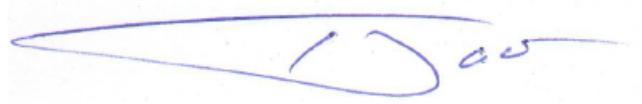


На правах рукописи



Гайсин Булат Маратович

Разработка методик определения влияния неоднородности  
электроэнергетических систем на возникновение и развитие аварийных  
каскадных процессов

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа – 2019

Работа выполнена на кафедре электромеханики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Научный руководитель кандидат технических наук Шахмаев Ильдар Зуфарович

Официальные оппоненты:

Куликов Александр Леонидович доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»

Илюшин Павел Владимирович кандидат технических наук, ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации», проректор по научной работе

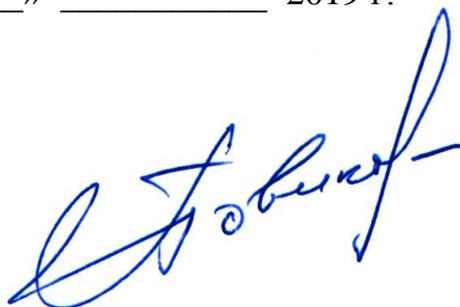
Ведущая организация АО «Научно-технический центр Единой энергетической системы»

Защита состоится «14» июня 2019 года в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 512.002.01 на базе акционерного общества «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» (АО «НТЦ ФСК ЕЭС») по адресу: 115201, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 22, корп. 3, этаж 3, зал НТС

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте АО «НТЦ ФСК ЕЭС», [ntc-power.ru](http://ntc-power.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета, д.т.н.



Н.Л. Новиков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Несмотря на развитие теории и разработки практических методов повышения надежности и живучести протяженных и развитых неоднородных электроэнергетических систем и сетей (ЭЭС) в них регулярно происходят аварийные процессы различного уровня сложности, в том числе каскадного типа, влекущие за собой существенные по масштабу потери (например, аварии в ЭЭС: США 10.08.1996 г., 14.08.2003 г.; Бразилии 21.01.2002 г.; Италии 28.09.2003 г.; Москвы и Московской области 25.05.2005 г.; Индии 30 и 31.07.2012 г., Республики Башкортостан (РБ) 02.07.2016 г.).

Исследование аварийных процессов в неоднородных ЭЭС является актуальной задачей, которая прорабатывалась многими отечественными и зарубежными учеными. Большой вклад в развитие этой области науки внесли: Жданов П.С., Веников В.А., Баринов В.А., Васин В.П., Воропай Н.И., Гамм А.З., Курбацкий В.Г., Гуревич Ю.Е., Гук Ю.Б., Идельчик В.И., Китушин В.Г., Кучеров Ю.Н., Кошечев Л.А., Мамиконянц Л.Г., Маркович И.М., Окин А.А., Портной М.Г., Розанов В.И., Руденко Ю.Н., Семенов В.А., Совалов С.А., Строев В.А., Фазылов Х.Ф., Кудрявый В.В., Рабинович М.А., Новиков Н.Л., Макоклюев Б.И. и многие их коллеги.

В сложных ЭЭС регулярно происходят возмущения вызываемые различными причинами: короткими замыканиями (КЗ), отказами оборудования, ошибками обслуживающего персонала и др. Подавляющая часть этих возмущений ликвидируется средствами релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА). При недостаточной эффективности и надёжности последней и по другим сопутствующим причинам могут происходить тяжёлые системные аварии с нарушением устойчивости и существенными отрицательными последствиями для ЭЭС и потребителей.

В данной работе на базе тестовых и реальных схем ЭЭС с учетом разработанных методик рассматривается формирование каскадного процесса до момента потери устойчивости. Под каскадным процессом понимается последовательность переходов из одного квазистационарного режима в другой при пошаговом отключении перегруженных по току элементов ЭЭС с окончанием в области допустимых или недопустимых значений режима (системная или каскадная авария). Отключения элементов ЭЭС могут продолжаться длительное время (от часов до нескольких суток) без нарушения устойчивости, при этом режим ЭЭС все более приближается к предельным границам областей устойчивости. В исследовании под факторами, влияющими на возникновение и развитие аварий, понимаются параметры ЭЭС с учетом их изменения и неоднородного распределения по топологии системы. Неоднородность ЭЭС зависит от схемно-режимных условий на конкретный момент времени и определяется несимметричным и неоднородным распределением по схеме ЭЭС совокупности параметров характеризующих элементы ЭЭС. В данной работе под параметрами, влияющими на неоднородность ЭЭС, понимаются сопротивления и проводимости ветвей, а также генерируемые и потребляемые мощности в узлах.

Исследования в области повышения надежности и живучести ЭЭС с целью

предотвращения возможности возникновения и развития каскадных процессов, оканчивающихся системными или каскадными авариями, является **актуальной задачей**.

### ***Цель работы и задачи исследований.***

Целью диссертационной работы является разработка методик определения влияния параметров неоднородных ЭЭС на возникновение и развитие аварийных каскадных процессов, а также на формирование границ предельно допустимых режимов.

Для достижения поставленной цели решены **основные задачи**:

1. Анализ параметров неоднородных ЭЭС и их связи с возникновением и развитием каскадных процессов.
2. Разработка методики построения и определения областей допустимых режимов неоднородных ЭЭС.
3. Разработка методик математического и 3D-графического анализа влияния параметров неоднородных ЭЭС на возникновение и развитие аварийных каскадных процессов.
4. Разработка программного комплекса для поиска путей развития каскадных процессов в ЭЭС.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является неоднородная ЭЭС. Предметом исследования являются ее структура, параметры и возможность возникновения и развития каскадных процессов в ЭЭС.

**Достоверность основных теоретических положений** подтверждается результатами значительных объемов компьютерных расчетов проведенных автором, детальным анализом основных влияющих факторов, расчетных условий и причинно-следственных связей по определению влияния неоднородности ЭЭС на возникновение и развитие каскадных процессов, а также на формирование границ предельно допустимых режимов в разработанной тестовой и реальной схемах ЭЭС путем изменения траектории утяжеления (по узлам), способа утяжеления (по генерируемой или потребляемой мощности).

**Методы исследований.** Теоретические исследования проведены с помощью уравнений установившихся и предельных режимов в ЭЭС. Для исследования влияния неоднородности ЭЭС на возникновение и развитие каскадных процессов использовались методы численного моделирования в программных комплексах (ПК) «*Rastr Win*» и «*MATLAB*».

### ***Научная новизна:***

1. Исследованы параметры неоднородных ЭЭС и их связи с возникновением и развитием каскадных процессов.
2. Разработана методика построения и определения областей допустимых режимов неоднородных ЭЭС.
3. Разработаны методики математического и 3D-графического анализа влияния параметров неоднородных ЭЭС на возникновение и развитие аварийных каскадных процессов.
4. Разработан программный комплекс для поиска путей развития каскадных процессов в ЭЭС.

***Реализация и практическая значимость результатов работы:***

Разработаны методики определения влияния неоднородности ЭЭС на возникновение и развитие аварийных каскадных процессов, которые позволяют на практике определить возможный ход развития каскадной аварии и обеспечить живучесть (надежность) и экономичность работы энергоузлов и электрических сетей, а также повысить эффективность решений, принимаемых при оперативном управлении режимами и проектировании ЭЭС.

Разработанные в рамках диссертации методики и программный комплекс внедрены и используются в отделе моделирования сетей в процессе моделирования и формирования режимов распределительных сетей напряжением 35, 110 кВ в деятельности АО «Башкирская электросетевая компания».

Предложенные в диссертационной работе проекты по поиску путей развития каскадных процессов в ЭЭС используются ООО «БЭСК Инжиниринг» в текущих и перспективных проектных решениях.

Также разработанные методики и программный комплекс внедрены и используются в учебном процессе на кафедре электромеханики ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет».

***Основные положения, выносимые на защиту.*** На защиту выносятся результаты работы, составляющие научную новизну и относящиеся к специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» в части пункта 11 «Разработка методов анализа структурной и функциональной надежности электроэнергетических систем и систем электроснабжения»:

1. Результаты исследования параметров неоднородных ЭЭС и их связи с возникновением и развитием каскадных процессов.
2. Методика построения и определения областей допустимых режимов неоднородных ЭЭС.
3. Методики математического и 3D-графического анализа влияния параметров неоднородных ЭЭС на возникновение и развитие аварийных каскадных процессов.
4. Программный комплекс для поиска путей развития каскадных процессов в ЭЭС.

***Апробация работы.*** Основные научные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на 11-ти научно-технических конференциях международного и всероссийского уровня.

- XIV Международная научно-техническая конференция «Интеллектуальная электроэнергетика, автоматика и высоковольтное коммутационное оборудование» г. Москва, ассоциация «ТРАВЭК», 2012 г.

- IX Международная научно-практическая конференция «Современные научные достижения – 2013» Чехия, г. Прага, 2013г.

- Международная – Сибирская конференция по управлению и связи (*Sibcon* – 2015) - г. Омск, Россия, 2015 г.

- IX Всероссийская молодёжная научная конференция «Мавлютовские чтения» - г. Уфа, УГАТУ, 2015 г.

- Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 110-летию А.М. Бамдаса. - г. Уфа, УГАТУ, 2015 г.
- X Открытая молодежная научно-практическая конференция «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» - г. Казань, КГЭУ, 2015 г.
- Конкурс программы «Молодежная секция РНК СИГРЭ» Номинация С, Грамота за III-е место г. Казань, 2015 г.
- XXII Международная научно-техническая и практическая конференция «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования», г. Москва, ассоциация «ТРАВЭК», 2015 г.
- Международная научно-техническая конференция "Пром-Инжиниринг" (IEEE) - г. Челябинск, Россия, 2016 г.
- Международная научно-практическая конференция «Электротехнические комплексы и системы» - г. Уфа, УГАТУ, 2016 г.
- Российский энергетический форум «Энергобезопасность. Крупные аварии – уроки и выводы», г. Уфа, 2017 г.

**Публикации по теме диссертации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 18 научных изданиях, в том числе 9 работ – в рецензируемых журналах из списка ВАК, 2 – в изданиях базы данных *Scopus*, 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертационной работы содержит 156 страниц машинописного текста, работа содержит 65 иллюстраций, 23 таблицы, список литературы содержит 123 наименования.

**Личный вклад автора в опубликованных работах:** из перечня ВАК: [1] выполнение экспериментальных вычислений, анализ результатов расчета – (глава 3); [4, 5, 6] – постановка задачи, анализ и обобщение результатов статистической обработки данных – (глава 3); [7] – выполнена единолично – (глава 3); [2, 3] – выполнение эксперимента, анализ полученных результатов расчета (глава 2); [8] – постановка задачи, выполнение вычислений, анализ и обобщение результатов статистической обработки данных – (глава 4); [9] – постановка задачи, выполнение экспериментальных расчетов, анализ и сопоставление полученных результатов – (глава 4). Из перечня *Scopus*: [10] – экспериментальные расчеты и анализ полученных результатов – (глава 3); [11] – экспериментальные расчеты и анализ полученных результатов – (глава 4).

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту, отмечена их новизна и практическая значимость. Приведены сведения о внедрении результатов, апробации работы и публикациях.

**В первой главе** дан анализ методов предотвращения каскадных процессов в ЭЭС, а также методов обеспечения надежности и живучести ЭЭС. Проведен сравнительный анализ и критический обзор публикаций по проблеме. Выполнена

общая постановка задачи. Сформулирована методологическая направленность исследований. В работе принимается, что необходимым условием существования каскадного процесса, является неравенство:

$$I_{ji} + \Delta I_{ji} > I_{\text{доп}ji}, \quad (1)$$

которое должно выполняться на каждом следующем шаге аварийного отключения элемента ЭЭС. В (1)  $\Delta I_{ji}$  – наброс тока на перегружаемый элемент,  $I_{\text{доп}ji}$  – допустимое значение тока для этого элемента. Невыполнение неравенства (1) приводит к останову аварийного каскадного процесса.

Исходя из (1) и топологического расположения элементов сети, при расчете режимов ЭЭС, получаем пошаговые варианты развития каскадных процессов, что в отличие от устоявшейся точки зрения позволяет рассматривать каскадный процесс, до стадии потери управляемости (до лавинообразного снижения напряжения и (или) частоты), как последовательность зависимых установившихся режимов (УР), объективно вытекающих друг из друга [17].

Таким образом, учитывая периодическое возникновение каскадных процессов, заканчивающихся системными авариями, как в ЭЭС России, так и на территории зарубежных ЭЭС автором поставлены цель и задачи исследований по выявлению влияния неоднородности ЭЭС на возможность возникновения и развития аварийных процессов.

**Во второй главе** применительно к поставленным в диссертационной работе задачам созданы две тестовые схемы ЭЭС, которые изображаются в виде сетки (совокупности квадратных ячеек), каждая ячейка представлена в виде четырех узлов и четырех ветвей (рис. 1). Подобные тестовые схемы, позволяют в результате ряда математических исследований выявить закономерности влияния расположения элементов по топологии схемы сети на возможность возникновения каскадных процессов в ЭЭС. Полученные на базе тестовых схем закономерности можно применять и к реальным схемно-режимным условиям ЭЭС. В проведенных исследованиях рассматриваются разработанные автором двадцати пяти (одна ЭЭС, номинальное напряжение  $U_{\text{ном}} = 110\text{кВ}$ ) (рис. 1) и тридцати шести (объединенная ЭЭС, состоящая из двух ЭЭС,  $U_{\text{ном}} = 500\text{кВ}$ ) узловых тестовые схемы ЭЭС. При этом размерность тестовых схем может меняться в зависимости от количества узлов и ветвей реальной эквивалентированной схемы ЭЭС. Параметры узлов этих схем задаются в соответствии с генерируемой мощностью на электростанциях ( $P_g, Q_g$ ), или потребляемой в узлах нагрузки ( $P_n, Q_n$ ). Параметры ветвей определяются сопротивлением или проводимостью соответствующего элемента сети ( $R, X, B$ ). Особенность предложенных схем заключается в том, что с применением эквивалентирования к подобной тестовой схеме различной размерности можно привести практически любую схему реальной ЭЭС.

Для расчета УР в исследовании использовался сертифицированный ПК «*Rastr Win*», достоверность вычислений которого подтверждается многолетним использованием и применением его СО ЭЭС России. В данном ПК «*Rastr Win*» в

качестве метода расчета УР использован метод Ньютона, в основу которого положены соотношения уравнения баланса мощностей.

В главе описана разработанная методика построения и определения областей формирования режимов, согласно которой возможны следующие переходы между областями: 1) Допустимый режим  $\rightarrow$  возмущение  $\rightarrow$  допустимый режим; 2) Допустимый режим  $\rightarrow$  возмущение  $\rightarrow$  недопустимый режим; 3) Допустимый режим  $\rightarrow$  возмущение  $\rightarrow$  каскадный процесс  $\rightarrow$  недопустимый режим; 4) Допустимый режим  $\rightarrow$  возмущение  $\rightarrow$  каскадный процесс  $\rightarrow$  допустимый режим. В соответствии с данной методикой исследовано влияние рассматриваемых параметров по вариантам неоднородности (рис. 2) на возможность возникновения и развития каскадных аварийных процессов.

Для вариантов неоднородности тестовой 25-ти узловой схемы ЭЭС выполнена многовариантная серия пошаговых расчетов нормальных и предельных режимов в соответствии с траекториями (1 – 31) утяжеления по потребляемой и генерируемой мощности. Расчеты нормальных и предельных режимов для всех траекторий утяжеления и вариантов неоднородности ЭЭС с учетом наличия балансирующего узла (БУ). При этом БУ является вычислительным инструментом позволяющим осуществить сходимость расчета УР. В ходе рассмотрения серий расчетов с симметричным и несимметричным распределением параметров, на примере тестовой схемы показано влияние рассмотренных параметров на аварийные процессы. В случае симметричного и однородного распределения параметров между узлами ЭЭС не возникают перетоки мощности и токовые перегрузки (даже в случае наличия симметричного и однородного утяжеления), поэтому в ЭЭС с однородным и симметричным

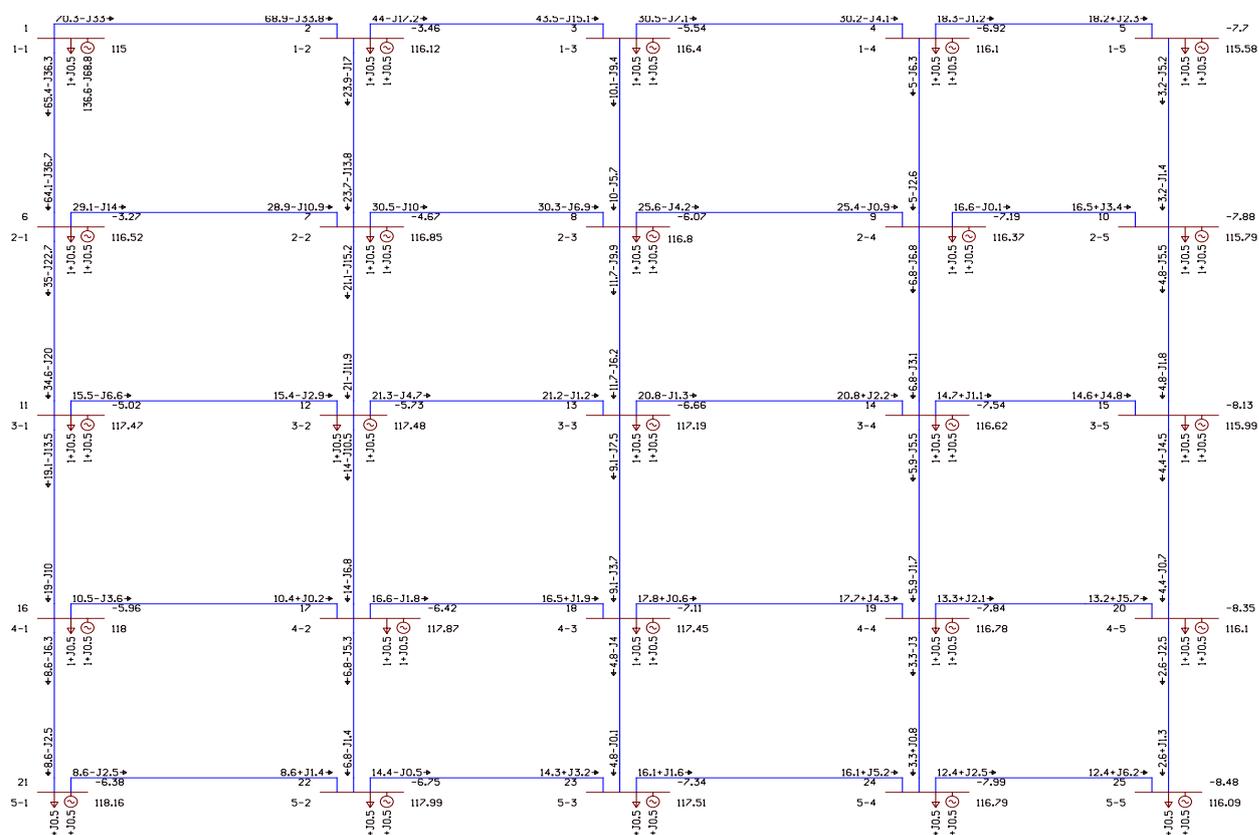


Рисунок 1 – Тестовая 25-ти узловая схема ЭЭС  $U_{НОМ} = 110 \text{ kV}$

распределением параметров каскадного процесса быть не может, в этом случае режим сразу переходит в область недопустимых значений. Для несимметричного распределения параметров (неоднородная ЭЭС) в исследовании показана возможность возникновения и развития каскадных процессов [2, 3].

Пошаговое утяжеление при расчете предельных режимов для вариантов неоднородности ЭЭС выполнялось до достижения предельно допустимого значения тока  $I_{\text{доп } ij}$  в одном или нескольких контролируемых элементах ЭЭС, или предельно допустимого значения напряжения в одном или нескольких узлах ЭЭС.

Для моделирования условий осуществления каскадных процессов или для распознавания существования таких условий разработаны описанные ниже методики математического (2 – 6) и 3D-графического (рис. 2, 4 б, 6, 8) анализа влияния неоднородности ЭЭС на возникновение и развитие аварийных каскадных процессов. Здесь ЭЭС рассматривается, как географически распределенная многопараметрическая система. Формализованная (используя любой подходящий аппарат формализации) до матричного типа (с матрицей  $A$  размером  $i \times j$ ) схема ЭЭС применяется как координатное поле для выявления неоднородности параметров, влияющих на формирование условий осуществления каскадных процессов. В соответствии с методикой выбираются факторы  $A_{ij}$ , наиболее влияющие на каскадный процесс. Каждый фактор  $A_{ij}$  распределяется в соответствии с матричной формализацией ЭЭС на двухмерной плоскости схемы ЭЭС по координатам  $i \times j$ .

Для исследуемых неоднородных ЭЭС, приняты следующие параметры, влияющие на возникновение и развитие аварийных каскадных процессов: индуктивное сопротивление  $X_{ij}$ , генерируемая  $P_{ij \text{ ген}}$  и потребляемая  $P_{ij \text{ наг}}$  в узлах ЭЭС мощность.

Для формирования неоднородной, 3D-графической поверхности влияющего фактора  $A_{ij}$  по двухмерной плоскости элементов ЭЭС, определяется величина его максимального распределения  $A_{ij}^{\text{max}}$ . Относительные величины влияющих факторов, в общем случае определяются по формуле:

$$A_{ij}^* = \frac{A_{ij}}{A_{ij}^{\text{max}}} , \quad (2)$$

где  $A_{ij}^*$  – значение влияющего фактора в относительных единицах;  $A_{ij}$  – текущее значение влияющего фактора рассматриваемой ЭЭС;  $A_{ij}^{\text{max}}$  – максимальное значение влияющего фактора  $A$  из всего ряда параметров  $A_{ij}$  рассматриваемой ЭЭС.

Применительно к исследуемым ЭЭС расчет для влияющих факторов  $X_{ij}$ ,  $P_{ij \text{ ген}}$ ,  $P_{ij \text{ наг}}$  выполняется аналогично:

$$X_{ij}^* = \frac{X_{ij}}{X_{ij}^{\text{max}}} ; P_{ij \text{ ген}}^* = \frac{P_{ij \text{ ген}}}{P_{ij \text{ ген}}^{\text{max}}} ; P_{ij \text{ наг}}^* = \frac{P_{ij \text{ наг}}}{P_{ij \text{ наг}}^{\text{max}}} , \quad (3)$$

где  $X_{ij}^*$ ,  $P_{ij \text{ ген}}^*$ ,  $P_{ij \text{ наг}}^*$  – значение влияющего фактора в относительных единицах;  
 $X_{ij}$ ,  $P_{ij \text{ ген}}$ ,  $P_{ij \text{ наг}}$  – текущее значение влияющего фактора рассматриваемой ЭЭС;  
 $X_{ij}^{\max}$ ,  $P_{ij \text{ ген}}^{\max}$ ,  $P_{ij \text{ наг}}^{\max}$  – максимальное значение влияющего фактора из всего ряда параметров  $X_{ij}$ ,  $P_{ij \text{ ген}}$ ,  $P_{ij \text{ наг}}$  соответственно в рассматриваемой ЭЭС.

В предлагаемой методике предложено параметры неоднородной поверхности, определяющей осуществимость формирования аварийных каскадных процессов на двухмерной плоскости матричной формализации схемы ЭЭС, определять при равноценности для всех влияющих факторов их алгебраическим сложением по соответствующим координатам:

$$N_{ij}^* = A_{ij}^* + B_{ij}^* + \dots + C_{ij}^* . \quad (4)$$

В общем случае, для учета различия влияния влияющих факторов, вводятся весовые коэффициенты:

$$N_{ij}^* = k_A A_{ij}^* + k_B B_{ij}^* + \dots + k_C C_{ij}^* , \quad (5)$$

где  $k$  весовой коэффициент участия в диапазоне от 0 до 1.

Применительно к ЭЭС для влияющих факторов  $X_{ij}^*$ ,  $P_{ij \text{ ген}}^*$ ,  $P_{ij \text{ наг}}^*$  параметры неоднородной поверхности определены при условии их равноценности, т.е. при  $k=1$  (коэффициент  $k$  для каждого из рассматриваемых параметров может принимать индивидуальные значения в соответствии с реальными объективными схемно-режимными условиями):

$$N_{ij}^* = X_{ij}^* + P_{ij \text{ ген}}^* + P_{ij \text{ наг}}^* . \quad (6)$$

Далее, строится поверхность изменения влияющих факторов в координатах  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , где координаты  $x$ ,  $y$  соответствуют координатам  $i \times j$  матричной формализации схемы ЭЭС на двухмерной плоскости, а по координате  $z$  распределяется значение влияющего фактора  $A_{ij}^*$  [о.е.].

В соответствии с (3) на рисунке 2 визуальны представлены 3D-модели распределения параметров ЭЭС по поверхности её топологии для вариантов: 1) полностью однородное (одинаковое во всех направлениях) распределение параметров  $X_{ij}^*$ ,  $P_{ij \text{ ген}}^*$ ,  $P_{ij \text{ наг}}^*$  (рис. 2 а); 2) линейно-неоднородное, несимметричное распределение параметра  $X_{ij}^*$  (рис. 2 б); 3) линейно-неоднородное, несимметричное распределение параметра  $P_{ij \text{ наг}}^*$  (рис. 2 в); 4) линейно-неоднородное, несимметричное распределение параметра  $P_{ij \text{ ген}}^*$  (рис. 2 в). Численные значения представлены шкалой от 0 до 1 и соответствуют цветовому диапазону от синего до красного цвета, соответственно.

Таким образом, во второй главе диссертационной работы на базе рассмотренных неоднородных ЭЭС экспериментально показано, что каскадные

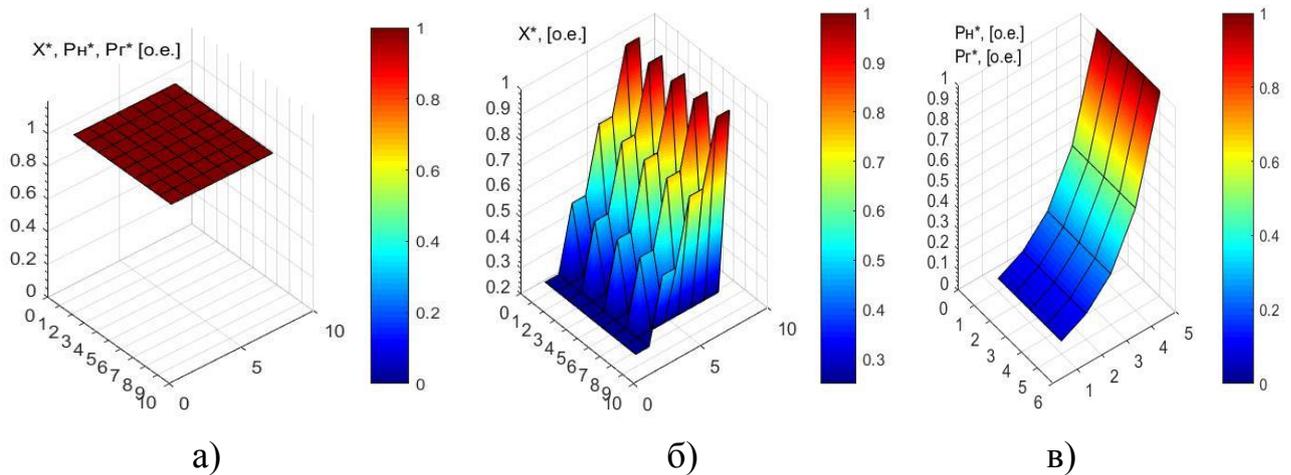


Рисунок 2 – 3D-графическое представление вариантов с однородным (а) и линейно-неоднородным (б, в) распределением параметров  $X_{ij}^*$ ,  $P_{ij}^*$  ген,  $P_{ij}^*$  наг по топологии ЭЭС

процессы могут возникать только в неоднородных ЭЭС с несимметричным распределением параметров по сетке узлов и ветвей. Разработана научно-техническая методика позволяющая, определять сценарии развития аварийных каскадных процессов заканчивающихся в области недопустимых режимов. Разработаны методики математического и 3D-графического анализа неоднородного распределения параметров ЭЭС, позволяющие определять траекторию («русло») развития каскадного процесса.

**В третьей главе** проведены вычислительные эксперименты в соответствии с методикой построения и определения областей допустимых режимов с учетом распределения параметров неоднородных ЭЭС, направленные на выявление возможность возникновения и развития каскадных процессов [1, 4, 5, 6, 7, 10, 12, 13].

На рисунке 3 представлены экспериментальные результаты, показывающие предельные границы допустимых режимов для вариантов неоднородности ЭЭС. Выполненные расчеты указывают на достоверность влияния выбранных факторов (параметров) неоднородности ЭЭС на возникновение и развитие каскадных аварийных процессов. Среди них рассмотрены варианты однородного (рис. 3 а) и линейно-неоднородного (рис. 3 б, в, г) распределения параметров по топологии тестовой схемы ЭЭС в соответствии с траекториями утяжеления по нагрузке при БУ 1-1. В соответствии с данной моделью завершение аварийного процесса может произойти в области: потери устойчивости по напряжению (косая штриховка), отключении БУ (серые столбцы). На рисунке 3 траектория обозначена Тр 2 – Тр 31, справа от траектории в скобках указано окончание переходного процесса в ЭЭС, где БУ – отключение балансирующего узла, У – потеря устойчивости в одном из узлов. Справа от гистограммы указано количество итераций утяжеления.

В ходе исследований экспериментально доказано, что рассмотренные параметры неоднородности ЭЭС влияют на возникновение и развитие каскадных процессов (каскадных аварий). Сравнительный анализ рисунка 3 указывает на

схожий характер окончания аварийного процесса для вариантов неоднородности по параметрам  $X_{ij}$ ,  $P_{ij \text{ ген}}$ ,  $P_{ij \text{ наг}}$ . На базе предложенных методик автором разработан программный комплекс позволяющий, исследовать ЭЭС на предмет возможного возникновения и развития аварийных каскадных процессов, заканчивающихся в области недопустимых значений режима.

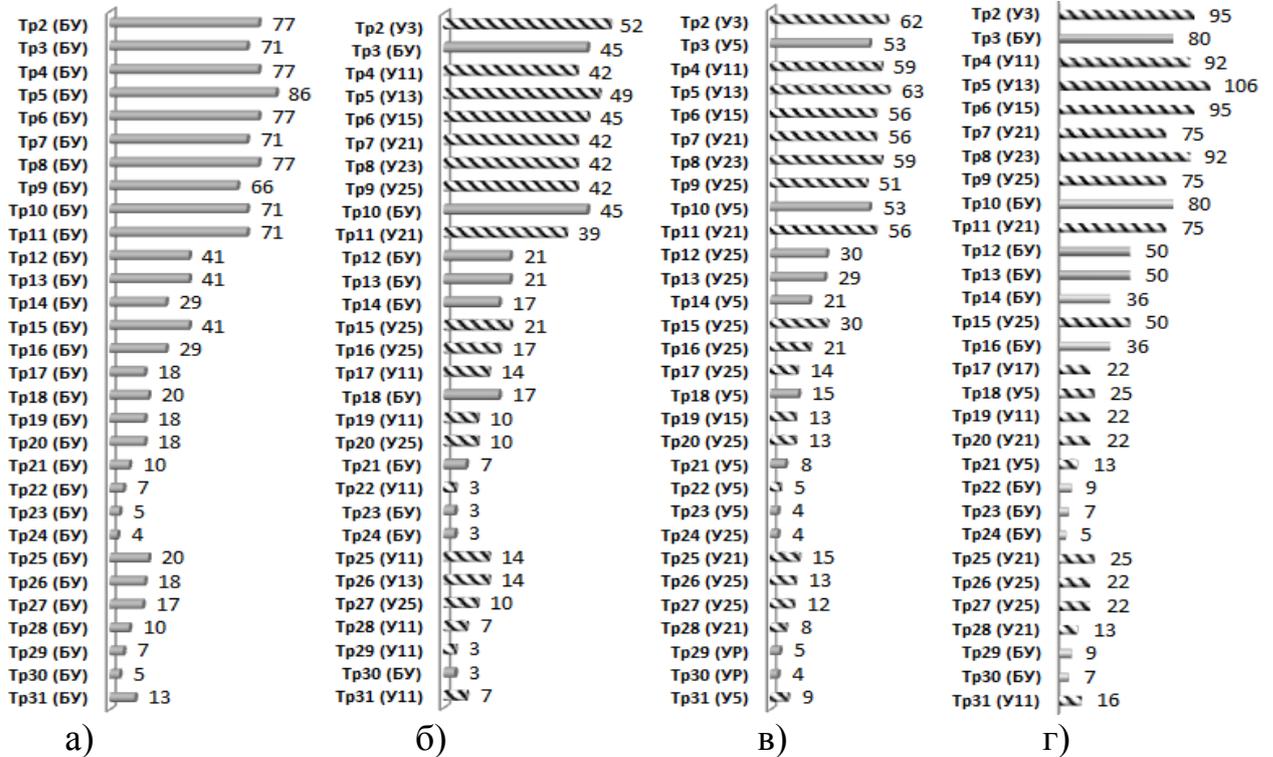


Рисунок 3 – Предельные границы допустимых режимов для вариантов ЭЭС с однородным (а -  $X_{ij}$ ,  $P_{ij \text{ ген}}$ ,  $P_{ij \text{ наг}}$ ), линейно-неоднородным (б -  $X_{ij}$ , в -  $P_{ij \text{ ген}}$ , г -  $P_{ij \text{ наг}}$ ) распределением параметров по топологии тестовой схемы ЭЭС при выполнении процедуры утяжеления по нагрузке

Далее на основе (б) применительно к двадцати пяти узловой тестовой схеме ЭЭС (рис. 4 а) показана возможность формирования каскадного процесса по заданной траектории, путем изменения параметров ( $X_{ij}^*$ ,  $P_{ij \text{ ген}}^*$ ,  $P_{ij \text{ наг}}^*$ ) неоднородной ЭЭС влияющих на возникновение и развитие каскадного процесса (каскадной аварии). На рисунке 4 а в момент времени  $t_1$  произошло триггерное возмущение (запускающее 1-ый шаг каскадного процесса), обусловленное увеличением потребляемой мощности в узле 23 со значения  $52 + j26 \text{ MVA}$  до  $72 + j36 \text{ MVA}$ , что с нумерацией шагов в соответствии с траекторией развития каскадного процесса соответствует увеличению  $P_{ij \text{ наг}}^*$  с 1,86 [о.е.] до 2,31 [о.е.], величина возмущения составила 0,45 [о.е.]. Это привело к перегрузу по току ветви 18-23. В данном случае параметры ветви 18-23 представлены проводом АС-70/11 ( $R = 10 \text{ Ом}$ ,  $X = 10,13 \text{ Ом}$ ,  $B = -255 \cdot 10^{-6} \text{ См}$ ,  $I_{\text{доп}} = 265 \text{ A}$ ). В ветви 18-23 отношение протекающего тока к допустимому составляет  $I_{\text{доп}} = 1,02$ , что указывает на превышение допустимого значения по условию (1) при этом данная ветвь отключается.

На рисунке 4 б с помощью программы математического моделирования «*MATLAB*» визуально представлена 3D-графическая модель поверхности параметров неоднородной ЭЭС с нумерацией пошаговых отключений. Представленная поверхность построена в соответствии с (6) для 1-го шага последовательности развития каскадного процесса, данная поверхность по характеру впадин определяет траекторию – «русло» возникновения и развития каскадного процесса.

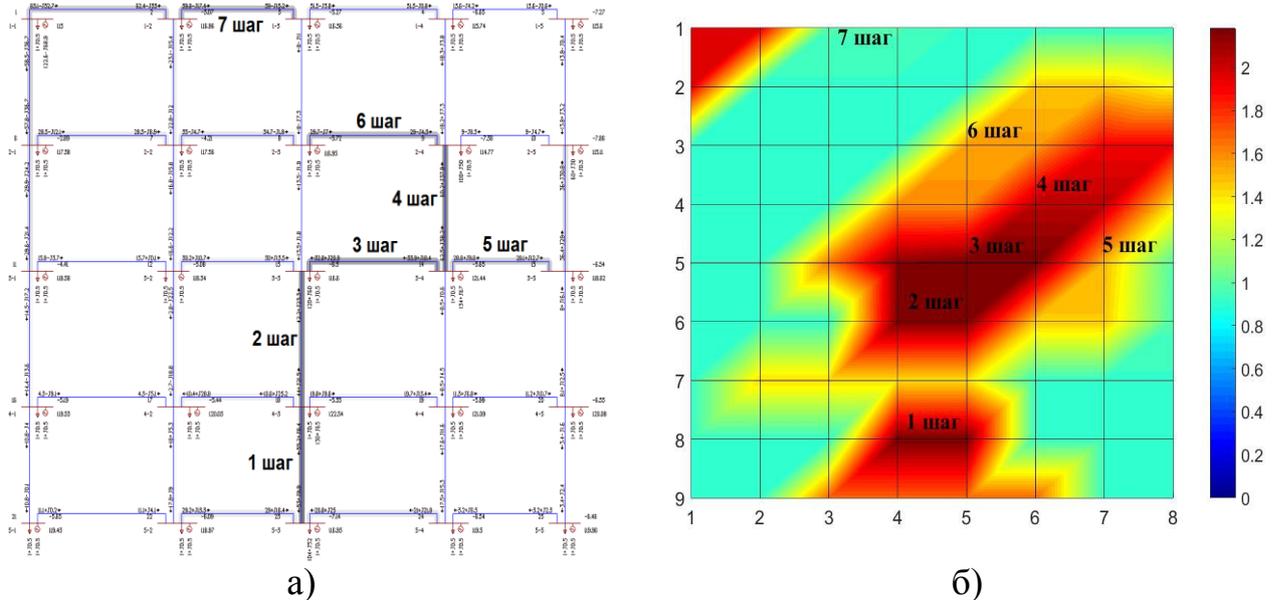


Рисунок 4 – Исследуемая схема ЭЭС (а) и построенная на её основе сводная 3D-модель неоднородного распределения параметров  $X_{ij}^*$ ,  $P_{ij \text{ ген}}^*$ ,  $P_{ij \text{ наг}}^*$  [о.е.] (б)

Таким образом, в третьей главе диссертационной работы на базе тестовых схем апробированы разработанные научно-технические методики позволяющие, определять: области допустимых режимов, пошаговый сценарий траектории («русла») развития аварийных отключений на каждом шаге ведения режима ЭЭС. Также при рассмотрении проекта развития ЭЭС принимать эффективные управленческие решения по недопущению возникновения крупных системных аварий каскадного характера.

**В четвертой главе** показано, что на основе разработанных методик определения влияния параметров неоднородных ЭЭС на возникновение и развитие аварийных каскадных процессов можно экономически обоснованно принимать более эффективные управленческие решения по развитию ЭЭС в дополнение к методическим указаниями по устойчивости энергосистем. Это позволит определять наиболее рациональное с точки зрения живучести ЭЭС расположение генерирующих объектов, а также места установки устройств относящихся к технологиям управляемых систем передачи переменного тока (*FACTS*) – активно-адаптивным элементам сети [8, 9, 11, 14, 15, 16, 18].

С помощью разработанных методик автором выполнен расчет, анализ и технико-экономическое сопоставление (рис. 5) вариантов позволяющих повысить живучесть ЭЭС (рассмотрена ЭЭС с  $U_{\text{НОМ}} = 500$  кВ) и предотвратить на первом

шаге развитие каскадного процесса заканчивающегося в области недопустимых режимов за счет определения наиболее рационального с точки зрения живучести ЭЭС расположения объектов генерации, а также места установки устройств *FACTS*, в сравнении с традиционным решением связанным со строительством новой ЛЭП.

Как видно из рисунка 5, повышение живучести ЭЭС посредством строительства новой ВЛ 500 кВ является наиболее дорогостоящим. Наиболее экономичным является перераспределение перетоков мощности за счет подключения дорогой (резервной) генерации (которой в прочем может и не быть), что позволяет снизить перетоки мощности по загруженным связям, отключение которых может привести к возникновению и развитию каскадной аварии. Техничко-экономические расчеты выполнены в соответствии со сроком службы устройств *FACTS*, который по приблизительным оценкам принят равным двадцати пяти годам. Применение гибких электропередач переменного тока для увеличения пропускной способности линий может являться более рациональным решением в сравнении с традиционным строительством новой ЛЭП, что особенно актуально для ЭЭС крупных мегаполисов с высокой плотностью электрических сетей.

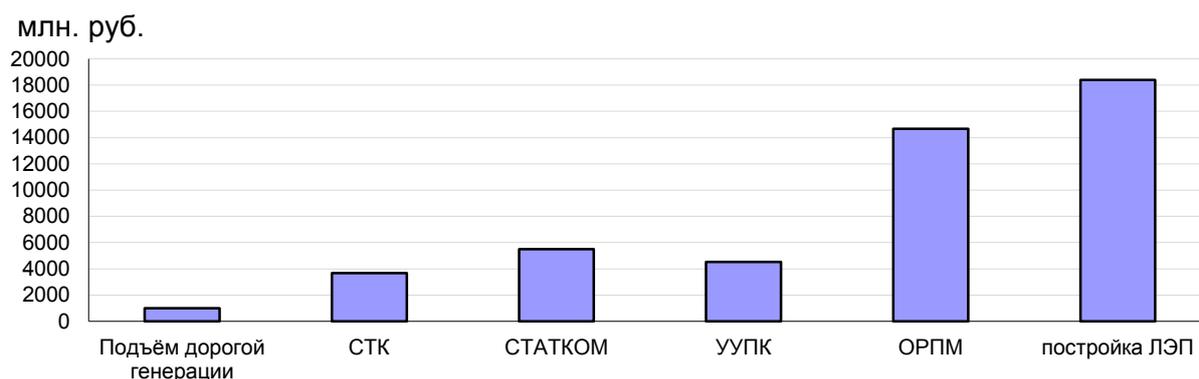


Рисунок 5 – Сравнение затрат по предотвращению первого шага аварийного каскадного процесса

Также в четвертой главе выполнено исследование, показывающее практическое применение методики математического и 3D-графического анализа влияния неоднородности ЭЭС на возникновение и развитие аварийного каскадного процесса, произошедшего в ЭЭС РБ 2.07.2016.

Для электрической сети 500 кВ составлена схема замещения, включающая узлы и ЛЭП. На рисунке 6 представлено наложение на топологию схемы замещения 3D - графической модели неоднородного распределения параметров ЭЭС на момент предшествующий КЗ на ВЛ Буйская – Уфимская 500 кВ.

В результате отключений действием ПА связей 500 кВ ВЛ Буйская Уфимская, АТ 5 и АТ 2 (3x167 МВА, 500/220/35 кВ), АТ 6 (250 МВА, 500/110/10 кВ) на ПС Бекетово произошел наброс мощности на связи 110 – 220 кВ центральной части ЭЭС РБ, что спровоцировало каскадное (пошаговое) отключение перегруженных по току элементов (рис. 7).

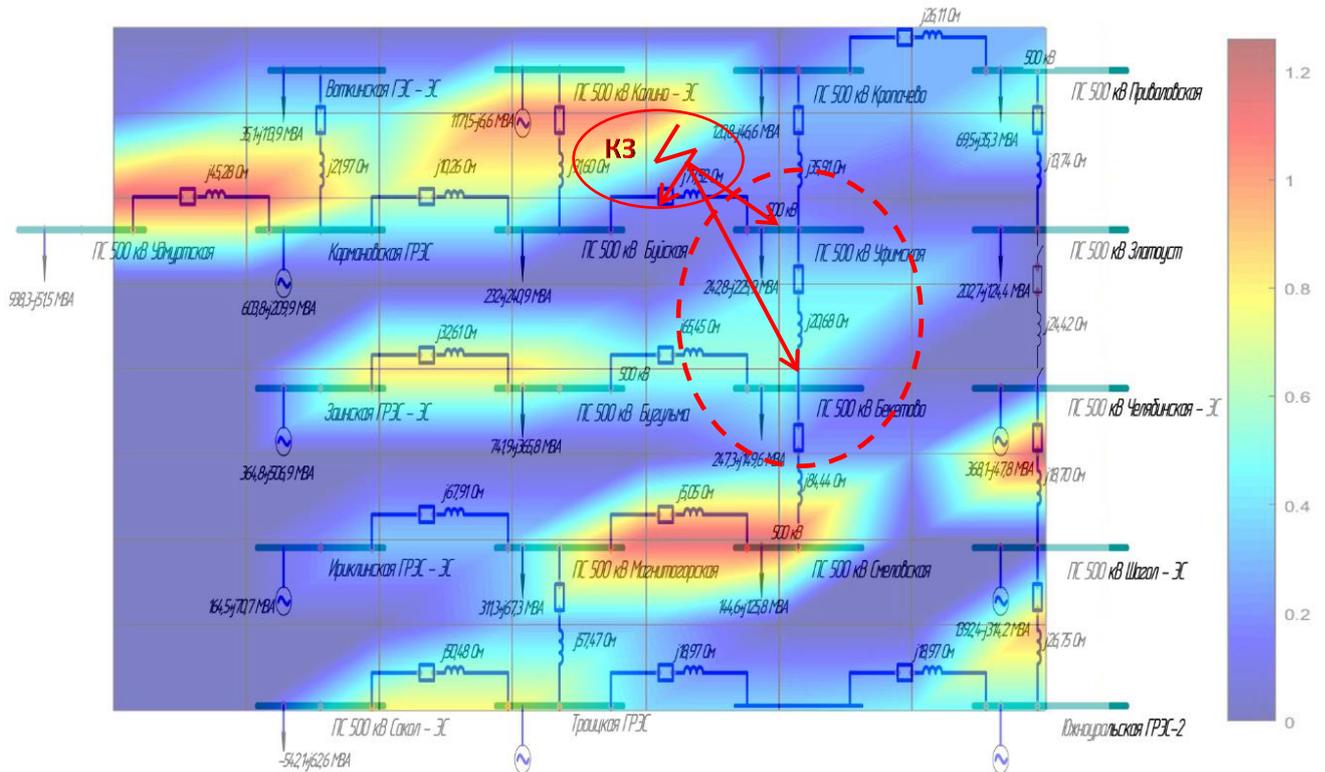


Рисунок 6 – Схема замещения и 3D-графическая поверхность неоднородного распределения параметров исследуемого энергорайона  $U_{ном}=500$  кВ до короткого замыкания на ЛЭП 500кВ Буйская-Уфимская

По результатам каскадных отключений вызванных превышением допустимого тока в элементах ЭЭС (рис. 7) построена 3D - графическая модель (рис. 8) на момент отключения ВЛ 500 кВ Буйская – Уфимская. На данном рисунке обозначены шаги развития каскадного процесса, в узлах указаны номинальные напряжения отключаемых элементов, часть ветвей ЭЭС РБ заменена эквивалентами соответствующими реальной схеме, в узлах обозначены связи с потребителями и электростанциями, в скобках указана принадлежность к соседней ЭЭС (Татарстан – ТЭ, Челябинская – ЧЭ, Оренбургская – ОЭ). После 7 - го шага отключений перегруженных по току элементов, по 4-ем связям 110 – 220 кВ между ЭЭС РБ и ЕЭС России начался асинхронный режим (на рис. 8 обозначен AP), в результате чего сработала на отключение автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР). После выделения на излированную работу дефицит мощности в центральной части ЭЭС РБ составил 866 МВт (потребление 2323 МВт, генерация 1457 МВт), при снижении частоты (в момент отделения 47,47 Гц) сработала автоматическая частотная разгрузка (АЧР) на отключение потребителей в выделившемся энергорайоне 967 МВт, в соседних ЭЭС в объеме 83 МВт.

В четвертой главе также выполнен анализ влияния схемы выдачи мощности Ново-Салаватской теплоэлектростанции (ТЭЦ) на формирование режимов в южной части ЭЭС РБ с точки зрения возможности возникновения каскадных процессов. В ходе расчетов выполнен анализ и сопоставление утвержденного и предлагаемого к реализации вариантов при формировании схем выдачи мощности для ПГУ - 410 МВт. Анализ режимов показал, что в соответствии с утвержденным

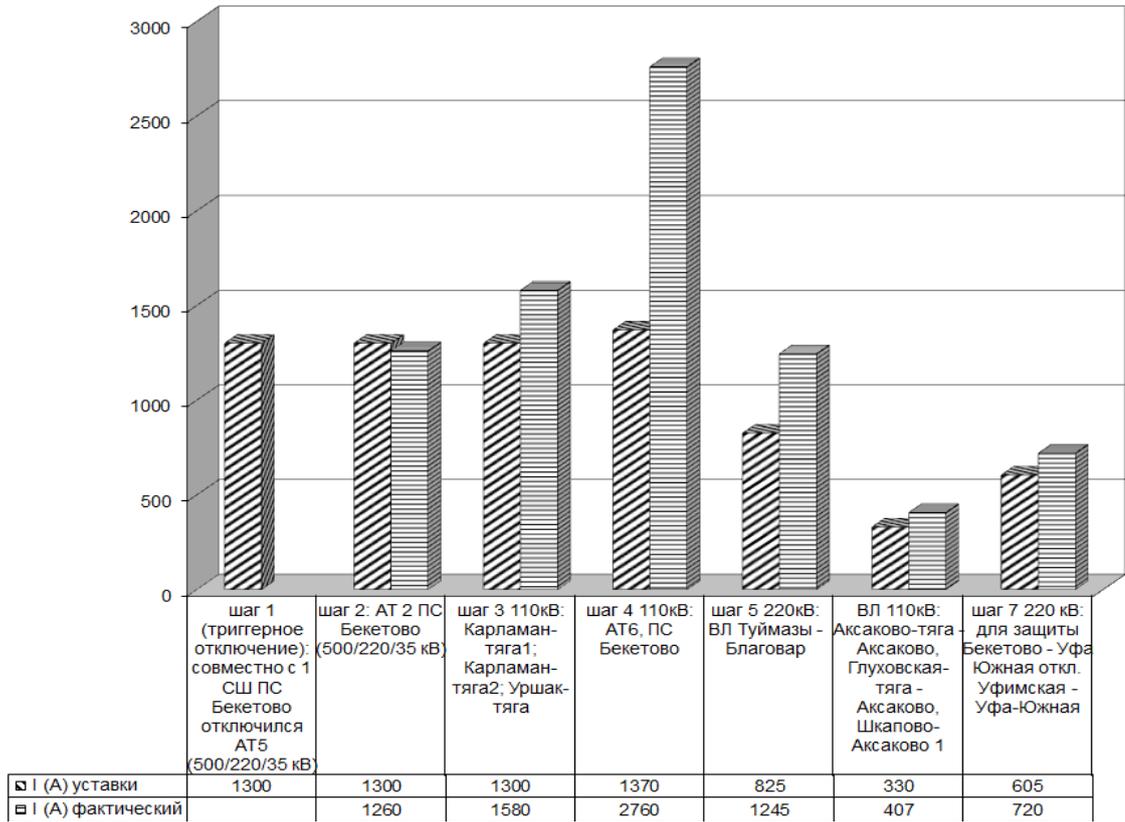


Рисунок 7 – Пошаговое отключение перегруженных по току элементов при каскадной аварии в ЭЭС РБ 02.07.16 г.

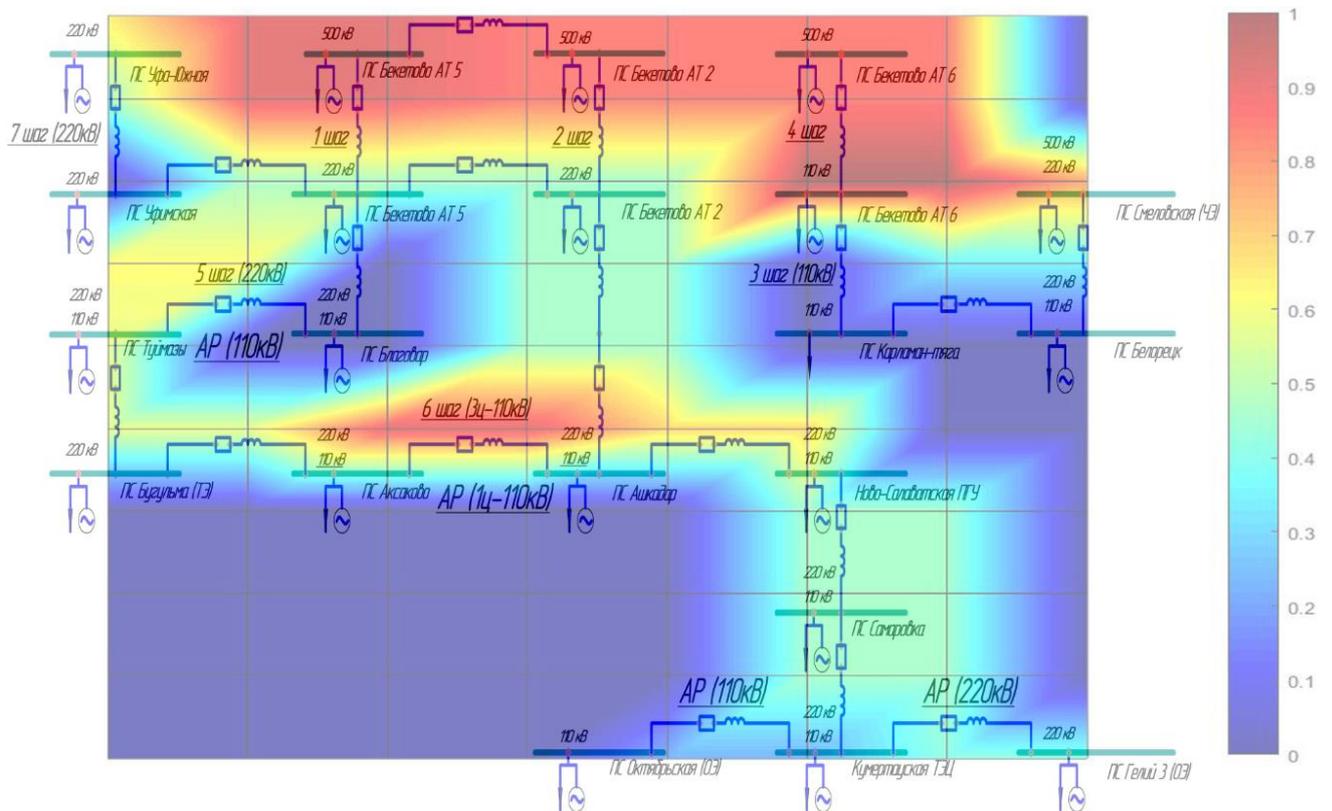


Рисунок 8 – 3D-графическая модель поверхности неоднородного распределения параметра тока ( $I$ , А) в элементах ЭЭС РБ при развитии каскадной аварии, после отключения ВЛ 500 кВ Буйская – Уфимская

вариантом возникает дополнительный наброс мощности на существующие линии 110 кВ, что приводит к необходимости дополнительных мероприятий по ограничению токов КЗ: установка четырех токоограничивающих реакторов и включения пятидесяти четырех вновь вводимых и реконструированных устройств ПА, что в конечном итоге увеличивает стоимость проекта, а также снижает КПД вводимой ПГУ – 410 МВт за счет постоянно включенных токоограничивающих реакторов. Также анализ показал в ряде режимов наличие токовых перегрузок с возможностью возникновения и развития аварийных каскадных процессов.

В результате предлагается в соответствии со схемой выдачи мощности Ново-Салаватской ТЭЦ по предлагаемому варианту №2 в нормальном режиме и в режимах одиночных отключений на время ремонта ЛЭП 220 кВ и генератора (в случае, когда ремонт на ЛЭП совпадает с ремонтом генератора или любого другого оборудования) выдачу мощности ПГУ - 410 МВт осуществлять по имеющимся ВЛ, учитывая, что пропускная способность ВЛ 220 кВ составляет 135 МВт. Предлагаемый вариант №2 схемы выдачи мощности в масштабах страны является необходимым инструментом снижения стоимости тарифных издержек на развитие энергосистем без ущерба для надежности электроснабжения потребителей.

Произведен анализ влияния полного демонтажа мощности Урусинской государственной районной электростанции (ГРЭС) на работу прилегающей сети и её влияние на общую системную надежность энергосистем Республики Татарстан и Республики Башкортостан.

Исходя из результатов электрических расчетов с учетом вывода из эксплуатации Урусинской ГРЭС, следует отметить, что реконструкция Урусинской ГРЭС на базе ПГУ-84 МВт позволит поддержать надёжность электроснабжения существующих потребителей электрической энергии, а также обеспечит возможность подключения перспективных производственных мощностей. В свою очередь, отсутствие генерации на Урусинской ГРЭС в ряде схемно-режимных условий приведет к отключению не менее 100 МВт потребителей Урусинского энергорайона.

Таким образом, в диссертационной работе показано, что разработанные методики применимы при анализе тестовых и реальных схем неоднородных ЭЭС. Это позволило на их основе разработать программный комплекс, направленный на поиск траекторий развития каскадных процессов и повышение живучести ЭЭС за счет наиболее рационального расположения электросетевых, генерирующих объектов, а также применения устройств относящихся к активно-адаптивным элементам сети.

В дальнейшем автором будут продолжены исследования параметров неоднородных ЭЭС и их влияние на возникновение и развитие каскадных процессов для повышения надежности и живучести ЭЭС.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе выполнено исследование по анализу влияния неоднородности ЭЭС на возникновение и развитие аварийных каскадных процессов.

1. Исследованы топологически неоднородно распределенные параметры ЭЭС и их связь с возникновением и развитием аварийных каскадных процессов.

2. Разработана методика построения и определения областей допустимых режимов при различных параметрах неоднородных ЭЭС.

Исследованы предельные границы допустимых режимов для рассмотренных вариантов неоднородности ЭЭС.

Установлено, что в ЭЭС с абсолютно однородно распределенными схемно-режимными параметрами возникновение и развитие каскадных процессов невозможно.

Для ЭЭС доказана возможность определения траектории развития аварийных отключений с возможным переходом в одну из следующих областей: каскадных процессов, допустимых или недопустимых режимов.

3. Разработаны методики математического и 3D-графического анализа влияния параметров неоднородных ЭЭС на возникновение и развитие аварийных каскадных процессов.

Дано расширенное понятие неоднородности ЭЭС для формирования или распознавания траектории развития отключений каскадного характера.

Экспериментально доказано, что на основе разработанных методик можно экономически обоснованно принимать более эффективные управленческие решения по развитию ЭЭС в дополнение к методическим указаниям по устойчивости энергосистем. Это позволит определять наиболее рациональное с точки зрения живучести ЭЭС расположение объектов генерации, а также места установки устройств, относящихся к технологиям интеллектуальных энергосистем на основе активно-адаптивных сетей.

Сформированы рекомендации по применению разработанных методик для безаварийного ведения режимов и проектирования схем развития ЭЭС:

- при расчете режимов с учетом возможного возникновения и развития аварийных каскадных процессов;

- для планирования режимов с учетом ввода и вывода объектов генерации при эксплуатации ЭЭС;

- для анализа схемно-режимной ситуации на момент возникновения и развития аварийного каскадного процесса, произошедшего 02.07.16 в ЭЭС РБ.

- при формировании схемы выдачи мощности Ново-Салаватской ТЭЦ в ЭЭС РБ;

- для поддержания надежности электроснабжения потребителей с учетом полного демонтажа мощности Урусинской ГРЭС.

4. На основе разработанных методик создан ПК, позволяющий производить пошаговый расчет траектории каскадного процесса для заданных схемно-режимных условий ЭЭС.

*Использование практических результатов:*

Разработанные в рамках диссертации методики и программный комплекс внедрены и используются в отделе моделирования сетей в процессе моделирования и формирования режимов распределительных сетей напряжением 35, 110 кВ в деятельности АО «Башкирская электросетевая компания».

Предложенные в диссертационной работе проекты по поиску путей

развития каскадных процессов в ЭЭС используются ООО «БЭСК Инжиниринг» в текущих и перспективных проектных решениях.

### **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

#### ***В рецензируемых журналах из перечня ВАК:***

1. Исмагилов Ф.Р., Шахмаев И.З., Гайсин Б.М. и др. Об учете влияния возможности возникновения каскадных процессов в электросети на проектирование схем выдачи мощности электростанций // Вестник УГАТУ. Энергетика, электротехнические комплексы и системы. Т. 15. №1(39) – Уфа: УГАТУ, 2012. – С.176–179.
2. Шахмаев И.З., Гайсин Б.М. и др. Влияние неоднородности параметров электроэнергетических систем на возникновение каскадных аварийных процессов // Современные проблемы науки и техники – 2013, №6 (50).
3. Шахмаев И.З., Гайсин Б.М. О развитии каскадных процессов в электротехнических и электроэнергетических комплексах // Фундаментальные исследования № 2 (часть 9) 2015, С. 1871–1876.
4. Исмагилов Ф.Р., Саттаров Р.Р., Гайсин Б.М. Исследование характеристик автономных источников электроэнергии на основе фотоэлектрических модулей в условиях средних широт России // Электротехнические и информационные комплексы и системы №1, т. 11, Уфа, 2015, С. 52–58.
5. Исмагилов Ф.Р., Гайсин Б.М. и др. Исследование эффективности работы солнечных фотоэлектрических установок в климатических условиях республики Башкортостан // Вестник УГАТУ. Электротехника. Т. 20. №2 (72) – Уфа: УГАТУ, 2016. – С.111–116.
6. Исмагилов Ф.Р., Шарифов Б.Н., Гайсин Б.М. и др. Исследование параллельной работы солнечной электростанции с сетью // Вестник УГАТУ. Электротехника. Т. 20. №4 (74) – Уфа: УГАТУ, 2016. – С.71–79.
7. Гайсин Б.М. Способ принятия эффективных решений для повышения живучести при проектировании и развитии энергосистем // Вестник УГАТУ. Электротехника. Т. 21. №3 (77) – Уфа: УГАТУ, 2017. – С.47–53.
8. Исмагилов Ф.Р., Гайсин Б.М. и др. Анализ эффективности применения солнечных фотоэлектрических модулей в климатических условиях Российской Федерации // Вестник УГАТУ. Электротехника. Т. 22. №2 (80) – Уфа: УГАТУ, 2018. – С. 73-81.
9. Шахмаев И.З., Гайсин Б.М. Методика выявления (распознавания) аварийных каскадных процессов в электроэнергетических системах // Вестник УГАТУ. Электротехника. Т. 22. №2 (80) – Уфа: УГАТУ, 2018. – С. 97-104.

#### ***В рецензируемых журналах из перечня Scopus:***

10. *Shahmaev I.Z., Gaisin B.M., Shiryayev O.V. A new method of taking management decisions at designing and developing electric power systems // 2016 2nd*

*International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) p. 1–3.*

11. *Ismagilov F.R., Shakhmaev I.Z., Gaisin B.M. The technique to improve the effectiveness of control systems in inhomogeneous electric power grids // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) p. 1-5.*

***В других изданиях:***

12. Исмагилов Ф.Р., Шахмаев И.З., Гайсин Б.М. Разработка алгоритма для поиска каскадных процессов в электроэнергетических системах // XIV Международная научно-техническая конференция «Интеллектуальная электроэнергетика, автоматика и высоковольтное коммутационное оборудование». – Москва ассоциация «ТРАВЭК», 2012 г. – С. 1–8.

13. Исмагилов Ф.Р., Шахмаев И.З., Гайсин Б.М. О возникновении каскадных аварийных процессов в электроэнергетических сетях // IX Международная научно-практическая конференция «Современные научные достижения – 2013» – Чехия, г. Прага 2013г. – С.50–54.

14. Гайсин Б.М., Якимов Б.Р. Управление каскадными аварийными процессами в неоднородных электроэнергетических системах и сетях // IX Всероссийская молодёжная научная конференция «Мавлютовские чтения». – Уфа, УГАТУ, 2015 г. – С. 528–531.

15. Шахмаев И.З., Гайсин Б.М., Якимов Б.Р. Влияние неоднородности параметров электротехнических систем на возникновение и развитие каскадных аварийных процессов // Всероссийская научно практическая конференция посвященная 110-летию А.М. Бамдаса. – Уфа 2015 г. – С. 47–51.

16. Шахмаев И.З., Гайсин Б.М. Способ принятия управленческих решений при проектировании и развитии энергосистем // X Открытая молодежная научно-практическая конференция «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике». – Казань, КГЭУ, 2015 г. – С. 35–43.

17. Шахмаев И.З., Гайсин Б.М. О возникновении и развитии каскадных процессов в электроэнергетических системах // Междунар. научно-практ. конф. «Электротехнические комплексы и системы» – Уфа, УГАТУ 2016г. – С. 190–193.

18. Шахмаев И.З., Гайсин Б.М. Программный комплекс определения развития каскадных аварийных процессов в электротехнических системах с распределенным генерированием и потреблением электрической энергии // Свидетельство о гос. рег. Progr. для ЭВМ № 2014617259 заявка № 2014614677 дата регистрации в реестре 16.07.14.

Подписано в печать 12.04.2019. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 0,8. Уч.-изд. л. 0,7.

Тираж 120 экз. Заказ № 357.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный  
технический университет»

Редакционно-издательский комплекс УГАТУ

450000 г. Уфа ул. Карла Маркса, 12