебательной устойчивости. Поскольку область устойчивости строится для одного генератора, то исходя из полученных областей устойчивости для простейшей системы выбрана пара коэффициентов $K_{1АРВ}$ и $K_{2АРВ}$ для одного из генераторов. Произведено определение области устойчивости для второго генератора. Из полученной области устойчивости выбирается пара коэффициентов $K_{1АРВ}$ и $K_{2АРВ}$ для второго генератора и проводится вычисление области для первого. Выявлено, что форма области устойчивости зависит от взаимного положения конкретного генератора и места подключения нагрузки (рис. 11 и 12).

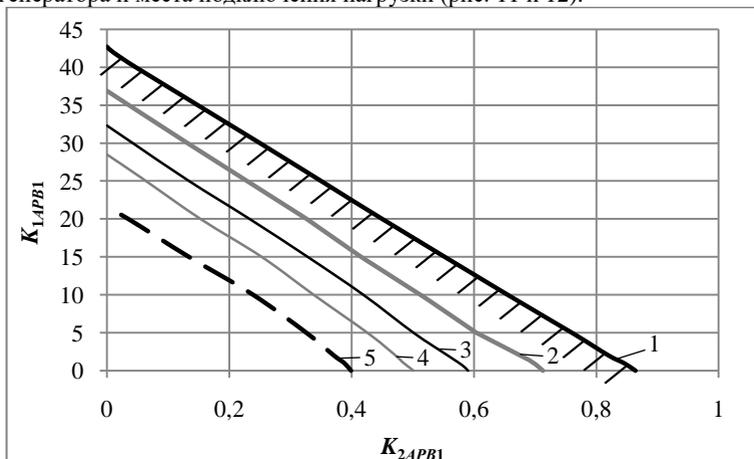


Рисунок 11 – Области колебательной устойчивости исследуемой ЭЭС для АРВ СД генератора 1 при вариации коэффициента регулирования УУПК:

1 – $K_{2УПК} = 1$; 2 – $K_{2УПК} = 2$; 3 – $K_{2УПК} = 3$; 4 – $K_{2УПК} = 4$; 5 – $K_{2УПК} = 6$

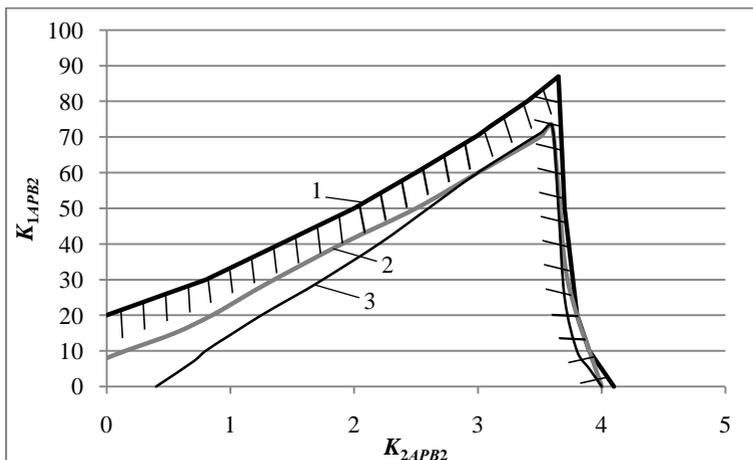


Рисунок 12 – Области колебательной устойчивости исследуемой ЭЭС для APB СД генератора 2 при вариации коэффициента регулирования УУПК:

1 – $K_{2УПК} = 0$; 2 – $K_{2УПК} = 2$; 3 – $K_{2УПК} = 4$

Четвертая глава посвящена исследованию динамической устойчивости и обеспечению требуемого качества переходных процессов исследуемой системы. Анализ динамической устойчивости исследуемой системы проведен при «больших» возмущающих воздействиях по математической модели, учитывающей как электромагнитные переходные процессы в элементах сети, так и электромеханический переходный процесс по разработанной программе интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений с решением системы нелинейных алгебраических уравнений на каждом шаге.

Расчеты показывают (рис. 13), что увеличение коэффициента регулирования УУПК позволяет повысить качество переходных процессов, а также снизить взаимный угол, при которых наблюдается новый УР.

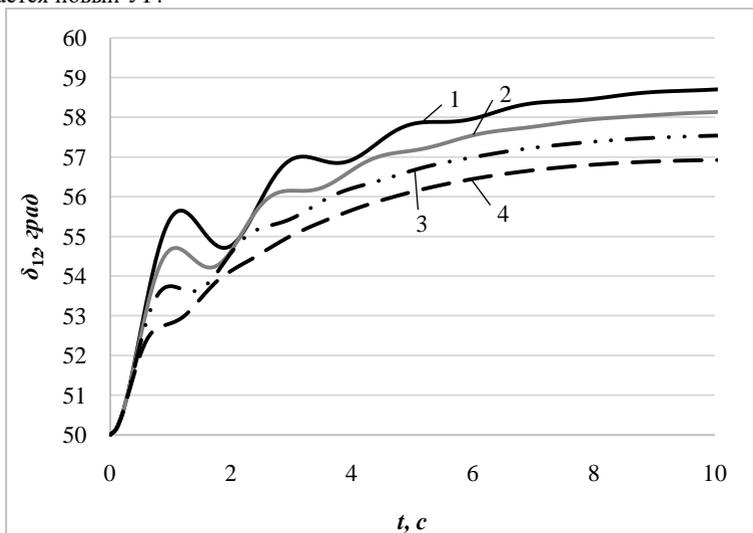


Рисунок 13 – Кривые изменения угла между векторами ЭДС генераторов при изменении мощностей турбин: 1 – $K_{2УПК} = 0$; 2 – $K_{2УПК} = 2$; 3 – $K_{2УПК} = 4$; 4 – $K_{2УПК} = 6$

Выбор слишком большого коэффициента регулирования УУПК приводит к нарушению динамической устойчивости и «переворачиванию» мощностей, выдаваемых станциями, что является признаком наступления резонансного перехода (рис. 14).

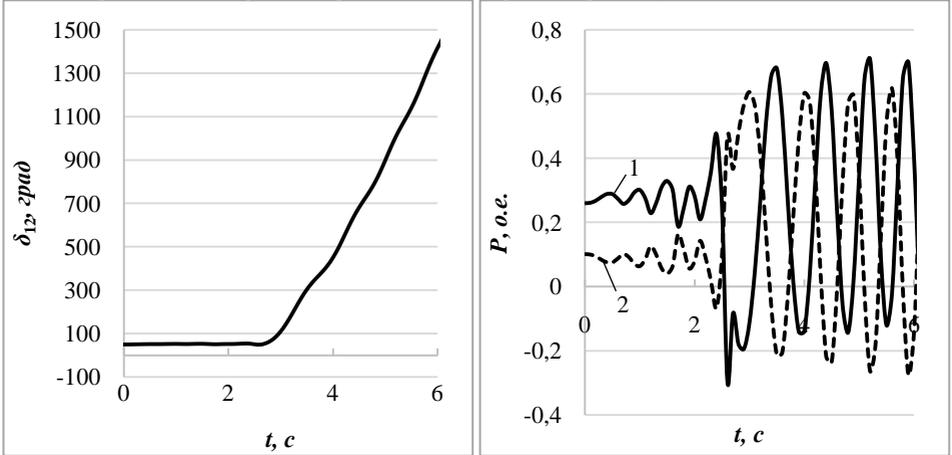


Рисунок 14 – Кривая изменения угла между векторами ЭДС генераторов и электромагнитной мощности генераторов при резонансном переходе при $K_{2УПК}=7,5$

Анализ полученных зависимостей на рис. 15 свидетельствует о том, что совместное регулирование управляемых устройств позволяет дополнительно улучшать качество переходных процессов, по сравнению с использованием только лишь УУПК, а значит и увеличивать предел передаваемой мощности по условию сохранения динамической устойчивости.

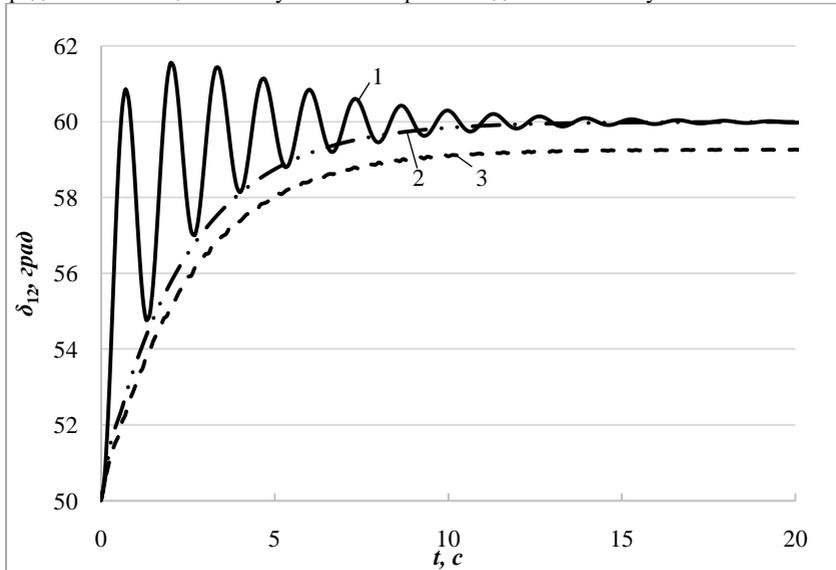


Рисунок 15 – Кривые изменения угла между векторами ЭДС генераторов при $K_{oU} = 20$:
 1 – $K_{2УПК} = 0, K_{1APB1} = K_{2APB1} = K_{1APB2} = K_{2APB2} = 0$; 2 – $K_{2УПК} = 0, K_{1APB1} = 5, K_{2APB1} = 0.5, K_{1APB2} = 10, K_{2APB2} = 0.2$; 3 – $K_{2УПК} = 2, K_{1APB1} = 5, K_{2APB1} = 0.5, K_{1APB2} = 10, K_{2APB2} = 0.2$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель двухмашинной системы с управляемой ДЛЭП СВН, позволяющая производить исследования установившихся и переходных режимов ЭЭС, а также для расчетов и оценки статической и динамической устойчивости системы при вариациях законов управления УУПК и УШР.

2. Произведен анализ характеристик установившихся режимов исследуемой ЭЭС, выявлена возможность возникновения нежелательных явлений из-за наличия управляемого в функции тока сопротивления $X_{УПК}(I)$ не только при изменении коэффициента регулирования УУПК, но и при изменении числа реакторов на выводах УУПК, а также вариации коэффициентов регулирования УШР.

3. Произведен анализ аperiodической устойчивости системы при различных вариантах регулирования управляемых устройств. Выявлено, что совместное регулирование УУПК и УШР позволяет повысить предел аperiodической устойчивости больше, чем на 10° по сравнению с нерегулируемой электропередачей.

4. Предложены методики построения областей колебательной устойчивости ЭЭС с различной степенью детализации модели ЭЭС. Выявлены области устойчивости, позволяющие отстраиваться от нежелательного нарушения колебательной устойчивости в плоскостях различных коэффициентов УУПК и АРВ. Показано, что применение упрощенных моделей для выявления допустимых диапазонов выбора коэффициентов регулирования АРВ генераторов допустимо. Для анализа колебательной устойчивости в уже существующей ЭЭС целесообразно использование более полной модели, поскольку она учитывает электромагнитные переходные процессы во всех элементах сети, в отличие от упрощенной, учитывающей переходные процессы только в обмотках генераторов.

5. Показано положительное влияние совместного регулирования управляемых устройств сети и автоматических регуляторов генераторов станций на динамическую устойчивость ЭЭС.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Голов В.П. Управляемая продольная компенсация линий сверхвысокого напряжения / В. П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин, **Д.Н. Кормилицын**; Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина". – Иваново: 2017. – 84 с. ISBN 978-5-00062-223-0

По перечню рецензируемых изданий ВАК

2. Голов В.П. Области колебательной устойчивости изолированной системы из двух станций при вариации характеристики и мощности нагрузки / В.П. Голов, **Д.Н. Кормилицын**, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин // Вестник ИГЭУ. – №6. – 2015. – с. 29-34.

3. Введенский Н.Е. Регулирование мощности шунтирующих реакторов для улучшения устойчивости энергосистемы с управляемым устройством продольной компенсации / Н.Е. Введенский, В.П. Голов, А.С. Казарин, **Д.Н. Кормилицын**, И.А. Москвин, С.Д. Никитина // Вестник ИГЭУ. – №6. – 2016. – с. 49-56.

4. Голов В.П. Использование управляемых электропередач с регулируемой продольной компенсацией для реализации адаптивных сетей / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин, **Д.Н. Кормилицын** // Электротехника. – №2. – 2017. – с. 60-66.

Переводная версия статьи, индексируемая в базе данных SCOPUS:

Golov V.P. Using controlled electric-power lines with controlled series compensation in smart-grid networks / V.P. Golov, A.A. Martirosyan, I.A. Moskvina, D.N. Kormilitsyn // Russian Electrical Engineering. – 2017. Vol. 88 – No. 2 – P. 81-86. DOI: 10.3103/S1068371217020031

5. Мартиросян А.А. Выбор места установки и законов регулирования устройств продольной емкостной компенсации для повышения устойчивости электроэнергетической системы / А.А. Мартиросян, М.В. Зотова, **Д.Н. Кормилицын** // Вестник ИГЭУ. – №4. – 2017. – с. 30-36.

6. Голов В.П. Выбор коэффициентов регулирования автоматического регулятора возбуждения для сохранения колебательной устойчивости электроэнергетической системы с управляемой линией электропередачи / В.П. Голов, Н.А. Градов, **Д.Н. Кормилицын**, Е.С. Скоропеева, Ю.О. Чуркина // Вестник ИГЭУ. – №5. – 2017. – с. 27-36.

Публикации в других изданиях

7. Голов В.П. Области колебательной устойчивости изолированной системы из двух станций при вариации характеристики и мощности нагрузки / В.П. Голов, **Д.Н. Кормилицын**, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. – №6. – 2016. – с. 22-27.

8. Никитина С.Д. Управляемая продольная компенсация ЛЭП СВН для повышения предела передаваемой мощности при изменении мощности шунтирующих реакторов / С.Д. Никитина, **Д.Н. Кормилицын** // Вестник Российского национального комитета СИГРЭ. Выпуск №10. Материалы Молодежной секции РНК СИГРЭ: сборник конкурсных докладов «Энергия-2016» по электроэнергетической и электротехнической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ. – Иваново: ФГБОУ ВО ИГЭУ им. В.И. Ленина, – Иваново, 2016. – с. 71-74.

9. Голов В.П. Выбор коэффициентов регулирования автоматического регулятора возбуждения для сохранения колебательной устойчивости электроэнергетической системы с управляемой линией электропередачи / В.П. Голов, Н.А. Градов, **Д.Н. Кормилицын**, Е.С. Скоропеева, Ю.О. Чуркина // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. – №2. – 2018. – с. 10-20.

Публикации в материалах конференций

10. **Кормилицын Д.Н.** Применение устройств продольной емкостной компенсации в передачах переменного тока / **Д.Н. Кормилицын**, И.А. Москвин // Электроэнергетика. Восьмая Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2013": материалы конференции, Том 3, ч. 1, г. Иваново, 23-25 апреля 2013 г.– Иваново: ФГБОУ ВПО ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2013. – с. 3-4.

11. **Кормилицын Д.Н.** К вопросу об использовании управляемых шунтирующих реакторов на выводах устройств продольной компенсации / **Д.Н. Кормилицын**, И.А. Москвин // Электроэнергетика. Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2014": материалы конференции, Том 3, ч. 1., Иваново, 15-17 апреля 2014 г – Иваново: ФГБОУ ВПО ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2014. – с. 60-63.

12. Гатиллов И.С. Выбор количества групп реакторов на выводах устройства продольной компенсации / И.С. Гатиллов, Е.В. Мареева, **Д.Н. Кормилицын** // Электроэнергетика. "Энергия-2015". Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых Иваново, 21-23 апреля 2015 г.: материалы конференции, Том 3. – Иваново: ФГБОУ ВПО ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2015. – с. 49-51.

13. **Кормилицын Д.Н.** Управляемые электропередачи с регулируемой продольной компенсацией в электроэнергетической системе / **Д.Н. Кормилицын**, И.А. Москвин // Электроэнергетика глазами молодежи. Труды VI международной научно-технической конференции, 9-13 ноября 2015 года, Том 1. – Иваново: ФГБОУ ВПО ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2015. – с. 558-561.

14. **Кормилицын Д.Н.** Влияние управляемых шунтирующих реакторов на устойчивость электроэнергетической системы с управляемой продольной компенсацией / **Д.Н. Кормилицын**, В.П. Голов // Радиотехника, электротехника и энергетика: Двадцать

вторая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов, Том 3, 25–26 февраля 2016 г. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – с. 265.

15. **Кормилицын Д.Н.** Влияние управляемых шунтирующих реакторов на устойчивость электроэнергетической системы с управляемой продольной компенсацией / **Д.Н. Кормилицын**, В.П. Голов // Электроэнергетика. Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия - 2016": материалы конференции, Том 3, г. Иваново, 5-7 апреля 2016 г. – Иваново: ФГБОУ ВО ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2016. – с. 52-53.

16. Никитина С.Д. Управляемая продольная компенсации ЛЭП СВН для повышения предела передаваемой мощности при изменении мощности шунтирующих реакторов / С.Д. Никитина, **Д.Н. Кормилицын** // Электроэнергетика. Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия - 2016": материалы конференции, Том 3, г. Иваново, 5-7 апреля 2016 г. – Иваново: ФГБОУ ВО ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2016. – с. 72-74.

17. **Кормилицын Д.Н.** Управляемые устройства продольной компенсации и управляемые шунтирующие реакторы для улучшения устойчивости электроэнергетической системы / **Д.Н. Кормилицын** // Электроэнергетика глазами молодежи - 2016: материалы VII Международной научно-технической конференции, 19 – 23 сентября 2016 г., Том 2. – Казань: КГЭУ, 2016. – с. 260-263.

18. Golov V. Shunt reactors power discrete and smooth control for improvement stability of electrical power systems containing controlled series compensation devices / V. Golov, **D. Kormilicyn**, A. Martirosyan, I. Moskvina // Proceedings of the X International Academic Congress "Contemporary Science and Education in Americas, Africa and Eurasia" (Brazil, Rio de Janeiro, 10-12 November 2016). – Rio de Janeiro, 2016. – pp. 297-311.

19. Градов Н.А. Математическая модель регулируемой электроэнергетической системы для анализа статической устойчивости / Н.А. Градов, Е.С. Скоропеева, **Д.Н. Кормилицын** // Электроэнергетика. Двенадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия - 2017": материалы конференции, Том 3, г. Иваново, 4-6 апреля 2017 г. – Иваново: ФГБОУ ВО ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2017. – с. 31-32.

20. Шатохина Д.И. Определение токов симметричных коротких замыканий ЭЭС с управляемой линией электропередачи / Д.И. Шатохина, **Д.Н. Кормилицын** // Электроэнергетика. Двенадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия - 2017": материалы конференции, Том 3, г. Иваново, 4-6 апреля 2017 г. – Иваново: ФГБОУ ВО ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2017. – с. 45-46.

21. Введенский Н.Е. Динамическая устойчивость электроэнергетической системы с использованием комплексного управления блоком продольной компенсации / Н.Е. Введенский, А.С. Казарин, **Д.Н. Кормилицын** // Электроэнергетика. Двенадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия - 2017": материалы конференции, Том 3, г. Иваново, 4-6 апреля 2017 г. – Иваново: ФГБОУ ВО ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2017. – с. 50-52.

22. **Кормилицын Д.Н.** Выбор параметров регулирования элементов многомашинной электроэнергетической системы с целью обеспечения статической устойчивости / **Д.Н. Кормилицын**, Ю.О. Чуркина // Электроэнергетика глазами молодежи. Материалы VIII международной молодежной научно-технической конференции, 2-6 октября 2017 года, Том 2. – Самара: СамГТУ, 2017. – с. 250-253.

23. Градов Н.А. Влияние состава и мощности нагрузки на статическую устойчивость ЭЭС / Н.А. Градов, Е.С. Скоропеева, **Д.Н. Кормилицын** // Электроэнергетика. Тринадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия - 2018": материалы конференции, Том 3, г. Иваново, 3-5 апреля 2018 г. – Иваново: ФГБОУ ВО ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2018. – с. 18.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

24. Сидоров А.В. Программа для ЭВМ: «SSST» / А.В. Сидоров, И.А. Москвин, **Д.Н. Кормилицын**, А.А. Братолобов // Свид. о государств. регистр. программы для ЭВМ 2016660082 / зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 06.09.16.

25. **Кормилицын Д.Н.** Программа для ЭВМ: «Controlled electric power system stability» / **Д.Н. Кормилицын** // Свид. о государств. регистр. программы для ЭВМ 2018660842 / зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 28.08.18.

Кормилицын Дмитрий Николаевич

УСТОЙЧИВОСТЬ РЕГУЛИРУЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С УПРАВЛЯЕМОЙ ЛИНИЕЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 18.12.2018 г. Формат 60x84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 19.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.