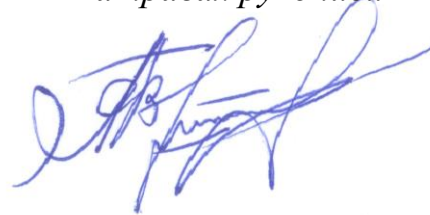


На правах рукописи



Тихонов Александр Владимирович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ FACTS ПРИ ОЦЕНИВАНИИ
СОСТОЯНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭЭС**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН).

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Колосок Ирина Николаевна

Официальные оппоненты: **Паздерин Андрей Владимирович**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Уральский энергетический институт, кафедра Автоматизированных электрических систем, заведующий кафедрой

Сулайманов Алмаз Омурзакович,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Энергетический институт, кафедра «Электроэнергетические системы», заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск

Защита состоится «19» сентября 2017 г. в 9:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: **664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте: <http://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2017-4/>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим отправить по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 003.017.01,
доктор технических наук, профессор



**Клер
Александр Матвеевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Изменения, происходящие в ЕЭС России и затрагивающие её техническую, экономическую и организационную части, являются наиболее значимыми с момента её создания.

Для перехода на качественно новый уровень управления в российской энергетике создается Интеллектуальная энергосистема (ИЭС), в которой все субъекты электроэнергетического рынка (генерация, сеть, потребители) принимают активное участие в процессах производства, передачи и распределения электроэнергии. В этом случае электрические сети становятся активными устройствами передачи электроэнергии с регулируемыми параметрами и характеристиками.

Важными проблемами ЕЭС России на сегодняшний день являются: недостаточная пропускная способность основных высоковольтных линий электропередач (ВЛ), малое количество регулирующих устройств, что влечёт за собой неоптимальное потокораспределение.

Очевидно, что экономически крайне невыгодно строительство дополнительных линий для увеличения пропускной способности по сечениям, а также повышения надёжности системы. Возможным решением может стать использование существующих линий электропередач, но с приданием им свойств «управляемых линий» за счет использования современных технических средств и технологий.

FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) - управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока - это самая современная технология, основой которой являются устройства FACTS, трансформирующие электрическую сеть из неактивного устройства транспорта электроэнергии в активное устройство, которое участвует в управлении режимами работы электроэнергетических систем (ЭЭС). Технология FACTS открывает новые возможности для управления электроэнергетическими системами, так как обеспечивает регулирование взаимосвязанных параметров схемы и режима.

К устройствам FACTS относятся:

- устройства первого поколения (FACTS I), которые обеспечивают скалярное регулирование напряжения или реактивной мощности; эти устройства достаточно широко представлены в ЕЭС страны;
- устройства FACTS второго поколения (FACTS II), которые позволяют одновременно регулировать несколько параметров режима, т.е. обеспечивают векторное регулирование.

В последние 20 лет наметилась тенденция к замене нерегулируемых устройств FACTS I на регулируемые или управляемые, параметры которых могут изменяться в зависимости от загрузки ВЛ. Применение таких устройств повышает эффективность использования ВЛ и экономичность их работы. Развитие полупроводниковых технологий в 90-х годах двадцатого века позволило создать новый тип преобразователей – преобразователь напряжения, на основе которого были созданы современные устройства FACTS второго поколения на базе силовой электроники.

Управление режимами ЭЭС ввиду сложности объекта управления может осуществляться только с использованием расчетной модели сети. От адекватности используемой модели реальному состоянию ЭЭС и решаемым на ее основе задачам зависит качество управления ЭЭС. Обеспечение адекватности полученной расчетной модели ЭЭС объекту управления и регулярная актуализация ее параметров является важной задачей при создании системы управления ИЭС. Очевидно, что для использования устройств FACTS при оперативном и противоаварийном управлении необходимо иметь расчетные модели этих устройств, наиболее приближенные к их фактическим параметрам.

Основными задачами, используемыми для формирования расчетной модели ЭЭС, являются задача расчёта установившегося режима (УР) и задача оценивания состояния (ОС) ЭЭС.

Оценивание состояния – одна из основных задач подсистемы оперативного управления режимами ЭЭС. Она состоит в расчете установившегося режима ЭЭС по телеизмерениям (ТИ) для текущей схемы сети, сформированной по телесигналам (ТС) о состоянии коммутационного оборудования. ОС осуществляет фильтрацию ошибок в телеизмерениях, диагностику измерительных трактов, позволяет производить оперативный прогноз режима энергосистемы.

Методы ОС ЭЭС начали разрабатываться в 70-х годах XX века. Основы теории ОС были заложены в трудах F.C.Schwerpe, E.J.Handschin и другие. Работы А.З. Гамма по оцениванию состояния ЭЭС являются пионерными в нашей стране.

В настоящее время активно ведутся исследования по разработке и включению моделей устройств FACTS в задачу расчета УР как в нашей стране, так и за рубежом. Модели устройств FACTS первого и второго поколения достаточно широко представлены в ПВК для расчета УР.

В области разработки и моделирования устройств FACTS можно отметить работы: Г.Н. Александрова, Е.В. Аметистова, М.Е. Гольдштейна, Ф.А. Дьякова, Г.А. Евдокунина, П.М. Ерохина, В.И. Кочкина, Л.А. Кошечева, М.Ш. Мисриханова, В.Г. Неуймина, В.М. Постолатия, С.В. Смоловика, А.О. Сулайманова, Ю.Г. Шакарьяна и других, а также ряда зарубежных авторов: E. Acha, C. R. Fuerte - Esquivel, H. Ambriz-Perez. Стоит отметить также исследования, выполненные в этом направлении сотрудниками ИСЭМ СО РАН: А.Е. Ушаковым, О.Н. Войтовым, Н.И. Воропаем, И.И. Голуб, А.Б. Осаком.

В работах зарубежных авторов в последние годы появились предложения по моделированию «гибких систем передачи тока» при решении задачи ОС ЭЭС.

В нашей стране модели устройств FACTS первого поколения представлены в задаче ОС ЭЭС не в полном объеме, модели устройств FACTS второго поколения до недавних пор практически не включались в задачу ОС.

Поэтому разработка моделей устройств FACTS и включение их в алгоритмы оценивания состояния современных ЭЭС является актуальной задачей при создании системы управления ИЭС. Поскольку параметры схем замещения многих устройств FACTS изменяются в зависимости от режима ЭЭС, то не менее актуальной является задача определения параметров моделей этих устройств в процессе формирования расчетной модели ЭЭС.

Цели работы: разработка и включение моделей устройств FACTS в задачу ОС ЭЭС, идентификация параметров этих моделей в процессе решения задачи ОС, исследование влияния включения моделей FACTS на эффективность методов ОС.

Для этого поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Изучение и анализ современного состояния разработок и внедрения устройств FACTS в практику управления ЕЭС России и зарубежных ЭЭС.
2. Исследование существующих подходов к моделированию устройств FACTS при расчёте УР и ОС ЭЭС. Выбор способа моделирования на основе анализа теории, практики и современных тенденций решения данной проблемы.
3. Разработка моделей устройств FACTS первого и второго поколения, не включенных к настоящему времени в задачу ОС ЭЭС в отечественной практике.
4. Разработка алгоритмов идентификации параметров моделируемых устройств FACTS в процессе решения задачи ОС.
5. Разработка экспериментальной программы ОС классическим методом в среде Matlab для исследования работоспособности и эффективности разработанных моделей.
6. Разработка модифицированных алгоритмов ОС на базе метода контрольных уравнений (КУ) для включения моделей устройств FACTS в задачу ОС ЭЭС.
7. Тестирование разработанных моделей FACTS при их включении в задачу ОС и проведении расчетов в имитационных экспериментах.
8. Исследование влияния разработанных моделей устройств FACTS на эффективность алгоритмов ОС методом КУ.

Объект исследований. Современные устройства управления и регулирования параметров режима – FACTS, используемые при управлении ИЭС.

Предмет исследований. Методы моделирования текущего режима ЭЭС на основе измерений (методы ОС ЭЭС).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»:

П.6. Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике;

П.7 Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем;

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования ЭЭС, теория и методы расчета установившихся режимов и оценивания состояния ЭЭС, методы решения систем нелинейных уравнений, методы теории вероятности и математической статистики. Методами исследования при выполнении экспериментальной части диссертации являлись математическое моделирование и пассивный эксперимент. Предлагаемые в диссертационной работе алгоритмы оценивания состояния ЭЭС базируются на разработанном в ИСЭМ СО РАН методе контрольных уравнений.

Составляют предмет научной новизны и выносятся на защиту следующие наиболее важные результаты:

1. Алгоритмы моделирования управляемых устройств FACTS первого поколения и устройств FACTS второго поколения при решении задачи ОС ЭЭС.
2. Алгоритмы идентификации параметров моделей устройств FACTS в процессе решения задачи ОС, построенные на включении параметров этих устройств в вектор состояния.
3. Модифицированные алгоритмы ОС ЭЭС классическим методом и методом КУ, разработанные для решения задачи ОС с учетом моделей устройств FACTS.
4. Результаты исследования влияния включения моделей FACTS на эффективность алгоритмов ОС методом КУ при расчетах фрагмента схемы реальной ЭЭС.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обоснована корректным применением математических методов и алгоритмов расчета УР и ОС, а также сопоставлением результатов моделирования ряда устройств FACTS с аналогичными результатами, опубликованными в отечественной и зарубежной литературе и полученными при проведении расчета УР с использованием ПВК АНАРЭС.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработаны алгоритмы моделирования современных управляемых устройств FACTS на базе силовой электроники при решении задачи ОС, включающие разработку моделей устройств FACTS и модифицированных алгоритмов ОС для включения этих моделей в задачу ОС. Разработанная методика может применяться для решения научно-технических задач при переходе на качественно новый уровень управления режимами ИЭС.

Использование предложенных в работе алгоритмов ОС ЭЭС с устройствами FACTS позволяет повысить точность моделирования текущих режимов ИЭС, на базе которых решаются задачи оперативного и противоаварийного управления ИЭС.

Разработанные модели и алгоритмы легко реализуемы с минимальными трудозатратами и могут быть включены практически в любой ПВК оценивания состояния (Космос, АНАРЭС, Оценка и другие), а также в аппаратно-программные комплексы управления нормальными и аварийными режимами большого энергообъединения.

Реализация результатов работы. Предложенные в работе модели устройств FACTS интегрированы в экспериментальную программу ОС и проверены при расчёте схемы 500 кВ, а также реализованы в ПВК "Оценка", предназначенном для проведения расчетов текущего режима ЭЭС по данным ТИ и ТС. ПВК "Оценка" прошел тестирование на сетевом предприятии ОАО «Иркутская электросетевая компания».

Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении Программы фундаментальных исследований СО РАН III.17.1. «Теория и методы управления режимами интеллектуальных электроэнергетических систем» и при

выполнении интеграционного проекта партнерских фундаментальных исследований СО РАН «Методы оценивания состояния интеллектуальных электроэнергетических систем со сложной иерархической структурой».

Материалы диссертации используются в учебном процессе на кафедре "Электроэнергетических систем" ИРНИТУ при изучении дисциплины "Интеллектуальные энергосистемы".

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 5 конференциях-конкурсах научной молодежи ИСЭМ СО РАН «Системные исследования в энергетике» (2012, 2013, 2014, 2015, 2016 г.), Научно-практическом семинаре «Современные программные средства для расчетов нормальных и аварийных режимов, анализа надежности, динамической устойчивости, оценивания состояния, проектирования и автоматизации оперативно-диспетчерского управления электроэнергетических систем», ИСЭМ СО РАН, Иркутск, 2012; Международной молодежной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи», г. Томск, 2014г, на Международных научных семинарах *им. Ю.Н. Руденко* «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (2015, 2016г), на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири», Иркутск, 2017г, на III Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», Санкт-Петербург, 2017г.

Публикации. В ходе работы над диссертацией было опубликовано 11 работ, в том числе 2 в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией («Промышленная энергетика», «Вестник ИРГТУ»), 1 статья в зарубежном издании ("Power and Electrical Engineering"), входящем в международную базу цитирования Scopus.

Личный вклад соискателя. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателем выполнен анализ существующих подходов к моделированию устройств FACTS при расчёте УР и ОС, разработаны алгоритмы моделирования управляемых устройств FACTS первого поколения и устройств FACTS второго поколения при решении задачи ОС, разработаны алгоритмы идентификации параметров моделируемых устройств FACTS в процессе решения задачи ОС, разработана экспериментальная программа оценивания состояния по методу Ньютона в среде Matlab, подготовлены схемы для проведения расчетов, протестированы модели FACTS при их включении в схему.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемой литературы из 126 источников и приложений.

Диссертационная работа изложена на 178 страницах текста, в тексте содержится 36 рисунков, 26 таблиц.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Во введении дается общая структура и характеристика диссертационной работы. Обосновывается её актуальность, значимость и научная новизна. Формулируются цели работы, определяется объект, предмет и методы

исследований. Обсуждаются актуальные проблемы функционирования ЕЭС России и возможности их решения с использованием устройств FACTS.

Отмечено, что в нашей стране модели устройств FACTS первого поколения представлены в задаче ОС ЭЭС не в полном объеме, модели современных устройств FACTS второго поколения до сих пор практически не включались в задачу ОС в отечественных ПВК.

В первой главе представлены основные методы формирования расчётной модели ЭЭС: расчёт установившегося режима и оценивание состояния ЭЭС.

ОС ЭЭС – это расчет параметров режима, выполненный по данным измерений \bar{y} . В качестве измерений используются ТИ SCADA и синхронизированные векторные измерения (СВИ), поступающие от системы мониторинга переходных режимов - СМПР. Традиционная постановка задачи ОС состоит в расчете оценок вектора состояния \hat{x} , включающего модули и фазы узловых напряжений, путем минимизации критерия:

$$J(x) = [\bar{y} - y(\hat{x})]^T R_y^{-1} [\bar{y} - y(\hat{x})], \quad (1)$$

где R_y - ковариационная матрица ошибок измерений. Вследствие нелинейной зависимости $y(x)$, задача решается итеративно.

Наряду с традиционным подходом в ИСЭМ СО РАН для ОС разработан метод контрольных уравнений. КУ – это уравнения установившегося режима, в которые входят только измеренные переменные режима y :

$$w_k(y) = 0 \quad (2)$$

Сравнивая величину невязки КУ, полученную после подстановки в него измерений, с некоторым порогом, определяемым точностью измерений (их дисперсиями), т.е. проверяя условие:

$$|w_k| < d, \quad (3)$$

можно судить о наличии в измерениях грубых ошибок (плохих данных).

При использовании КУ задача ОС состоит в минимизации критерия:

$$J(y) = (\bar{y} - \hat{y})^T R_y^{-1} (\bar{y} - \hat{y}), \quad (4)$$

т.е. в расчете оценок измеренных переменных \hat{y} , при ограничениях в виде системы контрольных уравнений (2). Вследствие нелинейности КУ задача решается итерационно с вычислением на каждой итерации поправок:

$$\Delta y = -R_y \left(\frac{\partial w_k}{\partial y} \right)^T \left[\frac{\partial w_k}{\partial y} R_y \left(\frac{\partial w_k}{\partial y} \right)^T \right]^{-1} w_k(\bar{y}), \quad (5)$$

где $\frac{\partial w_k}{\partial y}$ - матрица коэффициентов линеаризованной системы КУ.

При необходимости рассчитать компоненты вектора состояния x и оценки неизмеренных переменных выбирается базисная система измерений y_δ . После выбора y_δ вектор x вычисляется из уравнения:

$$H_\delta \Delta x^{(i)} = -[\hat{y}_\delta - y_\delta(x^{(i-1)})], \quad (6)$$

здесь $H_6 = \frac{\partial y_6}{\partial x}$ - базисная матрица Якоби, $\Delta x^{(i)}$ - поправка на i -той итерации.

Значительную роль в построении ИЭС играют современные технические средства и технологии, обеспечивающие управляемость электрической сети и реализацию управлений. Одной из наиболее перспективных в этой области являются FACTS-технологии или гибкие управляемые элементы сети.

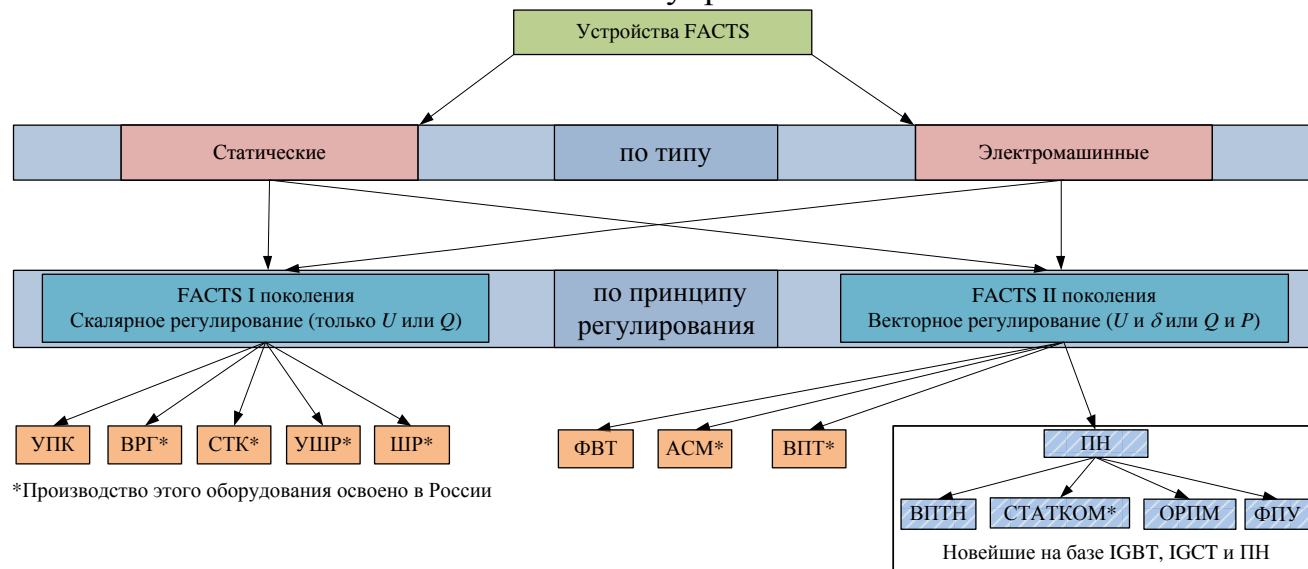


Рисунок 1. Основные устройства управляемых систем передачи переменного тока в электрических сетях

По принципу управления (рисунок 1) устройства FACTS можно разделить на:

- устройства первого поколения (FACTS I), обеспечивающие скалярное регулирование, такие, как шунтирующие реакторы (ШР), батареи статических конденсаторов (БСК), устройства продольной компенсации (УПК), синхронные компенсаторы (СК), статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (СТК), шунтирующие реакторы (ШР), тиристорно-управляемые УПК (ТУПК), управляемые ШР (УШР);
- устройства второго поколения (FACTS II), обеспечивающие векторное регулирование. Изначально для этого использовались асинхронизированные машины (АСМ), фазовращающие трансформаторы (ФВТ), вставки постоянного тока (ВПТ) и другие. Развитие полупроводниковой технологии в конце XX века позволило создать: запираемые (GTO и GCT) тиристоры, мощные транзисторы (IGBT) и быстродействующие диоды, которые работают в диапазоне от 2 500 до 6 000 В по напряжению и от 1 500 до 4 000 А по току. Новая элементная база дала возможность приступить к созданию нового класса преобразователей – преобразователей напряжения (ПН) и тока и на их основе современных устройств FACTS II, таких, как статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ), объединённый регулятор потоков мощности (ОРПМ), вставка постоянного тока на основе ПН (ВПТН), фазопоротное устройство (ФПУ) и другие. Векторное регулирование позволяет комплексно и наиболее оптимально решать проблемы повышения

пределов передаваемой по линиям электропередачи мощности вплоть до предельных по нагреву токов, принудительно распределять мощности в сложной неоднородной электрической сети в соответствии с требованиями диспетчера, регулировать напряжения в допустимых пределах.

Для каждого устройства в работе приведено их назначение, места установки, техническая реализация и принцип действия, управляющие воздействия. Показано, какие устройства FACTS смоделированы в современных ПВК, предназначенных для расчёта УР и ОС ЭЭС.

На сегодняшний день модели устройств FACTS широко представлены в задаче расчёта УР и приведены в литературе.

При решении задачи ОС модели устройств FACTS I представлены не в полном объёме – в основном это УПК, ШР, СК, а устройства FACTS II практически не представлены. В последние годы за рубежом появились работы по моделированию современных устройств FACTS, таких, как СТК, СТАТКОМ, ОРПМ в задаче ОС. Обзор публикаций свидетельствует об актуальности рассматриваемой проблемы и о необходимости проведения исследований в этой области в нашей стране.

Во второй главе представлены разработанные алгоритмы моделирования устройств FACTS при решении задачи ОС ЭЭС. Основное внимание уделено моделям управляемых устройств FACTS I - ТУПК, СТК, УШР и устройствам FACTS II - ФПУ, СТАТКОМ, ВПН, ОРПМ, для которых были разработаны модели.

В качестве базовой схемы для апробации разработанных алгоритмов моделирования устройств FACTS и ОС используется фрагмент сети 500 кВ Иркутской энергосистемы, содержащий 19 узлов и 28 связей, представленный на рисунке 2.

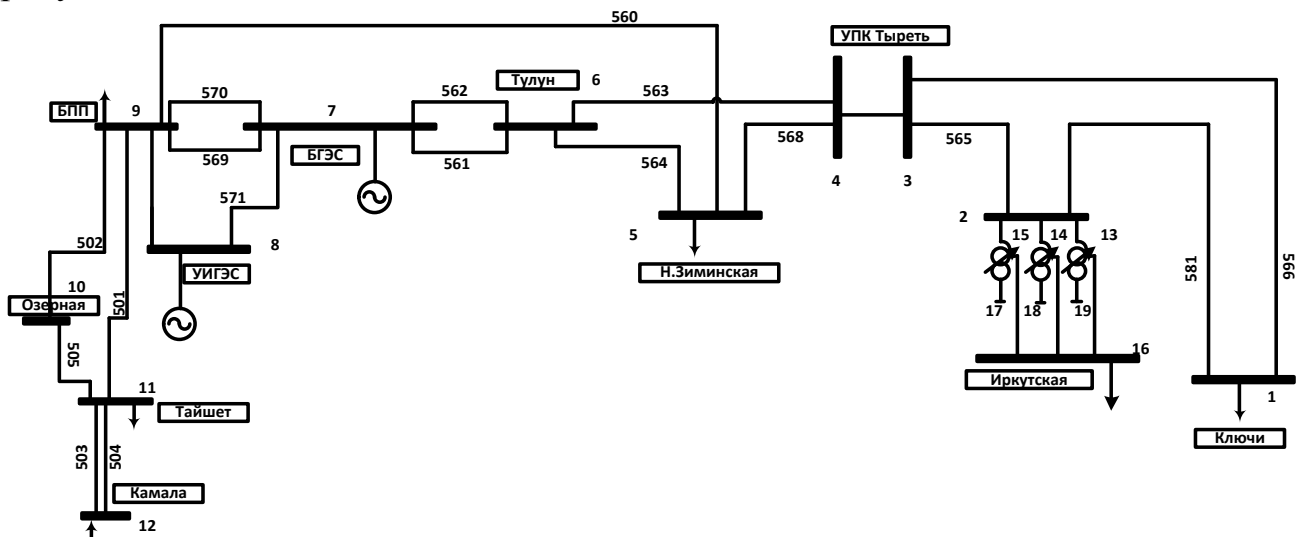


Рисунок 2. 19-ти узловой фрагмент схемы Иркутской энергосистемы

Основными питающим центрами являются две крупнейшие в нашей стране ГЭС – Братская и Усть-Илимская. Основными потребителями электроэнергии в Иркутской энергосистеме являются алюминиевые заводы, получающие питание от ПС 500 кВ «Ключи» и с Братской ГЭС, а также крупные потребители оборонного и металлургического комплексов, локализованных в Иркутско-

Черемховском и Братском энергорайонах. Иркутская энергосистема объединяет ОЭС Сибири и Дальнего Востока и передаёт мощность в республику Бурятия и Забайкальский край.

Из современных устройств FACTS I в работе были рассмотрены: тиристорно-управляемые устройства продольной компенсации и статические тиристорные компенсаторы.

ТУПК представляют собой стандартное устройство продольной компенсации (рисунок 3), дополненное блоком тиристорного управления реакторной группы (ТРГ).

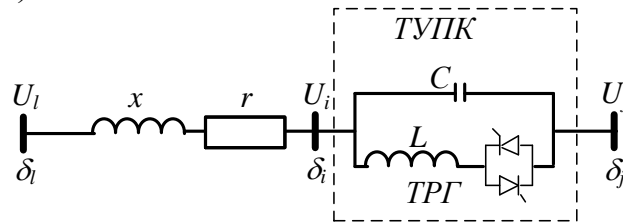


Рисунок 3. Структура тиристорно-управляемого устройства продольной компенсации

ТУПК позволяет в темпе изменения параметров режима непрерывно изменять в широких пределах, «подстраивать», результирующее реактивное сопротивление в диапазоне от емкостного до индуктивного.

Сопротивление ТУПК складывается из сопротивления параллельно соединенных конденсаторной батареи и реактора и зависит от угла управления тиристоров α :

$$x_{ТУПК}(\alpha) = \frac{x_{ТРГ}(\alpha) \cdot x_C}{x_{ТРГ}(\alpha) + x_C} \quad (7)$$

где:

$$x_{ТРГ}(\alpha) = \omega L \cdot \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}, \quad (8)$$

L – полная индуктивность ТРГ.

В разработанном алгоритме моделирования ТУПК при ОС задается ветвью $i - j$ с переменным реактивным сопротивлением, включенным в рассечку длинной линии электропередачи с фиксированным напряжением в одном из улов рассечки и фиксированным перетоком активной мощности. Реактивное сопротивление $x_{ТУПК}$ задается в качестве компоненты вектора состояния взамен напряжения и определяется непосредственно в процессе решения задачи ОС.

Расчёты выполнены для схемы при включении ТУПК вместо существующего дискретно управляемого устройства «УПК Тыреть» (ветвь 3–4, рисунок 2) для двух режимов: при передаче по транзиту 500 кВ «Братск Иркутск» – 1386 МВт и 1852 МВт. Устройство «УПК Тыреть» имеет полное емкостное сопротивление $x_{УПК} = -26,3 \text{ Ом}$, это значение было принято в качестве исходного приближения при расчетах с ТУПК. В таблице.1 показано, как изменялись значения $x_{ТУПК}$ в процессе расчета.

Изменение $x_{ТУПК}$ в процессе итерационных расчетов

№ итерации	Передаваемая активная мощность	
	P=1386 МВт	P=1852 МВт
	$x_{ТУПК}$ (Ом)	$x_{ТУПК}$ (Ом)
1	-26,30	-26,30
2	-18,51	-25,40
3	-18,46	-25,33
4	-18,39	-25,27
5	-18,36	-25,22

По полученному значению $x_{ТУПК}$, из (7) определяем $x_{ТРГ}$ и угол открывания тиристора α путем итерационного решения уравнения (8), записанного в виде:

$$f(\alpha_i) = \pi - 2\alpha_i - \sin(2\alpha_i) - \frac{\omega L}{x_{ТРГ}}, \text{ где } i - \text{ номер итерации.} \quad (9)$$

Результаты выполненных расчетов показывают, что степень продольной компенсации зависит от величины передаваемой мощности. Для передачи 1386 МВт необходимо скомпенсировать реактивное сопротивление транзита «Братск-Иркутск» на -18,36 Ом. Если передаваемая мощность будет выше – 1852 МВт, то и скомпенсировать реактивное сопротивление необходимо на большую величину – на -25,22 Ом. При передаче мощности 1386 МВт угол открывания тиристора, рассчитанный итерационно, составляет $62,57^\circ$, при передаче мощности 1852 МВт угол открывания тиристора составляет $59,99^\circ$.

СТК – многофункциональное статическое устройство, обеспечивающее стабилизацию напряжения и плавное или ступенчатое изменение потребляемой и (или) выдаваемой им реактивной мощности на шинах его подключения. Использование СТК в заданных узлах системы позволяет выровнять график нагрузки, уменьшить потери электроэнергии и повысить её качество, а также увеличить пропускную способность ВЛ.

В большинстве случаев устройство СТК состоит из тиристорно-конденсаторной группы (ТКГ) и тиристорно-реакторной группы (ТРГ). Возможны и другие комбинации устройств, например, выполненная отдельно ТКГ или ТРГ. В работе представлены два разработанных алгоритма моделирования СТК, состоящего из ТРГ, при ОС ЭЭС.

В первом алгоритме СТК моделируется шунтом переменной проводимости в узле с фиксированным напряжением, проводимость которого определяется при расчёте. В зависимости от полученного значения проводимости определяется угол открывания тиристора α . Во втором алгоритме угол α задается в качестве компоненты вектора состояния и определяется непосредственно в процессе решения задачи ОС.

В реальной ЭЭС (рисунок 2) для компенсации избыточной реактивной мощности на ПС 500 кВ Иркутская в узлах 17-19 на стороне низкого напряжения АТ установлены синхронные компенсаторы. Для проведения расчетов вместо СК была промоделирована установка СТК в этих же узлах.

Результаты расчётов по двум алгоритмам приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты расчётов с СТК и СК

Узел	$U_{изм}$	$U_{ос}$	δ	$P_{изм}$	$P_{ос}$	$Q_{изм}$	$Q_{ос}$	b	α
№	кВ	кВ	град	МВт	МВт	Мвар	Мвар	Сим	град
По первому алгоритму									
16	224	224	-8,1	-394	-393	-397	-397	-	-
17	10,5	10,5	-8,2	-	0	-	-15	0,136	-62,22
18	10,5	10,5	-8,2	-	0	-	-15	0,136	-62,22
19	10,5	10,5	-8,2	-	0	-	-15	0,136	-62,22
По второму алгоритму									
16	224	224	-8,1	-394	-395	-397	-397	-	-
17	10,5	10,51	-8,2	-	0	-	-15,1	0,137	-62,17
18	10,5	10,51	-8,2	-	0	-	-15,1	0,137	-62,17
19	10,5	10,51	-8,2	-	0	-	-15,1	0,137	-62,17
СК									
16	224	224	-8,1	-394	-394	-397	-397	-	-
17	10,5	10,5	-8,2	-	0,00	-15	-15	-	-
18	10,5	10,5	-8,2	-	0,00	-12	-12	-	-
19	10,5	10,5	-8,2	-	0,00	-15	-15	-	-

Как следует из таблицы 2, в обоих расчетах получены практически совпадающие значения проводимостей СТК и углов α . Полученные в обоих расчётах инъекции реактивной мощности совпадают с величиной Q , вырабатываемой СК в базовом режиме. Расчёты показывают, что СТК работают в индуктивном режиме и компенсируют избыточную реактивную мощность, генерируемую ВЛ 500 кВ протяженного транзита «Братск-Иркутск», обеспечивая заданные напряжения на шинах 220 кВ ПС «Иркутская» (таблица 2, узел 16), а также поддерживать $\cos \varphi = 0,7$ путем отбора из сети 45 Мвар реактивной мощности.

УШР при ОС ЭЭС моделировался аналогично СТК.

Разработка моделей устройств FACTS II была выполнена для ФПУ, СТАТКОМА, ВПТ на преобразователях напряжения (ВПТН) и ОРПМ.

ФПУ – одно из основных устройств FACTS второго поколения, позволяющее управлять перетоками активной мощности путём изменения угла фаз между напряжениями по концам линии. Принцип действия ФПУ основывается на том, что напряжение каждой фазы сдвинуто по отношению к междуфазному напряжению двух других фаз на угол 90° эл. В традиционной конструкции ФПУ используют каскад из двух трансформаторов – регулируемого Т1 и последовательного вольтодобавочного (ВДТ) – Т2.

На рисунке 4 показана схема ветви $i-j$ с включённым у узла i ФПУ. Уравнения для расчета перетоков по линиям аналогичны уравнениям, используемым при расчете оценок.

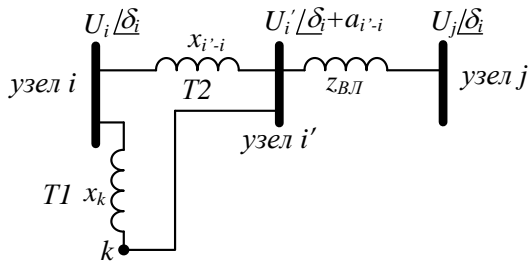


Рисунок 4. Схема включения ФПУ в линию

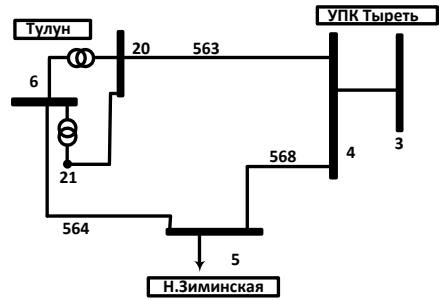


Рисунок 5. Фрагмент схемы Иркутской энергосистемы с включенным ФПУ

Для выполнения расчетов ФПУ был смоделирован на ВЛ транзита «Братск – Иркутск» у узла 6 (рисунок 5). Для моделирования ВДТ Т2 мощностью 630 МВА в схему был добавлен узел 20 и ветвь 6-20. Для моделирования понижающего трансформатора Т1 добавлен узел 21 и ветвь 6-21. Возбуждающий и вольтодобавочный трансформаторы соединены по стороне вторичных обмоток (ветвь 20-21). Результаты расчётов с ФПУ приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Результаты ОС с моделью ФПУ

Узел №	Название	$U_{изм}$	$U_{ос}$	δ	$P_{изм}$	$P_{ос}$	$Q_{изм}$	$Q_{ос}$
		кВ	кВ	град	МВт	МВт	Мвар	Мвар
1	Ключи	503	504,4	-5,9	-206	-206	-29	8
2	Иркутская	498	498,1	-6,0	0	0	0	0
3	Тыреть	-	516,9	-2,1	0	0	0	0
4	Тыреть	515	515,4	-5,5	0	0	0	0
20	Т2	-	510,7	-1,3	0	0	0	0
21	Т1	-	10,7	-1,3	0	0	0	0
5	Н. Зиминская	516	515,7	-4,8	-168	-168	-76	-76
6	Тулун	512	509	-4,0	0	0	-	0

При расчёте базового режима были получены следующие значения фазовых углов напряжений: $\delta_4 = -6,6^\circ$ и $\delta_6 = -3,8^\circ$. Разность углов по ветви 6-4 составила $\Delta\delta = 2,8^\circ$. Переток активной мощности по ветви 6-4 составляет 265 МВт, по ветви 6-5 - 200 МВт, а по ветви 5-4 – 343 МВт.

После подключения к узлу 6 ВДТ (связь 6-20) с коэффициентом трансформации $K_{i'-i} = 1 - j0,156$ получены следующие значения углов: $\delta_6 = -4,0^\circ$ и $\delta_{20} = -1,3^\circ$. Разность углов в ветви 6-20 составила $\Delta\delta = -2,7^\circ$. При включении в схему Иркутской энергосистемы ФПУ переток активной мощности по линии 6-4 увеличился с 263 МВт до 400 МВт, а по линии 4-5 уменьшился с 342 МВт до 207 МВт. При этом суммарная мощность, приходящая в узел 3, осталась прежней – 606 МВт.

СТАТКОМ – одно из ключевых устройств FACTS II. СТАТКОМ является тиристорно-управляемым источником реактивной мощности, обеспечивающим поддержание заданного значения напряжения посредством потребления или генерации реактивной мощности в точке подключения без использования дополнительных внешних реакторов или конденсаторных батарей большой

мощности. Устройства СТАТКОМ используют тиристоры с возможностью быстрого отключения, обеспечивающие контроль амплитуды и фазы напряжения, либо силовые транзисторы. Высокие частоты модуляции позволяют существенно снизить уровень высших гармоник в выходном сигнале.

СТАТКОМ может быть основан на преобразователях напряжения (ПН) или преобразователях тока (ПТ). На рисунке 6 приведена упрощенная схема СТАТКОМ на ПН.

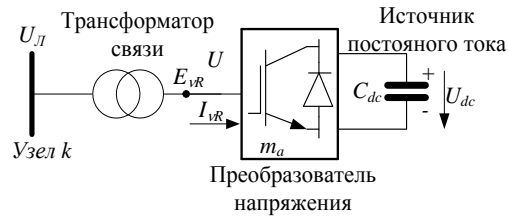


Рисунок 6. Структура СТАТКОМ с ПН

При расчёте УР и ОС СТАТКОМ моделируется как источник напряжения за некоторым шунтом, рисунок 7.

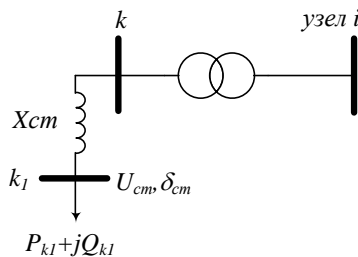


Рисунок 7. Схема СТАТКОМа

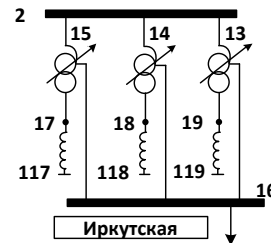


Рисунок 8. Укрупнённая схема ПС 500 кВ «Иркутская» со СТАТКОМом

При ОС параметры управления СТАТКОМа (модуль U_{cm} и угол δ_{cm} напряжения преобразователя) являются компонентами вектора состояния, поэтому такая модель легко включается в алгоритм ОС.

Так же, как и при моделировании СТК, в узлах 17-19 на стороне низкого напряжения АТ подстанции Иркутская вместо СК были смоделированы СТАТКОМы, представленные четырьмя блоками по 25 Мвар каждый. При моделировании СТАТКОМов в схему были добавлены узлы 177, 188, 199 и ветви 17-177, 18-188, 19-199, рисунок 8. Результаты расчёта с моделью СТАТКОМа приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Результаты расчёта с моделью и СТАТКОМа

Узел №	$U_{изм}$ кВ	$U_{ОС}$ кВ	δ град	$P_{изм}$ МВт	$P_{ОС}$ МВт	$Q_{изм}$ Мвар	$Q_{ОС}$ Мвар	b мкСим	α град
16	224	224	-8,1	-394	-394	-397	-397	-	-
17	10,5	10,5	-8,2	0	0	0	0	-	-
18	10,5	10,5	-8,2	0	0	0	0	-	-
19	10,5	10,5	-8,2	0	0	0	0	-	-
177	-	10,5	-8,2	0	0	-	-14,8	-	-
188	-	10,5	-8,2	0	0	-	-14,8	-	-
199	-	10,5	-8,2	0	0	-	-14,8	-	-

Как видно из таблиц 2 и 4, результаты расчетов при включении двух разных

устройств регулирования реактивной мощности – СТК и СТАТКОМа практически совпадают (в пределах заданной точности расчета).

Алгоритм моделирования СТАТКОМа легко реализуем с минимальными трудозатратами и может быть использован практически в любом ПВК ОС без изменения кода программы и введения новых компонентов в вектор состояния, как при включении модели СТК. Полученные в расчёте инъекции реактивной мощности совпадают с величиной Q по СК в базовом режиме.

ВПТ - преобразовательная подстанция, предназначенная для преобразования переменного тока в постоянный и последующего преобразования постоянного тока в переменный исходной или иной частоты. Вопросы моделирования ВПТ при расчёте УР достаточно хорошо изучены.

В настоящее время все большее распространение получают ВПТ, основанные на преобразователях тока и напряжения на базе современной силовой электроники. Такие ВПТ обладают широкими возможностями управления параметрами режима и обеспечивают регулирование как активной, так и реактивной мощности в широких пределах и относятся к категории FACTS.

В работе представлена разработанная модель ВПТ на преобразователе напряжения (ВПТН). ВПТН может быть представлена двумя ПН, соединенными на стороне постоянного тока. Каждый ПН подключен к системе переменного тока через трансформатор.

На рисунке 9 (а) показана линия, в которой моделируется установка ВПТН у узла j . К узлу j присоединяются две ветви, моделирующие трансформатор и выпрямитель. Для подключения инвертора в схему добавляется узел k , к которому также подключены две ветви, моделирующие трансформатор и инвертор. На рисунке 9 (б) показана эквивалентная схема после включения ВПТН.

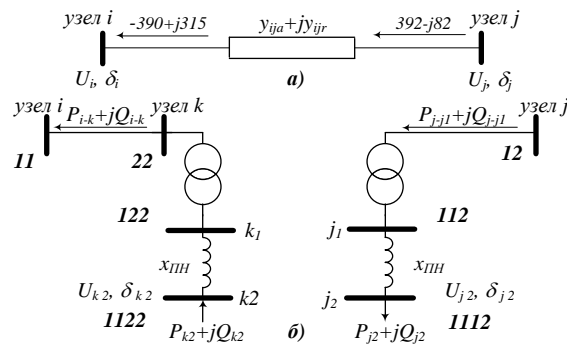


Рисунок 9. Схема включения ВПТН для ОС ЭЭС

а) - линия с расчетными параметрами; б) - эквивалентная схема

При моделировании ряда устройств FACTS возникают дополнительные уравнения, связывающие параметры режима этих устройств. Для ВПТН вводится дополнительное уравнение, описывающее процесс передачи активной мощности через ВПТН, т.е. равенство активной мощности, потребляемой выпрямителем P_{j_2} и выдаваемой инвертором P_{k_2} :

$$P_{j_2} + P_{k_2} = 0, \quad (10)$$

которое легко учитывается в методе КУ как дополнительное КУ.

ВПТН была смоделирована на системосвязующей ПС «Камала» (узел 12 в исходной схеме), для этого в схему был добавлен узел 22. Для моделирования понижающих трансформаторов 500/10,5 кВ мощностью 630 МВА в схему были добавлены узлы 112, 122 и ветви 12-112, 22-122, для моделирования преобразователей напряжений - узлы 1112, 1122 и ветви 112-1112, 122-1122. Полученные результаты ОС представлены в таблице 5.

Таблица 5.

Результаты ОС с моделью ВПТН

Узел	$U_{изм}$	$U_{ос}$	δ	$P_{изм}$	$P_{ос}$	$Q_{изм}$	$Q_{ос}$
№	кВ	кВ	град	МВт	МВт	Мвар	Мвар
12	512	512	0	-	392	-	-82
112	11	11	-5,4	0	0	0	0
1112	-	11,3	-10,0	-391	-391	-	156,4
22	512	511,8	4,8	0	0	0	0
122	11	10,0	10,8	0	0	0	0
1122	-	9,4	17,0	391	391	-	-197

Как видно из таблицы 5, передача активной мощности через ВПТН идёт практически без потерь мощности, в то время как режим по реактивной мощности существенно меняется по сравнению с УР, показанном на рисунке 9 (а).

ВПТН моделируется двумя ПН, подключенными через трансформаторы, т.е. дополнительными ветвями и узлами в схеме замещения сети. Параметры управления U_{j_2}, δ_{j_2} и U_{k_2}, δ_{k_2} включаются в вектор состояния x наряду с обычными компонентами – модулями и фазовыми углами напряжений, поэтому существенных модификаций самого алгоритма ОС не требуется.

Объединённый регулятор потоков мощности (ОРПМ) – это устройство продольной и поперечной компенсации на основе ПН, которое позволяет управлять основными параметрами (перетоки мощности и напряжения) режима ЭЭС. В схеме замещения ОРПМ моделируется двумя ПН, один (ПН₂) подключается к дополнительному узлу за ВДТ, включаемым в ВЛ последовательно, второй (ПН₁) – параллельно к тому же узлу ВЛ через понижающий трансформатор. Оба ПН объединены на стороне постоянного тока.

На рисунке 10 показана схема ветви $i-j$ с включённым у узла i ОРПМ. Уравнения для расчета перетоков по линиям аналогичны уравнениям, используемым при расчете оценок.

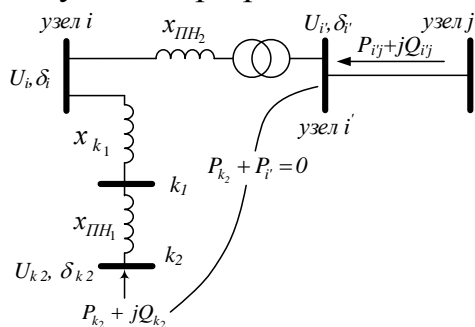


Рисунок 10. Схема включения ОРПМ в линию

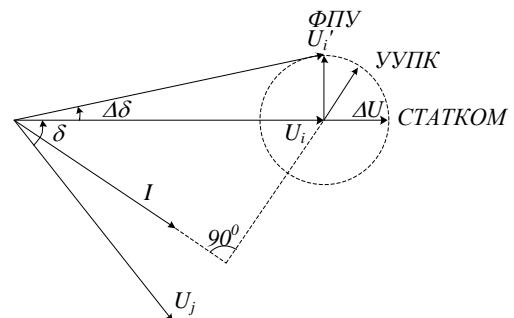


Рисунок 11. Векторная диаграмма линии с ОРПМ

ОРПМ может работать в режимах нескольких устройств FACTS: СТАТКОМа, ФПУ, УУПК. Как показано на рисунке 11, это достигается изменением угла добавочного напряжения $\delta_{ПН2}$ ($\Delta\delta$ на рисунке 11) от 0 до 2π в точке подключения ВДТ:

- если $\delta_{ПН2}$ сдвинут на $\pi/2$ к δ_i , то ОРПМ регулирует переток активной мощности и действует как ФПУ;
- если $\delta_{ПН2}$ сдвинут на $\pi/2$ к углу тока в линии, то он регулирует активный переток, действуя как УУПК;
- если $\delta_{ПН2}$ находится в фазе с углом δ_i , то ОРПМ регулирует напряжения узла. ОРПМ работает в режиме СТАТКОМа, самостоятельно генерирует или потребляет реактивную мощность;
- при всех других значениях $\delta_{ПН2}$ подключенный источник напряжения действует как комбинированный регулятор напряжения - УУПК и ФПУ.

При моделировании ОРПМ вводится дополнительное уравнение, описывающее процесс передачи активной мощности через ОРПМ, т.е. равенство активной мощности потребляемое ПН₁ и выдаваемое ПН₂:

$$P_{k_2} + P_i = 0 \quad (11)$$

Для выполнения расчетов ОРПМ был смоделирован на ВЛ транзита «Братск – Иркутск» у узла 6. Для моделирования ВДТ поперечного регулирования мощностью 630 МВА в схему был добавлен узел 20 и ветвь 6-20. Для моделирования понижающего трансформатора и ПН₁ добавлены узлы 21, 22 и ветви 6-21 и 21-22. Фрагмент тестовой схемы с включенным ОРПМ показан на рисунке 12.

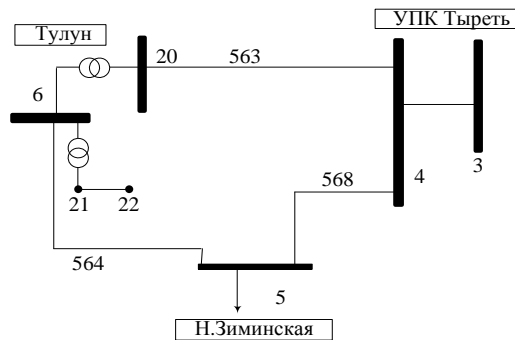


Рисунок 12. Фрагмент схемы Иркутской энергосистемы с включенным ОРПМ

В работе было проведено ОС для трех режимов работы ОРПМ (ФПУ, УУПК, СТАТКОМ). Полученные результаты ОС представлены в таблице 6.

Таблица 6.

Результаты ОС с моделью ОРПМ

Узел	Название	$U_{изм}$	$U_{ос}$	δ	$P_{изм}$	$P_{ос}$	$Q_{изм}$	$Q_{ос}$
№		кВ	кВ	град	МВт	МВт	Мвар	Мвар
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ОРПМ в режиме ФПУ								
1	Ключи	503	504,3	-5,5	-206	-206	-29	3
2	Иркутская	498	498,1	-5,6	0	0	0	0
3	Тыреть	-	517,2	-1,7	0	0	0	0
4	Тыреть	515	515,4	-5,2	0	0	0	0
20	ВДТ (Т2)	-	511,2	-0,5	-	-171	-	0

1	2	3	4	5	6	7	8	9
21	T1	-	10,7	-2	0	0	0	0
22	ПН ₁	-	10,7	-0,5	-	171	-	16
5	Н. Зиминская	516	515,8	-4,6	-168	-168	-76	-76
6	Тулун	512	509,2	-4,1	0	0	-	0
ОРПМ в режиме УУПК								
1	Ключи	503	503,8	-6,0	-206	-206	-29	-36
2	Иркутская	498	498,1	-6,2	0	0	0	0
3	Тыреть	-	519,2	-2,3	0	0	0	0
4	Тыреть	515	515,4	-5,7	0	0	0	0
20	ВДТ (Т2)	-	514,1	-1,8	-	-105	-	0
21	T1	-	10,8	-2,7	0	0	0	0
22	ПН ₁	-	10,8	-1,8	-	105	-	24
5	Н. Зиминская	516	515,9	-4,9	-168	-168	-76	-76
6	Тулун	512	510,0	-4,0	0	0	-	0
ОРПМ в режиме СТАТКОМ								
1	Ключи	503	503,2	-7,4	-206	-206	-29	-74
2	Иркутская	498	498,1	-7,6	0	0	0	0
3	Тыреть	-	521,2	-3,7	0	0	0	0
4	Тыреть	515	515,5	-7,1	0	0	0	0
20	ВДТ (Т2)	-	517	-5,0	-	64	0	0
21	T1	-	10,8	-4,5	0	0	0	0
22	ПН ₁	-	10,9	-5,0	-	-64	0	33
5	Н. Зиминская	516	516	-5,8	-168	-167	-76	-76
6	Тулун	512	511,1	-3,7	0	0	-	0

ОРПМ в режиме ФПУ. В базовом режиме угол между векторами напряжения в линии 6-4 составляет $\delta_6 - \delta_4 = 2,8^\circ$. При работе ОРПМ в режиме ФПУ с $K_{i'-i} = 1 - j0,171$ в узле подключения ПН₂ (узел 20) был получен угол напряжения $\delta_{20} = -0,5^\circ$. Кроме того, изменились углы в узлах 6 и 4 ($\delta_6 = -4,1^\circ$ и $\delta_4 = -5,2^\circ$). В результате угол между векторами напряжения в линии 20-4 составил $\delta_{20} - \delta_4 = 4,7^\circ$, что привело к перераспределению активных перетоков по линиям, передающим мощность в узел 4. Переток по линии 4-6 увеличился с -263 МВт до -443 МВт, а переток по линии 4-5 уменьшился с -342 МВт до -164 МВт.

ОРПМ в режиме УУПК. ОРПМ можно перевести в режим работы УУПК, изменив угол $\delta_{ПН_2}$ на величину, при которой вектор напряжения $U_{i'}$ будет повернут на 90° к вектору тока в линии, для этого задаем $K_{i'-i} = 1 - j0,122$. При этом в узле подключения ПН₂ угол напряжения стал равным $\delta_{20} = -1,8^\circ$. Соответственно, изменились углы в узлах 6 и 4 ($\delta_6 = -4,0^\circ$ и $\delta_4 = -5,7^\circ$), т.е. угол между векторами напряжения в линии 20-4 составил $\delta_{20} - \delta_4 = 3,9^\circ$. Вследствие этого увеличилась пропускная способность линии 6-4, т.е. электрически она станет «короче». Переток по линии 4-6 увеличился с -263 МВт до -374 МВт, а переток по линии 4-5 уменьшился с -342 МВт до -232 МВт.

ОРПМ в режиме СТАТКОМа. ОРПМ можно перевести в режим работы СТАТКОМа, для этого угол $\delta_{ПН_2}$ должен находиться в фазе с углом δ_i . Это достигается заданием $K_{i-i} = 1 - j0$. При этом ПН₁ будет потреблять из сети реактивную мощность 33 Мвар для поддержания заданного уровня напряжения в узле 6.

Таким образом, ОРПМ может работать в режимах различных устройств FACTS (СТАТКОМ, ФПУ, УУПК), при этом плавно изменяя основные параметры режима.

Работая в режиме ФПУ, ОРПМ управляет потоками электроэнергии, перераспределяя мощности по недогруженным ВЛ, тем самым увеличивая пропускную способность транзитных линий разной длины. При этом, в случае резкого увеличения перетока по транзиту до максимально допустимого можно достаточно быстро перевести ОРПМ в режим УУПК и поддерживать уровень напряжения по концам транзита на заданном уровне, снижая реактивное сопротивление более длинной ВЛ. Также ОРПМ может работать в режиме СТАТКОМа, что позволяет поддерживать заданный уровень напряжения на шинах подключения и выравнять $\cos \varphi$, компенсируя реактивную мощность.

По сути, ОРПМ является комплексным устройством, которое может работать в режиме трех устройств FACTS, что дает возможность получить высокую режимную управляемость ЭЭС.

Разработанные модели устройств FACTS полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к устройствам FACTS при управлении ИЭС, и позволяют:

- проводить расчёт ОС ЭЭС в темпе управления без участия оператора;
- формировать управляющих воздействий на устройства FACTS с целью ведения оптимального режима.

В третьей главе выполнены исследования влияния моделей устройств FACTS на эффективность алгоритмов ОС на примере метода КУ.

Включение моделей устройств FACTS, рассмотренных во второй главе - ТУПК, УШР, СТК, СТАТКОМ, ОРПМ, ВПТН в схему замещения при ОС ЭЭС требует исследования влияния этих моделей на различные аспекты при решении задачи ОС, такие, как наблюдаемость схемы, обнаружение грубых ошибок в измерениях или плохих данных (ОПД), сходимость алгоритмов ОС. В таблице 7 показано, к каким изменениям в схеме замещения и в алгоритмах ОС приводит моделирование этих устройств при ОС ЭЭС.

Таблица 7.

Включение моделей устройств FACTS в схему замещения при ОС ЭЭС

Наименование устройства FACTS	Изменения в схеме замещения и в алгоритме ОС
1	2
ТУПК	В вектор состояния вместо напряжения включается переменная реактивная проводимость ТУПК

1	2
УШР	Новые элементы в схему замещения не добавляются Во втором алгоритме в в.с. включается угол открывания тиристора α
ВПТН	К каждому узлу добавляется по две ветви: первая -понижающий трансформатор, вторая - ПН .
ОРПМ	Добавляется 4 ветви: одна ветвь – серийный трансформатор и ПН ₁ (обычно их объединяют), две ветви моделируют понижающий трансформатор и ПН ₂ , четвертая связь на стороне постоянного тока.
СТК	Новые элементы в схему замещения не добавляются
СТАТКОМ	Добавляется ветвь с реактивным сопротивлением малой величины, определяемым коэффициентом статизма характеристики СТАТКОМА

Исследование эффективности алгоритмов ОС при включении моделей устройств FACTS в схему замещения было выполнено на тестовой схеме, приведенной на рисунке 2, с помощью ПК "Оценка". Для этой схемы по реальным ТИ было выполнено ОС, и полученный режим был принят за эталонный УР. Затем расчеты проводились в имитационном эксперименте, телеизмерения моделировались путем зашумления параметров полученного установившегося режима. Для анализа эффективности алгоритмов ОС методом КУ были выбраны следующие показатели:

Наблюдаемость схемы. В качестве численных показателей наблюдаемости схемы были выбраны: количество ненаблюдаемых узлов n_U , количество критических измерений n_{CM} ; количество критических групп n_{CS} и количество входящих в них измерений n_{CSM} .

Эффективность процедуры ОПД. В результате применения алгоритма достоверизации ТИ методом контрольных уравнений все измерения делятся на 4 группы: 1) достоверные; 2) ошибочные; 3) сомнительные; 4) непроверенные или критические. При этом возможны ошибки первого рода - браковка достоверных измерений, и второго рода – пропуск ошибочного измерения в задачу ОС

Для определения эффективности процедуры ОПД было выбрано три показателя:

1. $V_{ошиб}$ – отношение количества правильно обнаруженных ошибочных измерений к количеству ошибочных измерений;
2. $V_{дост}$ – отношение количества ошибочных измерений, определенных как достоверные, к общему количеству ошибочных измерений;
3. $V_{сомн}$ – отношение количества ошибочных измерений, определенных как сомнительные, к общему количеству ошибочных измерений.

Количество итераций при расчете оценок. В качестве показателей сходимости итерационных процессов при ОС методом КУ было выбрано два показателя: количество итераций k_y при расчете оценок измерений и количество итераций k_x при расчете оценок вектора состояния.

Обусловленность процедуры ОС. При решении задачи ОС в классической постановке в качестве меры обусловленности процедуры ОС используется число обусловленности матрицы G:

$$G = (H^T R_y^{-1} H), \quad (12)$$

При решении задачи ОС методом КУ в качестве матрицы G используется матрица:

$$G_k = \left[\frac{\partial w_k}{\partial y} R_y \left(\frac{\partial w_k}{\partial y} \right)^T \right] \quad (13)$$

Чем больше число обусловленности (12, 13), тем хуже обусловленность процедуры ОС.

Точность оценок. В качестве характеристики точности оценок использовался критерий:

$$N_{3\sigma} = M_{i-j,3\sigma} / M_{i-j}, \quad (14)$$

где: M_{i-j} – общее количество инъекций и перетоков мощностей – активных и реактивных в схеме, $M_{i-j,3\sigma}$ – количество инъекций и перетоков мощностей, для которых отклонения оценок от истинных значений меньше 3σ .

В таблицах 8 и 9 приведены результаты расчетов выбранных показателей при моделировании 6 устройств FACTS.

Таблица 8.

Анализ наблюдаемости и результаты ОПД при ОС с моделями устройств FACTS

Устройство FACTS	Наблюдаемость			Результаты ОПД		
	n_U	n_{CM}	n_{CS} / n_{CSM}	$V_{ошиб}$	$V_{сомн}$	$V_{дост}$
Баз. схема	0	0	1/2	0,70	0,20	0,10
ТУПК	0	0	1/2	0,50	0,39	0,11
УШР	0	0	1/2	0,64	0,19	0,17
СТК	0	0	1/2	0,53	0,34	0,13
СТАТКОМ	0	0	1/2	0,56	0,23	0,11
ВПТН	0	0	2/5	0,66	0,2	0,14
ОРПМ	0	0	3/6	0,6	0,17	0,17

Таблица 9.

Обусловленность матриц, показатели сходимости итерационных процессов и точности оценок при ОС с моделями устройств FACTS

Устройство FACTS	Число обусловленности матриц		Сходимость k_y / k_x	Точность оценок $N_{3\sigma}$
	G	G_k		
Баз. схема	$8,94 \cdot 10^{10}$	$3,09 \cdot 10^7$	3/4	0,819
ТУПК	$1,73 \cdot 10^{14}$	$8,58 \cdot 10^7$	4/4	0,947
УШР	$2,26 \cdot 10^9$	$8,58 \cdot 10^7$	3/4	9,33
СТК	$2,25 \cdot 10^9$	$7,79 \cdot 10^7$	4/4	0,904
СТАТКОМ	$1,19 \cdot 10^9$	$8,55 \cdot 10^7$	4/4	0,929
ВПТН	$4,21 \cdot 10^8$	$6,54 \cdot 10^7$	3/5	0,892
ОРПМ	$7,98 \cdot 10^{13}$	$3,11 \cdot 10^7$	4/4	0,908

Анализ результатов, приведенных в таблицах 8 и 9, показывает, что включение в схему замещения устройств FACTS, которые моделируются реактивной проводимостью переменной величины в узле или связи (ТУПК, УШР, СТК) и не требуют изменения в топологии расчетной схемы и модификации алгоритмов ОС, не приводят к заметному ухудшению показателей эффективности алгоритмов ОС.

Включение в задачу ОС устройств FACTS, требующих добавления в схему замещения дополнительных узлов и ветвей (СТАТКОМ, ВПТН, ОРПМ) приводят к ухудшению наблюдаемости схемы, обусловленности матрицы G , сходимости итерационных процессов и точности оценок. Обусловленность матрицы G_k при ОС методом КУ при этом не ухудшается.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Показано, что важной задачей при формировании расчетной модели ЭЭС для качественного решения задач оперативного управления ЭЭС является моделирование устройств FACTS, активно участвующих в управлении режимами работы электроэнергетических сетей.

2. Отмечено, что разработка моделей устройств FACTS первого и второго поколения активно ведётся как в нашей стране, так и за рубежом. Модели таких устройств достаточно широко представлены в отечественных и зарубежных ПВК для расчета УР. В нашей стране модели устройств FACTS первого поколения представлены в задаче ОС ЭЭС не в полном объеме, модели устройств FACTS второго поколения до недавнего времени практически не включались в схему замещения при решении задачи ОС в отечественных ПВК.

3. Разработаны модели управляемых устройств FACTS первого и устройств FACTS второго поколения для задачи ОС ЭЭС с учетом особых требований, предъявляемых к устройствам FACTS при управлении ИЭС.

4. Для апробации полученных моделей устройств FACTS первого и второго поколения в задаче ОС ЭЭС разработана экспериментальная программа оценивания состояния классическим методом в среде Matlab. Создана модель фрагмента сети 500 кВ Иркутской энергосистемы, позволяющая проводить расчёты в имитационном эксперименте и по реальным ТИ.

5. Проведённые расчеты на фактических данных телеметрии фрагмента сети 500 кВ Иркутской энергосистемы показали высокое быстродействие и хорошую сходимость алгоритмов ОС при моделировании устройств FACTS.

6. Выполнена модификация алгоритмов ОС методом контрольных уравнений для включения моделей устройств FACTS в расчетную схему. Выбраны показатели для оценки эффективности модифицированных алгоритмов ОС.

7. Показано, что модели устройств FACTS, не требующие изменения в топологии расчетной схемы и модификации алгоритмов ОС - ТУПК, УШР, СТК, не приводят к заметному ухудшению показателей качества алгоритмов ОС. Включение в схему замещения устройств FACTS, которые требуют добавления в схему замещения дополнительных узлов и ветвей - СТАТКОМ, ВПТН, ОРПМ, приводят к ухудшению наблюдаемости схемы, обусловленности матрицы G и базисной матрицы Якоби, сходимости итерационных процессов и точности

оценок. Обусловленность матрицы G_k при ОС методом КУ при этом не ухудшается.

8. Включение параметров схемы замещения и параметров управления - переменной проводимости и/или угла открывания тиристорных компенсаторов для ТУПК, УШР, СТК в вектор состояния позволяет проводить идентификацию параметров моделей этих устройств в процессе решения задачи ОС. Это требует незначительной модификации алгоритмов ОС и не приводит к заметному ухудшению показателей их эффективности.

9. Для эффективной работы алгоритмов ОПД и получения надежных результатов ОС при установке устройств FACTS на объектах ЭЭС необходимо оснащать эти объекты дополнительными измерительными устройствами – датчиками ТИ SCADA и устройствами для снятия СВИ.

Основные публикации по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Тихонов А.В.** Опыт внедрения ПВК Оценивания состояния в Иркутской энергосистеме / **А.В.Тихонов** // Вестник ИрГТУ. - Иркутск. - 2014. - N 1. - С. 107-112.
2. Колосок И.Н. **Тихонов А.В.** Алгоритмы моделирования статических тиристорных компенсаторов при оценивании состояния электроэнергетических систем / И.Н.Колосок, **А.В.Тихонов** // Промышленная энергетика. -2015. - N 10. - С. 30-35.

Публикации в других изданиях:

3. **Тихонов А.В.** Моделирование статических тиристорных компенсаторов в задаче оценивания состояния ЭЭС / **А.В.Тихонов** // Труды конференции молодых ученых ИСЭМ СО РАН «Системные исследования в энергетике». - Иркутск. - 2014. - Выпуск 44. - С. 64-72.
4. **Тихонов А.В.** Алгоритмы моделирования статических тиристорных компенсаторов при решении задачи оценивания состояния ЭЭС / **А.В.Тихонов** // Труды Пятой научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». - Томск. - 2014. - Т.1. - С. 218-222.
5. **Тихонов А.В.** Моделирование статических синхронных компенсаторов в задаче оценивания состояния ЭЭС / **А.В.Тихонов** // Труды конференции молодых ученых ИСЭМ СО РАН «Системные исследования в энергетике». - Иркутск. - 2015. - Выпуск 45. - С. 41-47.
6. Колосок И.Н., **Тихонов А.В.** Моделирование устройств FACTS (СТК и СТАТКОМ) при решении задачи оценивания состояния ЭЭС / И.Н.Колосок, **А.В.Тихонов** // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетике. Актуальные проблемы надежности систем энергетике. - Минск. - 2015. - Выпуск 66. - С. 176-182.
7. Kolosok I.N., Mahnitko A.E., **Tikhonov A.V.** State Estimation of Electric Power Systems Including FACTS Models (SVC and STATCOM) / I.N.Kolosok, A.E.Mahnitko, **A.V.Tikhonov** // Power and Electrical Engineering. - 2016. - Vol.33. - p. 40-45.

8. **Тихонов А.В.** Моделирование вставки постоянного тока на СТАТКОМах при решении задачи оценивания состояния ЭЭС / **А.В.Тихонов** // Труды конференции молодых ученых ИСЭМ СО РАН «Системные исследования в энергетике». - Иркутск. - 2016. - Выпуск 46. - С. 52-58.
9. **Тихонов А.В.** Моделирование устройств FACTS при оценивании состояния ЭЭС / **А.В.Тихонов** // Труды конференции молодых ученых ИСЭМ СО РАН «Системные исследования в энергетике». - Иркутск. - 2012. - Выпуск 42. - С. 103-108.
10. Колосок И.Н., **Тихонов А.В.**, Коркина Е.С. Исследование эффективности алгоритмов ОС при включении моделей устройств FACTS в схему замещения / И.Н.Колосок, **А.В.Тихонов**, Е.С.Коркина // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Проблемы надежности систем энергетики. - Сыктывкар. - 2016. - Выпуск 67. - С. 206-214.
11. **Тихонов А.В.** Опыт внедрения ПВК оценивания состояния: проблемы, результаты, перспективы / **А.В.Тихонов** // Труды конференции молодых ученых ИСЭМ СО РАН «Системные исследования в энергетике». - Иркутск. - 2013. - Выпуск 43. - С. 79-88.