Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

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

## **ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

Голов Валерий Павлович

Иваново – 2018

## оглавление

| ВВЕДЕНИЕ  | 7  |
|---|----|
| ГЛАВА 1. ФОРМИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ       |    |
| ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ЭЛЕМЕНТАМИ        |    |
| УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ        |    |
| ПРОЦЕССОВ   | 20 |
| 1.1. Исследуемая электроэнергетическая система    | 20 |
| 1.2. Синхронные генераторы                        | 21 |
| 1.2.1. Статорные и роторные цепи                  | 21 |
| 1.2.2. Уравнение движения ротора                  | 28 |
| 1.3. Уравнения преобразования координат           | 30 |
| 1.4. Взаимные и собственные углы СГ               | 31 |
| 1.5. Трансформаторы                               | 31 |
| 1.6. Линии электропередачи                        | 32 |
| 1.7. Шунтирующие реакторы                         | 35 |
| 1.8. Нагрузка                                     | 36 |
| 1.9. УПК  | 37 |
| 1.10. Управляемые элементы                        | 38 |
| 1.10.1. АРВ сильного действия                     | 38 |
| 1.10.2. APC                                       | 39 |
| 1.10.3. УУПК                                      | 40 |
| 1.10.4. УШР                                       | 42 |
| 1.11. Уравнения баланса токов в сети              | 43 |
| 1.12. Представление модели ЭЭС в компактной форме | 44 |

| 1.12.1. Матричная форма записи уравнений СГ   | 44  |
|---|---|
| 1.12.2. Матричная форма записи уравнений элементов сети   |   |
| 1.12.3. Матричная форма записи уравнений баланса токов  |   |
| 1.12.4. Матричная форма записи уравнений преобразования   |   |
| координат   |   |
| 1.12.5. Матричная форма записи уравнений для собственных и  |   |
| взаимных углов  |   |
| 1.12.6. Уравнения управляемых элементов в компактной записи   |   |
| 1.13. Алгоритм расчета переходных и установившихся режимов в  |   |
| исследуемой ЭЭС   |   |
| 1.14. Выводы по первой главе  | 49  |
| ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ   |   |
|   |   |
| УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.   | 50  |
| УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.<br>2.1. Математическая модель рассматриваемой системы для расчетов  | <b>50</b><br>3  |
| УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.<br>2.1. Математическая модель рассматриваемой системы для расчетов<br>установившихся режимов  | <b>50</b><br>3<br>51  |
| <ul> <li>УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.</li> <li>2.1. Математическая модель рассматриваемой системы для расчетов установившихся режимов</li></ul>  | 50<br>3<br>51   |
| <ul> <li>УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.</li> <li>2.1. Математическая модель рассматриваемой системы для расчетов установившихся режимов</li></ul>  | <b> 50</b><br>3<br>51   |
| <ul> <li>УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.</li> <li>2.1. Математическая модель рассматриваемой системы для расчетов установившихся режимов.</li> <li>2.2. Основные допущения при эквивалентировании генераторов электрических станций.</li> <li>2.3. Особенности расчета установившихся режимов и угловых</li> </ul>  | 50<br>3<br>51<br>56   |
| <ul> <li>УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.</li> <li>2.1. Математическая модель рассматриваемой системы для расчетов установившихся режимов.</li> <li>2.2. Основные допущения при эквивалентировании генераторов электрических станций.</li> <li>2.3. Особенности расчета установившихся режимов и угловых характеристик исследуемой системы.</li> </ul>   | 50<br>3<br>   |
| <ul> <li>УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.</li> <li>2.1. Математическая модель рассматриваемой системы для расчетон установившихся режимов</li> <li>2.2. Основные допущения при эквивалентировании генераторов электрических станций.</li> <li>2.3. Особенности расчета установившихся режимов и угловых характеристик исследуемой системы</li> <li>2.4. Особенности утяжеления режима при наличии УУПК</li> </ul>  | <b> 50</b><br>3<br>51<br>56<br>56   |
| <ul> <li>УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.</li> <li>2.1. Математическая модель рассматриваемой системы для расчетой установившихся режимов</li> <li>2.2. Основные допущения при эквивалентировании генераторов электрических станций.</li> <li>2.3. Особенности расчета установившихся режимов и угловых характеристик исследуемой системы</li> <li>2.4. Особенности утяжеления режима при наличии УУПК.</li> <li>2.5. Предел передаваемой мощности изолированной системы с</li> </ul>  | 50<br>3<br>51<br>56<br>56<br>58   |
| <ul> <li>УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.</li> <li>2.1. Математическая модель рассматриваемой системы для расчетой установившихся режимов</li> <li>2.2. Основные допущения при эквивалентировании генераторов электрических станций.</li> <li>2.3. Особенности расчета установившихся режимов и угловых характеристик исследуемой системы</li> <li>2.4. Особенности утяжеления режима при наличии УУПК.</li> <li>2.5. Предел передаваемой мощности изолированной системы с УУПК и с различным количеством ступеней УШР.</li> </ul>   | 50<br>3<br>51<br>56<br>56<br>58<br>59   |
| <ul> <li>УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ .</li> <li>2.1. Математическая модель рассматриваемой системы для расчетой установившихся режимов</li> <li>2.2. Основные допущения при эквивалентировании генераторов электрических станций.</li> <li>2.3. Особенности расчета установившихся режимов и угловых характеристик исследуемой системы</li> <li>2.4. Особенности утяжеления режима при наличии УУПК</li> <li>2.5. Предел передаваемой мощности изолированной системы с УУПК и с различным количеством ступеней УШР</li> <li>2.6. Апериодическая устойчивость изолированной системы с УУПК</li> </ul> | 50<br>3<br>51<br>56<br>56<br>58<br>59   |
| <ul> <li>УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.</li> <li>2.1. Математическая модель рассматриваемой системы для расчетой установившихся режимов</li></ul>  | 50<br>3<br>51<br>56<br>56<br>58<br>58<br>59<br>59<br>59<br>50<br>50<br>50<br>50<br>50<br>50<br>50<br>50<br>50<br>50 |

|                   | .8. Колебательная устойчивость системы с УУПК и с различным  |
|-------------------|--|
| К                 | оличеством ступеней УШР 86   |
| 2                 | .9. Влияние характеристики и мощности нагрузки на  |
| К                 | солебательную устойчивость системы с УУПК и УШР с различным  |
| К                 | оличеством ступеней  |
| 2                 | 2.10. Предел передаваемой мощности изолированной системы с   |
| 2                 | УПК и УШР с плавным регулированием   |
| 2                 | .11. Апериодическая устойчивость изолированной системы с   |
| 7                 | УПК и УШР с плавным регулированием101  |
| 2                 | .12. Колебательная устойчивость системы с УУПК и УШР с   |
| П                 | лавным регулированием105   |
| 2                 | 2.13. Выводы по второй главе 106   |
| ГЛ                | ІАВА З. ВЫБОР КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ  |
| AB                | ЗТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ВОЗБУЖДЕНИЯ ПО   |
| УС                | ЛОВИЮ СОХРАНЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ   |
| <b>x</b> 77       |  |
| УC                | СТОЙЧИВОСТИ В СЕТИ С УПРАВЛЯЕМОЙ   |
| у(<br>ЭЛ          | СТОЙЧИВОСТИ В СЕТИ С УПРАВЛЯЕМОЙ<br>ІЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ 108  |
| у<br>Эл<br>3      | СТОЙЧИВОСТИ В СЕТИ С УПРАВЛЯЕМОЙ<br>ІЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ 108<br>.1. Совместный выбор коэффициентов в простейшей ЭЭС 109 |
| у<br>Эл<br>3      | СТОЙЧИВОСТИ В СЕТИ С УПРАВЛЯЕМОЙ<br>ІЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ  |
| у<br>Эл<br>3      | СТОЙЧИВОСТИ В СЕТИ С УПРАВЛЯЕМОЙ<br>ІЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ  |
| у<br>(Эл<br>3     | СТОЙЧИВОСТИ В СЕТИ С УПРАВЛЯЕМОЙ<br>IЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ  |
| у<br>Эл<br>3      | СТОЙЧИВОСТИ В СЕТИ С УПРАВЛЯЕМОЙ<br>ІЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ  |
| у<br>(Эл<br>3     | СТОЙЧИВОСТИ В СЕТИ С УПРАВЛЯЕМОЙ<br>ІЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ  |
| у<br>(Эл<br>3     | СТОЙЧИВОСТИ В СЕТИ С УПРАВЛЯЕМОЙ<br>ІЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ  |
| у<br>(<br>Эл<br>3 | СТОЙЧИВОСТИ В СЕТИ С УПРАВЛЯЕМОЙ<br>ІЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ  |

| 3.1.5. Области устойчивости для системы с регулируемым УПК и             |     |
|--|-----|
| устройством АРВ по методу утяжеления режима по одному из                 |     |
| параметров   | 119 |
| 3.1.6. Области устойчивости для системы с регулируемым УПК и             |     |
| устройством АРВ по методу общего приращения режима                       | 122 |
| 3.2. Совместный выбор коэффициентов в двухмашинной ЭЭС                   | 126 |
| 3.2.1. Модель рассматриваемой ЭЭС  | 126 |
| 3.2.2. Методика построения областей устойчивости по результату           |     |
| протекания переходного процесса при возникновении «малого»               |     |
| возмущения   | 126 |
| 3.2.3. Области колебательной устойчивости генератора 1 при               |     |
| вариации настроечных параметров АРВ генератора 2                         | 130 |
| 3.2.4. Исследование влияния коэффициента регулирования К <sub>2УПК</sub> |     |
| на колебательную статическую устойчивость                                | 131 |
| 3.2.5. Исследование влияния состава нагрузки на колебательную            |     |
| статическую устойчивость   | 134 |
| 3.2.6. Исследование влияния мощности нагрузки на                         |     |
| колебательную статическую устойчивость                                   | 135 |
| 3.3. Выводы по третьей главе   | 137 |
| ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В                            |     |
| ИССЛЕДУЕМОЙ ЭЭС ПРИ «БОЛЬШИХ» ВОЗМУЩЕНИЯХ                                | 139 |
| 4.1. Математическая модель рассматриваемой системы при                   |     |
| «больших» возмущениях  | 140 |
| 4.2. Особенности расчета переходных процессов при «больших»              |     |
| возмущениях  | 146 |
| 4.3. Выбор характеристик УПК по условию улучшения                        |     |
| динамической устойчивости  | 147 |

| 4.4. Выводы по четвертой главе              | 152 |
|---|-----|
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ                                  | 153 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ                           | 155 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ                           | 157 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ      |     |
| ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЭС                               | 175 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2 АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ           |     |
| КОЭФФИЦИЕНТОВ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ |     |
| ПРИ НАЛИЧИИ УУПК И УШР С РАЗЛИЧНЫМ          |     |
| КОЛИЧЕСТВОМ СТУПЕНЕЙ                        | 184 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ З АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ           |     |
| КОЭФФИЦИЕНТОВ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ |     |
| ПРИ НАЛИЧИИ УУПК И УШР                      | 189 |

#### введение

В.1 Актуальность темы. С необходимостью передачи электроэнергии на дальние расстояния инженеры столкнулись практически в самом начале развития большой энергетики, поскольку бесконечно наращивать количество электрических станций на территории городов было невозможно. Первым исторически важным проектом передачи мощности на большое расстояние является Лауфен-Франкфуртская электропередача, сооруженная Доливо-Добровольским в 1891 г. [1, 2]. С тех пор проблема передачи мощности на большое расстояние не снята ввиду широкой электрификации Земли.

В мировой практике имеет место тенденция к расширению производства электроэнергии в местах сосредоточения энергоресурсов. Центры нагрузки и главные потребители обычно находятся на удалении в сотни и тысячи километров от данных электрических станций. Надежная передача электроэнергии на сверхдальние расстояния является необходимым фактором функционирования электроэнергетической системы (ЭЭС) в целом. Данная проблема особо актуальна для энергосистемы России, поскольку она является наиболее крупной в мире с большим количеством протяженных электропередач.

Исходя из режимов работы дальних линий электропередачи сверхвысокого напряжения (ДЛЭП СВН) поток мощности по ним существенно изменяется как в течение суток, так и сезонно. Кроме того, с учетом развития промышленности Российской Федерации, а также увеличения количества энергоемких бытовых устройств электроэнергии требуется всё больше. Приведенные выше факты обуславливают 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, данные электропередачи из пассивных элементов преобразуются в активные и влияют на режимы работы ЭЭС [3]. 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 линии, усложнением распределительных устройств на подстанциях, повышенными значениями напряжения по длине линии в режимах, приближенных к холостому ходу и др.

Все устройства FACTS можно условно разделить на 3 типа:

1. Устройства регулирования (компенсации) реактивной мощности. Служат для поддержания уровней напряжения в ЭЭС, управления перетоками мощности между энергосистемами, а также повышения пределов статической и динамической устойчивости. К ним относятся шунтирующие реакторы (ШР), батареи статических конденсаторов (БСК), статические тиристорные компенсаторы (СТК), статический компенсатор реактивной мощности на основе IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) транзисторов (СТАТКОМ), управляемые шунтирующие реакторы (УШР), синхронные компенсаторы (СК) и асинхронизированные компенсаторы (АСК) [4].

2. Устройства регулирования параметров сети. Данные устройства изменяют эквивалентное реактивное сопротивление элементов сети, что приводит к изменению пропускной способности линий, а также перераспределению потоков мощности по шунтирующим ветвям. К данным устройствам относятся неуправляемые устройства продольной компенсации (УПК), управляемые устройства продольной компенсации (УУПК) и фазоповоротные устройства (ФПУ), а также АСК, подключаемые в сеть последовательно [5]. 3. Устройства продольно-поперечного включения. Данные устройства, в отличие от предыдущих, производят векторное регулирование, позволяя регулировать как величину, так и фазу вектора напряжения, что приводит к изменению потоков мощности в режимах работы ЭЭС. Таковыми устройствами являются объединенные регуляторы потоков мощности (ОРПМ), состоящие либо из двух СТАТКОМ, либо из двух АСК, включенных последовательно-параллельно в сеть [6].

В мировой практике широко используются устройства FACTS различного типа. Мировыми производителями оборудования FACTS являются Siemens, Areva, ABB. Отечественными заводами разработаны и внедрены УШР управляемые подмагничиванием постоянным током (ОАО «ЭЛУР», ОАО «ХК Электрозавод», ООО «ЭСКО») с номинальным напряжением до 500 кВ и мощностью до 180 Мвар [7], 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 АСК мощностью по 100 Мвар и установлены на ПС 500 кВ «Бескудниково» Московского энергетического кольца [8].

В таких странах как США, Швеция, Бразилия, Индия и Китай уже имеется практический опыт эксплуатации УУПК. Применение УПК в России в настоящий момент практически заморожено, поскольку имеется всего лишь один пример успешного применения данных устройств на электропередаче Куйбышев - Москва [9]. Однако работы, выполненные ОАО «Институт «Энергосетьпроект» и ОАО «ВНИИЭ» в 2007 г. показали, что применение УУПК является наиболее эффективным способом повышения пропускной способности электропередачи 500 кВ «Саяно-Шушенская ГЭС» – «Новокузнецкая», «Кузбасская» [10].

Создание управляемых электропередач на основе применения УУПК требует решения комплекса задач, в частности комплексной настройки регулируемых устройств, входящих в ЭЭС, с целью повышения пропускной спо-

собности, а также увеличения пределов статической и динамической устойчивости. Однако при выборе законов регулирования управляемых устройств необходимо учитывать возможные режимы работы при малой загрузке ДЛЭП СВН, поскольку при таких условиях возможны перенапряжения на линии. В данном случае является актуальным применение УУПК, позволяющее снижать степень компенсации при уменьшении протекающего по ДЛЭП СВН тока, а при применении специальных средств переходить в режим антикомпенсации для потребления излишков реактивной мощности и дополнительной стабилизации уровней напряжения [11, 12].

Исходя из вышесказанного, необходимо проанализировать режимы работы сложной ЭЭС, содержащей как УУПК, так и другие типы управляемых устройств и оценить их взаимное влияние. Данная работа является логическим продолжением цикла работ по улучшению устойчивости ЭЭС, содержащих ДЛЭП СВН на основе элементов гибких электропередач с УУПК, проводимых на кафедре Электрических систем ИГЭУ [13, 14].

В.2 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 [15-27]. 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, с более полным представлением элементов сети, указывается на явные преимущества применения УУПК или ОРПМ как наиболее перспективных устройств.

В настоящее время широко распространены три вида управления УПК:

1. С использованием тиристорно-реакторной группы, включаемой параллельно основной ёмкости (ТУПК – тиристорно-управляемая продольная компенсация, в англоязычной литературе получило название Thyristor Controlled Series Compensator – TCSC);

2. С использованием тиристорных выключателей, шунтирующих основную ёмкость (БУПК – безреакторное устройство продольной компенсации, в англоязычной литературе получило название Gate Controlled Series Compensator – GCSC);

3. С использованием выключателей, шунтирующих основную ёмкость и изменяющих эквивалентное сопротивление УУПК дискретно из-за ступенчатого переключения конденсаторных батарей (в англоязычной литературе получило название Mechanically Switched Series Capacitor – MSSC). Данный вид управления постепенно вытесняется вышеназванными технологиями ввиду плавности их управления.

Сравнению этих технологий реализации УУПК также посвящен целый ряд работ [28-33]. Результаты сводятся к тому, что применение тиристорных выключателей упрощает схему управления УПК, устройство не имеет явления резонанса и требует меньшего значения основной ёмкости по сравнению с ТУПК, однако имеется сложность в технических ограничениях современных тиристорных выключателей. Практической реализации УУПК с помощью силовых тиристоров посвящены патенты на изобретения [34-36].

В разработанных и воплощенных за рубежом проектах всё чаще УУПК разбивается на 2 отдельные части – нерегулируемая и управляемая, причем их раздельная установка позволяет значительно сгладить проблемы, связанные с перепадом напряжений на выводах УПК [37, 38]. Дальнейшие исследо-

вания в данном направлении рассматривают возможность установки распределенного УПК по линии без использования ШР для стабилизации уровней напряжения [39].

Другим вариантом модификации существующих линий является использование т.н. «гибридного» УУПК. В этом случае управляемая часть устанавливается только в одной фазе, а остальные имеют постоянную степень компенсации. Исследованиями ряда авторов показано [11, 40, 41], что применение такой схемы существенно влияет как на переходные, так и установившиеся режимы (УР) работы ЭЭС. Применение такого вида компенсации позволяет снизить затраты при установке, а также увеличить надежность по сравнению с традиционными ТУПК поскольку количество коммутируемых устройств снижается втрое.

Исходя из того, что УУПК является сосредоточенным устройством и, в целом, может быть установлено в любой точке линии, некоторое количество работ посвящено исследованию влияния положения УУПК на режимы и устойчивость ЭЭС [15, 42-45]. Результаты исследований показывают, что при наличии только одного УУПК на линии наибольшая передаваемая мощность наблюдается при установке управляемого устройства в середине линии. При наличии нескольких устройств FACTS на линии оптимальное положение УУПК возможно получить только в результате проведения вычислительного эксперимента.

В большинстве работ, посвященных влиянию УУПК на режимы и устойчивость ЭЭС, исследования производятся только для управляемой ДЛЭП СВН, подключенной к двум шинам бесконечной мощности [31, 43, 45-51]. Также во многих случаях рассматривается простейшая система, подключенная к шинам бесконечной мощности [12, 42, 52-58]. Наиболее точными являются исследования [59, 60], представляющие процессы в генераторах с использованием уравнений Парка-Горева, поскольку представление генератора упрощенными моделями дает большую погрешность или имеет крайне ограниченную область применения [61, 62]. Блок УПК обычно содержит большое количество устройств защиты и противоаварийной автоматики. Защиты или сама специфика закона регулирования УУПК ограничивают максимальное значение степени компенсации. Значение тока короткого замыкания (КЗ) в компенсированных линиях превышает нормируемые значения. Вследствие этого на выводах УПК наблюдаются перенапряжения и для защиты батарей конденсаторов устанавливается ограничитель перенапряжения и/или разрядник [63]. Он позволяет шунтировать конденсаторные батареи на время, за которое произойдет отключение КЗ силовым выключателем. Также блок УПК содержит защиту от превышения тока через конденсаторы и форсировку продольной компенсации [64].

Вопросы защиты гибких линий электропередачи при различном исполнении УУПК также успешно решаются в большом количестве работ. Основная часть исследований посвящена вопросам дистанционной защиты компенсированных линий [32, 65-67]. Также существуют работы, показывающие влияние УПК на характеристики срабатывания других видов защит – дифференциальной защиты линии (ДЗЛ), дифференциально-фазной защиты (ДФЗ), токовой направленной защиты нулевой последовательности (ТНЗНП) [68]. Одним из вариантов исполнения защит гибких линий предлагается разделение таких линий на однородные участки. На данных однородных участках действуют отдельные, согласованные друг с другом, защиты [69, 70]. Вопропротивоаварийного управления сложных ЭЭС, содержащих сы устройства FACTS, в том числе и УУПК, рассмотрены в [71].

Одним из наиболее распространенных устройств FACTS в России является УШР [7]. И как наиболее разработанное и внедренное устройство обсуждается в работах [15, 59-86]. Наибольший интерес представляют работы [60, 72, 78, 80, 86], поскольку в них рассматриваются различные законы регулирования УШР и их влияние на режимы и устойчивость системы.

Как показал анализ литературы [50, 75, 87, 88], совместному выбору настроечных параметров устройств регулирования, взаимному влиянию и учету совместного действия управляемых устройств друг на друга уделяется

13

очень скромное внимание. В основном исследования касаются совместной установки УУПК и УШР. Наличие же комплексного подхода с учетом автоматических регуляторов скорости (АРС), автоматических регуляторов возбуждения (АРВ), УУПК и УШР не наблюдается даже в простейшей системе.

В.3 Цель работы – 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.

#### В.4 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.

 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. В.5 Объект и предмет исследований. Объектом являются ЭЭС, содержащие ДЛЭП СВН с устройствами УУПК, УШР и АРВ и их устройства управления. Предметом исследования являются устойчивость ЭЭС с управляемой ЛЭП с УУПК, УШР и АРВ.

В.6 Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Соответствие диссертации формуле специальности: в соответствии с формулой специальности 05.14.02 в диссертационной работе объектом исследований является ЭЭС, содержащая ДЛЭП СВН с устройствами УУПК, УШР и АРВ и их устройства управления, предметом исследований – устойчивость систем с управляемыми ЛЭП 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.

В.7 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.

#### В.8 Научная новизна работы:

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 апериодической статической и динамической устойчивости с использованием УУПК, УШР и АРВ генераторов.

#### В.9 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.

#### В.10 Практическая значимость результатов работы:

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.

В.11 Достоверность и обоснованность 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 [10, 15, 28, 70], а также сравнением результатов с использованием моделей различной степени детализации.

#### В.12 Основные научные 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 апериодической 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.

**В.13** Диссертационные исследования и разработки выполнены при финансовой поддержке:

1. Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания «Электроэнергетическая система с управляемой продольной компенсацией», шифр проекта 13.7824.2017/8.9, 2017–2019 гг.

В.14 Внедрение результатов исследований. Научные и практические результаты работы используются в учебном процессе на кафедре «Электрические системы» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина.

В.15 Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, разработке и формировании математических моделей отдельных элементов управляемой ЭЭС и системы в целом 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.

В.16 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 г.), XIII международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2018» (Иваново, 2018 г.), VIII международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика молодежи - 2017» глазами (Самара, 2017 г.), XII международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017» (Иваново, 2017 г.), VII международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи - 2016» (Казань, 2016 г.), XI международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016» (Иваново, 2016 г.), Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать вторая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (Москва, 2016 г.), VI международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи - 2015» (Иваново, 2015 г.), Х международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015» (Иваново, 2015 г.), IX международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014» (Иваново, 2014 г.), VIII международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов И молодых ученых «Энергия-2013» (Иваново, 2013 г.).

В.17 Публикации. Результаты исследований опубликованы в 25 печатных работах [89-114]: в 1 монографии [89], 5 статьях – в изданиях по перечню ВАК [90-94], в том числе 1 работе – в журнале, переводная версия которого индексируется в международной базе SCOPUS [95], 3 статьях в прочих журналах [96-98], 14 тезисах и полных текстах докладов конференций [99-112], а также получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [113, 114].

В.18 Структура и объём диссертации. Работа, кроме введения, включает 4 главы, заключение, библиографический список, список сокращений и условных обозначений и приложения.

Библиографический список содержит 156 источников. Общий объем диссертации составляет 192 страниц, из них основной текст – 156 страниц, список литературы – 18 страниц, приложения – 18 страниц.

## ГЛАВА 1. ФОРМИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ЭЛЕМЕНТАМИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

#### 1.1. Исследуемая электроэнергетическая система

Исследования устойчивости и режимов электроэнергетических систем на математических моделях производятся для выяснения возможности практической реализации таких систем, а также для определения оптимальных значений настроечных параметров регулируемых элементов. В данной работе исследования производятся для изолированной двухмашинной системы со станциями идентичной мощности, представленной на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Исследуемая изолированная электроэнергетическая система

Рассматриваемая система содержит две генерирующие станции, номинальной мощностью 2400 МВт каждая, соединенные через управляемую ЛЭП, длиной 1000 км с нагрузкой. УПК устанавливается посередине линии, поскольку именно такое расположение при сосредоточенном исполнении УПК обеспечивает максимальный предел передаваемой мощности, т.к. ограничение будет накладываться исходя из наиболее «слабого» участка ЛЭП [15]. 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) [115]. На рис. 1.2 составлена схема замещения рассматриваемой электроэнергетической системы.



Рисунок 1.2 – Схема замещения исследуемой электроэнергетической системы

На основе схемы замещения системы составляется математическая модель. Генераторы представляются уравнениями Парка-Горева со своей системой координат, вращающимися с угловой частотой  $\omega_i$ , где *i* – номер генератора. Для корректного моделирования ЭЭС необходимо привести систему координат всех машин к опорной (или к синхронно вращающейся оси с угловой частотой  $\omega_0 = 2\pi f_0$ , где  $f_0$  – номинальная частота сети 50 Гц). Элементы сети представляются уравнениями с учетом электромагнитных переходных процессов в записи системы координат машины, принятой за опорную.

#### 1.2. Синхронные генераторы

#### 1.2.1. Статорные и роторные цепи

При описании процессов, происходящих в синхронном генераторе (СГ), принимаются следующие основные допущения:

 Предполагается синусоидальное распределение магнитного потока в воздушном зазоре что ведет к неучёту высших гармоник в магнитном потоке и токе статора. 2. Не учитывается изменение магнитной проводимости за счет влияния пазов и различной величины зазоров между статором и ротором.

3. Не учитывается насыщение магнитной системы машины.

4. Демпфирующее влияние ротора учитывается упрощенно одним эквивалентным демпферным контуром на роторе машины [116].

Принятые допущения позволяют представлять СГ как совокупность магнитно-связанных контуров статора и ротора, а также применять метод наложения для анализа процессов, происходящих в обмотках генератора.

Поскольку демпферная обмотка СГ имеет короткозамкнутый контур, то токи в ней могут наводиться только под воздействием сцепления магнитного поля с самой обмоткой. Исходное магнитное поле в зазоре, вращающееся относительно демпферной обмотки, по известным соотношениям можно заменить совокупностью двух пульсирующих полей. Данные поля целесообразно направить вдоль поперечной и продольной осей СГ, что позволит считать их неподвижными относительно короткозамкнутых контуров демпферной обмотки. Таким образом, демпферная обмотка распадается на две системы магнитно-несвязанных контуров: по продольной оси ротора d и вдоль поперечной оси q (здесь и далее традиционное представление демпферных обмоток индексами параметров «1d» и «1q» заменено на более удобное для математического описания «D» и «Q» соответственно) [117]. Обмотка возбуждения (индексы параметров «f») представлена только на продольной оси, поскольку обмотка возбуждения в СГ создает только продольный магнитный поток (рис. 1.6, а) [118]. Трехфазная обмотка статора представляется в виде отдельного контура (рис. 1.6, б), содержащего активное сопротивление якоря r<sub>a</sub>. Режимные параметры обмотки статора записываются через обобщенные вектора I<sub>6</sub>, U<sub>6</sub>,  $\psi_6$  в относительных единицах (здесь и в дальнейшем индексы относительных единиц опускаются, размерность единиц в [о.е.], если не указано иное).



Рисунок 1.3 – Представление синхронного генератора контурами на роторе (*a*) и статоре (б)

Переходные процессы в синхронной машине описываются уравнениями в относительных единицах по второму закону Кирхгофа для каждого рассмотренного контура:

$$0 = r_D i_D + p \psi_D, \qquad (1.1)$$

$$0 = r_{\mathcal{Q}} i_{\mathcal{Q}} + p \psi_{\mathcal{Q}}, \tag{1.2}$$

$$u_f = r_f i_f + p \psi_f, \qquad (1.3)$$

$$0 = U_{\mathfrak{g}} + r_{\mathfrak{g}}I_{\mathfrak{g}} + p\psi_{\mathfrak{g}}, \qquad (1.4)$$

где  $\psi_{1d}, \psi_{1q}, \psi_f$  – потокосцепления соответствующих контуров ротора;

$$p \equiv \frac{d}{dt} \tag{1.5}$$

– оператор дифференцирования.

В представленных уравнениях все параметры имеют размерность [o.e.], однако использование относительных единиц для размерности времени *t* неудобно, поэтому необходимо произвести переход к размерности в [c]:

$$\frac{d}{dt_{[o.e]}} = \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt_{[c]}} = \frac{1}{\omega_0} p .$$
(1.6)

Тогда уравнения (1.2)-(1.4) в более удобном для математического описания виде запишутся следующим образом:

$$p\psi_D = \omega_0 \left( -r_D i_D \right), \tag{1.7}$$

$$p\psi_{\varrho} = \omega_0 \left( -r_{\varrho} i_{\varrho} \right), \tag{1.8}$$

$$p\psi_f = \omega_0 \left( u_f - r_f i_f \right), \tag{1.9}$$

$$\frac{1}{\omega_0} p \psi_s = -U_s - r_a I_s. \tag{1.10}$$

Формулу для статорной цепи (1.10), записанную в обобщенных координатах, использовать для решения переходных процессов в СГ возможно, однако это сопряжено с рядом трудностей [116]. Гораздо удобнее перейти от обобщенных векторов к системе координат *d-q*. Для этого каждый обобщенный вектор  $\Pi_6$ , входящий в уравнение (1.4) необходимо спроецировать на продольную и поперечную оси ротора (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Проецирование вектора  $\Pi_{e}$  на оси d, q

Исходя из рис. 1.4 исходный вектор  $\Pi_{s}$  можно представить как векторную сумму:

$$\Pi_{e} = \overline{d} \cdot \Pi_{d} + \overline{q} \cdot \Pi_{q}, \qquad (1.11)$$

где  $\Pi_d$ ,  $\Pi_e$  – искомые значения, являющимися проекциями исходного обобщенного вектора  $\Pi_e$  на оси d и q;

$$\overline{d} = e^{j\delta} \tag{1.12}$$

– единичный вектор, направленный вдоль оси *d*;

$$\overline{q} = -j\overline{d} = -je^{j\delta} \tag{1.13}$$

– единичный вектор, направленный вдоль оси *q*.

При подстановке выражений (1.12) и (1.13) в (1.11) получается формула преобразования координат:

$$\Pi_{e} = e^{j\delta} \left( \Pi_{d} - j\Pi_{q} \right), \tag{1.14}$$

где  $\Pi = (I, U, \psi, E...).$ 

Переход в представлении статорной обмотки от обобщенных векторов к системе координат *d-q* приведет к появлению статорных обмоток на соответствующих осях и рис. 1.3 примет вид, указанный на рис. 1.5.



Рисунок 1.5 – Представление синхронного генератора в осях *d-q* 

При использовании данного преобразования уравнение для статорной цепи (1.10) запишется в следующем виде:

$$\frac{1}{\omega_0} p\left(e^{j\delta}\left(\psi_d - j\psi_q\right)\right) = -e^{j\delta}\left(u_d - ju_q\right) - r_a \cdot e^{j\delta}\left(i_d - ji_q\right).$$
(1.15)

При раскрытии производной произведения, учитывая, что  $pe^{j\delta} = j\omega e^{j\delta}$ , где  $\omega = p\delta$  – угловая скорость вращения ротора, уравнение (1.15) примет вид:

$$\frac{1}{\omega_0} \left( e^{j\delta} \left( p \psi_d - j p \psi_q \right) + j \omega e^{j\delta} \left( \psi_d - j \psi_q \right) \right) = -e^{j\delta} \left( u_d - j u_q \right) - r_a \cdot e^{j\delta} \left( i_d - j i_q \right). (1.16)$$

В данном выражении  $e^{j\delta}$  можно сократить. Уравнение обмотки статора по продольной оси генератора получится выделением действительной части данного выражения:

$$\frac{1}{\omega_0} \left( p \psi_d + \omega \psi_q \right) = -u_d - r_a i_d.$$
(1.17)

При группировке оставшейся части уравнения при –*j* (с последующим его удалением) получится уравнение обмотки статора по поперечной оси:

$$\frac{1}{\omega_0} \left( p \psi_q - \omega \psi_d \right) = -u_q - r_a i_q.$$
(1.18)

И в более удобном для математического описания виде:

$$p\psi_d = \omega_0 \left( -u_d - r_a i_d \right) - \omega \psi_q, \qquad (1.19)$$

$$p\psi_q = \omega_0 \left( -u_q - r_a i_q \right) + \omega \psi_d \,. \tag{1.20}$$

Однако решить полученную систему уравнений не представляется возможным, поскольку количество переменных превышает число уравнений. Поэтому необходимо записать уравнения потокосцеплений каждой обмотки машины. Исходя из того, что реальная обмотка статора теперь также представлена двумя составляющими в координатах d-q, то она заменяется системой из двух контуров, расположенных по продольной d и поперечной qосям (рис. 1.6) [116].



Рисунок 1.6 – Представление магнитно-связанных статорных и роторных обмоток СГ в осях d-q

Магнитная связь между контурами машины имеется только между обмотками, находящимися на одной оси. Поэтому выражения для потокосцеплений всех контуров будут иметь вид:

$$\psi_d = L_d i_d + M_{aD} i_D + M_{ad} i_f, \qquad (1.21)$$

$$\psi_q = L_q i_q + M_{aQ} i_Q, \qquad (1.22)$$

$$\psi_D = L_D i_D + L_{aD} i_d + L_{1f} i_f, \qquad (1.23)$$

$$\psi_{Q} = L_{Q}i_{Q} + M_{aQ}i_{q}, \qquad (1.24)$$

$$\psi_f = L_f i_f + M_{ad} i_d + M_{1f} i_D, \qquad (1.25)$$

где  $L_i$  – собственная индуктивность контура i;

 $M_{ij}$  – взаимная индуктивность контуров i и j.

Данные выражения имеют неудобный вид, поскольку в них фигурируют индуктивности, когда в паспортных данных машин присутствуют только реактивные сопротивления. Воспользовавшись соотношениями  $x_L = \omega_{0*}L$  и  $x_M = \omega_{0*}M$ , а также учитывая, что в [o.e.]  $\omega_{0*} = 1$  зависимости запишутся следующим образом:

$$\psi_d = x_d i_d + x_{aD} i_D + x_{ad} i_f, \qquad (1.26)$$

$$\psi_q = x_q i_q + x_{aQ} i_Q, \qquad (1.27)$$

$$\psi_D = x_D i_D + x_{aD} i_d + x_{1f} i_f, \qquad (1.28)$$

$$\psi_Q = x_Q i_Q + x_{aQ} i_q, \qquad (1.29)$$

$$\psi_f = x_f i_f + x_{ad} i_d + x_{1f} i_D.$$
(1.30)

#### 1.2.2. Уравнение движения ротора

Движение ротора описывается исходя из второго закона Ньютона выражениями в именованных единицах [119]:

$$J_0 \alpha = \Delta M \,, \tag{1.31}$$

$$\Delta M = M_T - M_c - M_{\rm SM}, \qquad (1.32)$$

где  $J_0$  и  $\alpha$  – момент инерции и угловое ускорение вращающейся части энергоагрегата (ротора турбины, вала и ротора генератора), [кг·м<sup>2</sup>] и [рад/c<sup>2</sup>] соответственно;

 $\Delta M$  – небаланс моментов, действующих на вал, [H·м];

*М*<sub>*T*</sub> – вращающий момент, создаваемый турбиной, [Н·м];

 $M_c$  – момент сопротивления, обусловленный трением в подшипниках и сопротивлением охлаждающей среды (данным моментом часто пренебрегают из-за его незначительной величины, нелинейности и малого влияния на переходные процессы при сохранении устойчивости мощных агрегатов), [H·м];  $M_{_{3M}}$  – электромагнитный момент, обусловленный электрической нагрузкой генератора и отражающий взаимодействие между электромагнитными системами статора и ротора, [H·м]. С учётом того что  $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$ , где  $\omega$  – угловая скорость, уравнение дви-

жения ротора запишется как:

$$J_0 \frac{d\omega}{dt} = \Delta M \,. \tag{1.33}$$

Для записи уравнения в относительных единицах необходимо разделить обе части уравнения на базисный момент, который определяется по следующей формуле:

$$M_{\delta} = \frac{P_{\delta}}{\omega_{\delta}} = \frac{S_{_{HOM}}}{\omega_{0}}, \qquad (1.34)$$

где  $\omega_0$  – синхронная частота.

Уравнение движения ротора в относительных единицах примет вид:

$$\frac{J_0\omega_0}{S_{_{HOM}}}\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta M}{M_{_{\tilde{o}}}} = \Delta M_*, \qquad (1.35)$$

или

$$\frac{T_j}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_{_{\mathcal{M}}}, \qquad (1.36)$$

где  $T_j = \frac{J_0 \omega_0^2}{S_{_{HOM}}}$  – постоянная инерции ротора, имеющая размерность времени и

численно равная промежутку времени, в течение которого ротор разгоняется из состояния покоя до номинальной скорости вращения под действием номинального вращающего момента, [c].

Таким образом, в последнем уравнении постоянная времени  $T_j$  и время *t* имеют размерность [c], а моменты представлены в [o.e.]. Запись того же уравнения в более удобном для математического описания виде:

$$p\omega = \frac{\omega_0}{T_j} \left( M_T - M_{\scriptscriptstyle \mathcal{M}} \right), \tag{1.37}$$

Электромагнитный момент, создаваемый генератором на валу выражается исходя из потокосцеплений и токов статорных обмоток [120]:

$$M_{_{\mathcal{M}}} = \psi_d i_q - \psi_q i_d \,. \tag{1.38}$$

#### 1.3. Уравнения преобразования координат

Поскольку в расчетной схеме присутствует два обобщенных генератора, которые имеют свою систему координат d-q, жестко связанную с положением ротора конкретной машины, они могут вращаться несинхронно, т.е. с разной угловой частотой. Для корректного представления ЭЭС в математической модели необходимо выбрать опорную машину и привести вектора режимных параметров остальных машин к опорной. Выбор опорной машины может быть произведен произвольно, поскольку результат протекания переходных процессов и вывод об устойчивости инвариантен выбору опорной машины [121].

На рис. 1.7 показан принцип преобразования координат в случае наличия в ЭЭС двух генераторов «*i*» и «*j*» и выбора в качестве опорной машины СГ «*i*».



Рисунок 1.7 – Преобразование координат СГ «*j*» к опорной машине – СГ «*i*» Запись вектора X в координатах *d<sub>j</sub>*-*q<sub>j</sub>* выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} X_{dj} = X \cdot \cos \alpha \\ X_{qj} = X \cdot \sin \alpha \end{cases}$$
(1.39)

При записи вектора *X* в координатах опорного генератора *d<sub>i</sub>-q<sub>i</sub>* уравнения принимают вид:

$$\begin{cases} X_{di} = X \cdot \cos\left(\alpha + \delta_{ij}\right) \\ X_{qi} = X \cdot \sin\left(\alpha + \delta_{ij}\right) \end{cases}$$
(1.40)

Используя тригонометрические преобразования, систему уравнений можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} X_{di} = X \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta_{ij} - X \cdot \sin \alpha \cdot \sin \delta_{ij} = X_{dj} \cdot \cos \delta_{ij} - X_{qj} \cdot \sin \delta_{ij} \\ X_{qi} = X \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta_{ij} + X \cdot \sin \alpha \cdot \cos \delta_{ij} = X_{qj} \cdot \cos \delta_{ij} + X_{dj} \cdot \sin \delta_{ij} \end{cases}.$$
(1.41)

В математической модели элементы сети (трансформаторы, линии, реакторы, УПК и нагрузки) записываются в системе координат опорной машины и не требуют преобразования координат.

#### 1.4. Взаимные и собственные углы СГ

Следующее выражение описывает собственный угол СГ по отношению к синхронно вращающейся оси:

$$p\delta_i = \omega_i - \omega_0, \qquad (1.42)$$

где  $\delta_i$  – собственный угол СГ,  $\omega_i$  – собственная угловая частота вращения ротора СГ.

Далее представлено выражение для взаимного угла СГ по отношению к системе координат опорного генератора:

$$p\delta_{ij} = \omega_i - \omega_j, \qquad (1.43)$$

где  $\delta_{ij}$  – взаимный угол между интересующим СГ и опорным,  $\omega_i$  – собственная угловая частота вращения ротора интересующего СГ,  $\omega_j$  – собственная угловая частота вращения ротора опорного СГ.

#### 1.5. Трансформаторы

В математической модели трансформаторы представлены только сквозным сопротивлением без учета поперечных ветвей (потерь холостого

хода) в связи с их слабым влиянием на рабочие режимы системы и для упрощения модели ЭЭС (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Схема замещения трансформатора в обобщенных векторах

Уравнение по второму закону Кирхгофа с использованием обобщенных векторов записывается следующим образом:

$$U_{i} - U_{j} = I_{ij}r_{m} + L_{m}\frac{di_{ij}}{t}.$$
 (1.44)

Дальнейшие преобразования производятся аналогично приведенным для СГ и не поясняются:

$$u_{di} - ju_{qi} - u_{dj} + ju_{qj} = r_m (i_{dij} - ji_{qij}) + L_m ((pi_{dij} - jpi_{qij}) + j\omega (i_{dij} - ji_{qji})), (1.45)$$

$$u_{di} - u_{dj} = r_m i_{dij} + L_m p i_{dij} + L_m \omega i_{qij}, \qquad (1.46)$$

$$u_{qi} - u_{qj} = r_m i_{qij} + L_m p i_{qij} - L_m \omega i_{dij}, \qquad (1.47)$$

где *ω* – угловая частота вращения опорной машины.

Конечная форма записи уравнений трансформаторов в осях *d-q* опорной машины выглядит следующим образом:

$$pi_{dij} = \omega_0 \left( \frac{u_{di} - u_{dj}}{x_m} - \frac{r_m}{x_m} i_{dij} \right) - \omega i_{qij}, \qquad (1.48)$$

$$pi_{qij} = \omega_0 \left( \frac{u_{qi} - u_{qj}}{x_m} - \frac{r_m}{x_m} i_{qij} \right) + \omega \, i_{dij} \,. \tag{1.49}$$

#### 1.6. Линии электропередачи

В математической модели линии электропередачи представлены П-образной схемой замещения с учетом зарядной мощности и потерь на корону, а также распределённости параметров для линий длиной более 300 км (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Схема замещения линии электропередачи в обобщенных векторах

Продольная ветвь ЛЭП записывается аналогично выражению для трансформатора:

$$pi_{dij} = \omega_0 \left( \frac{u_{di} - u_{dj}}{x_{\pi}} - \frac{r_{\pi}}{x_{\pi}} i_{dij} \right) - \omega \, i_{qij}, \qquad (1.50)$$

$$pi_{qij} = \omega_0 \left( \frac{u_{qi} - u_{qj}}{x_{_{_{\mathcal{I}}}}} - \frac{r_{_{_{\mathcal{I}}}}}{x_{_{_{\mathcal{I}}}}} i_{qij} \right) + \omega \, i_{dij} \,.$$
(1.51)

Для записи уравнений с использованием обобщенных векторов для поперечных ветвей по второму закону Кирхгофа необходимо произвести преобразования исходной схемы. Для рассмотрения выбрана поперечная ветвь, подключенная к узлу с напряжением  $U_i$ , для узла с напряжением  $U_j$  преобразования производятся аналогично.



Рисунок 1.10 – Схема замещения поперечного участка линии электропередачи в обобщенных векторах

Значение обобщенного вектора *I<sub>i</sub>*, исходя из законов коммутации, запишется следующим образом:

$$I_{i} = I_{iR} + I_{iC} = \frac{U_{i}}{r_{g}} + c_{b} \frac{dU_{i}}{dt} = \frac{U_{i}}{r_{g}} + c_{b} p U_{i}.$$
 (1.52)

Дальнейшие преобразования производятся аналогично приведенным для СГ и не поясняются:

$$i_{di} - ji_{qi} = \frac{u_{di} - ju_{qi}}{r_g} + c_b \left( \left( pu_{di} - jpu_{qi} \right) + j\omega \left( u_{di} - ju_{qi} \right) \right), \quad (1.53)$$

$$i_{di} = \frac{u_{di}}{r_g} + c_b \left( p u_{di} + \omega \, u_{qi} \right), \tag{1.54}$$

$$i_{qi} = \frac{u_{qi}}{r_g} + c_b \left( p u_{di} - \omega \, u_{qi} \right), \tag{1.55}$$

$$pu_{di} = \frac{i_{di} - \frac{u_{di}}{r_g} - c_b \omega u_{qi}}{c_b} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0}, \qquad (1.56)$$

$$pu_{qi} = \frac{i_{qi} - \frac{u_{qi}}{r_g} + c_b \omega \, u_{di}}{c_b} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0}.$$
(1.57)

Конечная форма записи уравнений поперечных ветвей ЛЭП в осях *d-q* опорной машины выглядит следующим образом:

$$pu_{di} = \omega_0 \left( x_b i_{di} - \frac{x_b}{r_g} u_{di} \right) - \omega u_{qi}, \qquad (1.58)$$

$$pu_{qi} = \omega_0 \left( x_b i_{qi} - \frac{x_b}{r_g} u_{qi} \right) + \omega u_{di}, \qquad (1.59)$$

$$pu_{dj} = \omega_0 \left( x_b i_{dj} - \frac{x_b}{r_g} u_{dj} \right) - \omega u_{qj}, \qquad (1.60)$$

$$pu_{qj} = \omega_0 \left( x_b i_{qj} - \frac{x_b}{r_g} u_{qj} \right) + \omega u_{dj}.$$
(1.61)

#### 1.7. Шунтирующие реакторы

В математической модели ШР представлены схемой замещения в виде поперечной ветви, находящейся в точке подключения ШР (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Схема замещения ШР в обобщенных векторах

Значение обобщенного вектора  $U_i$ , исходя из законов коммутации, запишется следующим образом:

$$U_{i} = r_{p}I_{i} + L\frac{di_{i}}{dt} = r_{p}I_{i} + Lpi_{i}.$$
 (1.62)

Дальнейшие преобразования производятся аналогично приведенным для СГ и не поясняются:

$$u_{di} - ju_{qi} = r_p \left( i_{di} - ji_{qi} \right) + L \left( j\omega \left( i_{di} - ji_{qi} \right) + p \left( i_{di} - ji_{qi} \right) \right),$$
(1.63)

$$u_{di} = \left(r_p i_{di} + L\omega \ i_{qi} + Lp i_{di}\right) \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0},\tag{1.64}$$

$$u_{qi} = \left(r_p i_{qi} - L\omega \ i_{di} + Lp i_{qi}\right) \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0},\tag{1.65}$$

$$\omega_0 u_{di} = \omega_0 r_p i_{di} + x_p \omega i_{qi} + x_p p i_{di}, \qquad (1.66)$$

$$\omega_0 u_{qi} = \omega_0 r_p i_{qi} - x_p \omega \, i_{di} + x_p p i_{qi} \,. \tag{1.67}$$

Конечная форма записи уравнений ШР в осях *d-q* опорной машины выглядит следующим образом:

$$pi_{di} = \omega_0 \left( \frac{u_{di}}{x_p} - \frac{r_p}{x_p} i_{di} \right) - \omega i_{qi}, \qquad (1.68)$$

$$pi_{qi} = \omega_0 \left( \frac{u_{qi}}{x_p} - \frac{r_p}{x_p} i_{qi} \right) + \omega i_{di}.$$

$$(1.69)$$

Также данные уравнения можно получить подстановкой  $U_j = u_{dj} = 0$  в уравнения (1.44-1.49) для трансформатора.

#### 1.8. Нагрузка

Нагрузку можно представлять как совокупность синхронных и асинхронных двигателей, а также статических элементов [122]. В математической модели рассматриваемой системы нагрузка представлена простейшим вариантом – в виде постоянного сопротивления  $\underline{Z}_n = r_n + jx_n$ . Использование более сложных математических выражений усложняет расчетную модель, но не изменяет принципа построения модели [123].



Рисунок 1.12 – Схема замещения нагрузки в обобщенных векторах

Поскольку схема замещения для нагрузки отличается от схемы замещения для ШР только значениями сопротивлений, то уравнения для нагрузки будут аналогичны уравнениям (1.68-1.69), полученным для ШР:

$$pi_{di} = \omega_0 \left( \frac{u_{di}}{x_{_{_H}}} - \frac{r_{_{_H}}}{x_{_{_H}}} i_{di} \right) - \omega \, i_{qi}, \qquad (1.70)$$

$$pi_{qi} = \omega_0 \left( \frac{u_{qi}}{x_{_H}} - \frac{r_{_H}}{x_{_H}} i_{qi} \right) + \omega \, i_{di}.$$
(1.71)
## 1.9. УПК

УПК в математической модели представляется чисто емкостным сопротивлением и имеет схему замещения, указанную на рис. 1.13



Рисунок 1.13 – Схема замещения УПК

Значение обобщенного вектора  $I_{ij}$ , исходя из законов коммутации, запишется следующим образом:

$$I_{ij} = c_{y\Pi K} \frac{d\Delta U_{ij}}{dt} = c_{y\Pi K} \frac{d\left(U_i - U_j\right)}{dt} = c_{y\Pi K} \cdot p\left(U_i - U_j\right).$$
(1.72)

Дальнейшие преобразования производятся аналогично приведенным для СГ и не поясняются:

$$i_{dij} - ji_{qij} = c_{yIIK} \cdot \left( p \left( u_{di} - u_{dj} \right) - j \ p \left( u_{qi} - u_{qj} \right) + j \omega \left( \left( u_{di} - u_{dj} \right) - j \left( u_{qi} - u_{qj} \right) \right) \right), \ (1.73)$$

$$i_{dij} = c_{_{YIIK}} \cdot \left( p \left( u_{di} - u_{dj} \right) + \omega \left( u_{qi} - u_{qj} \right) \right) \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0}, \qquad (1.74)$$

$$i_{qij} = c_{_{YIIK}} \cdot \left( p \left( u_{_{qi}} - u_{_{qj}} \right) - \omega \left( u_{_{di}} - u_{_{dj}} \right) \right) \cdot \frac{\omega_{_0}}{\omega_{_0}}, \qquad (1.75)$$

$$\omega_0 x_{VIIK} i_{dij} = p \left( u_{di} - u_{dj} \right) + \omega \left( u_{qi} - u_{qj} \right), \qquad (1.76)$$

$$\omega_0 x_{\text{VITK}} i_{qij} = p \left( u_{qi} - u_{qj} \right) - \omega \left( u_{di} - u_{dj} \right). \tag{1.77}$$

Конечная форма записи уравнений УПК в осях *d-q* опорной машины выглядит следующим образом:

$$p\left(u_{di}-u_{dj}\right)=\omega_{0}x_{VIIK}i_{dij}-\omega\left(u_{qi}-u_{qj}\right), \qquad (1.78)$$

$$p\left(u_{qi}-u_{qj}\right)=\omega_{0}x_{VIIK}i_{qij}+\omega\left(u_{di}-u_{dj}\right).$$
(1.79)

#### 1.10. Управляемые элементы

#### 1.10.1. АРВ сильного действия

АРВ генераторов служит для поддержания напряжения на выводах генераторов, а также положительно сказывается на показателях устойчивости и режимах ЭЭС. АРВ сильного действия (АРВ-СД) в отличие от АРВ пропорционального действия (АРВ-ПД) реагирует не только на отклонение режимного параметра генератора (напряжения на его выводах и/или его частоты), но также имеет каналы регулирования по производным режимных параметров. Такое устройство позволяет данному виду АРВ «предсказывать» поведение системы в следующий момент времени и при правильной настройке увеличивать предел колебательной устойчивости, демпфируя возрастающие во времени колебания режимных параметров [124].

В рассматриваемой системе моделируется наличие АРВ-СД на генераторах со структурой, представленной на рис. 1.14.



Рисунок 1.14 – Структурная схема АРВ-СД: ОВ – обмотка возбуждения; ТН – трансформатор напряжения; ДПР – датчик положения ротора генератора; В – возбудитель;  $E_{qe}$  – принужденная ЭДС генератора, прикладываемая к ОВ, пропорциональная напряжению  $U_f$ ;  $E_{qe0}$  – начальное значение ЭДС возбуждения;  $\Delta E_{qeAPB}$  – изменяющееся значение добавочного ЭДС возбуждения;  $k_1$ ,  $k_2$  – коэффициенты регулирования АРВ-СД по первой и второй производным угла положения ротора генератора соответственно;  $K_{oU}$  – коэффициент регулирования по отклонению напряжения генератора;  $U_{\Gamma^*}$  – приведенное напряжение на выводах генератора;  $U_0$  – уставка АРВ-СД генератора по напряжению. Наличие АРВ-СД на генераторах будет оказывать влияние на изменение тока возбуждения данных машин. Для корректного учета работы АРВ необходимо исходное уравнение (1.9) для обмотки возбуждения генератора переписать с учетом влияния АРВ и приведением статорных обмоток к роторным:

$$p\psi_{f} = u_{f} + \Delta E_{qeAPB} \frac{r_{f}}{x_{ad}} - r_{f}i_{f} = u_{f} + \Delta u_{f} - r_{f}i_{f}.$$
(1.80)

где  $\Delta u_f$  – значение добавочного напряжения обмотки возбуждения под воздействием APB.

Значение добавочного напряжения, исходя из структурной схемы (рис. 1.14), вычисляется следующим образом:

$$\Delta u_{f} = \left(K_{oU}\left(U_{0} - U_{\Gamma}\right) + k_{1}p\delta_{i} + k_{2}p^{2}\delta_{i}\right) \cdot \frac{r_{f}}{x_{ad}}.$$
 (1.81)

Исходя из того, что  $p\delta_i = \omega_i - \omega_0$  и  $p^2\delta_i = p\omega_i$ , а также используя уравнения движения ротора (1.37) данное выражение можно записать в следующем виде:

$$\Delta u_f = \left( K_{oU} \left( U_0 - U_{\Gamma} \right) + k_1 \left( \omega_i - \omega_0 \right) + k_2 \frac{\omega_0}{T_j} \left( M_T - M_{\mathcal{M}} \right) \right) \cdot \frac{r_f}{x_{ad}}.$$
(1.82)

Для корректной работы APB необходимо определить значение  $U_{\Gamma}$  через *d-q* составляющие:

$$U_{\Gamma} = \sqrt{\left(u_{\Gamma d}^{2} + u_{\Gamma q}^{2}\right)}.$$
 (1.83)

Случай  $k_1 = k_2 = 0$  соответствует учету только АРВ-ПД в рассматриваемой системе. Случай  $K_{oU} = k_1 = k_2 = 0$  соответствует неучету АРВ на генераторах.

### 1.10.2. APC

АРС служит первичным органом регулирования частоты в системе посредством изменения скорости вращения ротора генератора. Системы АРС могут иметь различное исполнение. В простейшем виде структура системы APC может быть представлена как на рис. 1.15 [125].



Рисунок 1.15 – Структурная схема АРС: ДУС – датчик угловой скорости генератора; *М*<sub>70</sub> – момент турбины в исходном УР; *К*<sub>*M*</sub> – коэффициент регулирования турбины.

Момент турбины с учетом АРС запишется в следующем виде:

$$M_T = M_{T0} \left( 1 - K_M \left( \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right) \right).$$
(1.84)

Случай  $K_{M} = 0$  соответствует неучету регулятора скорости.

#### 1.10.3. УУПК

УУПК позволяет изменять степень компенсации реактивного сопротивления ЛЭП, тем самым влиять на режимы и устойчивость ЭЭС в целом. УУПК построено на основе изменения ёмкостного сопротивления  $x_{УПК}$ . В данной диссертационной работе рассматривается закон управления сопротивления, предложенный в [126] и позволяющий увеличивать степень компенсации индуктивного сопротивления линии в зависимости от тока, протекающего по ЛЭП:

$$x_{y_{\Pi K}}(I_{y_{\Pi K}}) = \frac{10^{6}}{\omega_{0}(K_{1y_{\Pi K}} - K_{2y_{\Pi K}}I_{y_{\Pi K}})},$$
(1.85)

где  $I_{Y\Pi K}$  – ток в УУПК, [кА];  $x_{Y\Pi K}(I_{Y\Pi K})$  – сопротивление УУПК, [Ом],  $K_{1Y\Pi K}, K_{2Y\Pi K}$  – коэффициенты регулирования УУПК, [мкФ] и [мкФ/А] соответственно.

Такой закон управления может быть воспроизведен на практике с помощью технологий TCSC/GCSC изменением угла открытия (зажигания) управляющих тиристоров [127-129] или на основе конденсаторов с аномальной ёмкостью [130]. Характер зависимости ёмкостного сопротивления УПК при различных значениях коэффициентов регулирования показан на рис.1.16.



Рисунок 1.16 – Зависимость ёмкостного сопротивления УУПК от тока: 1 –  $K_{2УЛК} = 0$ ; 2 –  $K_{2УЛK} = 2$ ; 3 –  $K_{2УЛK} = 4$ ; 4 –  $K_{2УЛK} = 6$ ; 5 –  $K_{2УЛK} = 8$ ; 6 – при ограничении значения  $x_{УЛК}(I)$ .

Увеличение коэффициента регулирования  $K_{2V\Pi K}$  приводит к нарастанию крутизны характеристики  $x_{V\Pi K}(I_{V\Pi K})$ , а значит и скорости нарастания степени компенсации при увеличении тока через УУПК. Случай  $K_{2V\Pi K} = 0$  соответствует наличию нерегулируемого УПК в ЭЭС. Коэффициент регулирования  $K_{1V\Pi K}$  определяет значение сопротивления в исходном установившемся режиме (положение точки *a* на рис. 1.16).

Поскольку все расчеты ведутся в системе относительных единиц необходимо исходную зависимость (1.85), записанную в именованных единицах, привести к базисным условиям:

$$x_{y_{\Pi K}}(I_{y_{\Pi K}}) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_{1y_{\Pi K}} - K_{2y_{\Pi K}} I_{y_{\Pi K}} I_{\delta}) \cdot Z_{\delta}}, \qquad (1.86)$$

где  $I_{Y\Pi K}$  – ток в УУПК, [o.e.];  $x_{Y\Pi K}(I_{Y\Pi K})$  – сопротивление УУПК, [o.e.];  $K_{1Y\Pi K}$  и  $K_{2Y\Pi K}$  – коэффициенты регулирования УУПК, [o.e.];  $I_{\delta}$  – базисное значение тока, [кА];  $Z_{\delta}$  – базисное значение сопротивления, [Ом].

Для корректной работы закона регулирования УУПК необходимо определить значение *I*<sub>УПК</sub> через *d-q* составляющие:

$$I_{Y\Pi K} = \sqrt{\left(i_{Y\Pi K d}^{2} + i_{Y\Pi K q}^{2}\right)}.$$
 (1.87)

## 1.10.4. УШР

УШР позволяют регулировать напряжение в точке их подключения посредством смещения баланса реактивной мощности в данной точке в сторону потребления. Изменение потребляемой реактором мощности производится посредством изменения проводимости реактора, связывающего точку его подключения с «землёй».

Для корректного учета работы УШР необходимо исходные уравнения (1.68-1.69) для ШР переписать с учетом изменения сопротивления реакторов.

$$pi_{di} = \omega_0 \left( \frac{u_{di}}{x_p + \Delta x_{yIIIP}} - \frac{r_p}{x_p + \Delta x_{yIIIP}} i_{di} \right) - \omega i_{qi}, \qquad (1.88)$$

$$pi_{qi} = \omega_0 \left( \frac{u_{qi}}{x_p + \Delta x_{yIIIP}} - \frac{r_p}{x_p + \Delta x_{yIIIP}} i_{qi} \right) + \omega i_{di}, \qquad (1.89)$$

где  $\Delta x_{YIIIP}(U_{YIIIP})$  – изменение сопротивления УШР,  $U_{YIIIP}$  – напряжение в точке подключения УШР.

В литературе представлено большое количество законов управления [60, 72, 78, 80], поскольку имеются различия в технической реализации УШР. Наиболее простым законом управления является следующий,

корректирующий индуктивное сопротивление реактора обратно пропорционально изменению напряжения в точке его подключения:

$$\Delta x_{y_{IIIP}}(U_{y_{IIIP}}) = -K_{y_{IIIP}} \cdot (U_{y_{IIIP}} - U_{y_{IIIP0}}), \qquad (1.90)$$

где *U*<sub>*УШР*0</sub> – уставка по напряжению УШР, *К*<sub>*УШР*</sub> – коэффициент регулирования УШР по отклонению напряжения.

Поскольку реактор может только потреблять реактивную мощность, то регулирующий эффект будет наблюдаться только в том случае, если напряжение больше уставки, т.е.  $\Delta x_{yUUP} (U_{yUUP}) < 0$ . В случае, если  $U_{yUUP} < U_{yUUP0}$ , то реактор принимает свое максимальное значение сопротивления и становится неуправляемым, т.е.  $\Delta x_{yUUP} (U_{yUUP}) = 0$ .

Для корректной работы УШР необходимо определить значение  $U_{YШP}$  через *d-q* составляющие:

$$U_{YIIIP} = \sqrt{\left(u_{YIIIPd}^{2} + u_{YIIIPq}^{2}\right)}.$$
 (1.91)

Случай  $K_{yIIIP} = 0$  соответствует отключению управляемой части УШР и переводит его в режим работы с постоянным значением сопротивления.

#### 1.11. Уравнения баланса токов в сети

Уравнения баланса токов записываются по первому закону Кирхгофа исходя из схемы замещения.



Рисунок 1.17 – Часть схемы замещения для определения баланса токов

На рис. 1.17 рассмотрена часть схемы замещения для записи уравнений баланса токов в узле 6. Уравнения по каждой из осей запишутся следующим образом:

$$i_{d10} + i_{d2} = i_{d11} + i_{d12}, \qquad (1.92)$$

$$i_{q10} + i_{q2} = i_{q11} + i_{q12}. (1.93)$$

## 1.12. Представление модели ЭЭС в компактной форме

Исходная модель достаточно громоздка для её наглядного представления. Данную систему уравнений можно упростить с использованием матричной формы записи уравнений. Количество блоков таких уравнений зависит от количества соответствующих элементов.

#### 1.12.1. Матричная форма записи уравнений СГ

$$p\left[\psi_{pom}\right] = \omega_0\left(\left[u_{pom}\right] - \left[r_{pom}\right]\left[i_{pom}\right]\right),\tag{1.94}$$

где 
$$\begin{bmatrix} \psi_{pom} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{D} \\ \psi_{Q} \\ \psi_{f} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} u_{pom} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_{f} + \Delta u_{f} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} r_{pom} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{D} & 0 & 0 \\ 0 & r_{Q} & 0 \\ 0 & 0 & r_{f} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{pom} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{D} \\ i_{Q} \\ i_{f} \end{bmatrix}.$$
  
 $p[\psi_{cm}] = \omega_{0} \left( -[u_{cm}] - r_{a}[i_{cm}] - \frac{\omega}{\omega_{0}}[\gamma][\psi_{cm}] \right), \qquad (1.95)$   
где  $[\psi_{cm}] = \begin{bmatrix} \psi_{d} \\ \psi_{q} \end{bmatrix}, [u_{cm}] = \begin{bmatrix} u_{d} \\ u_{q} \end{bmatrix}, [i_{cm}] = \begin{bmatrix} i_{d} \\ i_{q} \end{bmatrix}, [\gamma] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}.$ 

$$\omega_{0*}[\psi] = [x][i], \qquad (1.96)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_d \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} x_d & 0 & x_{ab} & 0 & x_{ad} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} i_d \end{bmatrix}$$

где 
$$\begin{bmatrix} \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_D \\ \psi_Q \\ \psi_f \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d & c & x_{aD} & c & x_{ad} \\ 0 & x_q & 0 & x_{aQ} & 0 \\ x_{aD} & 0 & x_D & 0 & x_{1f} \\ 0 & x_{aQ} & 0 & x_Q & 0 \\ x_{ad} & 0 & x_{1f} & 0 & x_f \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_D \\ i_Q \\ i_f \end{bmatrix}.$$
  

$$p\omega = \frac{\omega_0}{T_j} \Big( M_T - \psi_d i_q - \psi_q i_d \Big).$$
(1.97)

#### 1.12.2. Матричная форма записи уравнений элементов сети

$$p\left[i_{ij}\right] = \omega_0 \left(\frac{\left[u_i\right] - \left[u_j\right]}{x_{ij}} - \frac{r_{ij}}{x_{ij}}\left[i_{ij}\right]\right) - \omega\left[\gamma\right]\left[i_{ij}\right], \qquad (1.98)$$

$$p[u_i] = \omega_0 \left( x_i[i_i] - \frac{x_i}{r_i}[u_i] \right) - \omega[\gamma][u_i], \qquad (1.99)$$

$$p([u_i] - [u_j]) = \omega_0 x_{y_{\Pi K}} [i_{ij}] - \omega[\gamma]([u_i] - [u_j]), \qquad (1.100)$$

где 
$$\begin{bmatrix} i_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dij} \\ i_{qij} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} u_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{di} \\ u_{qi} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} u_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{dj} \\ u_{qj} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{di} \\ i_{qi} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Уравнение (1.98) описывает процессы, происходящие в элементах, содержащих ветви с активно-индуктивным сопротивлением (трансформаторы, линии, ШР и нагрузки). Для поперечных активно-ёмкостных ветвей ЛЭП, компактная запись уравнений принимает вид, указанный в (1.99). Процессы, происходящие в УПК, описываются в компактной форме как указано в (1.100).

### 1.12.3. Матричная форма записи уравнений баланса токов

Баланс токов в сети описывается алгебраическими выражениями и в матричной форме может быть представлен как:

$$[M][I] = 0, (1.101)$$

где  $[M] = \begin{bmatrix} M_{11} & \dots & M_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{m1} & \dots & M_{mn} \end{bmatrix}$  – матрица соединений (узловая матрица) сети;

 $\begin{bmatrix} I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [i_1] \\ \vdots \\ [i_n] \end{bmatrix}, [i_i] = \begin{bmatrix} i_{di} \\ i_{qi} \end{bmatrix}, m$  – число узлов, без учета узла «земли», n – число вет-

вей в ЭЭС.

1.12.4. Матричная форма записи уравнений преобразования координат

$$\begin{bmatrix} V_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_j \end{bmatrix},$$
(1.102)  
rge  $\begin{bmatrix} V_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{di} & u_{di} \\ i_{qi} & u_{qi} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_{ij} & -\sin \delta_{ij} \\ \sin \delta_{ij} & \cos \delta_{ij} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} V_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dj} & u_{dj} \\ i_{qj} & u_{qj} \end{bmatrix}.$ 

1.12.5. Матричная форма записи уравнений для собственных и взаимных углов

$$p[\delta] = [\omega] - \omega_0, \qquad (1.103)$$

$$p\delta_{ij} = \omega_i - \omega_j, \qquad (1.104)$$

где  $\begin{bmatrix} \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_i \\ \omega_j \end{bmatrix}.$ 

#### 1.12.6. Уравнения управляемых элементов в компактной записи

Для управляемых элементов уравнения не требуют упрощения и могут быть записаны так, как они представлены выше.

# 1.13. Алгоритм расчета переходных и установившихся режимов в исследуемой ЭЭС

Записанную систему уравнений можно представить как совокупность нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений. В упрощенном виде она выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = F(X, Y, t) \\ \varphi(X, Y, t) = 0 \end{cases},$$
(1.105)

где X – вектор переменных, входящих под знак производной, Y – вектор переменных, не входящих под знак производной, F – вектор-функция правых частей дифференциальных уравнений,  $\varphi$  – вектор-функция правых частей алгебраических уравнений. Данная система уравнений обладает следующими основными свойствами:

- вектор-функции *F* и *φ* правых частей уравнений нелинейны;

- система дифференциальных уравнений имеет высокий порядок, поскольку произведено подробное математическое описание, как элементов сети, так и управляемых устройств.

Поскольку рассматриваемая система дифференциальных уравнений нелинейна, то её решение возможно только с использованием численных методов [131]. Система уравнений является жесткой, что приводит к необходимости использования малого шага интегрирования для минимизации погрешности вычислений. Кроме того, система содержит еще и алгебраические уравнения, которые накладывают ограничения на использование некоторых численных методов. Наиболее подходящими методами для решения поставленной задачи являются неявные методы (например, метод трапеций или неявно-явный метод Эйлера-Коши), которые требуют решения системы дифференциальных и алгебраических уравнений на каждом шаге интегрирования. Их применение позволяет увеличить шаг интегрирования по сравнению с явными методами при сохранении той же точности вычислений [132].

Составленную систему уравнений необходимо алгебраизовать и на каждом шаге интегрирования решать полученную систему нелинейных алгебраических уравнений. В данной работе используется итерационный метод Ньютона (метод касательных), который обладает наибольшей скоростью сходимости среди практически применяемых методов [131]. При алгебраизации с использованием неявного метода полученные уравнения будут иметь следующий вид:

$$X^{s} = X^{s-1} + \frac{\Delta t}{2} \Big( F \Big( X^{s-1}, Y^{s-1} \Big) + F \Big( X^{s}, Y^{s} \Big) \Big), \tag{1.106}$$

где *s* – номер шага интегрирования,  $\Delta t$  – шаг интегрирования.

В полученном выражении необходимо перенести все составляющие в правую часть и сгруппировать по номеру шага интегрирования:

$$0 = X^{s} - \frac{\Delta t}{2} F\left(X^{s}, Y^{s}\right) - \left(X^{s-1} + \frac{\Delta t}{2} F\left(X^{s-1}, Y^{s-1}\right)\right).$$
(1.107)

После алгебраизации всех дифференциальных уравнений имеем систему следующего вида:

$$\begin{cases} \gamma(X^{(s)}, Y^{(s)}, X^{(s-1)}, Y^{(s-1)}) = 0, \\ \varphi(X^{(s)}, Y^{(s)}) = 0, \end{cases}$$
(1.108)

где *γ* – вектор-функция правых частей алгебраизованных дифференциальных уравнений.

В данной системе уравнений значения переменных с индексом (s-1) определены исходя из начальных условий или результатов расчета на предыдущем шаге по времени. Поскольку в системе число уравнений совпадает с числом переменных (т.е. система определена), то на каждом шаге интегрирования организован итерационный процесс по методу Ньютона и он имеет решение. На каждой итерации решается система матричных уравнений, где определяются приращения переменных:

$$\begin{pmatrix} \frac{d\gamma}{dX} & \frac{d\gamma}{dY} \\ \frac{d\varphi}{dX} & \frac{d\varphi}{dY} \end{pmatrix}_{(i-1)} \begin{pmatrix} \Delta X_{(i)} \\ \Delta Y_{(i)} \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} \gamma(X_{(i-1)}, Y_{(i-1)}) \\ \varphi(X_{(i-1)}, Y_{(i-1)}) \end{pmatrix},$$
(1.109)

где *i* – индекс итерации.

Для расчета переходных процессов разработано оригинальное программное обеспечение на языке программирования С++ [133], реализующее алгебраизацию по методу трапеций на каждом шаге интегрирования и решение полученной системы алгебраизованных уравнений методом Ньютона [114].

#### 1.14. Выводы по первой главе

1. Сформирована математическая модель ЭЭС с регулируемой линией электропередачи и управляемыми устройствами, учитывающая как электромагнитные процессы в элементах сети.

2. Полученная модель позволяет анализировать как переходные, так и установившиеся режимы рассматриваемой системы.

3. Математическое описание системы состоит из блоков нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений.

4. Рассмотрены законы регулирования управляемых элементов, входящих в рассматриваемую ЭЭС: АРВ-СД, АРС, УУПК и УШР.

5. Предложена компактная форма записи математической модели системы.

6. Рассмотрен алгоритм работы программы для расчета переходных режимов по предложенной модели.

# ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Любая ЭЭС, работающая в допустимом УР должна обладать статической устойчивостью, поскольку «малые» возмущения происходят в сети постоянно и при их наличии ЭЭС должна исправно функционировать. Природа «малых» возмущений может быть различна, например небольшое изменение потребляемой мощности нагрузкой, действие регулирующих устройств, изменение сопротивления элементов сети под воздействием внешних факторов среды и т.д. Строго говоря, существование неизменного УР невозможно, поскольку режим постоянно находится в движении. Однако на практике под УР считают режим, при котором все «малые» возмущения и соответствующие им непрерывные процессы происходят в окрестности некоторой равновесной точки.

Данная глава посвящена вопросам исследования статической устойчивости изолированной двухмашинной системы, содержащей станции соизмеримой мощности при наличии управляемых устройств, таких как УУПК, УШР, АРС и АРВ. Основные вопросы, рассматриваемые в рамках данной главы:

1. Особенности расчета установившихся режимов в изолированной системе с управляемой ДЛЭП СВН.

2. Влияние управляемых устройств в ЭЭС на пределы передаваемой мощности.

3. Анализ статической апериодической устойчивости системы с управляемыми элементами.

4. Анализ статической колебательной устойчивости системы с управляемыми элементами.

# 2.1. Математическая модель рассматриваемой системы для расчетов установившихся режимов

Записанные в главе 1 модели для отдельных элементов ЭЭС после их объединения в одну систему уравнений могут быть сразу использованы для анализа переходных режимов. Полученную модель ЭЭС также можно использовать для расчета УР после проведения некоторых преобразований. Поскольку в данной работе принято упрощение, что УР является стационарным и не имеет отклонений режимных параметров во времени, то все производные по времени обращаются в ноль [134]. Также, поскольку генераторы в УР вращаются со скоростью, равной синхронной, то  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0 = 1$ . Таким образом, полученная математическая модель запишется следующим образом:

Синхронный генератор 1:

$$0 = -r_{D1}i_{D1}, (2.1)$$

$$0 = -r_{Q1}i_{Q1}, (2.2)$$

$$0 = u_{f1} + \Delta u_{f1} - r_{f1}i_{f1}, \qquad (2.3)$$

$$0 = -u_{d1} - r_{a1}i_{d1} - \psi_{q1}, \qquad (2.4)$$

$$0 = -u_{q1} - r_{a1}i_{q1} + \psi_{d1}, \qquad (2.5)$$

$$\psi_{d1} = x_{d1}i_{d1} + x_{aD1}i_{D1} + x_{ad1}i_{f1}, \qquad (2.6)$$

$$\psi_{q1} = x_{q1}i_{q1} + x_{aQ1}i_{Q1}, \qquad (2.7)$$

$$\psi_{D1} = x_{D1}i_{D1} + x_{aD1}i_{d1} + x_{1f1}i_{f1}, \qquad (2.8)$$

$$\psi_{Q1} = x_{Q1}i_{Q1} + x_{aQ1}i_{q1}, \qquad (2.9)$$

$$\psi_{f1} = x_{f1}i_{f1} + x_{ad1}i_{d1} + x_{1f1}i_{D1}, \qquad (2.10)$$

$$0 = M_{T1} - M_{_{3M1}}, (2.11)$$

$$M_{_{\mathcal{M}1}} = \psi_{d1} i_{q1} - \psi_{q1} i_{d1}.$$
 (2.12)

Трансформатор 1:

$$0 = \frac{u_{d1} - u_{d3}}{x_{m1}} - \frac{r_{m1}}{x_{m1}} i_{d1} - i_{q1}, \qquad (2.13)$$

$$0 = \frac{u_{q1} - u_{q3}}{x_{m1}} - \frac{r_{m1}}{x_{m1}} i_{q1} + i_{d1}.$$
 (2.14)

ЛЭП 1:

$$0 = \frac{u_{d3} - u_{d4}}{x_{n1}} - \frac{r_{n1}}{x_{n1}} i_{d4} - i_{q4}, \qquad (2.15)$$

$$0 = \frac{u_{q3} - u_{q4}}{x_{n1}} - \frac{r_{n1}}{x_{n1}} i_{q4} + i_{d4}, \qquad (2.16)$$

$$0 = x_{b1}i_{d3} - \frac{x_{b1}}{r_{g1}}u_{d3} - u_{q3}, \qquad (2.17)$$

$$0 = x_{b1}i_{q3} - \frac{x_{b1}}{r_{g1}}u_{q3} + u_{d3}, \qquad (2.18)$$

$$0 = x_{b1}i_{d5} - \frac{x_{b1}}{r_{g1}}u_{d4} - u_{q4}, \qquad (2.19)$$

$$0 = x_{b1}i_{q5} - \frac{x_{b1}}{r_{g1}}u_{q4} + u_{d4}.$$
 (2.20)

ШР 1:

$$0 = \frac{u_{d4}}{x_{p1} + \Delta x_{VIIIP1}} - \frac{r_{p1}}{x_{p1} + \Delta x_{VIIIP1}} i_{d6} - i_{q6}, \qquad (2.21)$$

$$0 = \frac{u_{q4}}{x_{p1} + \Delta x_{yIIIP1}} - \frac{r_{p1}}{x_{p1} + \Delta x_{yIIIP1}} i_{q6} + i_{d6}.$$
 (2.22)

УПК:

$$0 = x_{y_{\Pi K}} i_{d7} - \left( u_{q4} - u_{q5} \right), \tag{2.23}$$

$$0 = x_{y_{IIK}} i_{q7} + (u_{d4} - u_{d5}).$$
(2.24)

ШР 2:

$$0 = \frac{u_{d5}}{x_{p2} + \Delta x_{yIIIP2}} - \frac{r_{p2}}{x_{p2} + \Delta x_{yIIIP2}} i_{d8} - i_{q8}, \qquad (2.25)$$

$$0 = \frac{u_{q5}}{x_{p2} + \Delta x_{yIIIP2}} - \frac{r_{p2}}{x_{p2} + \Delta x_{yIIIP2}} i_{q8} + i_{d8}.$$
 (2.26)

ЛЭП 2:

$$0 = \frac{u_{d5} - u_{d6}}{x_{n2}} - \frac{r_{n2}}{x_{n2}} i_{d10} - i_{q10}, \qquad (2.27)$$

$$0 = \frac{u_{q5} - u_{q6}}{x_{n2}} - \frac{r_{n2}}{x_{n2}} i_{q10} + i_{d10}, \qquad (2.28)$$

$$0 = x_{b2}i_{d9} - \frac{x_{b2}}{r_{g2}}u_{d5} - u_{q5}, \qquad (2.29)$$

$$0 = x_{b2}i_{q9} - \frac{x_{b2}}{r_{g2}}u_{q5} + u_{d5}, \qquad (2.30)$$

$$0 = x_{b2}i_{d11} - \frac{x_{b2}}{r_{g2}}u_{d6} - u_{q6}, \qquad (2.31)$$

$$0 = x_{b2}i_{q11} - \frac{x_{b2}}{r_{g2}}u_{q6} + u_{d6}.$$
 (2.32)

Нагрузка:

$$0 = \frac{u_{d6}}{x_{\mu}} - \frac{r_{\mu}}{x_{\mu}} i_{d12} - i_{q12}, \qquad (2.33)$$

$$0 = \frac{u_{q6}}{x_{\mu}} - \frac{r_{\mu}}{x_{\mu}} i_{q12} + i_{d12}. \qquad (2.34)$$

Трансформатор 2:

$$0 = \frac{u_{d2} - u_{d6}}{x_{m2}} - \frac{r_{m2}}{x_{m2}} i_{d2to1} - i_{q2to1}, \qquad (2.35)$$

$$0 = \frac{u_{q2} - u_{q6}}{x_{m2}} - \frac{r_{m2}}{x_{m2}} i_{q2to1} + i_{d2to1}.$$
 (2.36)

Синхронный генератор 2:

$$0 = -r_{D2}i_{D2}, (2.37)$$

$$0 = -r_{Q2}i_{Q2}, \tag{2.38}$$

$$0 = u_{f2} + \Delta u_{f2} - r_{f2} i_{f2}. \tag{2.39}$$

$$0 = -u_{d2} - r_{a2}i_{d2} - \psi_{q2}, \qquad (2.40)$$

$$0 = -u_{q2} - r_{a2}i_{q2} + \psi_{d2}, \qquad (2.41)$$

$$\psi_{d2} = x_{d2}i_{d2} + x_{aD2}i_{D2} + x_{ad2}i_{f2}, \qquad (2.42)$$

$$\psi_{q2} = x_{q2}i_{q2} + x_{aQ2}i_{Q2}, \qquad (2.43)$$

$$\psi_{D2} = x_{D2}i_{D2} + x_{aD2}i_{d2} + x_{1f2}i_{f2}, \qquad (2.44)$$

$$\psi_{Q2} = x_{Q2}i_{Q2} + x_{aQ2}i_{q2}, \qquad (2.45)$$

$$\psi_{f2} = x_{f2}i_{f2} + x_{ad2}i_{d2} + x_{1f2}i_{D2}, \qquad (2.46)$$

$$0 = M_{T2} - M_{_{\mathcal{M}2}}, \tag{2.47}$$

$$M_{_{\mathcal{M}2}} = \psi_{d2} i_{q2} - \psi_{q2} i_{d2}.$$
 (2.48)

Уравнения баланса токов, исходя из схемы замещения, представленной на рис. 1.2 записываются следующим образом:

$$i_{d1} = i_{d3} + i_{d4}, \tag{2.49}$$

$$i_{q1} = i_{q3} + i_{q4}, \qquad (2.50)$$

$$i_{d4} = i_{d5} + i_{d6} + i_{d7}, \qquad (2.51)$$

$$i_{q4} = i_{q5} + i_{q6} + i_{q7}, \qquad (2.52)$$

$$i_{d7} = i_{d8} + i_{d9} + i_{d10}, \qquad (2.53)$$

$$i_{q7} = i_{q8} + i_{q9} + i_{q10}, \qquad (2.54)$$

$$i_{d10} + i_{d2to1} = i_{d11} + i_{d12}, (2.55)$$

$$i_{q10} + i_{q2to1} = i_{q11} + i_{q12}. (2.56)$$

Уравнения преобразования координат:

$$i_{d2to1} = i_{d2} \cdot \cos \delta_{12} - i_{q2} \cdot \sin \delta_{12}, \qquad (2.57)$$

$$i_{q2to1} = i_{q2} \cdot \cos \delta_{12} + i_{d2} \cdot \sin \delta_{12}, \qquad (2.58)$$

$$u_{d2to1} = u_{d2} \cdot \cos \delta_{12} - u_{q2} \cdot \sin \delta_{12}, \qquad (2.59)$$

$$u_{q^{2to1}} = u_{q^2} \cdot \cos \delta_{12} + u_{d^2} \cdot \sin \delta_{12}.$$
 (2.60)

АРВ-СД СГ 1:

$$\Delta u_{f1} = \left( K_{oU1} \left( U_{01} - U_{\Gamma 1} \right) \right) \cdot \frac{r_{f1}}{x_{ad1}}, \qquad (2.61)$$

$$U_{\Gamma 1} = \sqrt{\left(u_{d1}^{2} + u_{q1}^{2}\right)}.$$
 (2.62)

$$\Delta u_{f2} = \left( K_{oU2} \left( U_{02} - U_{\Gamma 2} \right) \right) \cdot \frac{r_{f2}}{x_{ad2}}, \qquad (2.63)$$

$$U_{\Gamma 2} = \sqrt{\left(u_{d2}^{2} + u_{q2}^{2}\right)}.$$
 (2.64)

УУПК:

$$x_{y_{\Pi K}}(I_{7}) = \frac{10^{6}}{\omega_{0}(K_{1Y_{\Pi K}} - K_{2Y_{\Pi K}}I_{7}I_{\delta}) \cdot Z_{\delta}}, \qquad (2.65)$$

$$I_7 = \sqrt{\left(i_{d7}^2 + i_{q7}^2\right)} \,. \tag{2.66}$$

УШР 1:

$$\Delta x_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}\mathcal{P}1} \left( U_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}\mathcal{P}1} \right) = -K_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}\mathcal{P}1} \cdot \left( U_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}\mathcal{P}1} - U_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}\mathcal{P}01} \right), \qquad (2.67)$$

$$U_{YIIIP1} = \sqrt{\left(u_{d4}^{2} + u_{q4}^{2}\right)}.$$
 (2.68)

УШР 2:

$$\Delta x_{\mathcal{YIIIP2}} \left( U_{\mathcal{YIIIP2}} \right) = -K_{\mathcal{YIIIP2}} \cdot \left( U_{\mathcal{YIIIP2}} - U_{\mathcal{YIIIP02}} \right), \qquad (2.69)$$

$$U_{yIIIP2} = \sqrt{\left(u_{d5}^{2} + u_{q5}^{2}\right)}.$$
 (2.70)

Математическая модель для УР не содержит АРС на турбинах, а также АРВ-СД представлено как АРВ-ПД, поскольку в УР отсутствуют изменения режимных параметров во времени, а частота вращения роторов генераторов равна синхронной. Модель состоит из 70 нелинейных алгебраических уравнений.

## 2.2. Основные допущения при эквивалентировании генераторов электрических станций

Поскольку по условиям, поставленным в первой главе диссертации, станции имеют по 8 блоков генераторов ТВВ-320-2, то их эквивалентирование возможно только при принятии следующих допущений:

1. Блоки генератор-трансформатор абсолютно идентичны.

2. Отдельные генераторы на каждой станции не могут иметь скольжения друг относительно друга.

3. Все генераторы станции имеют одинаковый коэффициент загрузки.

4. Нарушение устойчивости отдельно взятого генератора на станции невозможно.

Определение расчетных параметров эквивалентных генераторов, а также остальных элементов сети приведено в приложении 1.

# 2.3. Особенности расчета установившихся режимов и угловых характеристик исследуемой системы

Полученная ранее модель для расчета УР может быть представлена в виде:

$$\varphi(Y) = 0, \qquad (2.71)$$

где Y – вектор переменных, не входящих под знак производной,  $\varphi$  – векторфункция правых частей алгебраических уравнений.

Данная система решается с помощью метода Ньютона. Данный метод реализован в разработанном оригинальном программном обеспечении [113]. Применение метода Ньютона (метода касательных) позволяет получать решение при быстрой сходимости результата и относительно простом алгоритме [131].

На каждом шаге интегрирования происходит решение системы линейных уравнений:

$$\frac{d\varphi}{dY}(Y^{(i)})(\Delta Y^{(i+1)}) = -\varphi(Y^{(i)}).$$
(2.72)

На каждом шаге методом Гаусса определяются поправки и находятся новые приближения переменных:

$$Y^{(i+1)} = Y^{(i)} + \Delta Y^{(i+1)}.$$
(2.73)

Как только сумма квадратов вектора невязок итерационного процесса становится меньше заданной точности, процесс останавливается:

$$|(Y^{(i)})^2| \leq \varepsilon. \tag{2.74}$$

Таким образом, в использованном методе осуществляется контроль сходимости по точности расчета. В случае если итерационный процесс расходится (число итераций больше 1000), программой выдается сообщение о невозможности нахождения решения при заданных условиях.

Разработанная программа решает задачу анализа, поскольку позволяет, исходя из начальных приближений и коэффициентов регулирования отдельных элементов, получить значения всех режимных параметров:

начальные приближения, 
$$K_{1YIIK}, K_{2YIIK}, K_{YIIIP1(2)}, U_{YIIIP1(2)0}, K_{oU1(2)}, U_{\Gamma1(2)0} \rightarrow X_{YIIK}(I), \Delta x_{YIIIP1(2)}, \Delta u_{f1(2)}, pежимные параметры.$$

Для решения задачи синтеза разработана программа, позволяющая исходя из требуемого значения сопротивления УПК в исходном режиме, коэффициента регулирования УПК  $K_{2УЛК}$  и значений отклонения параметров регулируемых устройств получить все режимные параметры, а также значение коэффициента  $K_{1УЛК}$  и значение уставок АРВ и УШР:

начальные приближения,  $x_{y\Pi K}(I), K_{2Y\Pi K}, K_{YIIIP1(2)}, \Delta x_{YIIIP1(2)}, K_{oU1(2)}, \Delta u_{f1(2)} \rightarrow K_{1Y\Pi K}, U_{YIIIP1(2)0}, U_{\Gamma1(2)0}, peжимные параметры.$ 

Обычно уставки принимаются такими, чтобы APB и УШР не оказывали влияния на исходный УР ( $\Delta x_{yUIP1(2)} = 0, \Delta u_{f1(2)} = 0$ ).

Вышеуказанные программы позволяют проводить весь спектр расчетов статической устойчивости, проведенных в данной главе.

#### 2.4. Особенности утяжеления режима при наличии УУПК

Расчет режимов при наличии УУПК имеет некоторые особенности по сравнению с расчетами для простых систем, содержащих статичные элементы. Данное устройство вносит большую нелинейность в математическую модель ввиду изменения сопротивления УПК в функции тока через него.

Традиционно утяжеление режима для построения угловой характеристики производится по углу или по мощности генератора. Однако проведенные исследования показали, что для построения угловой характеристики при наличии УУПК применение утяжеления по углу не всегда дает необходимый результат. Из-за наличия изменяющегося сопротивления в функции тока возникают явления, когда при одном и том же значении угла возможно существование нескольких режимов с разным значением мощности [135]. Поэтому утяжеление по углу имеет ограничение в применении. Анализ показал, что наиболее предпочтительным является комбинированное утяжеление по углу и току УПК, поскольку именно в функции этого параметра меняется сопротивление УУПК, а значит и режимы ЭЭС в целом. Каждому значению тока соответствует только один режим, а, значит, утяжеление будет производиться планомерно без возможности скачкообразного перехода режима. Данное явление подробно рассматривается в п. 2.7 данной главы.

Исследования производились для системы, содержащей УУПК, а также УШР в двух исполнениях: со ступенчатым изменением сопротивления реакторов (коммутацией отдельных параллельно работающих ШР) и с плавным изменением в функции напряжения в точке подключения. Все результаты сравнивались со случаем отсутствия регулирования УУПК, т.е.  $K_{2VПK} = 0$  и  $x_{VПK} = const$ .

# 2.5. Предел передаваемой мощности изолированной системы с УУПК и с различным количеством ступеней УШР

На рис. 2.1 представлены угловые характеристики мощности электрических станций при отсутствии регулирования УУПК ( $K_{2VПK} = 0$ ) и включении по одной, три и пять групп ШР на «левых» и «правых» выводах УУПК.



Рисунок 2.1 – Угловые характеристики активной мощности генераторов при отсутствии регулирования УПК: 1, 1' – включение по 1 группе ШР на выводах УПК; 2, 2' – включение по 3 группы ШР; 3, 3' – включение по 5 групп ШР

Анализ зависимостей на рис. 2.1 свидетельствует о том, что увеличение числа включенных в работу ШР снижает предел передаваемой мощности. Однако принять произвольное (минимальное) число реакторов нельзя, поскольку в этом случае напряжение на выводах УППК выйдет за нормированные границы. На рис. 2.2 представлены угловые характеристики напряжения на «левом» (индекс «л») и «правом» (индекс «п») выводе УУПК при тех же условиях, что и на рис. 2.1.



Рисунок 2.2 – Угловые характеристики напряжения на «левом» и «правом» выводе УУПК при отсутствии его регулирования: 1 – включение по 1 группе ШР на выводах УПК; 2 – включение по 3 группы ШР; 3 – включение по 5 групп ШР

Зависимости на рис. 2.2 свидетельствуют о том, что по мере увеличения числа групп реакторов напряжения на выводах УУПК выравниваются. Полученные результаты справедливы также для других коэффициентов  $K_{2VIIK}$ . Включение по одной группе ШР недопустимо по условию соблюдения необходимых уровней напряжения на выводах УУПК.

Поскольку реакторы установлены на обоих выводах УУПК, то при изменении числа включенных реакторов хотя бы на одном из выводов изменяется баланс реактивной мощности в точке подключения обеих групп ШР. Исходя из этого изменяется и переток реактивной мощности через УУПК, а значит, степень компенсации и перепад напряжения на его выводах также изменяется. В данной системе имеет место явление перекрестного регулирования, когда включение дополнительных реакторов с одной стороны УУПК приводит к снижению напряжения на другом выводе при небольшом снижении или даже увеличении напряжения на рассматриваемом выводе.

60

Произведена оценка влияния перекрестного регулирования на предел передаваемой мощности, а также на уровни напряжения на выводах УУПК. На рис. 2.3 представлены угловые характеристики мощности электрических станций при отсутствии регулирования УУПК ( $K_{2VПK} = 0$ ) и двум условиям: включение по три группы ШР на «левых» и «правых» выводах УУПК, а также при включении трех групп ШР на «левых» и 5 групп ШР на «правых» выводах УУПК.



Рисунок 2.3 – Угловые характеристики активной мощности генераторов при отсутствии регулирования УПК: 1, 1' – включение по 3 группы ШР на выводах УПК; 2, 2' – включение 3 группы ШР на «левом» выводе и 5 групп на «правом»

Как и в предыдущем случае, увеличение суммарного числа установленных реакторов приводит к снижению предела передаваемой мощности изза увеличения эквивалентного сопротивления связи.

На рис. 2.4 представлены угловые характеристики напряжения на «левом» (индекс «л») и «правом» (индекс «п») выводе УУПК при тех же условиях, что и на рис. 2.3.



Рисунок 2.4 – Угловые характеристики напряжения на «левом» и «правом» выводе УУПК при отсутствии его регулирования: 1 – включение по 3 группы ШР на выводах УПК; 2 – включение 3 группы ШР на «левом» выводе и 5 групп на «правом» выводе

На данных зависимостях отчетливо наблюдается явление перекрестного регулирования, которое заключается в том, что включение ШР на одной из шин УПК в большей степени влияет на параметры с противоположной стороны. В данном случае включение дополнительных реакторов с «правой» стороны в большей степени оказывает влияние на уровни напряжения на «левом» выводе УПК.

Таким образом, выбор количества реакторов при фиксированном значении коэффициента  $K_{2V\Pi K}$  должен производиться с учетом двух ограничений:

- максимальное значение предела передаваемой мощности,

- приемлемые уровни напряжения на выводах УУПК.

62

## 2.6. Апериодическая устойчивость изолированной системы с УУПК и с различным количеством ступеней УШР

Поскольку, в отличие от анализа динамической устойчивости, при анализе статической устойчивости «малое» возмущение имеет неустановленное значение и место возникновения, то задача исследования устойчивости сводится к определению *характера* изменения параметров режима [120]. Для анализа статической устойчивости исходную систему нелинейных уравнений (2.1)-(2.70) необходимо линеаризовать в точке УР, соответствующему состоянию равновесия ЭЭС. Линеаризация производится по первому приближению – разложением уравнений в ряд Тейлора и выделением только линейных членов этого ряда [136]. Однако полученная линеаризованная модель будет иметь очень высокий порядок и для расчетов будет непригодна.

При различных количествах ступеней УШР оценка предела апериодической статической устойчивости производится по следующей упрощенной математической модели, описывающей электромеханический переходный процесс в исследуемой системе с УУПК, а также электромагнитные переходные процессы только в обмотках возбуждения генераторов:

$$\begin{cases} T_{J1}p^{2}\delta_{1} - D_{1}p\delta_{21} = P_{T1} - P'_{1}, \\ T_{J2}p^{2}\delta_{2} + D_{2}p\delta_{21} = P_{T2} - P_{2}, \\ T_{d01}pE'_{q1} + E_{q1} = E_{qe1}, \\ T_{d02}pE'_{q2} + E_{q2} = E_{qe2}, \\ I = f\left(\delta_{21}, X_{VIIK}, E_{q1}, E_{q2}\right), \\ X_{VIIK} = f\left(I\right). \end{cases}$$

$$(2.75)$$

Апериодическая статическая устойчивость любой сложной электроэнергетической системы определяется лишь знаком свободного члена характеристического уравнения [120]. В рассматриваемой системе после линеаризации модели (2.75) получен характеристический определитель:

$$D(p) = \begin{bmatrix} b & c & d & e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T_{d1}p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T_{d2}p & 0 \\ \frac{\partial E'_{q1}}{\partial \delta_{21}} & \frac{\partial E'_{q1}}{\partial E_{q1}} & \frac{\partial E'_{q1}}{\partial E_{q2}} & \frac{\partial E'_{q1}}{\partial X_{VIIK}} & -1 & 0 & 0 \\ \frac{\partial E'_{q2}}{\partial \delta_{21}} & \frac{\partial E'_{q2}}{\partial E_{q1}} & \frac{\partial E'_{q2}}{\partial E_{q2}} & \frac{\partial E'_{q2}}{\partial X_{VIIK}} & 0 & -1 & 0 \\ \frac{\partial I}{\partial \delta_{21}} & \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} & \frac{\partial I}{\partial E_{q2}} & \frac{\partial I}{\partial X_{VIIK}} & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & \frac{\partial X_{VIIK}}{\partial I} \end{bmatrix}$$
(2.76)

где 
$$b = p^2 + p \left( \frac{D_2}{T_{J2}} + \frac{D_1}{T_{J1}} \right) + \left( \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{21}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial \delta_{21}} \right); \qquad c = \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q1}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial E_{q1}};$$
  
 $d = \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q2}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial E_{q2}}; e = \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial X_{VIIK}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial X_{VIIK}}.$ 

Исходя из характеристического определителя получено характеристическое уравнение четвертого порядка [137]:

$$D(p) = a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4, \qquad (2.77)$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  – коэффициенты характеристического уравнения. Аналитическая запись данных коэффициентов приведена в приложении 2.

Свободный член характеристического уравнения исследуемой системы с регулируемым УПК имеет следующий вид:

$$a_{4} = \left(\frac{1}{T_{J1}}\frac{\partial P_{1}}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}}\frac{\partial P_{2}}{\partial \delta_{12}}\right) - \left(\frac{1}{T_{J1}}\frac{\partial P_{1}}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}}\frac{\partial P_{2}}{\partial \delta_{12}}\right)\frac{\partial I}{\partial X_{VIIK}}\frac{\partial X_{VIIK}}{\partial I} + .$$

$$+ \left(\frac{1}{T_{J1}}\frac{\partial P_{1}}{\partial X_{VIIK}} - \frac{1}{T_{J2}}\frac{\partial P_{2}}{\partial X_{VIIK}}\right)\frac{\partial I}{\partial \delta_{12}}\frac{\partial X_{VIIK}}{\partial I}$$

$$(2.78)$$

Зависимость значения свободного члена от взаимного угла  $\delta_{12}$ , полученная по (2.78), приведена на рис. 2.5.

64



Рисунок 2.5 – Зависимость свободного члена характеристического уравнения при отсутствии регулирования УПК: 1 – включение по 1 группе ШР на выводах УПК; 2 – включение по 3 группы ШР; 3 – включение по 5 групп ШР; 4 – включение 3 групп ШР на «левом» выводе и 5 групп на «правом» выводе

Критерием апериодической статической устойчивости рассматриваемой системы является условие  $a_n > 0$  и предельный по апериодической статической устойчивости режим соответствует условию  $a_n = 0$ . Таким образом, выделив интересующую часть зависимости возле перехода значения свободного члена через ноль, получим зависимость, указанную на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Зависимость свободного члена характеристического уравнения при отсутствии регулирования УПК: 1 – включение по 1 группе ШР на выводах УПК; 2 – включение по 3 группы ШР; 3 – включение по 5 групп ШР; 4 – включение 3 групп ШР на «левом» выводе и 5 групп на «правом» выводе (увеличенный масштаб)

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 2.6 показал, что число включенных групп ШР не влияет на предел апериодической устойчивости, поскольку смена знака свободного члена происходит при одном и том же значении взаимного угла  $\delta_{12}$ , близкому к 90°.

Данное явление происходит по той причине, что в выражении (2.78) при отсутствии регулирования сопротивления УУПК (в случае установки коэффициента регулирования  $K_{2УПК} = 0$ ) частная производная  $\frac{\partial X_{УПК}}{\partial I}$  обращается в ноль. Что в свою очередь приводит к тому, что записанное ранее выражение приобретает следующий вид:

$$a_4 = \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}}.$$
(2.79)

На основе данного уравнения получаем известный критерий устойчивости для двухмашинной системы [138]:

$$\frac{1}{T_{I1}}\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{I2}}\frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} > 0.$$
(2.80)

Проанализировав данное выражение можно сделать вывод о том, что момент перехода *a<sub>n</sub>* через ноль зависит от положения пиков угловых характеристик мощности эквивалентных генераторов.

На рис. 2.1 показано, что с увеличением числа групп ШР, включенных на выводах неуправляемого УПК пики данных угловых характеристик приближаются друг к другу, причем на одинаковую величину. Соответственно и переход  $a_n$  через ноль происходит при одном и том же значении взаимного угла  $\delta_{12}$ .

Данное явление полностью повторяет результаты, получаемые для простейшей нерегулируемой системы: переход  $a_n$  через ноль происходит при одном и том же значении взаимного угла  $\delta_{12}$  вне зависимости от сопротивления связи, связывающего эквивалентный генератор и систему [139].

Перейдем к рассмотрению совместной работы УУПК и УШР с различным количеством ступеней. При наличии регулирования УУПК увеличение числа включенных в работу реакторов на выводах УУПК приводит к смещению угловой характеристики первого генератора не только вниз, как это наблюдалось в системе без регулирования УУПК, но и вправо (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Угловые характеристики активной мощности генераторов: 1, 1' – включение по 3 группы ШР на выводах УПК при  $K_{2VПK} = 4$ ; 2, 2' – включение по 5 групп ШР на выводах УПК при  $K_{2VПK} = 4$ ; 3, 3' – включение по 5 групп ШР и отсутствии регулирования УУПК ( $K_{2VПK} = 0$ )

Данное явление приводит к тому, что свободный член характеристического уравнения меняет свой знак при бо́льшем значении  $\delta_{12}$ , чем в случае отсутствия регулирования УУПК (рис. 2.8). Полученный результат говорит о расширении диапазона устойчивых режимов и улучшении апериодической статической устойчивости.



Рисунок 2.8 – Зависимость свободного члена характеристического уравнения при  $K_{2V\Pi K}$  = 4: 1 – включение по 3 группы ШР на выводах УПК; 2 – включение по 5 групп ШР

Однако необходимо отметить, что нарушение данного вида устойчивости наблюдается при углах, которые не применяются в практике эксплуатации нормальных установившихся режимов. Таким образом, с точки зрения апериодической устойчивости возможно использование любого коэффициента регулирования  $K_{2УПК}$  и числа реакторов, поскольку в установившихся режимах углы в 90° и более в реальной практике эксплуатации встречаются редко и анализируются только при математическом моделировании.

Применение управляемой ёмкости также влияет на уровни напряжения на её выводах. На рис. 2.9 представлены зависимости напряжения в случае включения по три и 5 групп ШР на выводах УУПК и *К*<sub>2УПК</sub> = 4.

69



Рисунок 2.9 – Угловые характеристики напряжения на «левом» и «правом» выводе УУПК при  $K_{2VПK} = 4$ : 1 – включение по 3 группы ШР на выводах УПК; 2 – включение по 5 групп ШР

Из представленных зависимостей можно сделать вывод о том, что увеличение числа ШР на выводах регулируемого УПК позволяет выравнивать напряжения в рабочем диапазоне режимов. Рассмотрение рабочих режимов при углах более 90-100° нецелесообразно, поскольку при данных режимах будет происходить нарушение апериодической устойчивости системы.

Произведена оценка влияния закона регулирования УУПК на режимы и апериодическую устойчивость системы. На рис. 2.10 и 2.11 показаны угловые характеристики мощности генераторов и напряжения на выводах УУПК при включении по три группы ШР на выводах УУПК и вариации коэффициента регулирования *К*<sub>2УПК</sub> от 0 до 6.



Рисунок 2.10 – Угловые характеристики активной мощности генераторов при установке по 3 группы ШР на выводах УПК: 1, 1' –  $K_{2V\Pi K} = 0$ ; 2, 2' –  $K_{2V\Pi K} = 4$ ; 3, 3' –  $K_{2V\Pi K} = 6$ 



Рисунок 2.11 – Угловые характеристики напряжения на «левом» и «правом» выводе УУПК при установке по 3 группы ШР на выводах УПК: 1, 1' –  $K_{2YПK} = 0$ ; 2, 2' –  $K_{2YПK} = 4$ ; 3, 3' –  $K_{2YПK} = 6$ 

Анализ полученных зависимостей показывает, что увеличение коэффициента регулирования  $K_{2VIIK}$  положительно сказывается на пределе передаваемой мощности, а также позволяет несколько выравнивать напряжения в рабочем диапазоне режимов.

Изменение закона регулирования также сказывается на значениях частных производных, входящих в (2.78) и, как следствие, на поведение зависимости свободного члена характеристического уравнения от взаимного угла  $\delta_{12}$  (рис. 2.12)



Рисунок 2.12 – Зависимость свободного члена характеристического уравнения при установке по 3 группы ШР на выводах УПК:  $1 - K_{2V\Pi K} = 0$ ;  $2 - K_{2V\Pi K} = 4$ ;  $3 - K_{2V\Pi K} = 6$ 

Из приведенных на рис. 2.12 зависимостей можно сделать вывод, что увеличение коэффициента регулирования УУПК улучшает статическую апериодическую устойчивость, хотя необходимо отметить, что увеличенные углы, при которых наблюдается переход свободного члена в отрицательную область значений, положительно влияют на вынужденные и послеаварийные режимы.

Из приведенных зависимостей становится очевидно, что бо́льший коэффициент регулирования *К*<sub>2УПК</sub> положительно сказывается как на режимах,
так и устойчивости ЭЭС. Однако выбирать произвольное большое значение коэффициента регулирования нельзя, поскольку в этом случае возможно возникновение такого явления как резонансный переход при утяжелении режима по углу. Угловые характеристики мощности генераторов, напряжения на выводах УУПК и значения свободного члена характеристического уравнения при наличии резонансного перехода представлены на рис. 2.13-2.15 соответственно [140]. Условия возникновения резонансного перехода в данной ЭЭС следующие: включено по 4 группы ШР на выводах УУПК, коэффициент регулирования  $K_{2VПK} = 8$ .



Рисунок 2.13 – Угловые характеристики активной мощности генераторов при включении по 4 группы ШР на выводах УПК: 1, 1' – *K*<sub>2*УПК*</sub> = 8



Рисунок 2.14 — Угловые характеристики напряжения на «левом» и «правом» выводе УУПК при включении по 4 группы ШР на выводах УПК при  $K_{2УПK} = 8$ 



Рисунок 2.15 – Зависимость свободного члена характеристического уравнения при включении по 4 группы ШР на выводах УПК при *K*<sub>2*VПК*</sub> = 8

Приведенные зависимости показывают, что данный переход недопустим, поскольку имеет негативные последствия в виде больших уровней напряжения, а также резкого изменения выдаваемой генераторами мощности. Данный переход при реальном утяжелении режима приведет к возникновению «большого» возмущения и с большой долей вероятности приведет к нарушению устойчивости.

Отследить приближение к границе появления резонансного перехода можно по поведению значения свободного члена характеристического уравнения. На рис. 2.5 показано поведение значения свободного члена при отсутствии резонансного перехода. Имеет место планомерное снижение его значения. На приведенной зависимости для случая наличия резонансного перехода на рис. 2.15 имеется точка перегиба (точка *a*) при увеличении взаимного угла. Отслеживая поведение свободного члена можно контролировать приближение к точке возникновения резонансного перехода, а в случае проведения расчетов для построения угловых характеристик переходить от утяжеления по углу к утяжелению по току УУПК.

#### 2.7. Явление резонансного перехода

Явление резонансного перехода может происходить в компенсированных линиях как при утяжелении УР, так и при переходных процессах при «больших» возмущениях. Природа данного явления имеет в основе явление резонанса напряжений.

Для разъяснения явления резонансного перехода рассмотрим простейшую ЭЭС, содержащую УУПК в середине ЛЭП. Результаты, полученные по данной схеме, будут также справедливы для более сложных систем.



Рисунок 2.16 – Простейшая управляемая электроэнергетическая система

В упрощенном виде, без учета поперечных сопротивлений схема замещения выглядит следующим образом:



Рисунок 2.17 – Упрощенная схема замещения После преобразования данная схема будет иметь вид:



Рисунок 2.18 - Схема замещения после преобразования

Явление резонанса напряжения в традиционном последовательном колебательном контуре возникает на частоте  $\omega$ , при которой индуктивное сопротивление катушки  $x_L = \omega L$  совпадает с емкостным сопротивлением конденсатора  $x_C = \frac{1}{\omega C}$ . При этом полное сопротивление цепи  $\underline{Z} = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}$  снижается и становится чисто активным R. В этом случае по закону Ома ток в цепи будет максимальным  $I = \frac{U}{R}$ . В результате действующие значения напряжения на катушке  $U_L = I \cdot x_L$  и конденсаторе  $U_C = I \cdot x_C$  окажутся равными и будут иметь максимально большое значение, которое может значительно превышать напряжение на источнике ЭДС [141].

В данном случае резонанс напряжения возникает не из-за вариации частоты сети, а в результате изменения емкостного сопротивления УУПК в зависимости от тока, проходящего через него (1.85). При определенном значении тока, называемым резонансным, суммарное индуктивное сопротивление сети  $x_{d\Sigma}$  будет полностью скомпенсировано емкостным сопротивлением УУПК  $x_{y\Pi K}$ . Значение резонансного тока  $I_{pe3}$  будет зависеть от коэффициен-

тов регулирования УУПК. Чем больше коэффициент  $K_{2VПK}$ , тем быстрее нарастает сопротивление  $x_{VПK}$  и тем при меньшем значении тока возникает резонанс напряжений.



Рисунок 2.19 – Зависимости сопротивлений УПК и суммарного индуктивного сопротивления сети от тока:  $1 - x_{Y\Pi K}$  при  $K_{2Y\Pi K} = 40$ ;  $2 - x_{Y\Pi K}$  при  $K_{2Y\Pi K} = 20$ ;  $3 - x_{d\Sigma}$ 

На практике до появления резонанса напряжений возникает явление резонансного перехода. Введем понятие падения напряжения *N* в электропередаче между узлами 1 и 2 (рис. 2.18) [13]. Для упрощения рассмотрим ту же систему, но без учета активных сопротивлений:



Рисунок 2.20 – Схема замещения рассматриваемой сети без учета активных сопротивлений

Значение модуля падения напряжения можно получить исходя из следующей векторной диаграммы для данной сети:



Рисунок 2.21 – Векторная диаграмма падения напряжения

Зная взаимный угол векторов напряжения системы и эквивалентного генератора, а также длины этих векторов, можно определить модуль падения напряжения по теореме косинусов:

$$|N| = \sqrt{E_{\Gamma}^2 - 2E_{\Gamma}U_C \cdot \cos\delta + U_C^2}. \qquad (2.81)$$

Кроме того, исходя из возможных значений взаимных углов в диапазоне от 0 до 180° можно определить минимальное и максимальное значение падения напряжения.



Рисунок 2.22 – Векторная диаграмма минимального и максимального падений напряжения в электропередаче

С другой стороны данное падение напряжения можно рассчитать по второму закону Кирхгофа следующим образом:

$$N(I) = I \cdot \left( x_{d\Sigma} - X_{VIIK}(I) \right), \tag{2.82}$$

$$N(I) = I \cdot \left( x_{d\Sigma} - \frac{10^6}{\omega \cdot \left( K_{1VIIK} - K_{2VIIK} \cdot I \cdot I_{\delta} \right) \cdot Z_{\delta}} \right).$$
(2.83)

Раскрыв скобки в уравнении (2.83) получим:

$$N(I) = (I \cdot x_{d\Sigma}) - \left(I \cdot \frac{10^6}{\omega \cdot (K_{1VIIK} - K_{2VIIK} \cdot I \cdot I_{\delta}) \cdot Z_{\delta}}\right).$$
(2.84)

На рис. 2.23 построены расчетные зависимости уменьшаемого (1) и вычитаемого (2) данного выражения от тока *I*, а также зависимость |N(I)| в возможном диапазоне значений от  $N_{min}$  до  $N_{max}$ .



Рисунок 2.23 – Расчетные зависимости падения напряжения: 1 – падение напряжения на суммарном индуктивном сопротивлении сети  $I \cdot x_{d\Sigma}$ ; 2 – падение напряжения на УПК  $I \cdot x_{y\Pi K}(I)$ ; 3 – модуль падения напряжения на электропередаче |N(I)|; 4 – минимальное падение напряжения на электропередаче  $N_{min}$ ; 5 – максимальное падение напряжения на электропередаче  $N_{max}$ 

В результате получено, что рабочей характеристикой при всех значениях углов от 0 до 180° является участок кривой |N(I)| в диапазоне от  $N_{min}$  до  $N_{max}$  (рис. 2.23, *a*-б) при  $\frac{\partial N(I)}{\partial I} > 0$ .



Рисунок 2.24 – Зависимость модуля падения напряжения в диапазоне: 1 – модуль падения напряжения на электропередаче |N(I)|; 2 – минимальное падение напряжения на электропередаче  $N_{min}$ ; 3 – максимальное падение напряжения на электропередаче  $N_{max}$ 

Здесь и далее одинаковые наименования точек на разных зависимостях соответствуют друг другу и описывают один и тот же режим в разных осях координат. Данному участку *а-б* соответствует угловая характеристика, описываемая известным уравнением:

$$P(\delta) = E_{\Gamma}^{2} \cdot y_{11} \cdot \sin(\alpha_{11}) + E_{\Gamma} \cdot U_{C} \cdot y_{12} \cdot \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}).$$
(2.85)

Однако в данном случае собственная и взаимная проводимости  $y_{11}$  и  $y_{12}$ , а также углы  $\alpha_{11}$  и  $\alpha_{12}$  дополняющие аргумент проводимости до 90° являются переменными, поскольку на их значение влияет изменяющееся от тока значение сопротивления УПК. Собственная и взаимная проводимость в зависимости от протекающего тока *I* для данного случая будут численно равны:

$$y_{11}(I) = y_{12}(I) = \frac{1}{x_{d\Sigma} - x_{y\Pi K}(I)} = \frac{1}{x_{d\Sigma} - \frac{10^6}{\omega \cdot (K_{1Y\Pi K} - K_{2Y\Pi K} \cdot I) \cdot Z_6}}.$$
 (2.86)

Зависимость взаимного угла от тока *I* выражается из (2.81) и (2.82), приравниванием правых частей данных уравнений друг к другу:

$$\sqrt{E_{\Gamma}^2 - 2E_{\Gamma}U_C \cdot \cos\delta + U_C^2} = I \cdot (x_{d\Sigma} - X_{y\Pi K}(I)), \qquad (2.87)$$

$$\delta = \arccos\left(\frac{E_{\Gamma}^2 + U_C^2 - I^2 \cdot \left(x_{d\Sigma} - X_{VIIK}(I)\right)^2}{2E_{\Gamma}U_C}\right).$$
(2.88)

Таким образом, поскольку все переменные, входящие в (2.85) имеют зависимость от протекающего тока *I*, следует записать данное выражение в зависимости от этого тока:

$$P(I) = E_{\Gamma}^{2} \cdot y_{11}(I) \cdot \sin(\alpha_{11}(I)) + E_{\Gamma} \cdot U_{C} \cdot y_{12}(I) \cdot \sin(\delta_{12}(I) - \alpha_{12}(I)). \quad (2.89)$$

Тогда полученная зависимость активной мощности от тока будет иметь вид:



Рисунок 2.25 – Зависимость активной мощности от тока

Если же перейти от записи зависимости мощности от тока к зависимости от взаимного угла, то получим стандартную угловую характеристику:



Рисунок 2.26 – Зависимость активной мощности от взаимного угла

В рассмотренном случае при увеличении тока в системе происходит постоянное увеличение модуля |N(I)| вплоть до  $N_{max}$  соответствующий углу в 180° от точки *a* к точке *б* (рис. 2.24), при этом точка *в* на рис. 2.25, 2.26 является пределом мощности. Соответственно в диапазоне изменения |N(I)| от  $N_{min}$  до  $N_{max}$  частная производная всегда имеет значение  $\frac{\partial N(I)}{\partial I} > 0$ . Однако по мере увеличения коэффициента регулирования  $K_{2YIIK}$  крутизна нарастания графика зависимости сопротивления УУПК увеличивается (рис. 2.19), что в свою очередь приводит к тому, что значение |N(I)| не доходя до значения  $N_{max}$ начинает снижаться. Данное явление приводит к тому, что в диапазоне от  $N_{min}$  до  $N_{max}$  имеется точка, в которой  $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$  (рис. 2.27, *г*), которая соответствует началу резонансного перехода. Происходит данное явление из-за стремительного роста вычитаемого в (2.84).



Рисунок 2.27 – Зависимости падения напряжения: 1 – падение напряжения на суммарном индуктивном сопротивлении сети  $I \cdot x_{d\Sigma}$ ; 2 – падение напряжения

на УПК  $I \cdot x_{VIIK}(I)$ ; 3 – модуль падения напряжения на электропередаче |N(I)|;

4 – минимальное падение напряжения на электропередаче  $N_{min}$ ;

5 – максимальное падение напряжения на электропередаче N<sub>max</sub>

Для более наглядного представления на рис. 2.28 на одном графике совмещены как рассмотренные ранее характеристики |N(I)| для случая отсутствия резонансного перехода, так и для случая его наличия на интересующем диапазоне от  $N_{min}$  до  $N_{max}$ .



Рисунок 2.28 – Зависимости модуля падения напряжения на электропередаче в диапазоне от  $N_{min}$  до  $N_{max}$ , где: 1 – при отсутствии резонансного перехода; 2 – при наличии резонансного перехода; 3 – минимальное падение напряжения на электропередаче  $N_{min}$ ; 4 – максимальное падение напряжения на электропередаче  $N_{max}$ 

С точки зрения угловых характеристик  $P(\delta)$  наличие участка со снижающейся характеристикой |N(I)| (рис. 2.28, *г*-*д*) приводит к тому, что на ниспадающей части данной характеристики при увеличении тока мощность будет увеличиваться, а взаимный угол уменьшаться, что приведет, в теории, к образованию петлеобразных угловых характеристик (рис. 2.29).



Рисунок 2.29 – Угловые характеристики мощности генератора, где: 1 – при отсутствии резонансного перехода; 2 – при наличии резонансного перехода

В точке  $\partial$  петлеобразной характеристики  $P(\delta)$  наступает резонанс напряжений. В этом случае происходит 100% компенсация индуктивного сопротивления передачи. Однако на практике при утяжелении режима достижение точки резонанса напряжений невозможно, поскольку в момент резонансного перехода при  $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$  (точка г) происходит практически моментальный переход на возрастающую часть характеристики  $\frac{|\partial N(I)|}{\partial I}$  (в точ-

ку *ж*), сопровождающийся значительным изменением мощности выдаваемой генератором [13].

Таким образом, *резонансный переход* – это явление, когда, в теории, дальнейшее увеличение мощности, передаваемой в систему, должно происходить при снижении взаимного угла, однако на практике генераторы имеют большую инерцию, а значит, угол будет увеличиваться и пройдёт точку  $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$  что приведёт к резкому изменению электромагнитной мощности генераторов и потере устойчивости системы.

### 2.8. Колебательная устойчивость системы с УУПК и с различным количеством ступеней УШР

При наличии управляемой ёмкости в УУПК, изменяющейся по закону (1.86) возможно нарушение колебательной устойчивости системы [142]. Поэтому необходимо отметить, что выводы, сделанные относительно апериодической устойчивости справедливы только при отсутствии колебательной неустойчивости в системе [143].

Для оценки колебательной устойчивости по методу *D*-разбиения по одному параметру [144] используется та же упрощенная математическая модель (2.75), что и для анализа апериодической устойчивости. В данном случае параметром является коэффициент регулирования  $K_{2y\Pi K}$ . После линеаризации и записи характеристического определителя получено характеристическое уравнение ЭЭС. В данной модели коэффициент регулирования  $K_{2y\Pi K}$ будет непосредственно входить в характеристическое уравнение:

$$\left(a_{0}p^{n}+a_{1}p^{n-1}+\ldots+a_{n}\right)K_{2V\Pi K}+b_{0}p^{n}+b_{1}p^{n-1}+\ldots+b_{n}=0, \qquad (2.90)$$

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

В характеристическом уравнении имеются коэффициенты, которые содержат в себе частные производные параметров исходного режима, а также коэффициенты регулирования управляемых устройств, которые рассматриваются в рамках метода *D*-разбиения.

Для простейших систем, не содержащих поперечные элементы или при минимальном их количестве, расчет частных производных, входящих в характеристическое уравнение, производится по аналитическим выражениям [120]. Однако в приведенной системе присутствует большое количество нелинейных элементов и поперечных ветвей (рис. 1.2), что приводит к нерациональности и невозможности расчета частных производных аналитическими методами.

Для решения поставленной задачи частные производные можно рассчитать только численным методом – как отношение разности между параметрами утяжеленного установившегося режима и исходного:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta_{12}} \approx \frac{\Delta P}{\Delta \delta_{12}}.$$
(2.91)

Причем утяжеление производится при «малом» отклонении от исходного режима для минимизации погрешности от такого допущения.

Необходимо определить значения всех частных производных, входящих в выражения коэффициентов характеристического уравнения (2.90), кроме значения  $\frac{\partial X_{\text{УПК}}}{\partial I}$ , которое непосредственно включает в себя параметр регулирования УПК  $K_{2УПК}$ , определяющий крутизну зависимости  $X_{\text{УПК}}(I)$ . Данную частную производную легко найти по аналитическому выражению ввиду его простоты. Выражение  $\frac{\partial X_{\text{УПК}}}{\partial I}$  связано с коэффициентом  $K_{2УПК}$  следующим образом:

$$\frac{\partial X_{\text{VIIK}}}{\partial I} = \frac{10^6 \cdot I_6 \cdot K_{2\text{VIIK}}}{\omega_0 \cdot (K_{1\text{VIIK}} - K_{2\text{VIIK}} \cdot I \cdot I_6)^2 \cdot Z_6}.$$
(2.92)

При рассмотрении конкретного установившегося режима зависимость (2.92) можно представить в виде линейного выражения (2.93). Коэффициент пропорциональности *а* получен при подстановке в выражение (2.92) значений режимных параметров, соответствующих точке исходного установившегося режима:

$$\frac{\partial X_{\text{VIIK}}}{\partial I} = a \cdot K_{2\text{VIIK}} + b.$$
(2.93)

Необходимо отметить, что для построения границы *D*-разбиения коэффициент *K*<sub>2*уПК*</sub> необходимо представить в следующем комплексном виде [137]:

$$\dot{K}_{2V\Pi K} = K_{2V\Pi K}(\omega) + jb(\omega).$$
(2.94)

Полином  $jb(\omega)$ , входящий в уравнение (2.94) и влияющий на форму границы *D*-разбиения, зависит от конфигурации электроэнергетической системы, а также от характеристик исходного установившегося режима.

На рис. 2.30 представлены области устойчивости исследуемой ЭЭС с УУПК и с различным количеством ступеней УШР. По методу *D*-разбиения плоскость коэффициентов разбивается на отдельные *D*-области. Любая точка внутри определенной области соответствует такому характеристическому уравнению, решение которого дает неизменное количество корней в правой и левой полуплоскостях. Такие области традиционно обозначаются как D(m), где m – число корней в правой полуплоскости. Для выявления претендента на область устойчивости необходимо произвести штриховку полученных областей слева по ходу изменения частоты  $\omega$  от - $\infty$  до + $\infty$  [145]. Переход через границу *D*-разбиения с заштрихованной стороны на незаштрихованную приводит к увеличению числа неустойчивых корней в количестве, соответствующем кратности штриховки (одинарная или двойная). На рис. 2.30 указаны *D*-области для случая включения по одной группе ШР на выводах УУПК. Для других случаев принцип определения *D*-областей остается прежним.



Рисунок 2.30 – Области устойчивости УУПК: 1 – включение по 1 группе ШР на выводах УПК; 2 – включение по 2 группы ШР; 3 – включение по 3 группы ШР; 4 – включение по 5 групп ШР

Следует отметить, что интерес представляет только зона положительных действительных значений  $K_{2УПК}$ , поскольку именно по этому настроечному параметру УУПК производится построение области устойчивости [146]. Только этот диапазон имеет физический смысл, поскольку настроечный параметр УУПК не может являться комплексным числом. Исходя из данного положения на рис. 2.31 для большей наглядности представлены те же зависимости, что и на рис. 2.30, но с увеличенным масштабом интересующего диапазона.



Рисунок 2.31 – Области устойчивости УУПК: 1 – включение по 1 группе ШР на выводах УПК; 2 – включение по 2 группы ШР; 3 – включение по 3 группы ШР; 4 – включение по 5 групп ШР (увеличенный масштаб)

Для проверки претендента D(m) на область устойчивости найдены значения корней характеристического уравнения в точке *a*. Полученные корни имеют следующие значения:  $p_1 = -106.995$ ;  $p_2 = -895.168$ ;  $p_{3,4} = -0.703 \pm j \cdot 5.501$ . Все корни являются устойчивыми, значит, данная D-область является областью устойчивости. Значения корней также найдены для точки *б*:  $p_1 = 69.453$ ;  $p_2 = -112.79$ ;  $p_{3,4} = -1.154 \pm j \cdot 6.445$ . Получен один неустойчивый корень, соответствующий переходу через одинарную штриховку.

Анализ зависимостей показывает, что увеличение числа включенных реакторов отрицательно сказывается на диапазоне устойчивых коэффициентов  $K_{2V\Pi K}$ . Однако при передаче мощности, близкой к натуральной, или превосходящей ее необходимость в большом количестве реакторов отпадает, поскольку потери реактивной мощности в линии значительно превышают за-

рядную мощность ЛЭП, что позволяет дополнительно увеличить диапазон допустимого значения коэффициента.

Применительно к исследуемой системе, все используемые коэффициенты *К*<sub>2УЛК</sub> с запасом обеспечивают системе колебательную статическую устойчивость.

# 2.9. Влияние характеристики и мощности нагрузки на колебательную устойчивость системы с УУПК и УШР с различным количеством ступеней

Как было указано выше, форма границы *D*-разбиения определяется полиномом  $jb(\omega)$ , который в свою очередь зависит от исходного УР. На исходный УР будет сильно влиять состав и мощность нагрузки, находящейся на шинах ВН станции с генератором  $\Gamma_2$  (рис. 1.1).

В качестве исходного рассмотрен режим со следующими параметрами: степень компенсации индуктивного сопротивления линии 80%, на генераторах присутствует идеальное APB-CД (напряжение на выводах поддерживается равным  $1,05 \cdot U_n$ ), полная мощность нагрузки 6000 MB·A, коэффициент мощности нагрузки 0,6, на выводах УУПК включено по 3 группы ШР. В исходном режиме взаимный угол между векторами ЭДС эквивалентных генераторов составляет 50°, что обеспечивает передачу мощности по линии от генератора 1 к нагрузке (рис. 1.1). Область устойчивости при таких условиях будет иметь тип, представленный на рис. 2.32 кривой 1 (будет иметь место область с внешней штриховкой).



Рисунок 2.32 – Области устойчивости с внешней штриховкой:  $1 - |S_{\text{harp}}| = 6000 \text{ MB·A}; 2 - |S_{\text{harp}}| = 4000 \text{ MB·A}; 3 - |S_{\text{harp}}| = 3000 \text{ MB·A}$ 

При снижении мощности нагрузки (рис. 2.32 кривые 2 и 3) имеет место изменение вида области устойчивости, однако тип области (с внешней штриховкой) остается неизменным. Доходя до определенного значения мощности нагрузки тип области устойчивости изменится: область с внешней штриховкой сменится областью с внутренней штриховкой (рис. 2.33).



Рисунок 2.33 – Области устойчивости с внутренней штриховкой:  $1 - |S_{\text{Harp}}| = 1500 \text{ MB·A}; 2 - |S_{\text{Harp}}| = 1000 \text{ MB·A}; 3 - |S_{\text{Harp}}| = 400 \text{ MB·A}$ 

Дальнейшее снижение мощности нагрузки никак не повлияет на тип области устойчивости – с внутренней штриховкой.

Таким образом, существует некоторое значение мощности нагрузки, при которой происходит смена типа области: область с внешней штриховкой сменяется областью с внутренней штриховкой. На рис. 2.34 представлены области устойчивости при приближении к границе смены типа области устойчивости.



Рисунок 2.34 – Области устойчивости при приближении к границе смены типа области:  $1 - |S_{\text{harp}}| = 1870 \text{ MB·A}; 2 - |S_{\text{harp}}| = 1865 \text{ MB·A}$ 

На рис. 2.35 представлено поведение области устойчивости при снижении мощности нагрузки от 6000 MB·A до 400 MB·A. Области устойчивости вблизи границы смены типа области исключены намеренно, поскольку наглядно представить данные области вместе с остальными невозможно из-за разницы в масштабе данных зависимостей. Стрелками указано изменение вида области при снижении мощности нагрузки.



Рисунок 2.35 – Области устойчивости при вариации мощности нагрузки:  $1 - |S_{\text{Harp}}| = 6000 \text{ MB·A}; 2 - |S_{\text{Harp}}| = 4000 \text{ MB·A}; 3 - |S_{\text{Harp}}| = 3000 \text{ MB·A};$  $4 - |S_{\text{Harp}}| = 1500 \text{ MB·A}; 5 - |S_{\text{Harp}}| = 1000 \text{ MB·A}; 6 - |S_{\text{Harp}}| = 400 \text{ MB·A}$ 

В данном случае, также как и при рассмотрении влияния количества ШР на поведение области устойчивости, допустимый с точки зрения сохранения колебательной устойчивости диапазон изменения коэффициента  $K_{2VIIK}$  будет расположен вдоль оси действительных чисел. На рис. 2.36 указано поведение области устойчивости при тех же условиях, что и на рис. 2.35, но с выделением интересующей части областей устойчивости.



Рисунок 2.36 – Диапазоны изменения параметра регулирования  $K_{2V\Pi K}$  при вариации мощности нагрузки: 1 –  $|S_{\text{нагр}}| = 6000 \text{ MB·A}$ ; 2 –  $|S_{\text{нагр}}| = 4000 \text{ MB·A}$ ; 3 –  $|S_{\text{нагр}}| = 3000 \text{ MB·A}$ ; 4 –  $|S_{\text{нагр}}| = 1500 \text{ MB·A}$ ; 5 –  $|S_{\text{нагр}}| = 1000 \text{ MB·A}$ ; 6 –  $|S_{\text{нагр}}| = 400 \text{ MB·A}$ ;

Анализ приведенных зависимостей показывает, что снижение мощности нагрузки увеличивает диапазон допустимого изменения коэффициента  $K_{2VIIK}$  и не зависит от типа области: с внешней или внутренней штриховкой. Форма области устойчивости на интересующей части не изменяется.

Произведена оценка влияния характеристики и мощности нагрузки на допустимый диапазон изменения коэффициента  $K_{2y\Pi K}$  при степени компенсации 80 % (рис. 2.37). Анализ зависимостей показывает, что диапазон допустимого изменения параметра  $K_{2y\Pi K}$  зависит как от мощности, так и от характеристики нагрузки. Граница смены типа области устойчивости также зависит от характеристики нагрузки. На рис. 2.37 стрелками указано перемещение границы смены типа области устойчивости при увеличении коэффициента мощности нагрузки.



Рисунок 2.37 – Зависимости диапазона изменения коэффициента  $K_{2VIIK}$  от характеристики и мощности нагрузки и граница смены типа областей устойчивости при степени компенсации 80%:  $1 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0; 2 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0.2;$  $3 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0.4; 4 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0.6; 5 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0.8; 6 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 1;$ 7 - граница смены типа области устойчивости

Анализ зависимостей рис. 2.37 также 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 бо́льшая часть мощности, генерируемой линией, компенсируется нагрузкой. При активной нагрузке для поддержания напряжения на уровне 1,05· $U_n$  необходимо снижать токи возбуждения станций, что приводит к снижению ЭДС станций. Ток через УПК становится больше, чем в случае реактивной нагрузки, и, соответственно, для того чтобы степень компенсации (а по сути – сопротивление УПК) оставить прежней, необходимо снижать коэффициент  $K_{2УПК}$ .

Однако стоит отметить, что в большинстве случаев предельное значение уставки параметра  $K_{2V\Pi K}$  редко превышает 8. Таким образом, даже при мощности нагрузки, сопоставимой с номинальной мощностью генерации станций, диапазон изменения  $K_{2V\Pi K}$  остается приемлемым.

На рис. 2.38, 2.39 представлены зависимости допустимого изменения параметра  $K_{2V\Pi K}$  от мощности и характеристики нагрузки, а также границы смены типа областей устойчивости при степенях компенсации 50 и 90% соответственно.



Рисунок 2.38 – Зависимости диапазона изменения коэффициента  $K_{2yTIK}$  от характеристики и мощности нагрузки и граница смены типа областей устойчивости при степени компенсации 50%:  $1 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0; 2 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0.2;$  $3 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0.4; 4 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0.6; 5 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0.8; 6 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 1;$ 7 - граница смены типа области устойчивости



Рисунок 2.39 – Зависимости диапазона изменения коэффициента  $K_{2V\Pi K}$  от характеристики и мощности нагрузки и граница смены типа областей устойчивости при степени компенсации 90%:  $1 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0; 2 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0.2;$  $3 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0.4; 4 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0.6; 5 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 0.8; 6 - \cos(\varphi_{\text{нагр}}) = 1;$ 7 - граница смены типа области устойчивости

Анализ зависимостей показывает, что диапазон допустимого изменения параметра  $K_{2y\Pi K}$  и граница смены типа области также зависит и от степени компенсации индуктивного сопротивления ЛЭП.

### 2.10. Предел передаваемой мощности изолированной системы с УУПК и УШР с плавным регулированием

Для выяснения влияния комплексного управления на предел передаваемой мощности исследуемой системы все результаты расчетов сравнивались с режимом с постоянной степенью компенсации и с постоянным индуктивным сопротивлением реакторов, что обеспечивалось введением коэффициентов  $K_{2VIIK} = 0$  и  $K_{VIIIP} = 0$  в уравнения для законов регулирования УПК (2.65) и УШР (2.67, 2.69).



Рисунок 2.40 – Угловые характеристики активной мощности генераторов: 1, 1' –  $K_{2VIIK} = 0$ ;  $K_{VIIIP1} = K_{VIIIP2} = 0$ ; 2, 2' –  $K_{2VIIK} = 0$ ;  $K_{VIIIP1} = K_{VIIIP2} = 4$ ; 3, 3' –  $K_{2VIIK} = 4$ ;  $K_{VIIIP1} = K_{VIIIP2} = 0$ ; 4, 4' –  $K_{2VIIK} = 4$ ;  $K_{VIIIP1} = K_{VIIIP2} = 4$ 

На рис. 2.40 приведены угловые характеристики мощности для различных комбинаций управления УУПК и УШР. Угловые характеристики  $P_1(\delta_{12})$ и  $P_2(\delta_{12})$  показывают увеличение предела передаваемой мощности по сравнению с нерегулируемой передачей.

Здесь, как и в случае выбора коэффициентов регулирования УУПК, выбирать произвольно наибольшее значение коэффициентов регулирования УШР нельзя, поскольку такой выбор может привести к возникновению нежелательного явления резонансного перехода. На рис. 2.41 показаны угловые характеристики мощности генераторов при наличии резонансного перехода при значении коэффициентов регулирования УШР  $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 5$ .



Рисунок 2.41 – Угловые характеристики активной мощности генераторов: 1, 1' –  $K_{2YIIK} = 4$ ;  $K_{YIIIP1} = K_{YIIIP2} = 5$ 

## 2.11. Апериодическая устойчивость изолированной системы с УУПК и УШР с плавным регулированием

Упрощенная модель для анализа апериодической устойчивости при наличии плавного регулирования УШР и УУПК запишется следующим образом:

$$\begin{cases} T_{J1}p^{2}\delta_{1} - D_{1}p\delta_{12} = P_{T1} - P_{1}^{'}, \\ T_{J2}p^{2}\delta_{2} + D_{2}p\delta_{12} = P_{T2} - P_{2}, \\ I = f(\delta_{12}, X_{VIIK}, x_{p1}, x_{p2}), \\ X_{VIIK} = f(I, K_{2VIIK}), \\ U_{4} = f(\delta_{12}, x_{p1}), \\ x_{p1} = f(U_{4}, K_{p1}). \\ U_{5} = f(\delta_{12}, x_{p2}) \\ x_{p2} = f(U_{5}, K_{p2}) \end{cases}$$

$$(2.95)$$

В данной системе, в отличие от предыдущего раздела (2.75), регулирование возбуждения учтено упрощенно, т.е. приняты постоянными величины

101

*Е'* генераторов. Данное упрощение введено для снижения порядка характеристического уравнения и упрощения анализа устойчивости.

С учетом вышеизложенных допущений после линеаризации и преобразований уравнения установившегося режима исследуемой ЭЭС в малых отклонениях примут вид:

$$\begin{cases} p^{2}\Delta\delta_{12} + p(\frac{D_{2}}{T_{J2}} + \frac{D_{1}}{T_{J1}})\Delta\delta_{12} + \left(\frac{1}{T_{J2}}\frac{\partial P_{2}}{\partial\delta_{12}} - \frac{1}{T_{J1}}\frac{\partial P_{1}}{\partial\delta_{12}}\right)\Delta\delta_{12} + \\ + \left(\frac{1}{T_{J2}}\frac{\partial P_{2}}{\partial X_{VIIK}} - \frac{1}{T_{J1}}\frac{\partial P_{1}}{\partial X_{VIIK}}\right)\Delta X_{VIIK} + \\ + \left(\frac{1}{T_{J2}}\frac{\partial P_{2}}{\partial x_{p1}} - \frac{1}{T_{J1}}\frac{\partial P_{1}}{\partial x_{p1}}\right)\Delta x_{p1} + \left(\frac{1}{T_{J2}}\frac{\partial P_{2}}{\partial x_{p2}} - \frac{1}{T_{J1}}\frac{\partial P_{1}}{\partial x_{p2}}\right)\Delta x_{p2} = 0, \\ \Delta I_{4} = \frac{\partial I}{\partial\delta_{12}}\Delta\delta_{12} + \frac{\partial I}{\partial X_{VIIK}}\Delta X_{VIIK} + \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p1}}\Delta x_{p1} + \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p2}}\Delta x_{p2}, \\ \Delta X_{VIIK} = \frac{\partial V_{4}}{\partial \delta_{12}}\Delta\delta_{12} + \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p1}}\Delta x_{p1}, \\ \Delta U_{4} = \frac{\partial U_{4}}{\partial \delta_{12}}\Delta\delta_{12} + \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p1}}\Delta x_{p1}, \\ \Delta U_{5} = \frac{\partial U_{5}}{\partial \delta_{12}}\Delta\delta_{12} + \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p2}}\Delta x_{p2}, \\ \Delta x_{p2} = \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_{5}}\Delta U_{5}. \end{cases}$$

$$(2.96)$$

Характеристический определитель данной системы можно записать следующим образом:

$$D(p) = \begin{bmatrix} b & c & d & e & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial I}{\partial \delta_{12}} & \frac{\partial I}{\partial X_{y\Pi K}} & \frac{\partial I}{\partial x_{p1}} & \frac{\partial I}{\partial x_{p2}} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & \frac{\partial X_{y\Pi K}}{\partial I} & 0 & 0 \\ \frac{\partial U_4}{\partial \delta_{12}} & \frac{\partial U_4}{\partial X_{y\Pi K}} & \frac{\partial U_4}{\partial x_{p1}} & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_4} & 0 \\ \frac{\partial U_5}{\partial \delta_{12}} & \frac{\partial U_5}{\partial X_{y\Pi K}} & 0 & \frac{\partial U_5}{\partial x_{p2}} & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_5} \end{bmatrix}, \quad (2.97)$$

где 
$$b = p^2 + p \left( \frac{D_2}{T_{J2}} + \frac{D_1}{T_{J1}} \right) + \left( \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial \delta_{12}} \right), \quad c = \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial X_{YIIK}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial X_{YIIK}},$$
  
 $d = \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial x_{p1}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial x_{p1}}, e = \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial x_{p2}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial x_{p2}}$ 

После раскрытия записанного определителя получено характеристическое уравнение второго порядка:

$$D(p) = a_0 p^2 + a_1 p + a_2, \qquad (2.98)$$

где  $a_0, a_1, a_2$  – коэффициенты характеристического уравнения. Аналитическая запись данных коэффициентов приведена в приложении 3.

Рассматривая выражение для свободного члена (П.3.3) при плавном регулировании можно сделать вывод об его адекватности. В случае отсутствия регулирования частные производные  $\frac{\partial X_{VIIK}}{\partial I}$ ,  $\frac{\partial X_{p1}}{\partial U_4}$  и  $\frac{\partial X_{p2}}{\partial U_5}$  обращаются в ноль, что в свою очередь приводит к тому, что данное выражение приобрета-

ет вид известного критерия устойчивости для двухмашинной системы без регулирования [138]:

$$\frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J_2}}\frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} > 0.$$
(2.99)

На рис. 2.42 приведены зависимости изменения свободного члена характеристического уравнения рассматриваемой системы, при тех же условиях, что и на рис. 2.40. Показаны зависимости для системы без регулирования УПК и ШР ( $K_{2y\Pi K} = 0$  и  $K_{YШP1} = K_{YШP2} = 0$ ), для системы с регулированием УПК и с нерегулируемыми шунтирующими реакторами ( $K_{2Y\Pi K} = 4$  и  $K_{YШP1} = K_{YШP2} = 0$ ), для системы с нерегулируемым УПК и УШР ( $K_{2Y\Pi K} = 0$  и  $K_{YШP1} = K_{YШP2} = 4$ ) и для системы с комплексным управлением УУПК и УШР ( $K_{2Y\Pi K} = 4$  и  $K_{YШP1} = K_{YШP2} = 4$ ).

Комплексное управление устройством продольной компенсации и управляемыми шунтирующими реакторами дает наибольшее увеличение запаса системы по критерию апериодической статической устойчивости, ввиду того, что предельные режимы (переход значения свободного члена характеристического уравнения через ноль) наблюдаются при значениях угла  $\delta_{12}$  бо́льших более чем на 10°, по сравнению с нерегулируемой передачей.



Рисунок 2.42 – Зависимость свободного члена  $a_n$  характеристического уравнения рассматриваемой системы, где:  $1 - K_{2VIIK} = 0$  и  $K_{VIIIP1} = K_{VIIIP2} = 0$ ;  $2 - K_{2VIIK} = 4$  и  $K_{VIIIP1} = K_{VIIIP2} = 0$ ;  $3 - K_{2VIIK} = 0$  и  $K_{VIIIP1} = K_{VIIIP2} = 4$ ;  $4 - K_{2VIIK} = 4$  и  $K_{VIIIP1} = K_{VIIIP2} = 4$ 



Анализ колебательной устойчивости по методу *D*-разбиения при наличии плавного регулирования УШР затруднен, поскольку для данного метода необходимо, чтобы настроечные параметры УУПК и УШР были линейно независимы. Получаемое характеристическое уравнение имеет следующий вид:

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) K_{2Y\Pi K} + (b_0 p^n + b_1 p^{n-1} + \dots + b_n) K_{YIIIP1} + + (c_0 p^n + c_1 p^{n-1} + \dots + c_n) K_{YIIIP2} + (d_0 p^n + d_1 p^{n-1} + \dots + d_n) K_{2Y\Pi K} \cdot K_{YIIIP1} + (2.100) + (e_0 p^n + e_1 p^{n-1} + \dots + e_n) K_{2Y\Pi K} \cdot K_{YIIIP2} + f_0 p^n + f_1 p^{n-1} + \dots + f_n = 0.$$

где  $a_0, a_1...a_n$  – коэффициенты составляющих характеристического уравнения при коэффициенте регулирования  $K_{2YIIK}$ ;  $b_0, b_1...b_n$  – коэффициенты составляющих характеристического уравнения при коэффициенте регулирования  $K_{YIIIP1}$ ;  $c_0, c_1...c_n$  – коэффициенты составляющих характеристического уравнения при коэффициенте регулирования  $K_{YUIIP2}$ ;  $d_0, d_1...d_n$  – коэффициенты составляющих характеристического уравнения при коэффициентах регулирования  $K_{2YIIK}K_{YUIIP1}$ ;  $e_0, e_1...e_n$  – коэффициенты составляющих характеристического уравнения при коэффициентах регулирования  $K_{2YIIK}K_{YUIIP2}$ ;  $f_0, f_1...f_n$  – коэффициенты составляющих характеристического уравнения без коэффициентов регулирования.

В данном случае параметры зависимы нелинейно и характеристическое уравнение невозможно привести к виду, подходящему для построения однозначной области *D*-разбиения.

#### 2.13. Выводы по второй главе

1. Увеличение числа включенных групп ШР на выводах УУПК выравнивает напряжения в месте их установки, но уменьшает области устойчивости.

 Совместное применение УУПК и УШР позволяет добиться максимального увеличения предела передаваемой мощности и улучшения апериодической устойчивости

3. В рассматриваемой ЭЭС возможны 2 типа областей устойчивости: с внешней и внутренней штриховкой.

4. Тип области устойчивости не влияет на диапазон допустимых значений коэффициента регулирования *К*<sub>2*уПК*</sub>, принадлежащего оси действительных чисел.

5. Граница смены типа области устойчивости зависит от мощности и характеристики нагрузки, а также степени компенсации индуктивного сопротивления ЛЭП.

6. Следующие факторы влияют на диапазон допустимого изменения коэффициента *К*<sub>2*УПК*</sub> с точки зрения обеспечения колебательной устойчивости:

6.1. Полная мощность нагрузки.

6.2. Характеристика (коэффициент мощности) нагрузки.

6.3. Степень компенсации индуктивного сопротивления ЛЭП в исходном режиме.

6.4. Число включенных ступеней ШР на выводах УУПК.

7. Выбор коэффициента регулирования  $K_{2V\Pi K}$  необходимо производить при максимально возможной передаваемой мощности по ЛЭП, поскольку при снижении мощности диапазон допустимого значения коэффициента регулирования будет только увеличиваться, и запас колебательной устойчивости также будет расти.

## ГЛАВА 3. ВЫБОР КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ВОЗБУЖДЕНИЯ ПО УСЛОВИЮ СОХРАНЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ В СЕТИ С УПРАВЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ

Поскольку управляемая ЛЭП СВН является не единственным регулируемым элементом, то необходимо исследовать, как применение УУПК на таких линиях влияет на настройку других управляемых устройств, в частности APB генераторов. Применение APB в целом положительно сказывается на показателях устойчивости системы, однако неправильный выбор коэффициентов регулирования может приводить к нежелательным её нарушениям. Проведенные исследования показали, что каждый управляемый элемент вносит большую нелинейность, а также приводит к необходимости учета его влияния при определении допустимых значений коэффициентов регулирования других управляемых элементов.

Данная глава посвящена совместному выбору коэффициентов регулирования в сети с управляемой ДЛЭП СВН. Основные вопросы, рассматриваемые в рамках данной главы:

1. Метод совместного определения таких значений настроечных параметров УУПК, УШР и АРВ, при которых не происходит нарушения статической колебательной устойчивости

2. Анализ возможности применения упрощенной модели, учитывающей только электромеханический переходный процесс для выявления коэффициентов регулирования АРВ-СД соответствующих устойчивым режимам.

В связи со сложностью процедуры совместного выбора коэффициентов регулирования APB на обеих станциях, УППК и УШР поставленная задача разбивается на два этапа:

 Совместный выбор коэффициентов при наличии управляемой ДЛЭП СВН в простейшей ЭЭС.
2. Совместный выбор коэффициентов при наличии управляемой ДЛЭП СВН в изолированной ЭЭС.

### 3.1. Совместный выбор коэффициентов в простейшей ЭЭС

#### 3.1.1. Модель рассматриваемой ЭЭС

В данном разделе исследования производятся для простейшей ЭЭС, содержащей управляемую ЛЭП с устройствами УУПК и УШР, а также при наличии устройств АРВ-СД и АРС (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Исследуемая простейшая электроэнергетическая система

В данной схеме, как и в рассмотренной в предыдущих разделах (рис. 1.1) генераторы электрической станции с суммарной номинальной мощностью 2400 МВт имеют устройства АРВ СД и АРС и соединены с системой двухцепной линией электропередачи 500 кВ длиной 1000 км с установленным посередине УУПК. На выводах УУПК установлены УШР. На рис. 3.2 представлена схема замещения исследуемой системы.



Рисунок 3.2 - Схема замещения исследуемой электроэнергетической системы

3.1.2. Методика построения областей устойчивости по результату протекания переходного процесса при возникновении «малого» возмущения

Традиционно статическая устойчивость электроэнергетической системы оценивается по корням характеристического уравнения [147]. В случае если характеристическое уравнение имеет высокий порядок, то отыскание его корней становится весьма трудоемкой задачей, поэтому обычно для оценки устойчивости системы используют алгебраические и частотные критерии, связывающие корни с коэффициентами характеристического уравнения [148].

Современные вычислительные средства позволяют также анализировать статическую устойчивость без линеаризации системы дифференциальных уравнений, описывающих исследуемую систему, а именно с помощью вычислительного эксперимента по детальной математической модели при возникновении «малых» возмущений. По результату протекания переходного процесса формируется вывод об устойчивости.

В данном исследовании используется модель, учитывающая как электромагнитные процессы в обмотках ротора, статора и элементах сети, так и электромеханический переходный процесс.

Каждый конкретный режим ЭЭС имеет свою область устойчивости. Для оптимального выбора коэффициентов регулирования управляемых устройств необходимо провести совокупность расчетов и выбрать коэффициенты, входящие в общую для всех рассматриваемых режимов область устойчивости [149].

При фиксации одного из коэффициентов (в данном случае это  $K_{2APB}$ ) и изменении второго ( $K_{1APB}$ ) производится вычислительный эксперимент по определению границы устойчивости. Мощность турбины кратковременно (на 0,1 с) повышается на 5% от значения в исходном установившемся режиме. Результат протекания переходного процесса рассматривается на зависимостях угла ротора  $\delta_{12}$  и активной мощности  $P_{\Gamma}$ , выдаваемой генератором.

На рис. 3.3 и 3.4 представлены графики зависимостей при следующих условиях:  $K_{2VIIK} = 2$ ,  $K_{VIIIP1} = K_{VIIIP2} = 0$ ,  $K_{OU} = 20$ ,  $K_{1APB} = 0$ ,  $K_{2APB} = 0$ , что соответствует наличию в системе АРВ пропорционального действия, работе УУПК и нерегулируемых ШР.



Рисунок 3.3 – График изменения угла ротора  $\delta_{12}$  во времени при  $K_{2YIIK} = 2$ ,  $K_{YIIIP1} = K_{YIIIP2} = 0$ ,  $K_{OU} = 20$ ,  $K_{1APB} = 0$ ,  $K_{2APB} = 0$ 



Рисунок 3.4 – График изменения выдаваемой генератором активной мощности  $P_{\Gamma}(1)$  и мощности турбины  $P_{T}(2)$  во времени при  $K_{2Y\Pi K} = 2$ ,  $K_{YIIIP1} = K_{YIIIP2} = 0$ ,  $K_{OU} = 20$ ,  $K_{1APB} = 0$ ,  $K_{2APB} = 0$ 

На представленных зависимостях отчетливо виден традиционный переходный процесс для нерегулируемой системы, поскольку система APB с регулированием по первой и второй производной угла ротора генератора отключена, а величина коэффициента усиления по напряжению невелика.



На рис. 3.5, 3.6 изображены графики тех же зависимостей при различных значениях *K*<sub>1*APB*</sub>.

Рисунок 3.5 – График изменения угла ротора  $\delta_{12}$  во времени при  $K_{2YIIK} = 2$ ,  $K_{YIIIP1} = K_{YIIIP2} = 0, K_{OU} = 20, K_{2APB} = 0: 1 - K_{1APB} = 1; 2 - K_{1APB} = 4;$  $3 - K_{1APB} = 7,5$ 



Рисунок 3.6 – График изменения выдаваемой генератором активной мощности  $P_{\Gamma}$  (1-3) и мощности турбины  $P_{T}$  (2) во времени при  $K_{2VIIK} = 2$ ,  $K_{VIIIP1} = K_{VIIIP2} = 0$ ,  $K_{OU} = 20$ ,  $K_{2APB} = 0$ :  $1 - K_{1APB} = 1$ ;  $2 - K_{1APB} = 4$ ;  $3 - K_{1APB} = 7,5$ 

Анализируя полученные зависимости (рис. 3.3-3.6) можно сделать вывод о том, что увеличение коэффициентов регулирования АРВ СД приводит к различным последствиям. В начале наблюдается положительный эффект демпфирования графиков переходных процессов (при сравнении кривых 1 и 2), однако существует некоторое значение коэффициентов, когда имеет место перерегулирование и в системе возникают колебания с частотой гораздо выше той, что существуют в системе без регулирования по производным угла ротора (кривая 3). Данный эффект свидетельствует о том, что режим работы при таких коэффициентах регулирования АРВ находится на небольшом удалении от границы колебательной устойчивости [142].

Графики на рис. 3.7, 3.8 соответствуют границе колебательной устойчивости – в системе имеют место незатухающие колебания угла и мощности. Таким образом, значение  $K_{1APB} = 7,69$  при  $K_{2APB} = 0$  считается границей колебательной устойчивости.

113



Рисунок 3.7 – График изменения угла ротора  $\delta_{12}$  во времени при  $K_{2YIIK} = 2$ ,  $K_{YIIIP1} = K_{YIIIP2} = 0, K_{OU} = 20, K_{1APB} = 7.69, K_{2APB} = 0$ 



Рисунок 3.8 – График изменения выдаваемой генератором активной мощности  $P_{\Gamma}(1)$  и мощности турбины  $P_{T}(2)$  во времени при  $K_{YIIIP1} = K_{YIIIP2} = 0, K_{OU} = 20, K_{2APB} = 0, K_{1APB} = 7.69$ 

Аналогичным образом найдены точки границы устойчивости и при других значениях  $K_{2APB}$ .

## 3.1.3. Области устойчивости, полученные по результатам вычислительного эксперимента

После проведения вычислительного эксперимента для различных значений *К*<sub>2*APB*</sub> и нахождения для каждого из них соответствующей точки границы устойчивости можно построить область устойчивости для рассматриваемой системы в плоскости коэффициентов регулирования APB. На рис. 3.9 представлены области устойчивости при изменении коэффициента регулирования УУПК.



Рисунок 3.9 – Области колебательной устойчивости при  $K_{YIIIP1} = K_{YIIIP2} = 0$ ,  $K_{OU} = 20: 1 - K_{2YIIK} = 2; 2 - K_{2YIIK} = 0.5$ 

Анализ полученных зависимостей (рис. 3.9) показывает, что снижение коэффициента регулирования УУПК увеличивает допустимый диапазон выбора коэффициентов регулирования АРВ. Данное явление обусловлено тем, что при снижении коэффициента регулирования УУПК для достижения режима перерегулирования, т.е. потери колебательной устойчивости необходимо большее регулирующее воздействие от АРВ на генераторах при одном и том же возмущении, поскольку УУПК влияет на переходный режим слабее. Наблюдаемый эффект, приводящий к самораскачиванию синхронных гене-

раторов эквивалентен отрицательному демпфированию генераторов станции [142].

Для оценки влияния УШР на показатели устойчивости построены области устойчивости при наличии и отсутствии их регулирования (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 – Области колебательной устойчивости при  $K_{2VIIK} = 2, K_{OU} = 20$ : 1 –  $K_{VIIIP1} = K_{VIIIP2} = 0; 2 - K_{VIIIP1} = K_{VIIIP2} = 2$ 

Анализ полученных зависимостей (рис. 3.10) показывает, что применение УШР позволяет несколько увеличить диапазон изменения  $K_{1APB}$  при малых значениях  $K_{2APB}$  и практически не оказывает влияния на область при больших значениях коэффициента.

### 3.1.4. Анализ возможности применения упрощенной модели для оценки колебательной устойчивости системы

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. В данном пункте проведен анализ возможности применения упрощенной модели ЭЭС для более быстрого нахождения области допустимых значений коэффициентов регулирования с точки зрения сохранения колебательной устойчивости ЭЭС.

Упрощенная математическая модель, использованная для получения области устойчивости по коэффициентам регулирования APB, имеет следующий вид:

$$T_{J}p^{2}\delta + P_{d}p\delta = P_{T} - P_{\Im},$$

$$T_{do}pE'_{q} + E_{q} = E_{qe},$$

$$I = f(\delta, E_{q}, X_{y\Pi K}),$$

$$X_{y\Pi K} = f(I_{y\Pi K}),$$

$$E_{qe} = E_{qo} + \sum_{j} W'_{\Pi j}(p)\Pi_{j},$$

$$(3.1)$$

где  $W'_{\Pi_j}(p)$  – передаточная функция системы возбуждения и APB синхронной машины.

Система АРВ представлена следующей функцией, описывающей отклонение напряжения от уставки, а также первую и вторую производные изменения угла во времени [146]:

$$W'_{\Pi j}(p) = \Delta E_{qe} = \frac{-K_{OU} (U_{\Gamma} - U_0) + (K_{1APB} + pK_{2APB}) p\Delta\delta}{(1 + pT_e)(1 + pT_p)}, \qquad (3.2)$$

где  $\Delta E_{qe}$  – изменение стационарной синхронной ЭДС генератора, [кВ];  $U_{\Gamma}$  – напряжение на выводах генератора, [кВ];  $U_0$  – уставка АРВ по напряжению, [кВ];  $K_{OU}$  – коэффициент регулирования АРВ по отклонению напряжения генератора ротора генератора;  $K_{1APB}$ ,  $K_{2APB}$  – коэффициенты регулирования АРВ по первой и второй производным угла ротора генератора,  $\left[\frac{\kappa B}{\Gamma pad \cdot c}\right]$ 

и 
$$\left\lfloor \frac{\kappa B}{\Gamma p a d \cdot c^2} \right\rfloor$$
 соответственно;  $p$  – оператор дифференцирования;  $T_e$  – посто-

янная времени возбудителя, [c]; *T<sub>p</sub>* – постоянная времени регулятора возбуждения и преобразовательного устройства, [c].

После линеаризации уравнений составлен характеристический определитель 5 порядка:

$$D(p) = \begin{bmatrix} T_j p^2 + Dp + \frac{\partial P_r}{\partial \delta} & \frac{\partial P_r}{\partial E'} & \frac{\partial P_r}{\partial X_{YIIK}} & 0 & 0 \\ T_d p \frac{\partial E_q}{\partial \delta} & T_d p \frac{\partial E_q}{\partial E'} + 1 & T_d p \frac{\partial E_q}{\partial X_{YIIK}} & 0 & -1 \\ \frac{\partial I}{\partial \delta} & \frac{\partial I}{\partial E'} & \frac{\partial I}{\partial X_{YIIK}} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{\partial X_{YIIK}}{\partial I} & 0 \\ b & c & d & 0 & -1 \end{bmatrix},$$
(3.3)

где 
$$b = \frac{K_{OU} \frac{\partial U_{\Gamma}}{\partial \delta} + (K_{1APB} + K_{2APB}p) p \frac{\partial I_{\Gamma}}{\partial \delta}}{(T_e p + 1) \cdot (T_p p + 1)}; \quad c = \frac{K_{OU} \frac{\partial U_{\Gamma}}{\partial E'} + (K_{1APB} + K_{2APB}p) p \frac{\partial I_{\Gamma}}{\partial E'}}{(T_e p + 1) \cdot (T_p p + 1)};$$
$$d = \frac{K_{OU} \frac{\partial U_{\Gamma}}{\partial X_{VIIK}} + (K_{1APB} + K_{2APB}p) p \frac{\partial I_{\Gamma}}{\partial X_{VIIK}}}{(T_e p + 1) \cdot (T_p p + 1)}.$$

После раскрытия характеристического определителя, получено следующее характеристическое уравнение 5 порядка:

$$D(p) = a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5, \qquad (3.4)$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  – коэффициенты характеристического уравнения.

В данном случае для построения каждой из областей устойчивости параметр *К*<sub>2*уПК*</sub> будет фиксирован, поэтому частная производная сопротивления УПК по току (2.93) будет принимать конечное значение [137].

Поиск частных производных производился двумя путями:

1) отдельное утяжеление режима по каждому аргументу частных производных ( $\delta$ ,  $E_q$ ,  $X_{Y\Pi K}$ ) и поиск производных по соответствующему приращению режима;

2) по общему приращению режима, т.е. с однократным малым утяжелением режима по углу и поиском всех частных производных.

## 3.1.5. Области устойчивости для системы с регулируемым УПК и устройством APB по методу утяжеления режима по одному из параметров

Поскольку рассматриваемые параметры регулирования APB линейно входят в характеристическое уравнение (3.4), то данное уравнение можно представить в следующем виде:

$$D(p) = D_o(p) + K_{1APB}D_1(p) + K_{2APB}D_2(p) = 0.$$
(3.5)

Граница *D*-разбиения представляет собой отображение мнимой оси комплексной плоскости корней на плоскости исследуемых параметров, поэтому для построения области устойчивости принимаем в уравнении (3.5) чисто мнимый корень:

$$p = j\omega, \qquad (3.6)$$

$$D(j\omega) = D_0(j\omega) + K_{1APB}D_1(j\omega) + K_{2APB}D_2(j\omega) = 0.$$
(3.7)

Таким образом, уравнение (3.7) распадается на два уравнения:

$$K_{2APB} \operatorname{Re}_{2}(\omega) + K_{1APB} \operatorname{Re}_{1}(\omega) = -\operatorname{Re}_{0}(\omega),$$

$$K_{2APB} \operatorname{Im}_{2}(\omega) + K_{1APB} \operatorname{Im}_{1}(\omega) = -\operatorname{Im}_{0}(\omega).$$
(3.8)

При решении системы (3.8) относительно  $K_{1APB}$  и  $K_{2APB}$ , получены выражения для рассматриваемых коэффициентов регулирования. При подстановке в них значений  $\omega$  от - $\infty$  до + $\infty$  получены пара значений  $K_{1APB}$  и  $K_{2APB}$  для каждой  $\omega$ . По этим точкам построена кривая *D*-разбиения в плоскости рассматриваемых коэффициентов (рис. 3.11). Кривая *D*-разбиения разбивает плоскость  $K_{2APB}$ ,  $K_{1APB}$  на области D(m), показанные на рис. 3.11, где m – число неустойчивых корней. Чтобы выяснить, какая из областей D(m) является претендентом на область устойчивости, необходимо применить правило штриховки.



Рисунок 3.11 – Граница *D*-разбиения в плоскости коэффициентов регулирования APB

В целях проверки претендента на область устойчивости подставлены  $K_{1APB}$  и  $K_{2APB}$  из полученной области в характеристическое уравнение и вычислены корни. Для точки *а* ( $K_{1APB} = 1$  и  $K_{2APB} = 0,01$ ) получены следующие корни характеристического уравнения:  $p_1 = -156,255$ ;  $p_{2,3} = -13,465 \pm j.61,465$ ;  $p_{4,5} = -1,237 \pm j.3,594$ .

Для точки б ( $K_{IAPB} = 1$  и  $K_{2APB} = 0,1$ ) получены два неустойчивых корня из пяти:  $p_1 = 9475,87; p_2 = 14,457; p_3 = -13,025; p_{4,5} = -0,443 \pm j \cdot 2,194.$ 

Настройку регулируемых устройств, входящих в исследуемую систему, необходимо производить с учетом их влияния друг на друга. Иными словами, целесообразно выявить возможное изменение области устойчивости для коэффициентов регулирования АРВ при изменении коэффициента регулирования УПК. Это можно выполнить с помощью метода *D*-разбиения по трем параметрам [120]: для каждого интересующего значения коэффициента регулирования УПК нужно выполнить построение области устойчивости в координатах коэффициентов регулирования АРВ. Таким образом, суть метода *D*-разбиения по трем параметрам сводится к нескольким последовательным расчетам по методу *D*-разбиения по двум параметрам. При этом области устойчивости строятся либо в одной плоскости (рис. 3.12), либо в виде трехмерной фигуры (рис. 3.13).



Рисунок 3.12 – Граница *D*-разбиения в плоскости коэффициентов регулирования APB:  $1 - K_{2УПК} = 0$ ;  $2 - K_{2УПК} = 10$ 



Рисунок 3.13 – Область устойчивости в координатах коэффициентов регулирования УПК и АРВ

Следует отметить, что при увеличении коэффициента регулирования УПК область возможных значений коэффициентов регулирования APB сужается.

### 3.1.6. Области устойчивости для системы с регулируемым УПК и устройством APB по методу общего приращения режима

Используя частные производные по методу общего приращения режима, построена граница *D*-разбиения в координатах *K*<sub>1*APB*</sub>, *K*<sub>2*APB*</sub> (рис. 3.14).



Рисунок 3.14 – Граница *D*-разбиения при использовании метода общего приращения режима

Исследовано влияние коэффициента усиления  $K_{OU}$  АРВ СД генератора. Исследования проводились для значений коэффициента усиления в 20, 40, 50, 300 единиц. При  $K_{OU} = 20$  получили наименьшую область устойчивости, при  $K_{OU} = 40$  – наибольшую (рис. 3.15, здесь и далее штриховка области не производится для более наглядного представления вида областей; принято, что направление штриховки соответствует штриховке на рис. 3.14).



Рисунок 3.15 – Граница *D*-разбиения при изменении коэффициента усиления APB:  $1 - K_{0U} = 20$ ;  $2 - K_{0U} = 40$ ;  $3 - K_{0U} = 50$ ;  $4 - K_{0U} = 200$ 

Проведено изучение влияния коэффициента  $K_{2УПК}$  на область устойчивости (рис. 3.16). Установлено, что при уменьшении  $K_{2УПК}$  пределы изменения коэффициентов АРВ СД увеличиваются. Это объясняется тем, что увеличение  $K_{2УПК}$  ведет к более быстрому изменению сопротивления УУПК и, соответственно, более быстрому выходу на режим перекомпенсации, что ведет за собой сокращение области.



Рисунок 3.16 – Граница *D*-разбиения при изменении коэффициента регулирования  $K_{2УПK}$ : 1 –  $K_{2УПK}$  = 1; 2 –  $K_{2УПK}$  = 2; 3 –  $K_{2УПK}$  = 3

Дальнейшие исследования проведены для анализа влияния изменения значения сопротивления устройства УПК (исходной степени компенсации индуктивного сопротивления линии) на поведение границ области (рис. 3.17). Уменьшение значения сопротивления УУПК ведет к увеличению области устойчивости. Это происходит из-за того, что при уменьшении сопротивления УУПК снижается степень компенсации, увеличивается сопротивление связи между генератором и системой, поэтому требуется большее регулирующее воздействие АРВ генератора для поддержания необходимого уровня напряжения на выводах генератора.



Рисунок 3.17 – Граница *D*-разбиения при изменении степени компенсации линии:  $1 - X_{\text{УПК}} = 1,3; 2 - X_{\text{УПК}} = 1,6; 3 - X_{\text{УПК}} = 1,8$ 

В результате проведенного рассмотрения можно сделать следующее заключение:

1. Предложенная методика совместного получения возможных настроечных параметров регулирования УПК и АРВ позволяет выбирать коэффициенты, оказывающие положительное влияние на устойчивость исследуемой ЭЭС при осуществлении регулирования с помощью этих устройств. Подбор коэффициентов позволяет увеличить предел передаваемой мощности, улучшить апериодическую статическую устойчивость, а также отстроиться от колебательной неустойчивости ЭЭС, обусловленной спецификой закона регулирования УПК.

2. Определенные диапазоны изменения параметров регулирования УПК и АРВ для исходного рабочего режима и при увеличении регулирующего воздействия со стороны УПК свидетельствуют об уменьшении указанного диапазона для параметров регулирования АРВ.

3. Приведенные результаты показывают, что применение упрощенной модели для анализа колебательной устойчивости дает большое расхождение

с вычислительным экспериментом, использующим более детальное математическое описание.

4. Коэффициенты регулирования АРВ, выбранные при использовании упрощенной модели, входят в область устойчивости, полученную при более детальном математическом описании. Соответственно, 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.

5. Существующее расхождение обусловлено тем, что в исследуемой системе присутствует большое количество нелинейных элементов (УУПК, APB, CГ), а упрощенная модель не учитывает электромагнитные переходные процессы в элементах ЭЭС.

#### 3.2. Совместный выбор коэффициентов в двухмашинной ЭЭС

#### 3.2.1. Модель рассматриваемой ЭЭС

В данном разделе исследования производятся для системы, рассмотренной в главе 1: изолированная ЭЭС, содержащая управляемую ЛЭП с устройствами УУПК и УШР, а также при наличии АРВ-СД на генераторе (рис. 1.1-1.2). Параметры элементов схемы замещения приведены в приложении 1.

3.2.2. Методика построения областей устойчивости по результату протекания переходного процесса при возникновении «малого» возмущения

Принцип построения областей устойчивости аналогичен рассмотренному в предыдущем подразделе. В данном случае необходимо задаться значениями коэффициентов APB на одном из генераторов, а допустимую область коэффициентов APB на другом генераторе найти по результатам протекания переходного процесса после возникновения «малого» возмущения. Вычислительный эксперимент производится при фиксации одного коэффициента APB интересующего генератора (в данном случае это  $K_{2APB}$ ) и изменении второго ( $K_{1APB}$ ) для определения границы устойчивости. В качестве возмущения используется кратковременное (на 0,1 с) увеличение мощности турбины интересующего генератора на 5% от значения в исходном установившемся режиме. По результату протекания переходного процесса делается вывод об устойчивости. Для анализа используются зависимости угла ротора  $\delta_{12}$  и активной мощности  $P_T$ , выдаваемой соответствующим генератором. На рис. 3.18 и 3.19 представлены графики зависимостей при следующих условиях:  $K_{2YTIK} = 2$ ,  $K_{OUI} = K_{OU2} = 20$ ,  $K_{2APB} = 0$ , коэффициент  $K_{1APB}$  изменяется от 0 до 22 что соответствует наличию в системе APB сильного действия и работе УУПК.



Рисунок 3.18 – График изменения угла ротора  $\delta_{12}$  во времени при  $K_{OU} = 20$ ,  $K_{2APB} = 0$ : 1 –  $K_{1APB} = 26.5$ ; 2 –  $K_{1APB} = 5$ ; 3 –  $K_{1APB} = 0$ 



Рисунок 3.19 – График изменения выдаваемой генератором активной мощности  $P_{\Gamma}$  (1-3) и мощности турбины  $P_{T}$  (4) во времени при  $K_{OU} = 20, K_{2APB} = 0$ :  $1 - K_{1APB} = 26.5; 2 - K_{1APB} = 5; 3 - K_{1APB} = 0$ 

Результаты, полученные на рис. 3.18 и 3.19 свидетельствуют о том, что увеличение коэффициентов регулирования АРВ СД, как и в предыдущем случае, приводит к различным последствиям. При увеличении коэффициента регулирования вначале имеет место демпфирование графиков переходного процесса. Однако существует такое значение коэффициента, при котором дальнейшее его увеличение приводит к возникновению высокочастотных медленно-затухающих колебаний в системе. Получаемое явление свидетельствует о том, что рассматриваемый режим близок к границе колебательной устойчивости [142].

Графики на рис. 3.20, 3.21 соответствуют границе колебательной устойчивости – в системе имеют место незатухающие колебания угла и мощности.

128



Рисунок 3.20 – График изменения угла ротора  $\delta_{12}$  во времени при  $K_{0U} = 20$ ,  $K_{1APB} = 26.86, K_{2APB} = 0$ 



Рисунок 3.21 – График изменения выдаваемой генератором активной мощности  $P_{\Gamma}(1)$  и мощности турбины  $P_{T}(2)$  во времени при  $K_{0U} = 20, K_{1APB} = 26.86, K_{2APB} = 0$ 

Таким образом, значение  $K_{1APB} = 26,86$  при  $K_{2APB} = 0$  считается границей колебательной устойчивости.

129

Аналогичным образом найдены точки границы устойчивости и при других значениях *К*<sub>2*APB*</sub>.

Очевидно, что вне зависимости от сложности ЭЭС принцип нахождения границы колебательной устойчивости остается одинаков.

# 3.2.3. Области колебательной устойчивости генератора 1 при вариации настроечных параметров АРВ генератора 2

В работе рассмотрено нахождение областей устойчивости ЭЭС для АРВ сильного действия по производным угла ротора генератора. Проведено исследование влияния коэффициентов АРВ СД на колебательную устойчивость ЭЭС. Исходя из проведенных в п. 3.1.3 исследований, на генераторе 2 выбраны следующие коэффициенты АРВ СД:  $K_{1APB2} = 5$ ,  $K_{2APB2} = 0,5$ . Пользуясь вышеописанным методом, построены области устойчивости для генератора 1 (рис. 3.22).



Рисунок 3.22 – Области колебательной устойчивости исследуемой ЭЭС для АРВ СД генератора 1 при вариации настроечных параметров АРВ СД генератора 2:  $1 - K_{OU} = 20, K_{1APB2} = 20, K_{2APB2} = 2; 2 - K_{OU} = 20, K_{1APB2} = 10, K_{2APB2} = 1;$  $<math>3 - K_{OU} = 20, K_{1APB2} = 40, K_{2APB2} = 3$ 

Таким образом, вариация настроечных параметров АРВ СД генераторов противоположной станции не оказывает значительного влияния на области устойчивости рассматриваемого генератора. Для дальнейшего рассмотрения выбраны следующие значения коэффициентов АРВ СД генератора 1, входящие во все рассмотренные области:  $K_{1APB1} = 10$ ,  $K_{2APB1} = 0,2$ .

## 3.2.4. Исследование влияния коэффициента регулирования К<sub>2УПК</sub> на колебательную статическую устойчивость

Коэффициент регулирования  $K_{2VIIK}$  определяет степень изменения емкостного сопротивления УУПК в функции тока (1.85). Увеличение коэффициента  $K_{2VIIK}$  приводит к увеличению крутизны зависимости емкостного сопротивления от тока (рис. 1.16).

Для правильной настройки АРВ СД генераторов необходимо оценить влияние значения коэффициента  $K_{2VIIK}$  на колебательную устойчивость исследуемой ЭЭС. Для выявления влияния характеристики управляемого УПК на переходные процессы все результаты расчетов сравнивались с результатами, полученными для переходного процесса при постоянной степени компенсации, что осуществлялось введением коэффициента  $K_{2VIIK} = 0$ . Проведено исследование влияния коэффициента регулирования на изменение областей колебательной устойчивости. Исследование проведено для генератора 2 при мощности нагрузки равной  $S_{\text{нагр}} = 1500$  MBA, коэффициенте мощности нагрузки равном  $cos(\phi) = 0,707$  и для коэффициентов  $K_{2VIIK} = 0$ ,  $K_{2VIIK} = 2$  и  $K_{2VIIK} = 4$ .



Рисунок 3.23 – Области колебательной устойчивости исследуемой ЭЭС для АРВ СД генератора 2 при вариации коэффициента регулирования УУПК:  $1 - K_{2V\Pi K} = 0; 2 - K_{2V\Pi K} = 2; 3 - K_{2V\Pi K} = 4$ 

Также построены области колебательной устойчивости для генератора 1 при мощности нагрузки равной  $S_{\rm H} = 1500$  MBA и коэффициенте мощности нагрузки равном *cos* ( $\phi$ ) = 0,707. Настроечные параметры APB CД генератора 2 выбраны исходя из полученных ранее областей (рис. 3.23):  $K_{1APB2} = 20, K_{2APB2} = 2.$ 



Рисунок 3.24 – Области колебательной устойчивости исследуемой ЭЭС для АРВ СД генератора 1 при вариации коэффициента регулирования УУПК:  $1 - K_{2УПК} = 1; 2 - K_{2УПK} = 2; 3 - K_{2УПK} = 3; 4 - K_{2УПK} = 4; 5 - K_{2УПK} = 6$ 

Исходя из проведенных выше исследований, можно сделать вывод о том, что при увеличении степени регулирования сопротивления УУПК, области колебательной устойчивости для АРВ СД генераторов уменьшаются. Так как при большем значении степени регулирования емкостного сопротивления УУПК значение  $X_{\rm УПК}$  больше при том же токе, протекающем через УУПК, то соответственно степень компенсации реактивного сопротивления линии увеличивается. Это оказывает влияние на баланс реактивной мощности в исследуемой ЭЭС. Дальняя линия электропередачи генерирует большое количество реактивной мощности, что приводит к повышению уровней напряжения во всей системе [150]. В связи с этим при увеличении степени компенсации реактивного сопротивления линии потери реактивной мощности в линии снижаются, влияние генерируемой линией реактивной мощности увеличивается. Поэтому при выборе настроечных параметров АРВ СД необходимо учитывать изменение границ колебательной устойчивости при изменении регулирования емкостного сопротивления УУПК.

# 3.2.5. Исследование влияния состава нагрузки на колебательную статическую устойчивость

Рассмотрена работа системы при следующих условиях: степень компенсации индуктивного сопротивления линии 80%, полная мощность нагрузки составляет 2500 MBA, коэффициент мощности нагрузки изменяется от 0,2 до 0,8. Исследование проводилось для генератора 2. В исходном режиме взаимный угол между векторами ЭДС эквивалентных генераторов составляет  $\delta_0 = 50^\circ$ , что обеспечивает передачу мощности по линии от генератора 1 к нагрузке. При нахождении областей колебательной устойчивости для APB СД генератора 2, значения коэффициентов APB СД генератора 1 приняты  $K_{1APB1} = 10, K_{2APB1} = 0,2.$ 



Рисунок 3.25 – Области колебательной устойчивости исследуемой ЭЭС для АРВ СД генератора 2 при вариации коэффициента мощности нагрузки,  $S_{\rm H} = 2500 \text{ MB} \cdot \text{A}, K_{2 \textit{VIIK}} = 0$  (') и  $K_{2 \textit{VIIK}} = 2$  (''):  $1 - cos(\varphi) = 0,2$ ;  $2 - cos(\varphi) = 0,4$ ;  $3 - cos(\varphi) = 0,6$ ;  $4 - cos(\varphi) = 0,707$ ;  $5 - cos(\varphi) = 0,8$ 

Исходя из проведенного исследования, сделан вывод, что при одном и том же коэффициенте, определяющем степень регулирования УПК, и фиксированной полной мощности нагрузки, увеличение доли активной мощности нагрузки приводит к увеличению области колебательной устойчивости исследуемой ЭЭС. Это связано с распределением реактивной мощности в исследуемой ЭЭС. Как сказано ранее, дальняя линия электропередачи генерирует большое количество реактивной мощности. Однако при высокой доле реактивной составляющей нагрузки генераторам необходимо выдать большее реактивной мощности в сеть, что и ведет к сокращению области устойчивости при снижении коэффициента мощности нагрузки.

### 3.2.6. Исследование влияния мощности нагрузки на колебательную статическую устойчивость

Рассмотрена работа системы при следующих условиях: степень компенсации индуктивного сопротивления линии 80%, полная мощность нагрузки изменяется от 400 до 4000 MB·A, коэффициент мощности нагрузки 0,707. В исходном режиме взаимный угол между векторами ЭДС эквивалентных генераторов составляет 50°, что обеспечивает передачу мощности по линии от генератора 1 к нагрузке. При нахождении областей колебательной устойчивости для АРВ СД генератора 1, значения коэффициентов АРВ СД генератора 2 приняты  $K_{1APB2} = 5$ ,  $K_{2APB2} = 0,5$ .



Рисунок 3.26 – Области колебательной устойчивости исследуемой ЭЭС для АРВ СД генератора 1 при вариации мощности нагрузки при  $K_{2VIIK} = 0$ :  $1 - S_{\rm H} = 400$  MBA;  $2 - S_{\rm H} = 1000$  MBA;  $3 - S_{\rm H} = 1500$  MBA;  $4 - S_{\rm H} = 2000$  MBA;  $5 - S_{\rm H} = 2500$  MBA;  $6 - S_{\rm H} = 3000$  MBA;  $7 - S_{\rm H} = 4000$  MBA

Как видно из полученного графика (рис. 3.26), увеличение полной мощности нагрузки приводит к увеличению области допустимых коэффициентов АРВ СД. При этом характер области устойчивости сохраняется неизменным. Это связано с регулирующим эффектом нагрузки. При увеличении полной мощности нагрузки напряжение в точке подключения нагрузки уменьшается, соответственно уровни напряжения в ЭЭС будут ниже [146]. Для обеспечения исходного установившегося режима потребуется большее значение ЭДС, создаваемой генераторами, а, значит, устойчивое состояние система будет сохранять при больших значениях коэффициентов АРВ.

Так же рассмотрено влияние мощности нагрузки на колебательную статическую устойчивость для APB СД генератора 2. При нахождении областей колебательной устойчивости для APB СД генератора 2, значения коэффициентов APB СД генератора 1 приняты  $K_{1APB1} = 10$ ,  $K_{2APB1} = 0,2$ . Иссле-

136

дование проводилось при изменении значения коэффициента регулирования УУПК от 0 до 2.



Рисунок 3.27 – Области колебательной устойчивости исследуемой ЭЭС для АРВ СД генератора 2 при вариации мощности нагрузки при  $K_{2V\Pi K} = 0$  (') и  $K_{2V\Pi K} = 1$  (''):  $1 - S_{\rm H} = 400$  MBA;  $2 - S_{\rm H} = 1000$  MBA;  $3 - S_{\rm H} = 1500$  MBA;  $4 - S_{\rm H} = 2000$  MBA;  $5 - S_{\rm H} = 2500$  MBA;  $6 - S_{\rm H} = 3000$  MBA;  $7 - S_{\rm H} = 4000$  MBA

Рассмотренные на рис. 3.27 зависимости показывают, что увеличение мощности нагрузки ведет к увеличению области допустимых коэффициентов АРВ генератора 2.

#### 3.3. Выводы по третьей главе

Анализ полученных характеристик показал влияние изменения различных параметров ЭЭС на колебательную статическую устойчивость. Сделаны следующие выводы:

1. Вариация настроечных параметров АРВ СД генераторов противоположной станции не оказывает значительного влияния на области устойчивости рассматриваемого генератора. 2. Увеличение коэффициента регулирования сопротивления УУПК *К*<sub>2УПК</sub> приводит к уменьшению области колебательной устойчивости для АРВ СД генераторов.

3. Увеличение доли активной мощности нагрузки при фиксированной полной мощности нагрузки приводит к увеличению области колебательной устойчивости исследуемой ЭЭС, что связано с распределением реактивной мощности в исследуемой ЭЭС.

4. Увеличение полной мощности нагрузки приводит к увеличению области допустимых коэффициентов АРВ СД, что связано с регулирующим эффектом нагрузки.

5. Таким образом, выбор коэффициентов АРВ СД является многофакторной задачей, решение которой определяется для каждого конкретного случая в зависимости от параметров системы, таких как коэффициент регулирования *К*<sub>2*уПК*</sub>, мощность и состав нагрузки и т.д.

# ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИССЛЕДУЕМОЙ ЭЭС ПРИ «БОЛЬШИХ» ВОЗМУЩЕНИЯХ

Рассмотрение вопросов устойчивости работы ЭЭС тесно связано с физической возможностью её реализации и функционирования. Также в крупных системах именно вопросы устойчивости являются определяющим фактором, ограничивающим переток мощности по сечениям [10]. Особенно актуальными являются исследования устойчивости в системах, содержащих управляемые устройства (УУПК, УШР, АРС, АРВ и т.д.), поскольку их влияние на переходные режимы оказывается достаточно сильным. В результате протекание переходных процессов может кардинально отличаться от процессов, происходящих в традиционной нерегулируемой системе. Также возможны такие режимы работы ЭЭС и настройки управляемых устройств, при которых происходит перерегулирование и самораскачивание системы при возникновении возмущений.

«Большие» возмущения возникают в электроэнергетической системе гораздо реже чем «малые», однако их опасность нельзя недооценивать, поскольку наличие таких возмущений, как короткие замыкания и различного рода «большие» небалансы мощности в системе могут привести к выходу генерирующего оборудования из синхронной работы. Последствия таких аварийных ситуаций могут быть катастрофическими, вплоть до системных аварий (блэкаутов) с отключением целых районов и предприятий электрических сетей [151, 152].

Данная глава посвящена вопросам исследования динамической устойчивости изолированной двухмашинной системы, содержащей станции соизмеримой мощности при наличии управляемых устройств, таких как УУПК, УШР, АРС и АРВ. Основные задачи, рассматриваемые в рамках данной главы: 1. Особенности расчета переходных процессов при «больших» возмущениях в изолированной системе.

2. Сравнение результатов расчетов переходных процессов при различной детальности математического описания исследуемой системы.

3. Анализ взаимного влияния управляемых устройств на качество протекания переходных процессов.

Основная цель – выявление максимального эффекта применения управляемых устройств на характер переходных процессов при «больших» возмущениях и улучшение динамической устойчивости.

### 4.1. Математическая модель рассматриваемой системы при «больших» возмущениях

Математическая модель для ЭЭС, представленной на рис. 1.1 может быть сформирована исходя из уравнений для отдельных элементов ЭЭС, записанных в главе 1, дополненных уравнениями баланса токов в сети. Они представляют собой модель, позволяющую исследовать как переходные, так и установившиеся режимы.

Синхронный генератор 1:

$$p\psi_{D1} = \omega_0 \left( -r_{D1} i_{D1} \right), \tag{4.1}$$

$$p\psi_{Q1} = \omega_0 \left( -r_{Q1} i_{Q1} \right), \tag{4.2}$$

$$p\psi_{f1} = \omega_0 \left( u_{f1} + \Delta u_{f1} - r_{f1} i_{f1} \right).$$
(4.3)

$$p\psi_{d1} = \omega_0 \left( -u_{d1} - r_{a1} i_{d1} \right) - \omega_1 \psi_{q1}, \qquad (4.4)$$

$$p\psi_{q1} = \omega_0 \left( -u_{q1} - r_{a1} i_{q1} \right) + \omega_1 \psi_{d1}, \qquad (4.5)$$

$$\psi_{d1} = x_{d1}i_{d1} + x_{aD1}i_{D1} + x_{ad1}i_{f1}, \qquad (4.6)$$

$$\psi_{q1} = x_{q1}i_{q1} + x_{aQ1}i_{Q1}, \qquad (4.7)$$

$$\psi_{D1} = x_{D1}i_{D1} + x_{aD1}i_{d1} + x_{1f1}i_{f1}, \qquad (4.8)$$

$$\psi_{Q1} = x_{Q1}i_{Q1} + x_{aQ1}i_{q1}, \qquad (4.9)$$

$$\psi_{f1} = x_{f1}i_{f1} + x_{ad1}i_{d1} + x_{1f1}i_{D1}, \qquad (4.10)$$

$$p\omega_{1} = \frac{\omega_{0}}{T_{j1}} (M_{T1} - M_{_{\mathfrak{M}1}}), \qquad (4.11)$$

$$M_{_{\mathcal{M}1}} = \psi_{d1} i_{q1} - \psi_{q1} i_{d1}.$$
(4.12)

Трансформатор 1:

$$pi_{d1} = \omega_0 \left( \frac{u_{d1} - u_{d3}}{x_{m1}} - \frac{r_{m1}}{x_{m1}} i_{d1} \right) - \omega_1 i_{q1}, \qquad (4.13)$$

$$pi_{q1} = \omega_0 \left( \frac{u_{q1} - u_{q3}}{x_{m1}} - \frac{r_{m1}}{x_{m1}} i_{q1} \right) + \omega_1 i_{d1}.$$
(4.14)

ЛЭП 1:

$$pi_{d4} = \omega_0 \left( \frac{u_{d3} - u_{d4}}{x_{n1}} - \frac{r_{n1}}{x_{n1}} i_{d4} \right) - \omega_1 i_{q4}, \qquad (4.15)$$

$$pi_{q4} = \omega_0 \left( \frac{u_{q3} - u_{q4}}{x_{n1}} - \frac{r_{n1}}{x_{n1}} i_{q4} \right) + \omega_1 i_{d4}, \qquad (4.16)$$

$$pu_{d3} = \omega_0 \left( x_{b1} i_{d3} - \frac{x_{b1}}{r_{g1}} u_{d3} \right) - \omega_1 u_{q3}, \qquad (4.17)$$

$$pu_{q3} = \omega_0 \left( x_{b1} i_{q3} - \frac{x_{b1}}{r_{g1}} u_{q3} \right) + \omega_1 u_{d3}, \qquad (4.18)$$

$$pu_{d4} = \omega_0 \left( x_{b1} i_{d5} - \frac{x_{b1}}{r_{g1}} u_{d4} \right) - \omega_1 u_{q4}, \qquad (4.19)$$

$$pu_{q4} = \omega_0 \left( x_{b1} i_{q5} - \frac{x_{b1}}{r_{g1}} u_{q4} \right) + \omega_1 u_{d4}.$$
(4.20)

ШР 1:

$$pi_{d6} = \omega_0 \left( \frac{u_{d4}}{x_{p1} + \Delta x_{y111P1}} - \frac{r_{p1}}{x_{p1} + \Delta x_{y111P1}} i_{d6} \right) - \omega_1 i_{q6}, \qquad (4.21)$$

$$pi_{q6} = \omega_0 \left( \frac{u_{q4}}{x_{p1} + \Delta x_{yUIP1}} - \frac{r_{p1}}{x_{p1} + \Delta x_{yUIP1}} i_{q6} \right) + \omega_1 i_{d6}.$$
(4.22)

УПК:

$$p(u_{d4} - u_{d5}) = \omega_0 x_{VIIK} i_{d7} - \omega_1 (u_{q4} - u_{q5}), \qquad (4.23)$$

$$p(u_{q4} - u_{q5}) = \omega_0 x_{VIIK} i_{q7} + \omega_1 (u_{d4} - u_{d5}).$$
(4.24)

ШР 2:

$$pi_{d8} = \omega_0 \left( \frac{u_{d5}}{x_{p2} + \Delta x_{yIIIP2}} - \frac{r_{p2}}{x_{p2} + \Delta x_{yIIIP2}} i_{d8} \right) - \omega_1 i_{q8}, \qquad (4.25)$$

$$pi_{q8} = \omega_0 \left( \frac{u_{q5}}{x_{p2} + \Delta x_{VIIIP2}} - \frac{r_{p2}}{x_{p2} + \Delta x_{VIIIP2}} i_{q8} \right) + \omega_1 i_{d8}.$$
(4.26)

ЛЭП 2:

$$pi_{d10} = \omega_0 \left( \frac{u_{d5} - u_{d6}}{x_{n2}} - \frac{r_{n2}}{x_{n2}} i_{d10} \right) - \omega_1 i_{q10}, \qquad (4.27)$$

$$pi_{q10} = \omega_0 \left( \frac{u_{q5} - u_{q6}}{x_{n2}} - \frac{r_{n2}}{x_{n2}} i_{q10} \right) + \omega_1 i_{d10}, \qquad (4.28)$$

$$pu_{d5} = \omega_0 \left( x_{b2} i_{d9} - \frac{x_{b2}}{r_{g2}} u_{d5} \right) - \omega_1 u_{q5}, \qquad (4.29)$$

$$pu_{q5} = \omega_0 \left( x_{b2} i_{q9} - \frac{x_{b2}}{r_{g2}} u_{q5} \right) + \omega_1 u_{d5}, \qquad (4.30)$$

$$pu_{d6} = \omega_0 \left( x_{b2} i_{d11} - \frac{x_{b2}}{r_{g2}} u_{d6} \right) - \omega_1 u_{q6}, \qquad (4.31)$$

$$pu_{q6} = \omega_0 \left( x_{b2} i_{q11} - \frac{x_{b2}}{r_{g2}} u_{q6} \right) + \omega_1 u_{d6}.$$
(4.32)

143

Нагрузка:

$$pi_{d12} = \omega_0 \left( \frac{u_{d6}}{x_{_{_H}}} - \frac{r_{_{_H}}}{x_{_{_H}}} i_{d12} \right) - \omega_1 i_{q12}, \qquad (4.33)$$

$$pi_{q12} = \omega_0 \left( \frac{u_{q6}}{x_{\mu}} - \frac{r_{\mu}}{x_{\mu}} i_{q12} \right) + \omega_1 i_{d12}.$$
(4.34)

Трансформатор 2:

$$pi_{d2to1} = \omega_0 \left( \frac{u_{d2} - u_{d6}}{x_{m2}} - \frac{r_{m2}}{x_{m2}} i_{d2to1} \right) - \omega_1 i_{q2to1}, \qquad (4.35)$$

$$pi_{q2to1} = \omega_0 \left( \frac{u_{q2} - u_{q6}}{x_{m2}} - \frac{r_{m2}}{x_{m2}} i_{q2to1} \right) + \omega_1 i_{d2to1}.$$
(4.36)

Синхронный генератор 2:

$$p\psi_{D2} = \omega_0 \left( -r_{D2} i_{D2} \right), \tag{4.37}$$

$$p\psi_{Q2} = \omega_0 \left( -r_{Q2} i_{Q2} \right), \tag{4.38}$$

$$p\psi_{f2} = \omega_0 \left( u_{f2} + \Delta u_{f2} - r_{f2} i_{f2} \right).$$
(4.39)

$$p\psi_{d2} = \omega_0 \left( -u_{d2} - r_{a2} i_{d2} \right) - \omega_2 \psi_{q2}, \qquad (4.40)$$

$$p\psi_{q2} = \omega_0 \left( -u_{q2} - r_{a2} i_{q2} \right) + \omega_2 \psi_{d2}, \qquad (4.41)$$

$$\psi_{d2} = x_{d2}i_{d2} + x_{aD2}i_{D2} + x_{ad2}i_{f2}, \qquad (4.42)$$

$$\psi_{q2} = x_{q2}i_{q2} + x_{aQ2}i_{Q2}, \qquad (4.43)$$

$$\psi_{D2} = x_{D2}i_{D2} + x_{aD2}i_{d2} + x_{1f2}i_{f2}, \qquad (4.44)$$

$$\psi_{Q2} = x_{Q2}i_{Q2} + x_{aQ2}i_{q2}, \qquad (4.45)$$

$$\psi_{f2} = x_{f2}i_{f2} + x_{ad2}i_{d2} + x_{1f2}i_{D2}, \qquad (4.46)$$

$$p\omega_{2} = \frac{\omega_{0}}{T_{j2}} \left( M_{T2} - M_{_{\mathcal{M}2}} \right), \tag{4.47}$$

$$M_{_{\mathcal{M}2}} = \psi_{d2} i_{q2} - \psi_{q2} i_{d2}. \tag{4.48}$$

Уравнения баланса токов, исходя из схемы замещения, представленной на рис. 1.2 записываются следующим образом:

$$i_{d1} = i_{d3} + i_{d4}, \tag{4.49}$$

$$i_{q1} = i_{q3} + i_{q4}, \tag{4.50}$$

$$i_{d4} = i_{d5} + i_{d6} + i_{d7}, \tag{4.51}$$

$$i_{q4} = i_{q5} + i_{q6} + i_{q7}, \qquad (4.52)$$

$$i_{d7} = i_{d8} + i_{d9} + i_{d10}, \qquad (4.53)$$

$$i_{q7} = i_{q8} + i_{q9} + i_{q10}, \qquad (4.54)$$

$$i_{d10} + i_{d2to1} = i_{d11} + i_{d12}, \tag{4.55}$$

$$i_{q10} + i_{q2to1} = i_{q11} + i_{q12}.$$
(4.56)

Уравнения преобразования координат:

$$i_{d_{2to1}} = i_{d_2} \cdot \cos \delta_{12} - i_{q_2} \cdot \sin \delta_{12}, \qquad (4.57)$$

$$i_{q2to1} = i_{q2} \cdot \cos \delta_{12} + i_{d2} \cdot \sin \delta_{12}, \qquad (4.58)$$

$$u_{d2to1} = u_{d2} \cdot \cos \delta_{12} - u_{q2} \cdot \sin \delta_{12}, \qquad (4.59)$$

$$u_{q2to1} = u_{q2} \cdot \cos \delta_{12} + u_{d2} \cdot \sin \delta_{12}.$$
 (4.60)

Собственные и взаимные углы:

$$p\delta_1 = \omega_1 - \omega_0, \qquad (4.61)$$

$$p\delta_2 = \omega_2 - \omega_0, \qquad (4.62)$$

$$p\delta_{12} = \omega_1 - \omega_2. \tag{4.63}$$

АРВ-СД СГ 1:

$$\Delta u_{f1} = \left( K_{oU1} \left( U_{01} - U_{\Gamma 1} \right) + k_{11} \left( \omega_1 - \omega_0 \right) + k_{21} \frac{\omega_0}{T_{j1}} \left( M_{T1} - M_{_{3M1}} \right) \right) \cdot \frac{r_{f1}}{x_{ad1}}, \quad (4.64)$$

$$U_{\Gamma_1} = \sqrt{\left(u_{d_1}^2 + u_{q_1}^2\right)}.$$
(4.65)
АРВ-СД СГ 2:

$$\Delta u_{f2} = \left( K_{oU2} \left( U_{02} - U_{\Gamma 2} \right) + k_{12} \left( \omega_2 - \omega_0 \right) + k_{22} \frac{\omega_0}{T_{j2}} \left( M_{T2} - M_{_{3M2}} \right) \right) \cdot \frac{r_{f2}}{x_{ad2}}, (4.66)$$

$$U_{\Gamma 2} = \sqrt{\left(u_{d2}^{2} + u_{q2}^{2}\right)}.$$
(4.67)

АРС СГ 1:

$$M_{T1} = M_{T01} \left( 1 - K_{M1} \left( \frac{\omega_1 - \omega_0}{\omega_0} \right) \right).$$
(4.68)

АРС СГ 2:

$$M_{T2} = M_{T02} \left( 1 - K_{M2} \left( \frac{\omega_2 - \omega_0}{\omega_0} \right) \right).$$
(4.69)

УУПК:

$$x_{y_{IIK}}(I_{7}) = \frac{10^{6}}{\omega_{0}(K_{1y_{IIK}} - K_{2y_{IIK}}I_{7}I_{\delta}) \cdot Z_{\delta}},$$
(4.70)

$$I_7 = \sqrt{\left(i_{d7}^2 + i_{q7}^2\right)} \,. \tag{4.71}$$

УШР 1:

$$\Delta x_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}\mathcal{P}1}(U_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}\mathcal{P}1}) = -K_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}\mathcal{P}1} \cdot (U_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}\mathcal{P}1} - U_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}\mathcal{P}01}), \qquad (4.72)$$

$$U_{YIIIP1} = \sqrt{\left(u_{d4}^{2} + u_{q4}^{2}\right)}.$$
(4.73)

УШР 2:

$$\Delta x_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}\mathcal{P}2} \left( U_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}\mathcal{P}2} \right) = -K_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}\mathcal{P}2} \cdot \left( U_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}\mathcal{P}2} - U_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}\mathcal{P}02} \right), \tag{4.74}$$

$$U_{y_{IIIP2}} = \sqrt{\left(u_{d5}^{2} + u_{q5}^{2}\right)}.$$
(4.75)

Математическая модель, содержащая все рассматриваемые управляемые элементы состоит из 75 нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений. Данная модель учитывает электромеханический, а также электромагнитные переходные процессы во всех элементах сети.

# 4.2. Особенности расчета переходных процессов при «больших» возмущениях

Для расчета переходных процессов необходимо подготовить следующие исходные данные для расчетов:

1. Значения параметров элементов сети, таких как сопротивления, постоянные времени регулирующих устройств, синхронных машин и т.д. Определение данных значений показано в приложении 1.

2. Начальные приближения в виде результатов расчета исходного установившегося режима.

3. Значения коэффициентов регулирования, описывающих силу влияния управляемых элементов на режимы ЭЭС.

4. Записать исходные уравнения в алгебраизованном виде с помощью преобразований, указанных в п. 1.13.

Расчет первого шага во времени производится на основе параметров исходного УР, существовавшего до возникновения «большого» возмущения. В последующих шагах в качестве начальных приближений используются результаты, полученные на предыдущем шаге по времени. Такой метод позволяет иметь лучшую сходимость итерационного процесса метода Ньютона при наличии плавно протекающих процессов. Однако при наличии резких изменений режима (например, КЗ с последующим его отключением) решение системы уравнений может расходиться. Исходя из этого при переходе от аварийного режима к послеаварийному необходимо использовать начальные приближения исходного режима, поскольку значение тока КЗ много превышает как исходное, так и значение в послеаварийном режиме. Данная особенность связана с наличием УУПК в рассматриваемой ЭЭС [13].

В качестве значения шага интегрирования принято оптимальное значение, равное  $\Delta t = 0,001$  с. Уменьшение шага интегрирования не приводит к увеличению точности расчетов, а лишь увеличивает время расчета переходных процессов. Увеличение шага интегрирования приводит к появлению несинусоидальности изменения режимных параметров при быстропротекающих процессах.

В данной диссертационной работе в качестве «больших» возмущающих воздействий рассмотрены «набросы» мощности на генераторы станций.

# 4.3. Выбор характеристик УПК по условию улучшения динамической устойчивости

Специфика закона регулирования емкостного сопротивления управляемого УПК обуславливает необходимость детального рассмотрения влияния настроечных параметров УПК на динамическую устойчивость режимов ЭЭС, а также на качество переходных процессов.

В качестве «большого» возмущающего воздействия рассматривались сбросы и набросы активной мощности генераторов станций. Важно отметить, что при увеличении мощности, выдаваемой одной станцией, необходимо снижать мощность второй станции, чтобы соблюдался баланс мощности в системе при неизменной частоте, так как нагрузка остается прежней. Результаты расчетов переходных процессов, полученные при различных законах регулирования УПК, сравнивались со случаем применения нерегулируемой продольной емкостной компенсации.

Целью данного исследования является выявление общих требований к закону регулирования управляемого УПК, которые учитывали бы возможность максимального улучшения характеристик как установившихся, так и переходных режимов ЭЭС. Также необходимо выявить возможные ограничения, которые помогли бы избежать возникновения нежелательных явлений, таких как резонансный переход.

Влияние различных законов регулирования управляемого УПК на качество переходного процесса при 10% набросе мощности представлено на рис. 4.1-4.5. Показано, что увеличение коэффициента регулирования  $K_{2УПК}$ заметно снижает взаимный угол, при котором устанавливается новый УР. Кроме того, чем более резко изменяется сопротивление УПК при изменении тока (то есть чем больше значение коэффициента  $K_{2VIIK}$ ), тем быстрее затухает переходный процесс.



Рисунок 4.1 – Кривые изменения угла между векторами ЭДС генераторов при изменении мощностей турбин:  $1 - K_{2YITK} = 0$ ;  $2 - K_{2YITK} = 2$ ;  $3 - K_{2YITK} = 4$ ;  $4 - K_{2YITK} = 6$ 



Рисунок 4.2 – Кривые изменения электромагнитной мощности генератора  $P_1$  при изменении мощностей турбин:  $1 - K_{2V\Pi K} = 0$ ;  $2 - K_{2V\Pi K} = 2$ ;  $3 - K_{2V\Pi K} = 4$ ;  $4 - K_{2V\Pi K} = 6$ 



Рисунок 4.3 – Кривые изменения электромагнитной мощности генератора  $P_2$  при изменении мощностей турбин:  $1 - K_{2VIIK} = 0$ ;  $2 - K_{2VIIK} = 2$ ;  $3 - K_{2VIIK} = 4$ ;  $4 - K_{2VIIK} = 6$ 



Рисунок 4.4 – Кривые изменения напряжения на «левом» выводе УПК при изменении мощностей турбин:  $1 - K_{2УПК} = 0$ ;  $2 - K_{2УПK} = 2$ ;  $3 - K_{2УПK} = 4$ ;  $4 - K_{2УПK} = 6$ 

149



Рисунок 4.5 – Кривые изменения напряжения на «правом» выводе УПК при изменении мощностей турбин:  $1 - K_{2V\Pi K} = 0$ ;  $2 - K_{2V\Pi K} = 2$ ;  $3 - K_{2V\Pi K} = 4$ ;  $4 - K_{2V\Pi K} = 6$ 

Далее рассмотрен переходный процесс с резонансным переходом, который возможен при дальнейшем увеличении значения коэффициента  $K_{2УПК}$ при сохранении той же исходной степени компенсации. В таком режиме нарушается динамическая устойчивость системы (рис. 4.6-4.7). Анализ приведенных зависимостей показывает, что в определенный момент времени имеет место «переворачивание» мощностей, выдаваемых станциями, что является признаком наступления резонансного перехода.



Рисунок 4.6 – Кривая изменения угла между векторами ЭДС генераторов при резонансном переходе при *K*<sub>2*уПК*</sub>=7,5



Рисунок 4.7 – Кривые изменения электромагнитной мощности генераторов при резонансном переходе при *K*<sub>2*VIIK*</sub>=7,5: 1 – *P*<sub>1</sub>; 2 – *P*<sub>2</sub>

На рис. 4.8 приведены результаты расчетов переходных процессов при набросе мощности с учетом влияния АРВ. Видно, что АРВ положительно влияет на качество переходного процесса. При совместном регулировании

151

АРВ и УУПК достигается наилучшее качество переходного процесса: при прочих равных условиях новый установившийся режим наступает практически без колебаний режимных параметров и при меньшем значении угла между ЭДС генераторов станций.



Рисунок 4.8 – Кривые изменения угла между векторами ЭДС генераторов при  $K_{oU} = 20$ :  $1 - K_{2YIIK} = 0$ ,  $K_{1APBI} = K_{2APBI} = K_{1APB2} = K_{2APB2} = 0$ ;  $2 - K_{2YIIK} = 0$ ,  $K_{1APBI} = 5$ ,  $K_{2APBI} = 0.5$ ,  $K_{1APB2} = 10$ ,  $K_{2APB2} = 0.2$ ;  $3 - K_{2YIIK} = 2$ ,  $K_{1APBI} = 5$ ,  $K_{2APBI} = 0.5$ ,  $K_{1APB2} = 10$ ,  $K_{2APB2} = 0.2$ 

#### 4.4. Выводы по четвертой главе

1. По результатам анализа переходных процессов выявлено положительное влияние совместного регулирования УУПК и АРВ на динамическую устойчивость.

2. Коэффициент регулирования *К*<sub>2УПК</sub> должен иметь максимально возможное значение, обеспечивающее быстрое затухание переходного процесса при наличии «большого» возмущения, с учетом ограничений по условию обеспечения статической устойчивости режима.

3. Основным условием обеспечения динамической устойчивости является отстройка от резонансного перехода.

#### 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  $X_{VIIK}(I)$  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 апериодической устойчивости системы при различных вариантах регулирования управляемых устройств. Выявлено, что совместное регулирование УУПК и УШР позволяет повысить предел апериодической 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.

### СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) – управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока;

GCSC (Gate Controlled Series Compensator) – продольная компенсация, управляемая тиристорными выключателями;

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) – трёхэлектродный силовой полупроводниковый прибор, сочетающий два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления);

MSSC (Mechanically Switched Series Capacitor) – дискретноуправляемая (с помощью выключателей) продольная компенсация;

TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator) – тиристорноуправляемое устройство продольной компенсации;

АРВ – автоматический регулятор возбуждения;

АРВ-ПД – автоматический регулятор возбуждения пропорционального действия;

АРВ-СД – автоматический регулятор возбуждения сильного действия;

АРС – автоматический регулятор скорости (турбины);

АСК – асинхронизированный компенсатор;

БСК – батарея статических конденсаторов;

БУПК – безреакторное устройство продольной компенсации;

В – возбудитель;

ВН – высшее напряжение;

ДЗЛ – дифференциальная защита линии;

ДЛЭП – дальняя линия электропередачи;

ДЛЭП СВН – дальняя линия электропередачи сверхвысокого напряже-

ния;

ДПР – датчик положения ротора генератора;

ДУС – датчик угловой скорости генератора;

ДФЗ – дифференциально-фазная защита;

КЗ – короткое замыкание;

ЛЭП – линия электропередачи;

ОВ – обмотка возбуждения;

ОРПМ – объединенный регулятор потоков мощности;

ПС – подстанция;

рис. – рисунок;

СГ – синхронный генератор;

СК – синхронный компенсатор;

СТАТКОМ – статический компенсатор мощности на основе IGBT транзисторов;

СТК – статический тиристорный компенсатор;

табл. – таблица;

ТН – трансформатор напряжения;

ТНЗНП – токовая направленная защита нулевой последовательности;

ТУПК – тиристорно-управляемая продольная компенсация;

УПК – (неуправляемое) устройство продольной компенсации;

УР – установившийся режим;

УУПК – управляемое устройство продольной компенсации;

УШР – управляемый шунтирующий реактор;

ФПУ – фазоповоротное устройство;

ШР – шунтирующий реактор:

ЭДС – электродвижущая сила;

ЭС – электрическая система;

ЭЭС – электроэнергетическая система.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доливо-Добровольский М.О. *Современное развитие техники трехфазного тока* // Электричество. — №4. — Февраль 1900. — с. 49-57.

2. Доливо-Добровольский М.О. Современное развитие техники трехфазного тока (окончание) // Электричество. — №5-6. — Март 1900. — с. 65-78.

3. C.B., Поспелов Г.Е. Повышение Кузьмич эффективности электроэнергетических систем и развитие их управляемости в свете гибких FACTS электропередач // применения Известия **BV30B** И энергетических объединений СНГ. Энергетика. — №6. — 2007. — с. 15-19.

4. Балабанов М.С., Хамитов Р.Н. *FACTS-устройства. Выбор при проектировании электрооборудования предприятий* — Омск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет", 2015. — 184 с.

 Кощеев Л.А., Шлайфштейн В.А. Об эффективности применения управляющих устройств в электрической сети // Электрические станции. — №12. — 2005. — с. 30-38.

6. Гусев С.И., Шакарян Ю.Г., Новиков Н.Л. Развитие устройств FACTS // [RusCable.ru] URL: http://www.ruscable.ru/article/Razvitie\_ustrojstv\_FACTS/ (дата обращения: 21/Июль/2012).

7. Брянцев А.М., Базылев Б.И., Лурье А.И. [и др.] Стабилизация напряжения сети управляемыми подмагничиванием реакторами и конденсаторными батареями // Электрические станции. — №6. — 2013. — с. 40-47.

8. Володарский Л.Г., Довганюк И.Я., Мнев Р.Д. [и др.] *Результаты* испытаний асинхронизированных компенсаторов типа ACK-100-4УХЛ4 на ПС 500 кВ Бескудниково // Электрические станции. — №7 (984). — 2013. — с. 43-52.

 Миролюбов А.В., Рокотян С.С. Линия электропередачи 400кВ Куйбышев— Москва // Электричество. — №7. — 1952. — с. 5-10. 10. Фокин В.К. Повышение выдачи мощности Саяно-Шушенской ГЭС с помощью емкостной компенсации на линии СШ ГЭС – «Новокузнецкая», «Кузбасская» // Энергия единой сети. — №2 (7). — 2013. — с. 66-73.

11. Unal I., Pan S., Faried S.O. Coordinated Control of Two Phase Imbalanced Hybrid Series Capacitive Compensation Schemes for Damping Power System Oscillations //. — Manchester, United Kingdom, 2011. — pp. 1229-1234.

12. Ивакин В.Н., Магницкий А.А., Шульга Р.Н. Применение установок тиристорно-управляемой продольной компенсации на линиях электропередачи переменного тока // Электротехника. — №9. — 2006. — с. 42-49.

Москвин И.А. Устойчивость электроэнергетической системы с регулируемой продольной компенсацией : автореф. дис... канд. техн. наук – Иваново, 2014. – 20 с.

14. Мартиросян А.А. Повышение устойчивости электроэнергетических систем с применением регулируемой продольной компенсации:автореф. дис ... канд. техн. наук. – Иваново, 2009. – 20 с.

15. Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П. Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с сетевыми устройствами гибких электропередач // Электричество. — №12. — 2013. — с. 2-13.

16. Кочкин В.И., Пешков М.В., Романенко Д.В. [и др.] Линии электропередачи с параллельной и последовательной компенсацией реактивной мощности // Вестник ВНИИЭ. — 2004. — с. 173-184.

17. Sahoo A.K., Dash S.S., Thyagarajan T. *Power flow study including FACTS devices* // Journal of applied sciences. — Vol. 10 (15). — 2010. — pp. 1563-1571.

18. Murali D., Rajaram M., Reka N. Comparison of FACTS Devices for Power System Stability Enhancement // International Journal of Computer Applications.
— Vol. 8, Issue 4. — October 2010. — pp. 30-35.

19. Ивакин В.Н. Внешние характеристики устройств гибких передач переменного тока и их влияние на характеристики мощности управляемых

линий электропередачи переменного тока // Электротехника. — №12. — 2005. — с. 10-19.

20. Фокин В.К., Филатова Л.К. Электропередачи переменного тока и их применение в ЕНЭС России // Энергия единой сети. — №3 (8). — 2013. — с. 26-37.

21. Карташев И.И., Строев В.А., Шаров Ю.В. *Научные исследования кафедры* электроэнергетических систем // Вестник МЭИ. — №1. — 2014. — с. 30-34.

22. Кочкин В.И. *Новые технолоии повышения пропускной способности ЛЭП* // Новое в Российской электроэнергетике. — №8. — 2010. — с. 5-16.

23. Mohammed O.H., Cheng S.J., Zakaria A. Steady-state modeling of SVC and TCSC for power flow analysis // Proceedings of IMECS, Vol. 2. — Hong Kong, 2009. — pp. 1-5.

24. Eminoglu U., Hocaoglu M.H., Yalcinoz T. *Transmission Line Shunt and Series Compensation with Voltage Sensitive Loads* // International Journal of Electrical Engineering Education. — Vol. 46, Issue 4. — October 2009. — pp. 354-369.

25. Дорофеев В.В., Шакарян Ю.Г., Кочкин В.И. [и др.] Перспективы применения в ЕЭС России гибих (управляемых) систем электропередачи переменного тока // Электрические станции. — №8. — 2004. — с. 10-12.

26. Habur K.,O'Leary D. FACTS — Flexible Alternating Current Transmission Systems for Cost Effective and Reliable Transmission of Electrical Energy // Siemens-World Bank document – Final Draft Report. — 2004.

27. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах — М.: Издательство "ТОРУС ПРЕСС", 2011.

28. Фокин В.К. Выбор типа, систем управления и законов регулирования устройств продольной емкостной компенсации // Энергия единой сети. — №4. — 2017. — с. 28-39.

29. Wantanabe E.H., De Souza L.F.W., De Jesus F.D., et al. GCSC-Gate Controlled Series Capacitor: A New FACTS Device for Series Compensation of

Transmission Lines // International Conference IEEE/PES and Distribution. — Latin America, 2004. — pp. 981-986.

30. de Souza L.F.W., Watanabe E.H., da Rocha Alves J.E. *Thyristor and Gate-Controlled Series Capacitors: A Comparison of Components Rating* // IEEE Transactions on Power Delivery. — Vol. 23, Issue 2. — 2008. — pp. 899-906.

Ивакин В.Н., Магницкий А.А. Устройства продольной компенсации на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах // Электротехника. — №10. — 2008. — с. 47-57.

32. Zellagui M., Chaghi A. Impact of Series FACTS Devices (GCSC, TCSC and TCSR) on Distance Protection Setting Zones in 400 kV Transmission Line // An Update on Power Quality — Rijeka: InTech, 2013.

33. Zellagui M., Chagh A. A Comparative Study of GCSC and TCSC Effects on MHO Distance Relay Setting in Algerian Transmission Line // International Journal of Engineering and Technology (IJET). — Vol. 2, Issue 2. — February 2012. — pp. 220-228.

34. Кучумов Л.А.,Игнайкин А.И., "Устройство продольной емкостной компенсации" Изобретение № 653677, 18.02.1977.

35. Игольников Ю.С., "Устройство компенсации реактивной мощности (варианты)" Изобретение № 2 475 916 С1, 7.09.2011.

36. Панфилов Д.И., Асташев М.Г., Рашитов П.А. [и др.], "Малогабаритное устройство продольной компенсации" Изобретение № 168 424 U1, 18.08.2016.

37. Александров Г.Н. *Передача* электрической энергии на дальние расстояния // Электричество. — №7. — 2000. — с. 8-15.

Карташев И.И., Рыжов Ю.П. Способы и средства управления режимами
 электроэнергетических систем и качеством электроэнергии //
 Электричество. — №9. — 2007. — с. 20-25.

39. Рыжов Ю.П., Некукар А.Р. О возможности сооружения на линиях СВН устройств продольной емкостной компенсации без шунтирующих

*реакторов на выводах конденсаторных батарей* // Электричество. — №1. — 2012. — с. 9-18.

40. Mallesham M., Vathsal S. *Hybrid Series Capacitive Compensation Scheme In Damping Power System Oscillations Using TCSC //* International Journal of Engineering Research and Applications. — Vol. 4, Issue 1. — January 2014. — pp. 266-270.

41. Rai D., Faried S.O., Ramakrishna G., et al. *An SSSC-Based Hybrid Series Compensation Scheme Capable of Damping Subsynchronous Resonance //* IEEE Transactions on Power Delivery. — Vol. 27, Issue 2. — 2012. — pp. 531-540.

42. Kommamuri S., Sureshbabu P. *Optimal Location and Design of TCSC controller For Improvement of Stability* // International Journal of Instrumentation, Control and Automation. — Vol. 1, Issue 2. — 2011. — pp. 105-110.

43. Шамардин А.О. Исследование влияния установки продольной компенсации на режимы дальней электропередачи // Современные научные исследования и инновации. 2016, №6 [Электронный ресурс] URL: http://web.snauka.ru/issues/2016/06/69596 (дата обращения: 02/06/2017).

44. Анисимова Н.Д., Веников В.А., Зарудский Г.К. Исследование влияния местоположения и степени продольной емкостной компенсации на пропускную способность электропередач 750 кВ. – Сборник статей «Дальние электропередачи 750 кВ». Ч. 1. Воздушные линии/Под общ. ред. А.М. Некрасова и С.С. Рокотяна. — М.: Энергия, 1974. — 224 с.

45. Gama C., Angquist L. Commissioning and Operative Experience of TCSC for Damping Power Oscillation in the Brazilian North-South Interconnection // CIGRE, Session 2000, Paris, France. (paper № 14-104).

46. Ивакин В.Н. Исследование характеристик управляемой продольной компенсациикак устройства для регулирования потоков мощности гибких линий электропередачи переменного тока // Электротехника. — №6. — 2003. — с. 56-61.

47. Антонов А.В., Фокин В.К., Тузлукова Е.В. О применении устройств продольной компенсации в высоковольтных электрических сетях России // Энергия единой сети. — №6 (29). — 2016. — с. 26-41.

48. Рыжов Ю.П., Мотибирджанди А.А. Возможные ограничения при успользовании управляемой продольной компенсации в линиях электропередачи 220-500 кВ // Вестник МЭИ. — №5. — 2004. — с. 26-31.

49. Kumar P.S.P., Vijaysimha N., Saravanan C.B. *Static Synchronous Series Compensator for series compensation of EHV Transmission Line //* International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. — Vol. 2, Issue 7. — July 2013. — pp. 3180-3190.

50. Зарудский Г.К., Радилов Т.В. *Расчет установившихся режимов* электропередачи сверхвысокого напряжения, оснащенной устройствами гибких электропередач // Электричество. — №1. — 2014. — с. 5-11.

51. Колобродов Е.Н. *Новые предложения по применению управляемого устройства продольной компенсации линий* // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — №2. — 2012. — с. 93-95.

52. Shankar R., Srivastava J. Transient Stability Study by Using Thyristor Controlled Series Compensator Controller for Single Machine Infinite Bus (SMIB) System // International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT). — Vol. 2, Issue 5. — September 2013. — pp. 30-34.

53. Desai V., Pandya V., Markana A. Enhancement of Transient Stability of Power System with Variable Series Compensation // International Journal of Engineering Research and Development (IJERD) ISSN: 2278-067X Recent trends in Electrical and Electronics & Communication Engineering (RTEECE 17th – 18th April 2015). — Vadodara, 2015. — pp. 62-88.

54. Yarlagadda V., Sankar Ram B.V., Rao K.R.M. *Automatic Control of Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)* // International Journal of Engineering Research and Applications. — Vol. 2, Issue 3. — May-Jun 2012. — pp. 444-449.

55. Поспелов Г.Е. Эффективность компенсирующих устройств для управления параметрами и режимами электрических сетей и их

*регулирования.* // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. — №4. — 2007. — с. 5-13.

56. Kumar P.S., Swapna CH. *Enhancement of Power System using TCSC with Fuzzy PID Controller //* International Journal of Recent Trends in Engineering & Research (IJRTER). — Vol. 2, Issue 4. — April 2016. — pp. 512-518.

57. Singh P., Mathew L., Chatterji S. MATLAB Based Simulation of TCSC FACTS Controller // Proceedings of 2nd National Conference on Challenges & Opportunities in Information Technology (COIT-2008) RIMT-IET. — Mandi Gobindgarh, 2008. — pp. 295-298.

58. Колобродов Е.Н., Законьшек Я. Традиционные алгоритмы и новые решения в области регулирования УУПК // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем. — Санкт-Петербург, 2011.

59. Рагозин А.А., Таланов С.Б. *Применение синхронных компенсаторов для дальних линий электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами* // Электричество. — №4. — 2002. — с. 23-27.

60. Рагозин А.А., Таланов С.Б. Условия самовозбуждения систем, содержащих дальние линии электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами // Электричество. — №11. — 1999. — с. 2-7.

61. Мисриханов М.Ш., Гречин В.П., Серов В.А. Математическое моделирование переходных процессов в сложных электроэнергетических системах при больших возмущениях Россия — Москва - Нижний Новгород - Иваново: [б. и.], 2014. — 243 с.

62. Крючков И.П., Старшинов В.А., Гусев Ю.П. [и др.] *Переходные процессы* в электроэнергетических системах : Учебник для ВУЗов — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 416 с.

63. Khanzode N., Nemade S., Punse N., et al. *Series compensated transmission line protected with MOV //* International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering. — Vol. 2, Issue 2. — February 2014. — pp. 1145-1148.

64. Глускин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах, Том 1, в 2 томах, Россия — М.: "Знак", 2009. — 568 с.

65. Dhote R.P., Patil P.S. *Application of Thyristor Controlled Series Capacitor and its Impact on the Distance protection* // International Journal of Engineering Research and Applications. — April 2014. — pp. 5-10.

66. Perera N., Narendra K., Ponram K., et al. Series Compensated Transmission Line Protection Using Distance Relays // PACWorld Americas. — 2014.

67. Abdelaziz A.Y., Ibrahim A.M., Mansour M.M., et al. *Modern approaches for protection of series compensated transmission lines* // Electric Power System Research. — 2005. — pp. 85-98.

68. Виштибеев А.В., Глущенко Е.А., Гузеев А.В. [и др.] Особенности релейной защиты линий для активно-адаптивных сетей на примере устройства продольной компенсации // Новое в российской электроэнергетике. — №8. — 2012. — с. 38-46.

69. Булычев А.В., Колобородов Е.Н. Автоматика и защита линий электропередачи с управляемой продольной компенсацией в аварийных режимах // Энергетик. — №12. — 2012. — с. 19-24.

70. Колобродов Е.Н. Совершенствование управления и защиты воздушных линий электропередачи с устройством продольной компенсации : автореф. дис... канд. техн. наук – Москва, 2013. – 20 с.

71. Воропай Н.И., Этингов П.В., Удалов А.С. [и др.] Координированное противоаварийное управление нагрузкой и устройствами FACTS // Электричество. — №10. — 2005. — с. 25-38.

72. Масленников В.А., Устинов С.М. Динамические свойства и статическая устойчивость дальних электропередач с управляемыми шунтирующими реакторами // Изв. РАН Энергетика. — №3. — 1999. — с. 68-78.

73. Кашин И.В., Смоловик С.В. Устойчивость работы протяженных электропередач переменного тока с регулируемыми устройствами поперечной компенсации // Электричество. — №2. — 2001. — с. 8-15.

74. Жермон А., Саженков А.В., Строев В.А. Анализ установившихся режимов и пропускной способности электропередачи с управляемой поперечной компенсацией // Электричество. — №2. — 2006. — с. 2-6.

75. Александров Г.Н., Ле Тхань Бак Уменьшение потерь мощности в дальних линиях электропередачи с управляемыми реакторами // Электричество. — №3. — 2007. — с. 8-15.

76. Рагозин А.А. Условия статической устойчивости дальних линий электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами // Электричество. — №5. — 1997. — с. 11-14.

77. Рагозин А.А., Попов М.Г. Анализ эффективности применения управляемых шунтирующих реакторов в системообразующих сетях энергообъединений // Электричество. — №2. — 2002. — с. 26-28.

 Саженков А.В. Статические характеристики электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами // Электричество. — №3. — 2006. — с. 17-21.

79. Sharma P.R., Kumar A., Kumar N. *Optimal location for shunt connected FACTS devices in a series compensated long transmission line //* Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. — Vol. 15, Issue 1. — 2007. — pp. 321-328.

80. Беляев А.Н., Евдокунин Г.А., Смоловик С.В. [и др.] *О применении устройств управляемой поперечной компенсации для транзитных электропередач класса 500 кВ* // Электричество. — №2. — 2009. — с. 2-13.

81. Карымов Р.Р., Лурье А.И., Сафиуллин Д.Х., "Устройство компенсации реактивной мощности" Изобретение № 2 479 907 С1, авг. 19, 2011.

82. Кочкин В.И. *Реактивная мощность в электрических сетях* // Новости электротехники. — №3 [45]. — 2007.

83. Александров Г.Н. Об эффективности применения компенсирующий устройств на линиях электропередачи // Электричество. — №4. — 2005. — с. 62-67.

84. Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П. О влиянии быстродействия управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа на стабилизацию напряжения и электромеханические переходные процессы // Электричество. — №5. — 2015. — с. 4-14.

85. Александров Г.Н.,Л Лунин В.П. Управляемые реакторы — Санкт-Петербург: Третье издание Центра подготовки кадров энергетики, 2005. — 200 с.

86. Назарова Е.С. Разработка методики выбора мест установки устройств поперечной компенсации реактивной мощности в сетях 330-500 кВ : автореф. дис... канд. техн. наук – Иваново, 2012. – 20 с.

87. Зарудский Г.К. О результатах исследований по применению продольной емкостной компенсации в электропередачах СВН // Электричество. — №9. — 2007. — с. 48-51.

88. Зарудский Г.К. Исследования электропередач сверхвысокого напряжения при глубокой компенсации параметров: автореф. дис ... канд. техн. наук. – МЭИ, 1970. – 20 с.

89. Голов В.П., Кормилицын Д.Н., Мартиросян А.А. [и др.] Управляемая продольная компенсация линий сверхвысокого напряжения. Монография. — Иваново: ФГБОУВО Иван. гос. энерг. ун–т;, 2017. — 100 с.

90. Голов В.П., Кормилицын Д.Н., Мартиросян А.А. [и др.] Области колебательной устойчивости изолированной системы из двух станций при вариации характеристики и мощности нагрузки // Вестник ИГЭУ. — №6. — 2015. — с. 29-34.

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

92. Голов В.П., Мартиросян А.А., Москвин И.А., Кормилицын Д.Н. Использование управляемых электропередач с регулируемой продольной

компенсацией для реализации адаптивных сетей // Электротехника. — №2. — 2017. — с. 60-66.

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

94. Голов В.П., Градов Н.А., Кормилицын Д.Н. [и др.] Выбор коэффициентов регулирования автоматического регулятора возбуждения для сохранения колебательной устойчивости электроэнергетической системы с управляемой линией электропередачи // Вестник ИГЭУ. — №5. — 2017. — с. 27-36.

95. Golov V.P., Martirosyan A.A., Moskvin I.A., Kormilitsyn D.N. Using controlled electric-power lines with controlled series compensation in Smart-Grid networks // Russian Electrical Engineering. — №2, Vol. 88. — 2017. — pp. 81-86. 96. Голов В.П., Кормилицын Д.Н., Мартиросян А.А. [и др.] Области колебательной устойчивости изолированной системы из двух станций при вариации характеристики и мощности нагрузки // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. — №6. — 2016. — с. 22-27.

97. Никитина С.Д., Кормилицын Д.Н. Управляемая продольная компенсация ЛЭП СВН для повышения предела передаваемой мощности при изменении мощности шунтирующих реакторов // Вестник Российского национального комитета СИГРЭ. Выпуск №10. — Иваново, 2016. — с. 71-74.

98. Голов В.П., Градов Н.А., Кормилицын Д.Н. [и др.] Выбор коэффициентов регулирования автоматического регулятора возбуждения для сохранения колебательной устойчивости электроэнергетической системы с управляемой линией электропередачи // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. — №2. — 2018. — с. 10-20.

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

100. Кормилицын Д.Н., Москвин И.А. К вопросу об использовании управляемых шунтирующих реакторов на выводах устройств продольной компенсации // Электроэнергетика. Девятая международная научнотехническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2014", Иваново, 15-17 апреля 2014 г: материалы конференции, Том 3, ч. 1. — Иваново, 2014. — с. 60-63.

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

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

103. Кормилицын Д.Н., Голов В.П. Влияние управляемых шунтирующих реакторов на устойчивость электроэнергетической системы с управляемой продольной компенсацией // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать вторая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, 25—26 февраля 2016 г.: тезисы докладов, Том 3. — М., 2016. — с. 265.

104. Кормилицын Д.Н., Голов В.П. Влияние управляемых шунтирующих реакторов на устойчивость электроэнергетической системы с управляемой

продольной компенсацией // Электроэнергетика. Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2016", г. Иваново, 5-7 апреля 2016 г.: материалы конференции, Том 3. — Иваново, 2016. — с. 52-53.

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

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

107. Golov V., Kormilicyn D., Martirosyan A., et al. Shunt reactors power discrete and smooth control for improvement stability of electrical power systems containing controlled series compensation devices // 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.

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

109. Шатохина Д.И., Кормилицын Д.Н. Определение токов симметричных коротких замыканий ЭЭС с управляемой линией электропередачи // Электроэнергетика. Двенадцатая международная научно-техническая

конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2017", г. Иваново, 4-6 апреля 2017 г.: материалы конференции, Том 3. — Иваново, 2017. — с. 45-46.

110. Введенский Н.Е., Казарин А.С., Кормилицын Д.Н. Динамическая устойчивость электроэнергетической системы использованием с комплексного управления блоком продольной компенсации // Электроэнергетика. Двенадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2017", г. Иваново, 4-6 апреля 2017 г.: материалы конференции, Том 3. — Иваново, 2017. — c. 50-52.

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

112. Градов Н.А., Скоропеева Е.С., Кормилицын Д.Н. Влияние состава и мощности нагрузки на статическую устойчивость ЭЭС // Электроэнергетика. Тринадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2018", г. Иваново, 3-5 апреля 2018 г.: материалы конференции, Том 3. — Иваново, 2018. — с. 18.

113. Сидоров А.В., Москвин И.А., Кормилицын Д.Н. [и др.], "SSST" Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016660082, зарегистрирована в реестре программ для ЭВМ 06.09.16.

114. Кормилицын Д.Н., "Controlled electric power system stability" Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018660842, зарегистрирована в реестре программ для ЭВМ 28.08.18.

115. РД 34.20.577. Методические указания по определению устойчивости энергосистем. Часть 1, 1977.

116. Братолюбов А.А. *Расчетные параметры синхронных машин: учебное пособие* — Иваново: ГОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина", 2008. — 116 с.

117. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока — Л.:
Энергия, 1980. — 256 с.

118. Горев А.А. *Переходные процессы синхронной машины* — Л.—М.: Государственное энергетическое издательство, 1950. — 551 с.

119. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Математические модели элементов электроэнергетических систем в расчетах установившихся режимов и переходных процессов: учебное пособие — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. — 115 с.

120. Веников В.А. *Переходные* электромеханические процессы в электрических системах — М.: Высшая школа, 1985. — 536 с.

121. Голов П.В., Шаров Ю.В., Строев В.А. Система математических моделей для расчета переходных процессов в сложных электроэнергетических системах // Электричество. — №5. — 2007. — с. 2-11.

122. Строев В.А., Шульженко С.В. Математическое моделирование элементов электрических систем: Курс лекций. — М.: Изд-во МЭИ, 2002. — 56 с.

123. Строев В.А., Голов П.В. Модели для исследования переходных процессов в сложной регулируемой ЭЭС // Изв. РАН Энергетика. — №6. — 2010. — с. 66-74.

124. Куликов Ю.А. *Переходные процессы в электроэнергетических системах* : учебное пособие — М.: Издательство «Омега-Л», 2013. — 384 с.

125. Голов П.В. К вопросу о моделировании переходных процессов в сложных
ЭЭС // Вестник ИГЭУ. — №5. — 2004. — с. 57-62.

126. Голов В.П. Применение регулируемой компенсации линии электропередач // Изв. Вузов, Энергетика. — №6. — 1978. — с. 3-8.

127. Голов В.П., Мартиросян А.А., Москвин И.А. [и др.] Влияние законов регулирования УПК с тиристорным управлением на устойчивость электроэнергетической системы // Материалы 6 международной научно-практической конференции «21 век: фундаментальная наука и технологии», North Charleston, USA. — 2015. — с. 105-110.

128. Billinton R., Fotuhi-Firuzabad M., Faried S.O. *Power System Reliability Enhancement using a Thyristor Controlled Series Capacitor* // IEEE Transactions on Power Systems. — Vol. 14, Issue 1. — February 1999. — pp. 369-374.

129. Jesus F.D., Watanabe E.H., Souza L.F.W., et al. Analysis of SSR mitigation using gate-controlled series capacitors // Proceedings of Power Electronics Specialist Conference. — Recife, Brazil, 2005. — pp. 1402-1407.

130. Лидоренко Н.С. Аномальная электрическая емкость и экспериментальные модели гиперпроводимости // Докл. АН СССР, Том 216, № 6, 1974. — с. 1261-1263.

131. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов —
М.: Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.

132. Ортега Д., Пул Н. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений: пер. с англ. — М.: Наука, 1986. — 288 с.

133. Павловская Т.А. *С/С++*. *Программирование на языке высокого уровня* — СПб: Питер, 2009. — 461 с.

134. Андреев В.С. *Теория нелинейных электрических цепей: Учебное пособие для вузов* — М.: Радио и связь, 1982. — 280 с.

135. Голов В.П., Мартиросян А.А., Москвин И.А. [и др.] Устойчивость электроэнергетической системы из двух электрических станций с регулируемой продольной компенсацией // Вестник ИГЭУ. — №5. — 2012. — с. 26-31.

136. Бабаков Н.А., Воронов А.А., Воронова А.А. [и др.] *Теория* автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. І. Теория линейных систем автоматического

*управления*; 2-е издание, переработанное и дополненное под ред. Воронова А.А. — М.: Высшая школа, 1986. — 367 с.

137. Голов В.П., Москвин И.А. Выбор характеристик регулируемого устройства продольной компенсации по условию обеспечения колебательной статической устойчивости // Вестник ИГЭУ. — №5. — 2014. — с. 21-26.

138. Костюк О.М. Элементы теории устойчивости энергосистем — Киев: "Наукова думка", 1983. — 296 с.

139. Калентионок Е.В. *Устойчивость* электроэнергетических систем — Минск: Техноперспектива, 2008. — 375 с.

140. Голов В.П., Мартиросян А.А., Москвин И.А. *Расчет характеристик установившихся режимов электроэнергетической системы с регулируемым устройством продольной компенсации* // Вестник ИГЭУ. — №6. — 2012. — с. 18-22.

141. Бессонов Л.А. *Теоретические основы электротехники*. Электрические *цепи* — М.: Юрайт, 2016. — 702 с.

142. Веников В.А., Анисимова Н.Д., Долгинов А.И. Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах — М.: Высшая школа, 1964. — 198 с.

143. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 390 с.

144. Ежков В.В., Зеленохат Н.И., Литкенс И.В. [и др.] Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях: Учеб. пособие для вузов под ред. В.А. Строева — М.: Знак, 1996. — 224 с.

145. Горяченко В.Д. Элементы теории колебаний: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений; Издание второе переработанное и дополненное — М.: Высшая школа, 2001. — 395 с.

146. Электрические системы. Т.1. Математические задачи
электроэнергетики: под ред. В.А. Веникова — М.: Высшая школа, 1970. —
336 с.

147. Kundur P. *Power System Stability and Control* — New-York: McGraw-Hill Professional Publishing, 1994. – p. 1176.

148. Строев В.А., Кузнецов О.Н. Электромеханические переходные процессы
в электроэнергетических системах: Курс лекций: учебное пособие — М.:
Издательский дом МЭИ, 2013. — 120 с.

149. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем под ред.Жукова Л.А. — М.: Энергия, 1979. — 456 с.

150. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов — М.: Издательский дом МЭИ, 2007. — 488 с.

151. "Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations," U.S.-Canada Power System Outage Task Force, 2004.

152. "Rapporto sul blackout italiano del 28 settembre 2003 ," Ufficio federale dell'energia UFE, 2003.

153. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций; 4-е издание, переработанное и дополненное — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 608 с.

154. Справочник по проектированию электрических сетей: под ред. Д.Л. Файбисовича; 4-е издание, переработанное и дополненное — М.: ЭНАС, 2012. — 376 с.

155. Справочник по проектированию электроэнергетических систем: под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 352 с.

156. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях: под ред.

В.А. Веникова — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 504 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЭС

Рассматриваемая в диссертационной работе ЭЭС (рис. 1.1) имеет схему замещения, представленную на рис. 1.2. Для проведения правильных и достоверных расчетов необходимо определить значение параметров элементов схемы замещения ЭЭС.

Поскольку расчеты производятся в системе относительных единиц, при расчетах заданы базисные величины. Две из них задаются произвольно, остальные рассчитываются по известным соотношениям:

$$S_{\delta} = 3400 \text{ MBA},$$
 (II.1.1)

$$U_{\delta} = 500 \text{ kB},$$
 (II.1.2)

$$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{U_{\sigma}\sqrt{3}} = \frac{3400}{500\sqrt{3}} = 3.926 \text{ KA},\tag{\Pi.1.3}$$

$$Z_{\delta} = \frac{U_{\delta}^{2}}{S_{\delta}} = \frac{500^{2}}{3400} = 73.529 \text{ Om}, \tag{\Pi.1.4}$$

где  $S_{\delta}, U_{\delta}, I_{\delta}, Z_{\delta}$  – базисные значения мощности, напряжения, тока и сопротивления соответственно.

#### Генераторы

Электрические станции представлены эквивалентными генераторами. На каждой станции установлены по 8 генераторов типа ТВВ-320-2 с параметрами, указанными в табл. П.1.1 [153, 154]

Таблица П.1.1 Параметры синхронного турбогенератора ТВВ-320-2

| $P_{H}, MBT$ | cos φ         | <i>U</i> <sub>н</sub> , кВ | η, % | $f_0,$ Гц | <i>п</i> , об/мин | $GD^2$ , t·m <sup>2</sup> , |
|--------------|---------------|----------------------------|------|-----------|-------------------|-----------------------------|
| 300          | 0,85          | 20                         | 98,7 | 50        | 3000              | 29,8                        |
| Таблиі       | іа П.1.1 Окон | чание                      |      |           |                   |                             |

| <i>x</i> " <sub><i>d</i></sub> , o.e. | <i>x</i> ' <sub><i>d</i></sub> , o.e. | <i>x</i> <sub><i>d</i></sub> , o.e. | $x_{\sigma}$ , o.e. | <i>x</i> <sub>2</sub> , o.e. | <i>x</i> <sub>0</sub> , o.e. | <i>r</i> <sub><i>f</i></sub> , Ом | <i>r</i> <sub><i>a</i></sub> , Ом | <i>T"</i> <sub>d</sub> , c |
|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 0,173                                 | 0,258                                 | 1,698                               | 0,17                | 0,211                        | 0,0879                       | 0,1145                            | 0,001335                          | 0,112                      |

На одном валу с генераторами работают паровые турбины К-300–240 с моментом инерции  $GD_T^2 = 49$  т·м<sup>2</sup> [155].

Полная мощность одного агрегата:

$$S_{\Gamma} = \frac{P_{\mu}}{\cos \varphi} = \frac{300}{0.85} = 352,941 \text{ MBA.}$$
 (II.1.5)

Полная мощность всей станции из 8 блоков генераторов:

$$S_{\Gamma\Sigma} = n_{\Gamma} \cdot S_{\Gamma} = 8 \cdot 352,9411 = 2823,529 \text{ MBA}, \tag{\Pi.1.6}$$

где  $n_{\Gamma}$  – число блоков генераторов на станции.

Приведение реактивных сопротивлений генератора к базисным условиям:

$$x_d = x_{d_{o.e.}} \frac{S_{\tilde{o}}}{S_{\Gamma\Sigma}} = 1,698 \frac{3400}{2823,529} = 2,045 \text{ o.e.},$$
 (II.1.7)

$$x_{\sigma} = x_{\sigma_{o.e.}} \frac{S_{\delta}}{S_{\Gamma\Sigma}} = 0.17 \frac{3400}{2823,529} = 0.205 \text{ o.e.}, \tag{\Pi.1.8}$$

$$x'_{d} = x'_{d_{o.e.}} \frac{S_{\tilde{o}}}{S_{\Gamma\Sigma}} = 0,258 \frac{3400}{2823,529} = 0,311 \text{ o.e.},$$
 (II.1.9)

$$x''_{d} = x''_{d_{o.e.}} \frac{S_{\tilde{o}}}{S_{\Gamma\Sigma}} = 0,173 \frac{3400}{2823,529} = 0,208 \text{ o.e.}$$
 (II.1.10)

Взаимное сопротивление обмотки статора и обмотки возбуждения:

$$x_{ad} = x_d - x_\sigma = 2,045 - 0,205 = 1,84$$
 o.e. (II.1.11)

Сопротивление рассеяния обмотки возбуждения:

$$x_{\sigma f} = x_{ad} \frac{x'_d - x_{\sigma}}{x_d - x'_d} = 1,84 \frac{0,311 - 0,205}{2,045 - 0,311} = 0,1124 \text{ o.e.}, \quad (\Pi.1.12)$$

Сопротивление обмотки возбуждения:

$$x_f = \frac{x_{ad}^2}{x_d - x'_d} = \frac{1,84^2}{2,045 - 0,311} = 1,95241 \text{ o.e.}$$
(II.1.13)

Базисное сопротивление одного генератора:

$$Z_{\delta 1} = \frac{U_{\mu}^{2}}{S_{\Gamma}} = \frac{20^{2}}{352,941} = 1,133 \text{ Om.}$$
(Π.1.14)

Сопротивление обмотки статора и обмотки возбуждения в относительных единицах, приведенных к базисной мощности одного генератора:

$$r_{f1} = \frac{r_{f[OM]}}{Z_{\delta 1}} = \frac{0.115}{1.133} = 0.101029 \text{ o.e.}, \qquad (\Pi.1.15)$$

$$r_{a1} = \frac{r_{a[OM]}}{Z_{\delta 1}} = \frac{0,001335}{1,133} = 0,0011779 \text{ o.e.}$$
(II.1.16)

Приведение активных сопротивлений генератора к базисным условиям:

$$r_f = r_{f1} \frac{S_{\delta}}{S_{\Gamma\Sigma}} = 0,101029 \frac{3400}{2823,529} = 0,1216562 \text{ o.e.}, \quad (\Pi.1.17)$$

$$r_a = r_{a1} \frac{S_{\delta}}{S_{\Gamma\Sigma}} = 0,0011779 \frac{3400}{2823,529} = 0,0014184 \text{ o.e.}$$
 (II.1.18)

Сопротивления рассеяния демпферных обмоток генератора:

$$x_{\sigma D} = \frac{1}{\frac{1}{x_{d}^{*} - x_{\sigma}} - \frac{1}{x_{ad}} - \frac{1}{x_{\sigma f}}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{0,208 - 0,205} - \frac{1}{1,84} - \frac{1}{0,1124}}} = 0,00374 \text{ o.e.}, \quad (\Pi.1.19)$$

$$x_{\sigma Q} = \frac{1}{\frac{1}{x_{\sigma d}^{*} - x_{\sigma}} - \frac{1}{x_{ad}}} = \frac{1}{\frac{1}{0.208 - 0.205} - \frac{1}{1.84}} = 0,00362 \text{ o.e.}$$
(II.1.20)

Сопротивления демпферных обмоток генератора:

$$x_D = x_{\sigma D} + x_{ad} = 0,00374 + 1,84 = 1,84371 \text{ o.e.}, \qquad (\Pi.1.21)$$

$$x_Q = x_{\sigma Q} + x_{ad} = 0,00374 + 1,84 = 1,84359$$
 o.e. (II.1.22)

Постоянная инерции пары генератор-турбина [156]:

$$T_{J1} = 2,74 \cdot 10^{-6} \frac{\left(GD^2 + GD_T^2\right) \cdot n^2}{S_T} =$$
  
= 2,74 \cdot 10^{-6} \frac{\left(29,8^2 + 49^2\right) \cdot 3000^2}{352,941} = 6,395 c. (\Pi.1.23)

Эквивалентная постоянная инерции 8 блоков генератор-турбина [156]:

$$T_J = T_{J1} \frac{S_{\Gamma\Sigma}}{S_{\delta}} = 6,395 \frac{2823,529}{3400} = 5,311 \text{ c.}$$
 (II.1.24)

Сверхпереходная постоянная времени синхронной машины по продольной оси, приведенная к базисным условиям:

$$T''_{d} = T''_{d1} \frac{S_{\Gamma\Sigma}}{S_{\delta}} = 0,112 \frac{2823,529}{3400} = 0,093 \text{ c.}$$
 (II.1.25)

Активные сопротивления демпферных обмоток генератора:

$$r_{D} = \frac{\left(x_{D} \cdot x_{d} - x_{ad}^{2}\right) \cdot x_{d}^{*}}{\omega_{0} \cdot x_{d} \cdot x_{d}^{*} \cdot x_{d}^{*} \cdot T_{d}^{*}} = \frac{\left(1,84371 \cdot 2,045 - 1,84^{2}\right) \cdot 0,208}{314,159 \cdot 2,045 \cdot 0,311 \cdot 0,093} = 0,00431316 \text{ o.e.}, \qquad (\Pi.1.26)$$

$$r_Q = r_D \frac{x_Q}{x_D} = 0,00431316 \frac{1,84359}{1,84371} = 0,00431 \text{ o.e.}$$
 (II.1.27)

## Трансформаторы

На электрических станциях установлено по 8 трансформаторов типа ТДЦ-400000/500. в блоке с генераторами. Параметры трансформаторов указаны в табл. П.1.2 [154]

Таблица П.1.2 Параметры трансформатора ТДЦ-400000/500

| <i>S</i> <sub>н</sub> ,<br>МВт | Δ <i>Р<sub>КЗ</sub></i> ,<br>кВт | <i>U<sub>BH</sub></i> ,<br>кВ | <i>U<sub>НН</sub></i> ,<br>кВ | U <sub>K</sub> , % | $\Delta P_x$ ,<br>кВт | <i>I</i> <sub>x</sub> , % | <i>r</i> <sub>m</sub> ,<br>Ом | <i>х</i> <sub><i>m</i></sub> ,<br>Ом | $\Delta Q_x$ , кВАр |
|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------|
| 400                            | 800                              | 500                           | 20                            | 13                 | 350                   | 0,4                       | 1,4                           | 89,5                                 | 1600                |

Приведение сопротивлений трансформатора к базисным условиям:

$$r_T = \frac{r_{m[OM]}}{Z_{\delta}} = \frac{1.4}{73,529} = 0,019 \text{ o.e.}, \qquad (\Pi.1.28)$$

$$x_T = \frac{x_{m[OM]}}{Z_{\hat{o}}} = \frac{89,5}{73,529} = 1,217 \text{ o.e.}$$
 (II.1.29)

Сопротивления эквивалентного трансформатора:

$$r_{T\Sigma} = \frac{r_T}{n_T} = \frac{0.019}{8} = 0.00238 \text{ o.e.},$$
 (II.1.30)

$$x_{T\Sigma} = \frac{x_T}{n_T} = \frac{1,217}{8} = 0,15215 \text{ o.e.}$$
 (II.1.31)

#### Линии электропередачи

Эквивалентные станции связаны двухцепной ЛЭП, длиной 1000 км. ЛЭП выполнена проводом 3×AC-500/64 и разделена на два равных участка по 500 км. Параметры провода указаны в табл. П.1.3 [154].

Таблица П.1.3 Параметры провода 3×AC-500/64

| Номинальное сечение, мм | Число проводов | <i>r</i> <sub>0</sub> , | <i>x</i> <sub>0</sub> , | <i>b</i> <sub>0</sub> , | $\Delta P_{\kappa o p}, \ \kappa { m Bt}/\kappa { m M}$ |
|-------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---|
| (алюминий/сталь)        | в фазе, шт.    | Ом/км                   | Ом/км                   | см/км                   |   |
| 500/64                  | 3              | 0,0197                  | 0,304                   | 3,645.10-6              | 5,5   |

Активная проводимость, обусловленная потерями на корону определяется следующим образом:

$$g_0 = \frac{\Delta P_{\kappa o p} \cdot 10^{-3}}{U_{\mu o m}^2} = \frac{5.5 \cdot 10^{-3}}{500^2} = 2.2 \cdot 10^{-8} \text{ cm/km.}$$
(П.1.32)

Погонное комплексное сопротивление продольной ветви схемы замещения ЛЭП (Рис. 1.9):

$$\underline{Z}_0 = r_0 + jx_0 = 0,02 + j0,304 \text{ Om/km.}$$
(II.1.33)

Погонная комплексная проводимость поперечной ветви схемы замещения ЛЭП (рис. 1.9):

$$\underline{Y}_0 = g_0 + jb_0 = 2,2 \cdot 10^{-8} + j3,645 \cdot 10^{-6} \text{ см/км.}$$
(П.1.34)

Волновое сопротивление ЛЭП:

$$\underline{Z}_{C} = \sqrt{\underline{Z}_{0}}_{\underline{Y}_{0}} = \sqrt{\frac{0,02 + j0,304}{2,2 \cdot 10^{-8} + j3,645 \cdot 10^{-6}}} = 288,97 - j8,48 \text{ Om.} \quad (\Pi.1.35)$$

Коэффициент распространения волны:

$$\underline{\gamma}_{0} = \sqrt{\underline{Z}_{0} \cdot \underline{Y}_{0}} = \sqrt{(0,02 + j0,304) \cdot (2,2 \cdot 10^{-8} + j3,645 \cdot 10^{-6})} = 0,000037 + j0,001053 \ 1/\text{km}. \tag{\Pi.1.36}$$

Коэффициент продольного сопротивления, учитывающий распределенность параметров ДЛЭП:

$$\underline{K}_{Z} = \frac{sh(\underline{\gamma}_{0} \cdot L)}{(\underline{\gamma}_{0} \cdot L)} = \frac{sh((0,000037 + j0,001053) \cdot 500)}{(0,000037 + j0,001053) \cdot 500} = 0,95448 + j0,00318, \quad (\Pi.1.37)$$

где *L* – длина участка линии 500 км.

Коэффициент поперечной проводимости, учитывающий распределенность параметров ДЛЭП:

$$\underline{K}_{Y} = \frac{th\left(\underline{\gamma}_{0} \cdot \frac{L}{2}\right)}{\left(\underline{\gamma}_{0} \cdot \frac{L}{2}\right)} = \frac{th\left((0,000037 + j0,001053) \cdot \frac{500}{2}\right)}{(0,000037 + j0,001053) \cdot \frac{500}{2}} = \\= 1,02373 - j0,00173. \tag{\Pi.1.38}$$

Продольное комплексное сопротивление с учетом распределенности параметров:

$$\underline{Z}_{\pi} = \underline{Z}_{0} \cdot L \cdot \underline{K}_{Z} = (0,02 + j0,304) \cdot 500 \cdot (0,95448 + j0,00318) =$$
  
= 8,918 + j145,112 Om. (II.1.39)

Поперечная комплексная проводимость с учетом распределенности параметров:

$$\underline{Y}_{\pi} = \frac{\underline{Y}_{0} \cdot L \cdot \underline{K}_{Y}}{2} = \frac{\left(2, 2 \cdot 10^{-8} + j3, 645 \cdot 10^{-6}\right) \cdot 500 \cdot \left(1, 02373 - j0, 00173\right)}{2} = 7,207 \cdot 10^{-6} + j9,329 \cdot 10^{-4} \text{ Cm.}$$
(II.1.40)

Использование проводимостей в математической модели не предусмотрено, поэтому необходимо перейти от проводимостей к сопротивлениям. Представление комплексной проводимости возможно двумя способами: последовательной ветвью (рис. П.1.1, а) и параллельной ветвью (рис. П.1.1, б)


Рисунок П.1.1 – Представление комплексной проводимости последовательной (а) и параллельной (б) ветвями

При использовании последовательного соединения эквивалентное сопротивление будет составлять:

$$\underline{Z}_{GC} = \frac{1}{\underline{Y}_{\mathcal{I}}} = \frac{1}{7,207 \cdot 10^{-6} + j9,329 \cdot 10^{-4}} = 8,281 - j1071,903 \text{ Om} \quad (\Pi.1.41)$$

Однако в схеме замещения на рис. 1.9, по которой составляется схема замещения, используется параллельное соединение элементов:

$$\underline{Z}_{gc} = \frac{1}{\operatorname{Re}(\underline{Y}_{JT})} - j\frac{1}{\operatorname{Im}(\underline{Y}_{JT})} = \frac{1}{7,207\cdot10^{-6}} - j\frac{1}{9,329\cdot10^{-4}}$$
$$= 138757,662 - j1071,967 \,\mathrm{Om} \tag{\Pi.1.42}$$

Приведение сопротивлений линии к базисным условиям:

$$r_{\pi'} = \frac{\text{Re}(\underline{Z}_{\pi})}{Z_{\delta}} = \frac{8,918}{73,529} = 0,121 \text{ o.e.}, \tag{\Pi.1.43}$$

$$x_{\pi'} = \frac{\text{Im}(\underline{Z}_{\pi})}{Z_{\delta}} = \frac{145,112}{73,529} = 1,974 \text{ o.e.}, \tag{\Pi.1.44}$$

$$r_{g'} = \frac{\text{Re}(\underline{Z}_{gc})}{Z_{\delta}} = \frac{138757,662}{73,529} = 1887,104 \text{ o.e.}, \quad (\Pi.1.45)$$

$$x_{c'} = \frac{\text{Im}(\underline{Z}_{gc})}{Z_{\delta}} = \frac{1071,967}{73,529} = 14,579 \text{ o.e.}, \tag{\Pi.1.46}$$

Сопротивления эквивалентной двухцепной линии:

$$r_{\Pi} = \frac{r_{\Pi'}}{n_{\mu}} = \frac{0.121}{2} = 0.061 \text{ o.e.},$$
 (II.1.47)

$$x_{\Pi} = \frac{x_{\Pi'}}{n_u} = \frac{1,974}{2} = 0,987$$
 o.e., (II.1.48)

$$r_g = \frac{r_{g'}}{n_u} = \frac{1887,104}{2} = 943,552 \text{ o.e.},$$
 (II.1.49)

$$x_c = \frac{x_{c'}}{n_u} = \frac{14,579}{2} = 7,289$$
 o.e., (II.1.50)

#### Шунтирующие реакторы

На выводах УПК устанавливаются реакторы типа РОДЦ-60000/500. Параметры реакторов указаны в табл. П.1.4 [154].

Таблица П.1.4 Параметры реакторов типа РОДЦ-60000/500

| $U_{HOM}$ , кВ | $I_{HOM}, \mathbf{A}$ | $S_{HOM}$ , MBA | $\Delta P$ , к $B$ т |
|----------------|-----------------------|-----------------|----------------------|
| 500            | 198                   | 60              | 205                  |

Активное сопротивление реактора:

$$R_{P} = \frac{\Delta P \cdot 10^{3}}{I_{_{HOM}}^{2}} = \frac{205 \cdot 10^{3}}{198^{2}} = 5,2318 \text{ Om.}$$
(II.1.51)

Полное сопротивление реактора:

$$\underline{Z}_{P} = \frac{S_{HOM} \cdot 10^{6}}{I_{HOM}^{2}} = \frac{60 \cdot 10^{6}}{198^{2}} = 1531,25 \text{ Om.}$$
(II.1.52)

Реактивное сопротивление реактора:

$$X_{P} = \sqrt{\left(\underline{Z}_{P}^{2} - R_{P}^{2}\right)} = \sqrt{\left(1531, 25^{2} - 5, 2318^{2}\right)} = 1531, 241 \text{ Om.} \quad (\Pi.1.53)$$

Приведение сопротивлений реактора к базисным условиям:

$$r_{p} = \frac{R_p}{Z_{\delta}} = \frac{5,2318}{73,529} = 0,071 \text{ o.e.},$$
 (II.1.54)

$$x_{P'} = \frac{X_P}{Z_6} = \frac{1531,241}{73,529} = 20,825 \text{ o.e.}$$
(II.1.55)

Сопротивления эквивалентного реактора:

$$r_P = \frac{r_{P'}}{n_P} = \frac{0.071}{3} = 0.02372$$
 o.e., (II.1.56)

$$x_P = \frac{x_{P'}}{n_P} = \frac{20,825}{3} = 6,94163 \text{ o.e.}$$
 (II.1.57)

### Нагрузка

Нагрузка представлена в простейшем виде – эквивалентным сопротивлением. В исходном режиме при номинальном напряжении в точке подключения нагрузки она задана мощностью  $P_{\text{нагр}} = 3075 \text{ MBr}, Q_{\text{нагр}} = 2305 \text{ MBAp}.$ 

Сопротивление нагрузки:

$$R_{\mu a c p} = \frac{P_{\mu a c p} \cdot U_{\mu o m}^{2}}{P_{\mu a c p}^{2} + Q_{\mu a c p}^{2}} = \frac{3075 \cdot 500^{2}}{3075^{2} + 2305^{2}} = 52,0528 \text{ Om}. \tag{\Pi.1.58}$$

$$X_{\mu a c p} = \frac{Q_{\mu a c p} \cdot U_{\mu o M}^{2}}{P_{\mu a c p}^{2} + Q_{\mu a c p}^{2}} = \frac{2305 \cdot 500^{2}}{3075^{2} + 2305^{2}} = 39.0185 \text{ Om.}$$
(II.1.59)

Приведение сопротивлений нагрузки к базисным условиям:

$$r_{\mu} = \frac{R_{\mu a z p}}{Z_{\tilde{o}}} = \frac{52,0528}{73,529} = 0,708 \text{ o.e.}, \qquad (\Pi.1.60)$$

$$x_{\mu} = \frac{X_{\mu a z p}}{Z_{\phi}} = \frac{39,0185}{73,529} = 0,531 \text{ o.e.}$$
(II.1.61)

# ПРИЛОЖЕНИЕ 2 АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ УУПК И УШР С РАЗЛИЧНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ СТУПЕНЕЙ

$$\begin{split} a_{0} &= T_{d1}T_{d2} \left( \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q1}} \left( \frac{\partial I}{\partial X_{YIIK}} \frac{\partial X_{YIIK}'}{\partial I} - 1 \right) \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q2}} - \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q1}} \frac{\partial I}{\partial E_{q2}} \frac{\partial X_{YIIK}'}{\partial I} \frac{\partial E_{q2}'}{\partial I} - \frac{\partial E_{q1}'}{\partial X_{YIIK}} \frac{\partial E_{q2}'}{\partial I} - \left( \frac{\partial I}{\partial X_{YIIK}} \frac{\partial X_{YIIK}'}{\partial I} - 1 \right) \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q2}} \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q1}} - ( (II.2.1) \right) \\ &- \frac{\partial E_{q1}'}{\partial X_{YIIK}} \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q2}} \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} \frac{\partial X_{YIIK}'}{\partial I} + \frac{\partial E_{q1}'}{\partial I} \frac{\partial I}{\partial E_{q2}} \frac{\partial X_{YIIK}'}{\partial I} - 1 \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q2}} \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q1}} - ( (II.2.1) \right) \\ &- \frac{\partial E_{q1}'}{\partial X_{YIIK}} \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q2}} \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} \frac{\partial X_{YIIK}'}{\partial I} + \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q2}} \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} \frac{\partial X_{YIIK}'}{\partial I} \frac{\partial E_{q2}'}{\partial X_{YIIK}} \right]; \\ &= a_{1}^{2} \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q1}} T_{d1} \left( \frac{\partial I}{\partial X_{YIIK}} \frac{\partial X_{YIIK}'}{\partial I} - 1 \right) + \left( \frac{\partial I}{\partial X_{YIIK}} \frac{\partial X_{YIIK}'}{\partial I} - 1 \right) \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{\partial E_{q1}'}{\partial X_{YIIK}} \frac{\partial I}{\partial X_{YIIK}} \frac{\partial X_{YIIK}'}{\partial I} - 1 \right) \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q2}} T_{d1} \frac{\partial I}{\partial E_{q2}} \frac{\partial X_{YIIK}'}{\partial I} \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q1}} T_{d1} \left( \frac{D_{2}}{D_{2}} + \frac{D_{1}}{D_{1}} \right) \frac{\partial I}{\partial E_{q2}} \frac{\partial X_{YIIK}'}{\partial I} \frac{\partial E_{q2}'}{\partial X_{YIIK}} T_{d1} \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q1}} T_{d2} - \frac{(D_{2}}{T_{J2}} + \frac{D_{1}}{T_{J1}} \right) \frac{\partial I}{\partial E_{q2}} \frac{\partial X_{YIIK}}{\partial I} \frac{\partial E_{q2}'}{\partial X_{YIIK}} T_{d1} \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{(D_{2}}{D_{2}} + \frac{D_{1}}{D_{1}} \right) \frac{\partial E_{q1}'}{\partial X_{YIIK}} T_{d1} \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q2}} T_{d2} \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} \frac{\partial X_{YIIK}}{\partial I} \frac{\partial I}{\partial E_{q2}} \frac{\partial X_{YIIK}}{\partial I} \frac{\partial I}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{(D_{2}}{D_{2}} + \frac{D_{1}}{D_{1}} \right) \frac{\partial E_{q1}'}{\partial X_{YIIK}} T_{d1} \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q2}} T_{d2} \frac{\partial E_{q2}'}}{\partial E_{q1}} \frac{\partial Z_{YIIK}'}{\partial I} \frac{$$

$$\begin{aligned} a_{2} &= \left(\frac{\partial I}{\partial X_{YHK}} - \frac{\partial X_{YHK}}{\partial I} - 1\right) + \frac{\partial E_{q1}^{i}}{\partial E_{q1}} T_{d1} \left(\frac{D_{2}}{T_{22}} + \frac{D_{1}}{T_{21}}\right) \left(\frac{\partial I}{\partial X_{YHK}} - \frac{\partial X_{YHK}}{\partial I} - 1\right) + \\ &+ \left(\frac{D_{2}}{T_{22}} + \frac{D_{1}}{T_{21}}\right) \left(\frac{\partial I}{\partial X_{YHK}} - \frac{\partial X_{YHK}}{\partial I} - 1\right) \frac{\partial E_{q2}^{i}}{\partial E_{q2}} T_{d2}^{i} - \\ &- \left(\frac{D_{2}}{T_{22}} + \frac{D_{1}}{T_{11}}\right) \frac{\partial I}{\partial E_{q2}} - \frac{\partial X_{YHK}}{\partial I} - \frac{\partial E_{q2}^{i}}{\partial X_{YHK}} T_{d2}^{i} - \left(\frac{D_{2}}{T_{22}} + \frac{D_{1}}{T_{11}}\right) \frac{\partial E_{q1}^{i}}{\partial X_{YHK}} T_{d1}^{i} - \frac{\partial E_{q2}^{i}}{\partial I} - \frac{\partial X_{YHK}^{i}}{\partial I} + \\ &+ \frac{\partial E_{q1}^{i}}{\partial E_{q1}} T_{d1} - \frac{\partial I}{\partial E_{q2}} - \frac{\partial X_{YHK}}{\partial I} - \frac{\partial E_{q2}^{i}}{\partial \delta_{21}} T_{d2}^{i} \left(\frac{1}{T_{22}} - \frac{\partial P_{2}}{\partial X_{YHK}} - \frac{1}{T_{21}} - \frac{\partial P_{1}^{i}}{\partial X_{YHK}}\right) - \\ &- \frac{\partial E_{q1}^{i}}{\partial E_{q2}} T_{d1} - \frac{\partial E_{q2}^{i}}{\partial E_{21}} T_{d1} - \frac{\partial E_{q2}^{i}}{\partial E_{q1}} T_{d2}^{i} \left(\frac{1}{T_{22}} - \frac{\partial P_{2}}{\partial X_{YHK}} - \frac{1}{T_{21}} - \frac{\partial P_{1}^{i}}{\partial X_{YHK}}\right) - \\ &- \frac{\partial E_{q1}^{i}}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{\partial I}{\partial E_{21}} - \frac{\partial X_{YHK}}{\partial I} \left(\frac{1}{T_{22}} - \frac{\partial P_{2}}{\partial X_{YHK}} - \frac{1}{T_{21}} - \frac{\partial P_{1}^{i}}{\partial X_{YHK}}\right) - \\ &- \frac{\partial E_{q1}^{i}}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} - \frac{\partial X_{YHK}}{\partial I} \left(\frac{1}{T_{22}} - \frac{\partial P_{2}}{\partial X_{YHK}} - \frac{1}{T_{21}} - \frac{\partial P_{1}^{i}}{\partial X_{YHK}}\right) - \\ &- \frac{\partial E_{q1}^{i}}{\partial E_{q2}} T_{d1} - \frac{\partial E_{q2}^{i}}{\partial E_{22}} T_{d2} - \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} - T_{d2}^{i} \left(\frac{1}{T_{22}} - \frac{\partial P_{2}}{\partial X_{YHK}} - \frac{1}{T_{21}} - \frac{\partial P_{1}^{i}}{\partial X_{YHK}}\right) - \\ &- \frac{\partial E_{q1}^{i}}{\partial E_{q2}} T_{d1} - \frac{\partial E_{q2}^{i}}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{\partial I}{\partial X_{H}} \frac{\partial X_{HK}}{\partial I} \left(\frac{1}{T_{22}} - \frac{\partial P_{2}}{\partial X_{YHK}} - \frac{1}{T_{21}} - \frac{\partial P_{1}^{i}}{\partial X_{YHK}}\right) - \\ &- \frac{\partial E_{q1}^{i}}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} \frac{\partial X_{YHK}}{\partial I} \left(\frac{1}{T_{22}} - \frac{\partial P_{2}}}{\partial X_{YHK}} - \frac{1}{T_{21}} - \frac{\partial P_{1}^{i}}}{\partial X_{YHK}}\right) - \\ &- \frac{\partial E_{q2}^{i}}{d_{1}} \frac{\partial E_{q2}^{i}}{\partial E_{q2}} T_{d2} - \frac{1}{T_{21}} \frac{\partial P_{1}}{\partial E_{22}} \right) \left(\frac{\partial I}{\partial X_{YHK}} - \frac{\partial X_{YHK}}}{\partial I} - 1\right) \frac{\partial E_{q2}^{i}}}{\partial Z_{21}} T_{d2} + \\ &+ \frac{\partial E_{q1}^{i}}}{d_{1$$

$$+ \left(\frac{1}{T_{J_2}}\frac{\partial P_2}{\partial \delta_{21}} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{21}}\right)\frac{\partial I}{\partial E_{q_2}}\frac{\partial X_{YIK}}{\partial I}\frac{\partial E_{q_1}}{\partial X_{YIK}}T_{d_1}\frac{\partial E_{q_2}}{\partial E_{q_1}}T_{d_2} - \frac{1}{T_{d_2}}\frac{\partial P_2}{\partial E_{q_2}} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial E_{q_2}}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial X_{YIK}}\frac{\partial X_{YIK}}{\partial I} - 1\right)\frac{\partial E_{q_2}}{\partial \delta_{21}}T_{d_2} + \frac{\partial E_{q_1}}{\partial E_{q_1}}T_{d_1}\left(\frac{1}{T_{J_2}}\frac{\partial P_2}{\partial \delta_{21}} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{21}}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial X_{YIK}}\frac{\partial X_{YIK}}{\partial I} - 1\right)\frac{\partial E_{q_2}}{\partial E_{q_2}}T_{d_2} - \frac{1}{D_{q_1}}\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{21}}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial X_{YIK}}\frac{\partial X_{YIK}}{\partial I} - 1\right)\frac{\partial E_{q_2}}{\partial E_{q_2}}T_{d_2} - \frac{1}{D_{q_1}}\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{21}}\right)\frac{\partial I}{\partial E_{q_2}}\frac{\partial X_{YIK}}{\partial I}\frac{\partial E_{q_2}}{\partial X_{YIK}}T_{d_2} + \frac{\partial E_{q_1}}{\partial E_{q_2}}T_{d_2} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial E_{q_2}}\right)\frac{\partial I}{\partial \delta_{21}}\frac{\partial X_{YIK}}{\partial I}\frac{\partial E_{q_2}}{\partial X_{YIK}}T_{d_2} + \frac{\partial E_{q_2}}{\partial E_{q_1}}T_{d_2} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial E_{q_2}}\right)\frac{\partial I}{\partial \delta_{21}}\frac{\partial X_{YIK}}{\partial I}\frac{\partial X_{YIK}}{\partial I} - 1\right)\frac{\partial E_{q_2}}{\partial E_{q_2}}T_{d_2} + \frac{\partial E_{q_2}}{\partial E_{q_1}}T_{d_2} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial E_{q_2}}\right)\frac{\partial E_{q_1}}{\partial \delta_{21}}T_{d_1}\left(\frac{\partial I}{\partial X_{YIK}}\frac{\partial X_{YIK}}{\partial I} - 1\right)\frac{\partial E_{q_2}}{\partial E_{q_2}}T_{d_2} + \frac{1}{(\frac{1}{T_{J_2}}}\frac{\partial P_2}{\partial E_{q_1}} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial E_{q_1}}\right)\frac{\partial I}{\partial E_{q_2}}\frac{\partial X_{YIK}}{\partial I}\frac{\partial X_{YIK}}{\partial I} - 1\right)\frac{\partial E_{q_2}}{\partial E_{q_1}}T_{d_2} - \frac{1}{(\frac{1}{T_{J_2}}}\frac{\partial P_1}{\partial E_{q_1}}\right)\frac{\partial I}{\partial E_{q_2}}\frac{\partial X_{YIK}}{\partial I} - 1\right)\frac{\partial E_{q_2}}{\partial E_{q_2}}T_{d_2} - \frac{1}{(\frac{1}{T_{J_2}}}\frac{\partial P_1}{\partial E_{q_1}}\right)\frac{\partial I}{\partial E_{q_2}}\frac{\partial X_{YIK}}{\partial I}\frac{\partial X_{YIK}}}{\partial I} - 1\right)\frac{\partial E_{q_2}}{\partial E_{q_1}}T_{d_2} - \frac{1}{(\frac{1}{T_{q_2}}}\frac{\partial P_1}{\partial E_{q_1}}\right)\frac{\partial I}{\partial E_{q_2}}\frac{\partial X_{YIK}}}{\partial I}\frac{\partial X_{YIK}}}{\partial I} - 1\right)\frac{\partial E_{q_2}}{\partial E_{q_1}}T_{d_2} - \frac{1}{(\frac{1}{T_{q_2}}}\frac{\partial P_1}{\partial E_{q_1}}\right)\frac{\partial I}{\partial E_{q_2}}\frac{\partial X_{YIK}}}{\partial I}\frac{\partial X_{YIK}}}{\partial I} - 1\right)\frac{\partial E_{q_2}}{\partial E_{q_1}}T_{d_2} - \frac{1}{(\frac{1}{T_{q_2}}}\frac{\partial P_1}{\partial E_{q_2}}}\right)\frac{\partial I}{\partial X_{YIK}}\frac{\partial X_{YIK}}}{\partial I} - 1\right)\frac{\partial E_{q_2}}}{\partial E_{q_2}}T_{d_2} - \frac{1}{(\frac{1}{T_{q_2}}}\frac{\partial P_1}{\partial E_{q_2}}}\frac{\partial X_{YIK}}}{\partial Z_{YIK}}\frac{\partial E_{q_2}}}{\partial Z_{YIK}}T_{d_1}$$

$$+ \left(\frac{1}{T_{J_{2}}}\frac{\partial P_{2}}{\partial E_{q_{1}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}}\frac{\partial P_{1}^{'}}{\partial E_{q_{2}}}\right)\frac{\partial E_{q_{1}}^{'}}{\partial \lambda_{YHK}}T_{d_{1}}\frac{\partial E_{q_{2}}^{'}}{\partial E_{q_{2}}^{'}}T_{d_{2}}\frac{\partial A_{YHK}}{\partial \lambda_{YHK}}T_{d_{2}} + \left(\frac{1}{T_{J_{2}}}\frac{\partial P_{2}}{\partial E_{q_{2}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}}\frac{\partial P_{1}^{'}}{\partial E_{q_{2}}}\right)\frac{\partial E_{q_{1}}^{'}}{\partial \delta_{2_{1}}}T_{d_{1}}\frac{\partial I}{\partial E_{q_{1}}}\frac{\partial X_{YHK}}{\partial I}\frac{\partial E_{q_{2}}^{'}}{\partial X_{YHK}}T_{d_{2}} + \left(\frac{1}{T_{J_{2}}}\frac{\partial P_{2}}{\partial E_{q_{1}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}}\frac{\partial P_{1}^{'}}{\partial E_{q_{2}}}\right)\frac{\partial E_{q_{1}}^{'}}{\partial E_{q_{2}}}T_{d_{1}}\frac{\partial I}{\partial E_{q_{1}}}\frac{\partial X_{YHK}}{\partial I}\frac{\partial E_{q_{2}}^{'}}{\partial X_{YHK}}T_{d_{2}} - \left(\frac{1}{T_{J_{2}}}\frac{\partial P_{2}}{\partial E_{q_{1}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}}\frac{\partial P_{1}^{'}}{\partial E_{q_{2}}}\right)\frac{\partial E_{q_{1}}^{'}}{\partial E_{q_{2}}}T_{d_{1}}\frac{\partial I}{\partial E_{q_{1}}}\frac{\partial X_{YHK}}{\partial I}\frac{\partial E_{q_{2}}^{'}}{\partial X_{YHK}}T_{d_{2}}; \\ a_{1} = \left(\frac{D_{2}}{T_{J_{2}}} + \frac{D_{1}}{D_{1}}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial X_{YHK}}\frac{\partial X_{YHK}}{\partial I} - 1\right) + \\ + \frac{\partial E_{q_{1}}^{'}}{\partial E_{q_{1}}}T_{d_{1}}\left(\frac{1}{\partial Z_{Q_{2}}}\frac{\partial P_{2}}{\partial Z_{1}} - \frac{1}{T_{J_{1}}}\frac{\partial P_{1}^{'}}{\partial \delta_{2_{1}}}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial X_{YHK}}\frac{\partial X_{YHK}}{\partial I} - 1\right) - \\ - \left(\frac{1}{T_{J_{2}}}\frac{\partial P_{2}}{\partial E_{q_{2}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}}\frac{\partial P_{1}^{'}}{\partial \delta_{2_{1}}}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial X_{YHK}}\frac{\partial X_{YHK}}{\partial I} - 1\right)\frac{\partial E_{q_{2}}^{'}}{\partial E_{q_{2}}}T_{d_{2}} + \\ + \left(\frac{1}{T_{J_{2}}}\frac{\partial P_{2}}{\partial E_{q_{2}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}}\frac{\partial P_{1}^{'}}{\partial E_{q_{1}}}}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial X_{YHK}}\frac{\partial X_{YHK}}{\partial I} - 1\right)\frac{\partial E_{q_{2}}^{'}}{\partial E_{q_{2}}}T_{d_{2}} - \\ - \left(\frac{1}{T_{J_{2}}}\frac{\partial P_{2}}{\partial E_{q_{2}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}}\frac{\partial P_{1}^{'}}}{\partial E_{q_{2}}}}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial X_{YHK}}\frac{\partial X_{YHK}}{\partial I} - 1\right)\frac{\partial E_{q_{2}}^{'}}{\partial E_{q_{2}}}T_{d_{2}} - \\ - \left(\frac{1}{T_{J_{2}}}\frac{\partial P_{2}}{\partial E_{1}} - \frac{1}{T_{J_{1}}}\frac{\partial P_{1}^{'}}}{\partial E_{2}}}\right)\frac{\partial E_{q_{1}}}^{'}}{\partial X_{YHK}}T_{d_{1}}\frac{\partial E_{q_{1}}}}{\partial E_{q_{2}}}\frac{\partial X_{YHK}}{\partial I} + \\ + \left(\frac{1}{T_{J_{2}}}\frac{\partial P_{2}}{\partial E_{1}} - \frac{1}{T_{J_{1}}}\frac{\partial P_{1}^{'}}}{\partial X_{YHK}}}\right)\frac{\partial E_{q_{1}}}^{'}}{\partial X_{YHK}}T_{d_{1}}\frac{\partial E_{q_{2}}}}{\partial X_{YHK}}\frac{\partial X_{YHK}}}{\partial I} + \\ + \left(\frac{1}{T_{J_{2}}}\frac{\partial P_{2}}}{\partial E_{q_{2}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}}\frac{\partial P_{1}^{'}}}{\partial$$

$$+\frac{\partial E_{q1}^{'}}{\partial \delta_{21}}T_{d1}\frac{\partial I}{\partial E_{q1}}\frac{\partial X_{VIIK}}{\partial I}\left(\frac{1}{T_{J2}}\frac{\partial P_{2}}{\partial X_{VIIK}}-\frac{1}{T_{J1}}\frac{\partial P_{1}^{'}}{\partial X_{VIIK}}\right)-$$

$$-\frac{\partial E_{q2}^{'}}{\partial E_{q2}}T_{d2}\frac{\partial I}{\partial \delta_{21}}\frac{\partial X_{VIIK}}{\partial I}\left(\frac{1}{T_{J2}}\frac{\partial P_{2}}{\partial X_{VIIK}}-\frac{1}{T_{J1}}\frac{\partial P_{1}^{'}}{\partial X_{VIIK}}\right);$$

$$a_{4}=\left(\frac{1}{T_{J2}}\frac{\partial P_{2}}{\partial \delta_{21}}-\frac{1}{T_{J1}}\frac{\partial P_{1}^{'}}{\partial \delta_{21}}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial X_{VIIK}}\frac{\partial X_{VIIK}}{\partial I}-1\right)-$$

$$-\frac{\partial I}{\partial \delta_{21}}\frac{\partial X_{VIIK}}{\partial I}\left(\frac{1}{T_{J2}}\frac{\partial P_{2}}{\partial X_{VIIK}}-\frac{1}{T_{J1}}\frac{\partial P_{1}^{'}}{\partial X_{VIIK}}\right).$$
(II.2.5)

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ УУПК И УШР

$$\begin{split} a_{0} &= \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{VIIK}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{yIIK}} - \frac{\partial x_{VIIK}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{yIIK}} - \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p2}} \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_{5}} - \\ &- \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{VIIK}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{VIIK}} - \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_{4}} + \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p2}} \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_{5}} - \\ &- \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p2}} \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial x_{VIIK}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{VIIK}} + \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{VIIK}} \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial x_{VIIK}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p2}} + \\ &+ \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{VIIK}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p2}} \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{VIIK}} + \\ &+ \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p2}} \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{VIIK}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p2}} \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{VIIK}} + \\ &+ \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p2}} \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{VIIK}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{VIIK}} - \\ &- \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial x_{VIIK}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial x_{p2}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p2}} + 1; \\ &- \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial x_{VIIK}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial x_{VIIK}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p2}} + 1; \\ &- \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial x_{VIIK}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{VIIK}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{VIIK}} \cdot \frac{\partial I_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p2}} + 1; \\ &- \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial x_{P1}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{P1}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{VIIK}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{VIIK}} \cdot \frac{\partial I_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p2}} + 1; \\ &- \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial x_{P1}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{VIIK}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{VIIK}} \cdot \frac{\partial I_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p2}} + 1; \\ &- \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{P1}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{P1}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{VIIK}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p2}} \cdot \frac{\partial U_{5}$$

$$\begin{split} a_{1} &= \left(\frac{D_{1}}{T_{J_{1}}} + \frac{D_{2}}{T_{J_{2}}}\right) \cdot \left(1 - \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p_{1}}} \cdot \frac{\partial x_{p_{1}}}{\partial U_{4}} - \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{y\Pi K}} \cdot \frac{\partial x_{y\Pi K}}{\partial I_{4}} - \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p_{2}}} \cdot \frac{\partial x_{p_{2}}}{\partial U_{5}} - \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p_{1}}} \cdot \frac{\partial x_{p_{1}}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial I_{4}} + \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{y\Pi K}} \cdot \frac{\partial x_{p_{1}}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{y\Pi K}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p_{1}}} + \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p_{1}}} \cdot \frac{\partial x_{y\Pi K}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p_{1}}} + \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p_{2}}} \cdot \frac{\partial x_{p_{1}}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial I_{4}} + \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p_{1}}} \cdot \frac{\partial x_{p_{2}}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial x_{y\Pi K}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p_{2}}} + \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p_{2}}} \cdot \frac{\partial x_{p_{1}}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p_{2}}} + \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p_{1}}} \cdot \frac{\partial x_{p_{1}}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p_{2}}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p_{1}}} + \frac{\partial I_{4}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{p_{1}}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{p_{1}}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p_{2}}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p_{1}}} + \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p_{1}}} \cdot \frac{\partial x_{p_{1}}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{p_{1}}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p_{1}}} + \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p_{1}}} \cdot \frac{\partial x_{p_{1}}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p_{2}}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p_{2}}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p_{1}}} + \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p_{1}}} \cdot \frac{\partial x_{p_{1}}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p_{2}}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p_{1}}} - \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p_{1}}} \cdot \frac{\partial x_{p_{1}}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p_{1}}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p_{2}}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p_{2}}} \right];$$

$$\begin{split} a_{2} &= \left(\frac{1}{T_{J_{2}}} \frac{\partial P_{2}}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J_{1}}} \frac{\partial P_{1}}{\partial \delta_{12}}\right) + \left(\frac{1}{T_{J_{2}}} \frac{\partial P_{2}}{\partial x_{YIK}} - \frac{1}{T_{J_{1}}} \frac{\partial P_{1}}{\partial x_{YIK}}\right) \cdot \frac{\partial x_{YIK}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial \delta_{12}} + \\ &+ \left(\frac{1}{T_{J_{2}}} \frac{\partial P_{2}}{\partial x_{p_{1}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}} \frac{\partial P_{1}}{\partial x_{p_{1}}}\right) \cdot \frac{\partial x_{p_{1}}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial \delta_{12}} + \left(\frac{1}{T_{J_{2}}} \frac{\partial P_{2}}{\partial x_{p_{2}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}} \frac{\partial P_{1}}{\partial \delta_{12}}\right) \cdot \frac{\partial x_{p_{1}}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p_{1}}} - \left(\frac{1}{T_{J_{2}}} \frac{\partial P_{2}}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J_{1}}} \frac{\partial P_{1}}{\partial \delta_{12}}\right) \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p_{2}}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial U_{5}} - \\ &- \left(\frac{1}{T_{J_{2}}} \frac{\partial P_{2}}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J_{1}}} \frac{\partial P_{1}}{\partial x_{p_{1}}}\right) \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial x_{PI}}{\partial U_{4}} - \left(\frac{1}{T_{J_{2}}} \frac{\partial P_{2}}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J_{1}}} \frac{\partial P_{1}}{\partial x_{p_{1}}}\right) \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial x_{PI}}{\partial U_{5}} + \\ &+ \left(\frac{1}{T_{J_{2}}} \frac{\partial P_{2}}{\partial x_{p_{1}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}} \frac{\partial P_{1}}{\partial x_{p_{1}}}\right) \cdot \frac{\partial x_{PI}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{PIK}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial u_{5}} - \\ &- \left(\frac{1}{T_{J_{2}}} \frac{\partial P_{2}}{\partial x_{p_{1}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}} \frac{\partial P_{1}}}{\partial x_{p_{1}}}\right) \cdot \frac{\partial x_{PI}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{PIK}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{PI}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial \delta_{12}} - \\ &- \left(\frac{1}{T_{J_{2}}} \frac{\partial P_{2}}{\partial x_{p_{1}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}} \frac{\partial P_{1}}}{\partial x_{p_{1}}}\right) \cdot \frac{\partial x_{PI}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial x_{PIK}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial \delta_{12}} - \\ &- \left(\frac{1}{T_{J_{2}}} \frac{\partial P_{2}}{\partial x_{p_{1}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}} \frac{\partial P_{1}}}{\partial x_{p_{1}}}\right) \cdot \frac{\partial x_{PI}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{PI}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{4}}}{\partial U_{2}} \cdot \frac{\partial I_{4}}}{\partial \delta_{12}} - \\ &- \left(\frac{1}{T_{J_{2}}} \frac{\partial P_{2}}{\partial x_{p_{1}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}} \frac{\partial P_{1}}}{\partial x_{p_{1}}}\right) \cdot \frac{\partial x_{PI}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{PI}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{4}}}{\partial x_{p_{2}}} \cdot \frac{\partial I_{4}}}{\partial x_{p_{2}}} - \\ &- \left(\frac{1}{T_{J_{2}}} \frac{\partial P_{2}}}{\partial x_{p_{1}}} - \frac{1}{T_{J_{1}}} \frac{\partial P_{1}}}{\partial u_{p_{1}}} \right) \cdot \frac{\partial x_{PI}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial U_{5}}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}}{\partial U_{5}} - \\ &- \left(\frac{1}{T_{J_{2}}} \frac{\partial P_{2}}}{\partial x_{p_$$

$$\begin{split} + & \left(\frac{1}{T_{J_2}}\frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}}\right) \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_4} \cdot \frac{\partial x_{yTR}}{\partial I_4} \cdot \frac{\partial U_4}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial I_4}{\partial x_{yTR}} + \\ + & \left(\frac{1}{T_{J_2}}\frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}}\right) \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_4} \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_5} \cdot \frac{\partial U_5}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial I_5}{\partial x_{p2}} - \\ - & \left(\frac{1}{T_{J_2}}\frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}}\right) \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_5} \cdot \frac{\partial x_{yTR}}{\partial I_4} \cdot \frac{\partial U_5}{\partial x_{yTR}} \cdot \frac{\partial I_4}{\partial x_{p2}} + \\ + & \left(\frac{1}{T_{J_2}}\frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}}\right) \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_5} \cdot \frac{\partial x_{yTR}}{\partial I_4} \cdot \frac{\partial U_5}{\partial x_{yTR}} \cdot \frac{\partial I_4}{\partial x_{yTR}} - \\ - & \left(\frac{1}{T_{J_2}}\frac{\partial P_2}{\partial x_{p2}} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial x_{p1}}\right) \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_4} \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial I_4} \cdot \frac{\partial U_5}{\partial x_{p2}} \cdot \frac{\partial U_4}{\partial x_{yTR}} - \\ - & \left(\frac{1}{T_{J_2}}\frac{\partial P_2}{\partial x_{p2}} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial x_{p1}}\right) \cdot \frac{\partial U_4}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial x_{yTR}}{\partial I_4} \cdot \frac{\partial U_5}{\partial U_5} \cdot \frac{\partial U_5}{\partial U_5} \cdot \frac{\partial U_4}{\partial x_{yTR}} \cdot \frac{\partial I_4}{\partial \delta_{12}} - \\ - & \left(\frac{1}{T_{J_2}}\frac{\partial P_2}{\partial x_{p2}} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial x_{p1}}\right) \cdot \frac{\partial U_4}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial x_{yTR}}{\partial I_4} \cdot \frac{\partial L_5}{\partial I_4} \cdot \frac{\partial L_5}{\partial U_5} \cdot \frac{\partial U_4}{\partial U_5} \cdot \frac{\partial I_4}{\partial I_5} + \\ + & \left(\frac{1}{T_{J_2}}\frac{\partial P_2}{\partial x_{p2}} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial x_{p1}}\right) \cdot \frac{\partial X_{p1}}{\partial U_4} \cdot \frac{\partial X_{yTR}}{\partial I_4} \cdot \frac{\partial I_4}{\partial I_4} \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_5} \cdot \frac{\partial U_5}{\partial X_{yTR}} \cdot \frac{\partial I_4}{\partial I_5} - \\ - & \left(\frac{1}{T_{J_2}}\frac{\partial P_2}{\partial x_{p2}} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial x_{p1}}\right) \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_4} \cdot \frac{\partial x_{yTR}}{\partial I_4} \cdot \frac{\partial I_4}{\partial I_4} \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_5} \cdot \frac{\partial U_5}{\partial X_{yTR}} \cdot \frac{\partial U_4}{\partial I_2} - \\ - & \left(\frac{1}{T_{J_2}}\frac{\partial P_2}{\partial x_{p1R}} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial x_{p1R}}\right) \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_4} \cdot \frac{\partial x_{yTR}}{\partial I_4} \cdot \frac{\partial I_4}{\partial X_{p1}} \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_5} \cdot \frac{\partial U_5}{\partial X_{yTR}} \cdot \frac{\partial U_4}{\partial I_2} - \\ \\ - & \left(\frac{1}{T_{J_2}}\frac{\partial P_2}{\partial x_{p1R}} - \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial X_{p1R}}\right) \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_4} \cdot \frac{\partial x_{yTR}}{\partial I_4} \cdot \frac{\partial I_4}{\partial X_{p2}} \cdot \frac{\partial I_5}{\partial U_5} \cdot \frac{\partial U_5}}{\partial X_{yTR}} \cdot \frac{\partial U_4}{\partial I_2} - \\ \\ - & \left(\frac{1}{T_{J_2}}$$

$$+ \left(\frac{1}{T_{J2}}\frac{\partial P_{2}}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J1}}\frac{\partial P_{1}}{\partial \delta_{12}}\right) \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{y\Pi K}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p1}} \cdot \frac{\partial x_{p2}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{p2}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{y\Pi K}} + \left(\frac{1}{T_{J2}}\frac{\partial P_{2}}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J1}}\frac{\partial P_{1}}{\partial \delta_{12}}\right) \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{y\Pi K}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{p2}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial x_{y\Pi K}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p1}} - , \quad (\Pi.3.3)$$
$$- \left(\frac{1}{T_{J2}}\frac{\partial P_{2}}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J1}}\frac{\partial P_{1}}{\partial \delta_{12}}\right) \cdot \frac{\partial x_{p1}}{\partial U_{4}} \cdot \frac{\partial x_{y\Pi K}}{\partial I_{4}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial x_{y\Pi K}} \cdot \frac{\partial I_{4}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{5}}{\partial U_{5}} \cdot \frac{\partial U_{4}}{\partial x_{p1}} - ,$$