

БРАГУТА МАКСИМ ВАЛЕРИЕВИЧ

**СИСТЕМА ОТОБРАЖЕНИЯ ДАННЫХ СИТУАЦИОННОГО
МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (по энергетике)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2011

Работа выполнена в Автономной некоммерческой организации «Международный центр по ядерной безопасности»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Исламов Рустам Талгатович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Анохин Алексей Никитич
кандидат физико-математических наук
Волков Андрей Александрович

Ведущая организация: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск.

Защита состоится: «_____» _____ 2011г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.130.10 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1, зал заседаний ученого совета ИАТЭ НИЯУ «МИФИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАТЭ НИЯУ «МИФИ».

Автореферат разослан «_____» _____ 2011г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.130.10
доктор физико-математических наук,
профессор

В.Л. Шаблов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

За последнее десятилетие во всех энергосистемах различных стран мира выросла потребность в повышении наблюдаемости электроэнергетических систем в целях обеспечения их надежного и оптимального функционирования. Следствием является увеличение детализации моделей, описывающих состояние электроэнергетических систем и потоков информации, консолидируемых диспетчерскими пунктами. Кроме того, в связи с введением конкурентных, рыночных отношений, в информационную модель электроэнергетической системы были введены новые переменные (локальные цены на передачу, выработку электроэнергии, стоимость потерь и др.). Крупномасштабные каскадные системные аварии (США-Канада в 2003 году, Финляндия в 2003 году, Швеция-Дания в 2003 году, Италия-Швейцария в 2003 году, Россия в 2005 году), происходящие во многих странах, свидетельствуют о недостаточном уровне оперативной ситуационной осведомленности диспетчерского персонала.

На экранах коллективного пользования отображается лишь некоторая часть всей поступающей информации, управление выводом которой осуществляется посредством пользовательского интерфейса оператора. Диспетчерский персонал электроэнергетических систем, атомных, тепловых станций и ситуационных центров при принятии решений должен воспринимать и обрабатывать колоссальные объемы постоянно изменяющихся данных. Современные системы автоматизации и мониторинга, установленные на объектах электроэнергетики, передают данные, описывающие состояние внутренних и внешних компонентов систем и оборудования. Увеличение потока данных приводит к снижению уровня информированности диспетчерского персонала. Такое явление объясняется сложностью в восприятии предоставляемых данных и выделении необходимой диспетчеру информации для своевременного вывода системы из нештатных и аварийных режимов.

Актуальность работы связана с необходимостью поиска и построения принципиально новых информационных решений в условиях ограниченного информационного пространства применяемых в настоящее время технологий - видеостен в пунктах диспетчерского управления и в центрах по принятию решений. Использование технологии виртуального окружения является новым шагом в развитии и повышении эффективности решения задач ситуационного анализа состояния электроэнергетических систем. Применение технологии виртуального окружения существенно повышает качество предоставления информации за счет «погружения» операторов в виртуальную среду решаемой задачи. Использование

технологии виртуального окружения способствует созданию тренажёрных комплексов с инновационным человеко-машинным интерфейсом, повышающим эффективность процесса обучения за счет обеспечения взаимодействия оператора с виртуальными объектами и наглядного моделирования различных ситуаций.

За последнее время в России наблюдается растущий интерес к бурно развивающемуся во всем мире направлению преобразования электроэнергии на базе новой концепции, получившей название интеллектуальные сети (Smart Grid). Выделяют пять фундаментальных технологий, обеспечивающих реализацию данной концепции, одной из которых является применение эффективных систем отображения информации о состоянии наблюдаемых электроэнергетических систем. Одним из аспектов оптимизации процесса передачи и распределения электроэнергии является оценка её потерь в элементах электроэнергетической системы. Все большее распространение получают вероятностные подходы к анализу состояния сложных технических систем. Потери электроэнергии являются важнейшим показателем экономичности работы наблюдаемой системы, а также наглядным индикатором в задачах оценки её состояния. На данный момент разработано значительное количество методов, алгоритмов по расчёту и оценке потерь электроэнергии. Повышение эффективности существующих алгоритмов расчета потерь электроэнергии может быть достигнуто благодаря построению методов, использующих детерминистическую и статистическую информацию о схеме и многорежимности сети, а также использования методики анализа неопределенности применяемых детерминистических моделей.

Цель и задачи исследования

Цель работы состоит в повышении эффективности решения задач ситуационного анализа состояния электроэнергетической системы за счет использования современных технологий отображения информации и моделирования потерь электроэнергии с учетом оценки неопределенности расчетной модели.

Для достижения цели диссертационной работы были решены следующие задачи:

1. Исследование современных методов отображения ситуационной информации о состоянии электроэнергетических систем. Формулировка проблемы повышения эффективности систем отображения данных ситуационного мониторинга электроэнергетических систем и анализ литературы, посвященной данной предметной области.
2. Разработка виртуальной модели электроэнергетической системы, описывающей состав, структуру и динамику протекания технологического процесса, для решения задач

анализа информации о состоянии наблюдаемой системы.

3. Разработка экспериментального образца системы отображения данных, предоставляющего пользователям ситуационную информацию о состоянии наблюдаемой электроэнергетической системы в среде виртуального окружения.

4. Разработка методики анализа потерь электроэнергии по параметрам неопределенности в линиях электропередач, использующей детерминистическую и статистическую информацию о схеме и режиме её функционирования.

5. Оценка неопределенности и оптимизация расчетной модели потерь в линиях электропередач по параметрам неопределенности; оценка погрешности оптимизированной модели и экономического эффекта её использования.

Научная новизна

1. Разработана виртуальная модель электроэнергетической системы, описывающая состав, структуру и динамику протекания технологического процесса, для использования в среде виртуального окружения в целях решения задач визуализации и анализа информации о состоянии наблюдаемой системы на основе компьютерных методов обработки информации.

2. Разработан экспериментальный образец системы отображения данных, предоставляющий пользователям ситуационную информацию о состоянии наблюдаемой электроэнергетической системы в среде виртуального окружения.

3. Разработана методика анализа потерь электроэнергии в линиях электропередач, использующая детерминистическую и статистическую информацию о схеме и режиме её функционирования, основанная на расчете коэффициента аппроксимации с помощью стохастических преобразований.

Достоверность научных положений подтверждается разработанным экспериментальным образцом системы отображения информации и его апробацией на действующих установках виртуального окружения.

Личный вклад автора

1. Реализация виртуальной модели электроэнергетической системы в виде компьютерного кода на основе предложенных в работе алгоритмов и моделей, результаты моделирования в среде виртуального окружения.

2. Разработка экспериментального образца системы отображения данных о состоянии наблюдаемой электроэнергетической системы для использования в среде виртуального окружения.

3. Моделирование потерь электроэнергии в линиях электропередач с использованием детерминистической и статистической информации о схеме и режиме её функционирования.

4. Оценка неопределенности детерминистической модели потерь электроэнергии в линиях электропередач, её оптимизация с целью снижения неопределенности.

5. Оценка погрешности вычисления потерь электроэнергии при использовании оптимизированной модели и экономического эффекта её применения.

Положения, выносимые на защиту

1. Виртуальная модель электроэнергетической системы, описывающая состав, структуру и динамику протекания технологического процесса, для решения задач анализа информации о состоянии наблюдаемой системы.

2. Экспериментальный образец системы отображения данных, предоставляющий пользователям ситуационную информацию о состоянии наблюдаемой электроэнергетической системы в среде виртуального окружения.

3. Методика анализа потерь электроэнергии по параметрам неопределенности в линиях электропередач, использующая детерминистическую и статистическую информацию о схеме и режиме её функционирования.

4. Результаты оценки неопределенности и оптимизации расчетной модели потерь электроэнергии в линиях электропередач по параметрам неопределенности; оценка погрешности оптимизированной модели и экономического эффекта её использования.

Апробация работы

Материал диссертационной работы докладывался и обсуждался на:

- первой международной научной конференции «Трехмерная визуализация научной, технической и социальной реальности. Кластерные технологии моделирования», организованной Министерством образования и науки РФ, Российская академия наук (Ижевск, 2009г.);

- научном семинаре ОАО «Научно-исследовательский центр электронной и вычислительной техники» (Москва, 2009г.);

- 52-ой Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием Московского физико-технического института (МФТИ) «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» (Долгопрудный, 2010г.);

- международных конференциях «MEDIAS 2010» и «MEDIAS 2011» (г. Лимассол, Кипр, 2010г., 2011г.), организованных Средиземноморским институтом прикладных наук, Кафедрой системной интеграции и менеджмента (МФТИ) и Университетом Никосии;

- научно-техническом семинаре кафедры автоматизированных систем управления и кафедры информационных систем Обнинского института атомной энергетики – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Обнинск, 2011г.);

- научно-технической конференции, организованной ОАО «Концерн радиостроения «Вега» и ОАО «Научно-исследовательский центр электронной вычислительной техники» (Москва, 2011г.).

Результаты работы представлялись и получили одобрение экспертов в финале конкурса русских инноваций - «Умные сети будущего», а также включены в отчет по проекту Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-08-01009) «Разработка прототипа системы визуализации диспетчерско-технологической информации для управления электроэнергетическими объектами на основе технологии виртуального окружения». Доклад, представленный на международной научной конференции «MEDIAS 2011», на конкурсе занял первое место.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 2 в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы

Диссертация объемом 132 страницы состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, кроме того, приложений с А по Г на 28 страницах. В работе содержится 41 рисунок и 11 таблиц. Библиографический список включает 117 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертации изложены вопросы актуальности, научной новизны, практической ценности, основной цели и задач диссертационной работы, приведена формулировка выносимых на защиту положений. Описана структура и объем диссертации.

Первая глава является обзорной частью диссертации. Глава включает в себя анализ существующих систем отображения ситуационной информации. Обоснована необходимость поиска и построения новых перспективных методов отображения диспетчерской информации. Рассмотрены преимущества и недостатки классических двухмерных способов отображения ситуационной информации.

В современных системах диспетчерского управления электроэнергетическими системами используются программно-аппаратные комплексы видеоэкранов в сочетании со сложными интегрированными программными приложениями, которые предоставляют необходимую информацию в масштабе реального времени и позволяют оперативному

персоналу осуществлять регулирующие воздействия на наблюдаемую систему. Основопологающим методом предоставления информации является возможность всестороннего просмотра данных, полученных от различных источников, их оперативное сравнение и анализ. Видеостена, как средство отображения коллективного пользования, дополняет функциональность мнемонического диспетчерского щита возможностью вывода различной динамической информации для коллективного анализа. Используемая технология отличается существенной стоимостью, что затрудняет ее повсеместное внедрение в пункты диспетчерского управления и ситуационные центры, и тем более в учебно-методические центры подготовки персонала. Также следует отметить, что необходима адаптация персонала, привыкшего к классическим мнемоническим схемам, и применение эффективных методов обучения персонала, зачастую рассматривающего монитор компьютера или коллективный проекционный экран как нечто абстрактное и не имеющее отношения к реальным элементам энергообъекта.

В главе описаны аппаратные конфигурации систем виртуальной реальности, которые позволяют воспроизводить в виртуальной среде объекты (их структуру, вид, поведение и взаимодействие), которые в режиме реального времени могут копировать поведение своих реальных прототипов, находящихся и функционирующих в реальной среде (технологическом процессе). В работе отмечено, что термин «виртуальная реальность» широко распространен в популярной литературе, однако он представляется неудачным для использования в качестве научного термина. В диссертации отдается предпочтение термину «виртуальное окружение», поскольку виртуальное окружение – это технология человеко-машинного взаимодействия, которая обеспечивает погружение пользователя в трёхмерную интерактивную среду изучаемого моделируемого явления или процесса и предоставляет естественный интуитивный интерфейс для взаимодействия с объектами.

На сегодняшний момент существует широкий спектр систем виртуального окружения, различаемых по соотношению реальных и виртуальных объектов и разной степени «погружения». Между системами полного виртуального окружения и реальным миром располагается целый ряд приложений. Приводится описание континуума «реальность-виртуальность», предложенного Полом Милграмом и классификация систем виртуального окружения, основанная на данном континууме.

В главе приведена сравнительная оценка интерфейсов по уровню эффективности их использования на основе классической модели количественного анализа интерфейсов GOMS. Полученные результаты показывают, что при использовании технологии виртуального окружения и трёхмерного отображения данных пользователю предоставляется

полная картина состояния наблюдаемого оборудования и строка вида «К Р» (нажатие клавиши и указание позиции курсором) — является когнитивной единицей манипуляции данными в виртуальном пространстве. Среднее время выполнения операции по переходу пользователя к просмотру режимных параметров элемента однолинейной схемы энергоузла с дальнейшим переходом диалогового окна в режим отображения ситуационной схемы составляет 9,55 сек. (16,3 сек. - при двухмерных способах отображения информации), что свидетельствует о потенциальной эффективности применения данной технологии в рассматриваемой сфере.

Вторая глава посвящена описанию роли операторов в системах ситуационного анализа состояния по управлению сложными системами в масштабе реального времени.

Эффективность взаимодействия оперативного персонала и автоматизированной системы в контуре управления зависит от простоты обмена и восприятия информации. Принимается, что необходимо рассматривать каждый аспект функциональных возможностей автоматизированной системы применительно к конечному пользователю. На концепции, когда человек рассматривается как наиболее важное звено системы управления автоматизированными процессами, основано направление, получившее название ситуационная осведомленность (Situational Awareness).

Существует разрыв между предоставляемой и необходимой информацией для получения актуальной и своевременной картины о состоянии наблюдаемой системы - предоставление оператору больших объемов данных не будет приводить к успешным результатам, если эти данные не были обработаны при сложившейся ситуации в наблюдаемой среде для своевременного осознания человеком.

В диссертации за основу описания процесса принятия решений операторами принимается информационная модель Эндсли, в которой ситуационная осведомленность является одним из ключевых звеньев в процессе принятия решений и осуществления управляющих воздействий на наблюдаемую систему. Ситуационная осведомленность включает в себя три уровня:

- *Уровень 1* - восприятие важнейших факторов окружающей среды;
- *Уровень 2* - понимание того, что эти факторы означают в рамках наблюдаемой системы;
- *Уровень 3* - возможность прогнозирования состояния системы в ближайшем будущем.

Рассмотрены вопросы комплексной категоризации информации о наблюдаемом объекте, механизмы восприятия и обработки информации в долговременной и кратковременной памяти диспетчера. Приведены механизмы формирования и использования ментальных моделей текущих ситуаций. Концепция использования ментальных моделей

представляет собой механизм для:

1. Фокусирования внимания на соответствующих аспектах режима функционирования электроэнергетической системы.
2. Интеграции информации и восприятия ее смысла.
3. Прогнозирования будущих режимов электроэнергетической системы на основе текущих значений параметров системы и осмысления динамики их изменения.

В главе выделены следующие потенциальные преимущества трехмерного способа отображения информации:

- увеличение объемов отображаемой информации, которая может быть выведена на стандартные экраны, с учетом графических буквенно-цифровых обозначений;
- увеличение ощущения присутствия оператора в пределах окружающей среды, благодаря использованию технологии виртуального окружения;
- помощь в навигации и поиске;
- помощь в решении задач, требующих информационной интеграции;
- разделение целей в глубинах трехмерной сцены;
- облегчение восприятия точных ментальных моделей управляемых систем.

Проведен анализ экспериментов Инженерно-исследовательского центра энергетических систем (PSERC, Tempe, USA), направленного на оценку роли человеческого фактора при предоставлении информации различными способами. Результаты эксперимента показывают, что использование трехмерного отображения данных обеспечивает наименьшее время реакции и принятия решений операторами. Это объясняется тем, что двухмерное отображение информации требует распределенного внимания и умственной обработки для каждого режима.

На основе проведенного исследования, в главе описаны основные принципы создания экспериментального образца системы отображения диспетчерско-технологической информации (СОДТИ). В основу разработанного экспериментального образца были заложены принципы избирательности, иерархичности и функциональности. Избирательный принцип реализован в виде возможности выбора оператором необходимой ему мнемосхемы в зависимости от текущей технологической ситуации, отображаемой в плоскости энергоузлов. Построение иерархии СОДТИ должно быть реализовано по принципу «от общего к подчиненному» (сеть – энергоузел). При этом уровень «сеть» является «корнем» иерархического дерева. За каждым уровнем СОДТИ должно быть закреплено определенное функциональное назначение. На первом уровне («сеть» - ситуационная схема) реализуются только информационные функции (отображение значений основных параметров,

характеризующих технологический процесс в целом, обобщенная сигнализация режимных отклонений и нарушения работы оборудования, что следует из анализа задач операторов). Мнемосхемы этого уровня содержат объем информации, позволяющий оценить ситуацию в целом. Функциональность СОДТИ заключается в наглядном отображении функционально-технической схемы, а также в отображении связей и характера взаимодействия управляемого объекта с другими объектами и внешней средой. Приведен анализ задач пользователей системы отображения информации и их ментальных моделей.

В **третьей главе** рассматриваются компоненты разработанного экспериментального образца системы отображения данных ситуационного мониторинга в среде виртуального окружения. Определен состав программного комплекса, состав трехмерных моделей силового электротехнического оборудования, их атрибуты и свойства. Описаны разработанные вспомогательные визуальные объекты, необходимые для снижения умственной загрузки на диспетчерский персонал, а также способы интеграции различных информационных уровней.

Приведено описание предложенного метода построения карт состояний сети электроснабжения регионов (КССЭ), являющихся визуальным инструментарием для оценки текущей ситуации в наблюдаемой системе, а также прогнозирования будущих состояний (реализация 2 и 3 уровней ситуационной осведомленности). Для описания предложенного метода и определения состояния системы электроснабжения в работе предложены следующие интегральные показатели:

- индекс изменения собственной выработки генерирующих объектов на территории региона (отношение суммарной выработки электроэнергии энергообъектами, за рассматриваемый период времени, к суммарной выработки электроэнергии энергообъектами за предшествующий период времени):

$$I_G^i = \frac{F(S_{G.1}^t, S_{G.2}^t, \dots, S_{G.i}^t, \dots, S_{G.n}^t)}{F(S_{G.1}^{t-1}, S_{G.2}^{t-1}, \dots, S_{G.i}^{t-1}, \dots, S_{G.n}^{t-1})}, \quad i=1 \dots n, \quad (1)$$

где F - функция, определяющая суммарную выработку электроэнергии в регионе, $S_{G.1}^t$ - выработка электроэнергии первого генерирующего энергообъекта в регионе за рассматриваемый период времени, $S_{G.i}^t$ - выработка электроэнергии i -м генерирующим энергообъектом в регионе и $S_{G.i}^{t-1}$ - выработка электроэнергии i -м генерирующим энергообъектом в регионе за предшествующий период времени; n - количество генерирующих объектов.

- индекс изменения потребления электроэнергии в регионе (отношение суммарного потребления электроэнергии к тому же уровню за предшествующий расчетный период):

$$I_L^j = \frac{F(S_{L.1}^t, S_{L.2}^t, \dots, S_{L.j}^t, \dots, S_{L.m}^t)}{F(S_{L.1}^{t-1}, S_{L.2}^{t-1}, \dots, S_{L.j}^{t-1}, \dots, S_{L.m}^{t-1})}, \quad j=1 \dots m, \quad (2)$$

где F - функция, определяющая суммарное потребление электроэнергии в регионе, $S_{L.1}^t$ - суммарное потребление электроэнергии первым потребителем за рассматриваемый период времени, $S_{L.j}^t$ - суммарное потребление электроэнергии j -м потребителем, $S_{L.j}^{t-1}$ - суммарное потребление электроэнергии j -м потребителем за предшествующий период времени, m — количество объектов потребления электроэнергии в регионе.

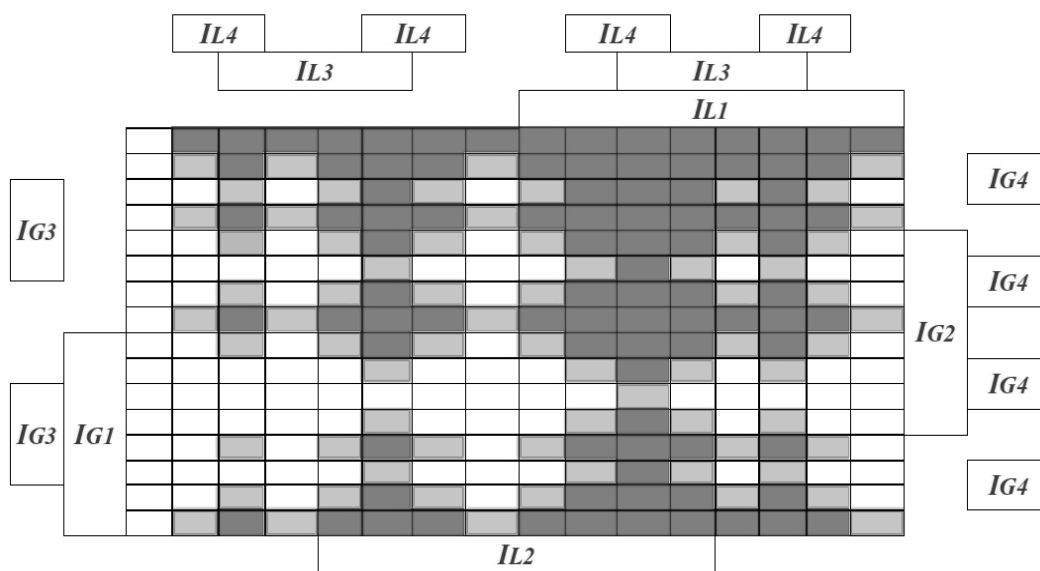


Рисунок 1 - Карта состояний системы электроснабжения региона

В связи с общепринятым интервалом усреднения измерений электроэнергии в сфере коммерческого учета равным 0,5 часа при расчете предложенных интегральных показателей принимается аналогичный период времени.

На основе метода построения диаграмм Вейча предложено построение КССЭ, использование которых обеспечивает оценку уровня потребления электроэнергии и наличия резервов активной мощности в регионе. Для навигации экспертов в предоставляемой информации и определения состояния системы в определенный момент времени и его прогнозирования в ближайшем будущем, была введена цветовая маркировка состояний системы электроснабжения региона. Мнемоника состоит из трех уровней состояния системы электроснабжения, каждому из которых соответствует свое описание и цвет (рисунок 1).

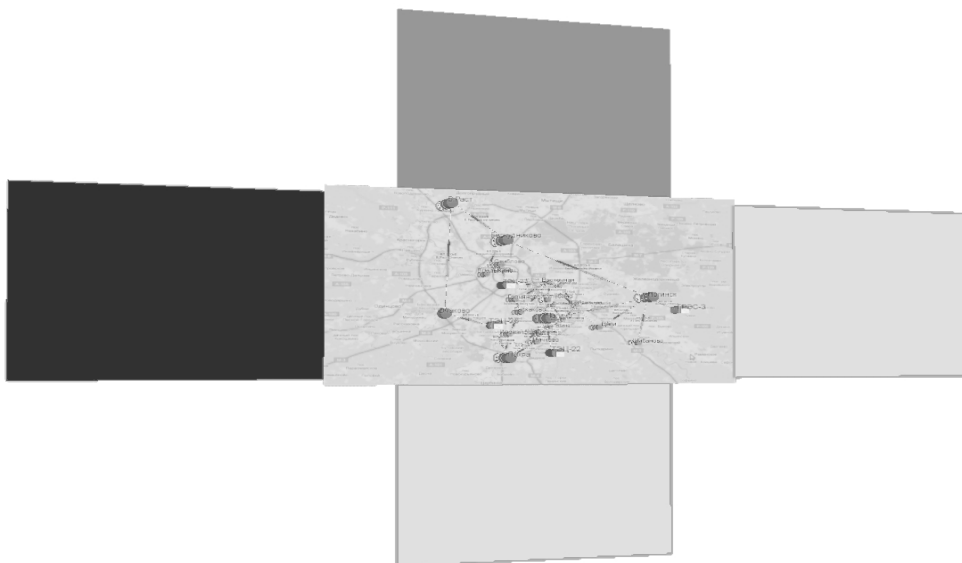


Рисунок 2 - Отображение виртуальной среды СОДТИ. Совмещение модели электроэнергетической системы и карт состояний

Применение трехмерного отображения и технологии виртуального оружия позволяют совместное отображение КССЭ и виртуальной модели электроэнергетической системы в разработанном экспериментальном образце системы отображения данных путем использования технологии альфа-смешивания текстур (рисунок 2).

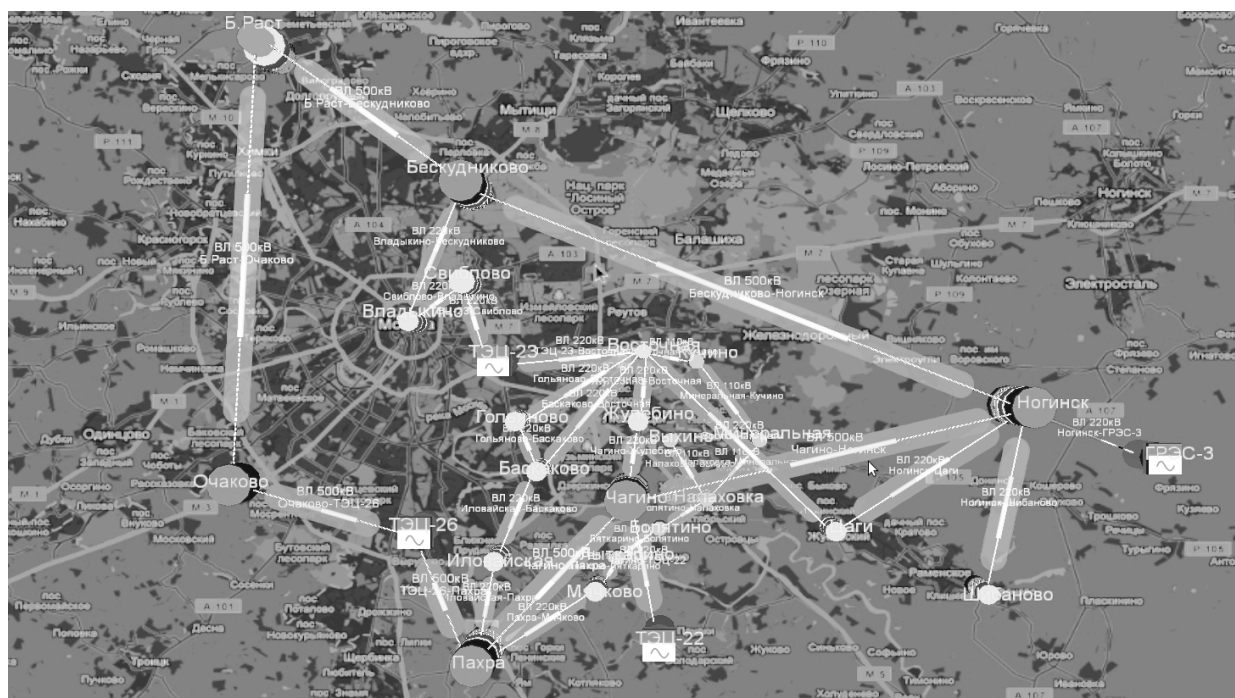


Рисунок 3 - Отображение виртуальной среды СОДТИ. Ситуационная схема электроэнергетической системы и визуализация уровня потерь активной мощности

В главе рассмотрен вопрос отображения уровня потерь активной мощности в линиях электропередач - как локального показателя экономичности работы электроэнергетической

системы. Уровень потерь в разработанном экспериментальном образце системы отображается средствами дополнительных визуализационных элементов с заданным значением RGB с применением технологии альфа-смешивания текстур (рисунок 3).

В четвертой главе приведено описание разработанного экспериментального образца системы отображения диспетчерско-технологической информации. При разработке СОДТИ применялись следующие библиотеки и инструментарии:

- графические библиотеки OpenGL;
- инструментарий OpenSceneGraph.



Рисунок 4 - Отображение виртуальной среды СОДТИ. Ситуационная схема электроэнергетической системы и однолинейная схема энергоузла

Приведено описание предложенного способа интеграции ситуационной информации и информации о состоянии элементов энергоузла.

На основе использования общедоступных программных инструментариев и специализированных программных модулей был разработан экспериментальный образец СОДТИ. На рисунках 2-5 приведены примеры, демонстрирующие виртуальную среду экспериментального образца СОДТИ.

В пятой главе рассмотрены вопросы повышения эффективности существующих алгоритмов расчета потерь электроэнергии, которое может быть достигнуто благодаря построению методов, использующих детерминистическую и статистическую информацию о схеме и многорежимности сети. Задачи оценки неопределенности возникают при анализе результатов расчётов и их сравнения с измеренными значениями режимных параметров. Сложность данной задачи заключается в том, что результаты измерений представляют собой, как правило, массив точек произвольной размерности. Неопределенность модели

определяется степенью «близости» (некоторой мерой) модели и существующими статистическими, экспериментальными данным или другими моделями. При этом «моделью» может служить не только математическая модель, но и измеренные средствами автоматизированных систем режимные параметры.

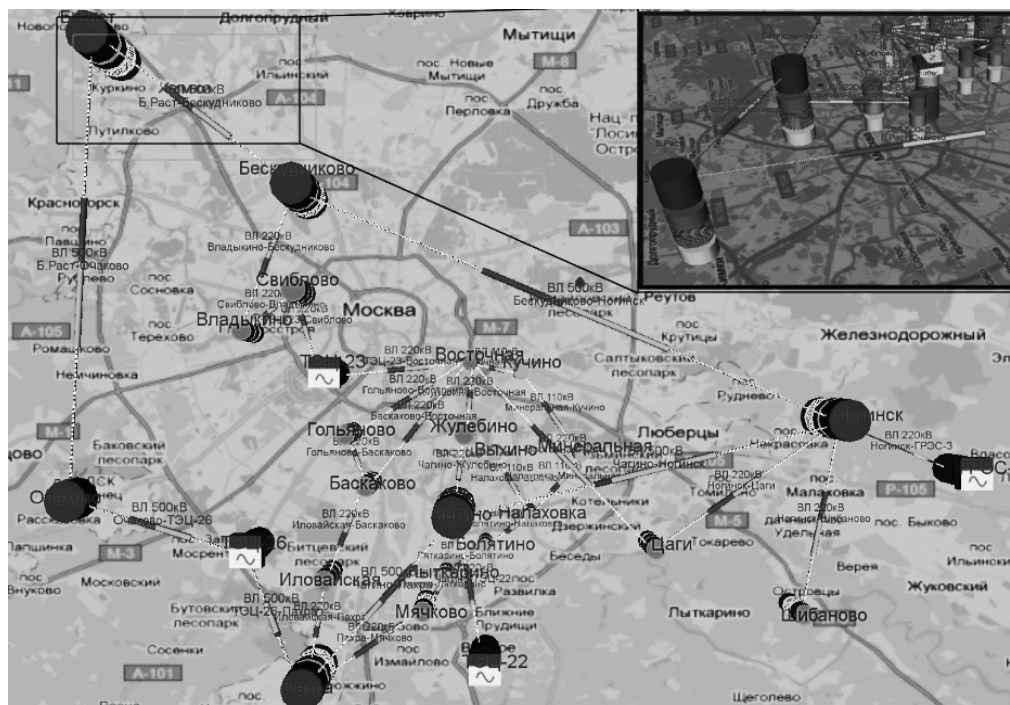


Рисунок 5 - Отображение виртуальной среды СОДТИ. Ситуационная схема электроэнергетической системы

Согласно Приказу Минэнерго РФ №326 от 30.12.2008 нагрузочные потери электроэнергии в каждом элементе электрических сетей могут быть рассчитаны методами оперативных расчетов и средних нагрузок. В случае применения метода оперативных расчетов, нагрузочные потери электроэнергии в воздушной линии (ВЛ), кабельной линии (КЛ) за базовый период определяются по формуле:

$$\Delta W_{n_j} = 3 \cdot R \sum_{j=1}^M (I_j^2 \cdot \Delta t_j) \cdot 10^3 = 3 \cdot R \sum_{j=1}^M \left(\frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2} \cdot \Delta t_j \right) \cdot 10^3, \quad (3)$$

где R - активное сопротивление ВЛ, КЛ, шинпровода; I_j - токовая нагрузка ВЛ, КЛ, шинпровода, принимаемая на интервале времени t_j неизменной; P_j, Q_j - значения активной и реактивной мощности ВЛ, КЛ, шинпровода, принимаемые на интервале времени t_j неизменными; U_j - значение напряжения на ВЛ, КЛ, шинпровода, принятое на интервале или t_j неизменным; Δt_j - интервал времени, в течение которого нагрузка

элемента сети с сопротивлением R принимается неизменной; M - количество интервалов времени t_j в базовом периоде.

Метод оперативных расчетов предполагает квадратичную зависимость нагрузочной составляющей потерь от нагрузки. Неточность данного допущения обусловлена тем, что изменение нагрузки оказывает влияние на напряжения в узлах, в свою очередь влияющих на потери активной и реактивной мощности на рассматриваемом участке сети. В главе предложен метод оценки неопределенности применяемой расчетной модели путем вычисления коэффициента аппроксимации с помощью стохастических преобразований, а также способ оптимизации расчетной модели потерь электроэнергии в линии электропередач с целью минимизации её неопределенности.

В качестве статистических данных (режимных параметров) были использованы измеренные значения средствами автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ), установленные на концах рассматриваемой линии электропередач. В связи с наличием в АИИС КУЭ системы обеспечения единого времени принимается, что значения режимных параметров измеряются в одинаковые моменты времени.

Коэффициент аппроксимации с помощью стохастических преобразований (SAR), как мера неопределенности модели Y , определяется следующим образом. Предположим, что $X_1, X_2, \dots, X_n$ являются случайными параметрами, а переменная Z является детерминистически связанной с рассматриваемыми параметрами $Z(X_1, X_2, \dots, X_n)$. Параметры $X_1, X_2, \dots, X_n$ рассматривают как входные данные для модели Y и соответствующей модели $Z(X_1, X_2, \dots, X_n)$. Коэффициент стохастической аппроксимации как мера неопределенности модели Y может быть записан в виде:

$$SAR = \left(1 - \frac{\sqrt{a_{Y-Z}}}{\sqrt{a_Y} + \sqrt{a_Z}} \right)^2, \quad (4)$$

где a_{Y-Z} , a_Y и a_Z – моменты второго порядка:

$$a_{Y-Z} = \int [Y(x) - Z(x)]^2 f(x) dx, \quad (5)$$

$$a_Y = \int [Y(x)]^2 f(x) dx, \quad (6)$$

$$a_Z = \int [Z(x)]^2 f(x) dx, \quad (7)$$

и $f(x)$ – функция плотности.

Значение коэффициента аппроксимации определено, как $[0,1]$. Если значение SAR близко к 1, то это означает, что переменная Z и соответствующая модель Y очень близки и $Z(X_1, X_2, \dots, X_n) \approx Y(X_1, X_2, \dots, X_n)$ неопределенность модели очень низка. Если

$SAR \ll 1$, то это означает, что переменная Z и соответствующая модель Y не близки, и неопределенность высока.

Для оценки неопределенности используемой расчетной модели в работе использовалась программное обеспечение PRAISE. При сравнении детерминистической модели, определенной выражением (3), и статистической модели, определенной выборками режимных параметров рассматриваемой линии электропередач, было получено значение коэффициента аппроксимации $SAR=0.47$, что свидетельствует высокой неопределенности расчетной модели (рисунки 6-7).

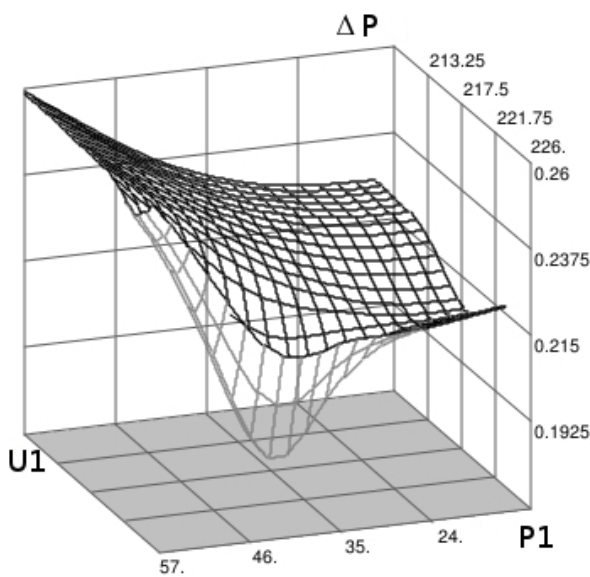


Рисунок 6 - Зависимость потерь активной мощности от передаваемой по линии активной мощности и напряжения на шинах. Статистическая модель

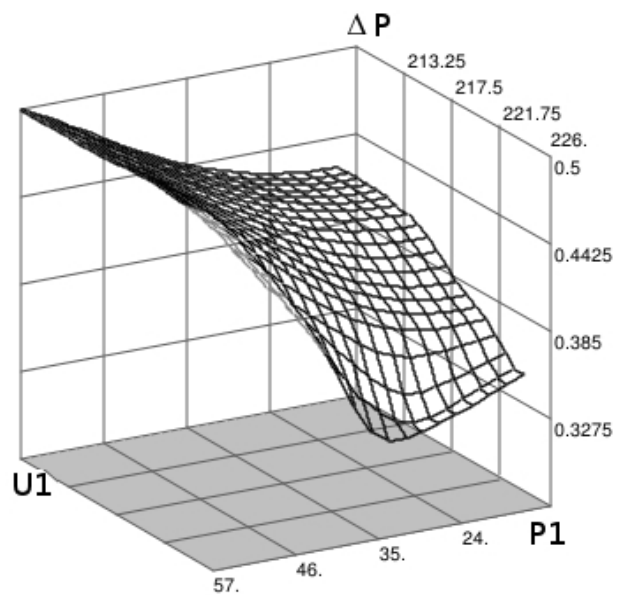


Рисунок 7 - Зависимость потерь активной мощности от передаваемой по линии активной мощности и напряжения на шинах. Детерминистическая модель

С целью минимизации неопределенности расчетной модели в работе предлагается следующий способ оптимизации модели: расчетное выражение (3) дополняется поправочными коэффициентами:

1. Коэффициент, определяющий наличие погрешности информационно-измерительных комплексов - k_U ;
2. Коэффициенты, учитывающие распределение режимных параметров вдоль рассматриваемого участка ЛЭП - S_P, S_Q, S_U .

С учетом предложенных коэффициентов выражение (3) приобретает следующий вид:

$$\Delta W_{n j} = 3 \cdot R \sum_{j=1}^M \left(\frac{(k_U \cdot P_j)^{S_P} + (k_U \cdot Q_j)^{S_Q}}{(k_U \cdot U_j)^{S_U}} \right) \cdot 10^3 \cdot \Delta t \quad (8)$$

Результатом проведенных расчетов поправочных коэффициентов, при которых неопределенность детерминистической модели была минимальна являлись следующие значения:

$$k_U=1,224 ; S_P=2,004 ; S_Q=2,190 ; S_U=2,187 \quad (9)$$

При расчете неопределенности детерминистической модели, определенной выражением (8) и значениями поправочных коэффициентов (9) было получено значение коэффициента $SAR = 0.73$, что свидетельствует о близости расчетной модели (рисунок 8).

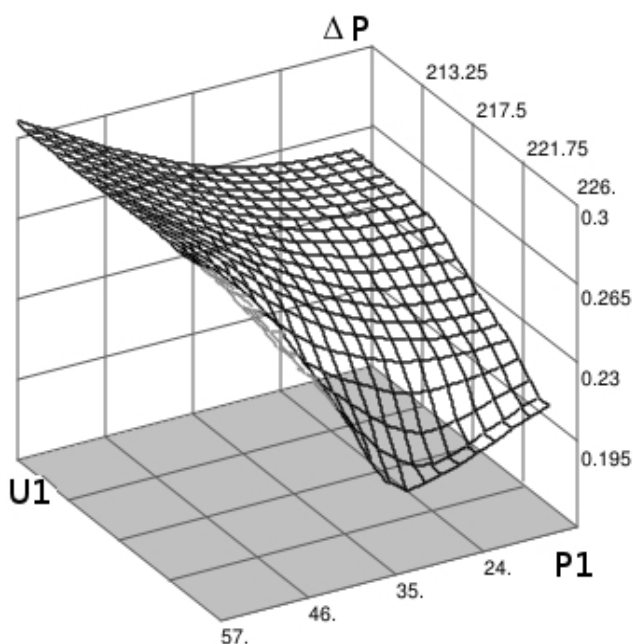


Рисунок 8 - Зависимость потерь активной мощности от передаваемой по линии активной мощности и напряжения на шинах. Оптимизированная модель

В главе проведена оценка средней погрешности вычислений. В результате получено, что средняя погрешность оптимизированной модели, определенной поправочными коэффициентами (9) ниже на 15,91%.

Для оценки ожидаемого экономического эффекта применения предложенной оптимизированной модели для определения потерь электроэнергии были использованы следующие исходные данные:

- Согласно отчету ОАО «ФСК ЕЭС» за 2009 год суммарные фактические потери электроэнергии единой национальной электрической сети (ЕНЭС) составили 22

120,6 млн. кВт·ч.;

- Согласно приказу Федеральной службы по тарифам от 29 декабря 2009 г. №552-э/2 средний тариф на оплату технологических потерь электроэнергии в ЕНЭС на 2010г. составляет 0,94 руб./кВт·ч.

В результате оценки ожидаемого экономического эффекта применения оптимизированной модели расчета потерь электроэнергии в масштабе ЕНЭС было получено, что использование данной методики позволяет получить экономию средств предприятий-собственников электросетевого оборудования за счет перерасчета технологических потерь электроэнергии в размере 3,306 млрд. руб. в год.

В **заключении** приведено описание преимуществ разработанного экспериментального образца СОДТИ и перспективы развития данной технологии, а также предполагаемое промышленное использование разработанного программного комплекса.

Разработанный экспериментальный образец системы предоставляет:

1. Совместное отображение ситуационной схемы и однолинейных схем отдельных энергоузлов.
2. Совместный просмотр распределения электросетей и конструктивного исполнения энергообъектов с их географической привязкой.
3. Выбор степени детализации виртуальной модели электроэнергетической системы.
4. Информационную интеграцию карт состояния и ситуационной схемы наблюдаемого участка электроэнергетической системы, а также уровня технологических потерь активной мощности.

Сделан вывод о целесообразности применения предложенной методики анализа неопределенности детерминистических моделей потерь электроэнергии в линиях электропередач и необходимости проведения дополнительных расчетов для каждого элемента электроэнергетической системы, в связи с наличием уникальных условий эксплуатации и технологического исполнения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведено исследование современных методов отображения ситуационной информации о состоянии электроэнергетических систем. Сформулирована проблема повышения эффективности систем отображения данных ситуационного мониторинга электроэнергетических систем. Проведен анализ литературы, посвященной данной предметной области.

2. Разработана виртуальная модель электроэнергетической системы, описывающая состав, структуру и динамику протекания технологического процесса, для решения задач анализа информации о состоянии наблюдаемой системы.

3. Разработан экспериментальный образец системы отображения данных, предоставляющий пользователям ситуационную информацию о состоянии наблюдаемой электроэнергетической системы в среде виртуального окружения.

4. Разработана методика анализа потерь электроэнергии по параметрам неопределенности в линиях электропередач, использующая детерминистическую и статистическую информацию о схеме и режиме её функционирования.

5. Проведена оценка неопределенности и оптимизация расчетной модели потерь электроэнергии в линиях электропередач по параметрам неопределенности; проведена оценка погрешности оптимизированной модели и экономического эффекта её использования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В ведущих научных журналах из перечня ВАК:

1. **Клименко С.В.** Использование систем виртуального окружения для визуализации информации в сфере управления электроэнергетическими системами / С.В. Клименко, М.В. Брагута // Вестник ИГЭУ. – 2008. - №4. –С.52-57.

2. **Брагута М.В.** Разработка системы отображения диспетчерско-технологической информации с использованием технологии виртуального окружения / М.В. Брагута, Е.Н. Еремченко, С.В. Клименко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - Иркутск: ИрГУПС.- 2010. - №1(25). - С.206 - 211.

В других изданиях:

3. **Брагута М.В.** Использование систем виртуального окружения для визуализации систем теплоснабжения // Новости теплоснабжения. -2008. - № 4 (92). - С.51.

4. **Клименко С.В.** Применение систем виртуального окружения / С.В. Клименко, М.В. Брагута // Промышленная и экологическая безопасность. - 2009. - №4(30). - С.45-47.

5. **Брагута М.В.** Система визуализации диспетчерско-технологической информации на основе технологии виртуального окружения / М.В. Брагута, С.В. Клименко // Тр. 1-й международной конференции «Трехмерная визуализация научной, технической и социальной реальности. Кластерные технологии моделирования». - 2009. - Том 2. - С.26-29.

6. **Брагута М.В.** Система отображения диспетчерско-технологической информации с использованием технологии виртуального окружения / М.В. Брагута, С.В. Клименко // Тр. 52-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть IV Молекулярная и биологическая физика. Том 1. - М.:МФТИ, 2009. - С.65-67.

7. **Клименко С.В.** Отображение диспетчерско-технологической информации о состоянии электроэнергетической / С.В. Клименко, Л.Н. Столяров, М.В. Брагута // MEDIAS2011 Труды Международной научной конференции, 10-14 мая 2010 г., Лимассол, Республика Кипр. - Изд.ИФТИ. ISBN 978-5-88835-030-0. - 2010. - С.1-5.

8. **Алешин В.П.** Программно-технический комплекс ситуационного центра для мониторинга и управления территориями и проектами модернизации / В.П.Алешин, Р.Т.Исламов, М.В.Брагута и др. // MEDIAS2011 Труды Международной научной конференции, 10-14 мая 2010 г., Лимассол, Республика Кипр. - Изд.ИФТИ. ISBN 978-5-88835-030-0. - 2010. - С.149-230.

9. **Брагута М.В.** Новые подходы к отображению ситуационной информации о состоянии электроэнергетических систем с учетом моделирования потерь электроэнергии /

М.В.Брагута, Р.Т.Исламов, С.В. Клименко // MEDIAS2011 Труды Международной научной конференции, 10-14 мая 2011 г., Лимассол, Республика Кипр. - Изд.ИФТИ. ISBN 978-5-88835-030-0. - 2011. - С.1-5.

Для заметок

БРАГУТА МАКСИМ ВАЛЕРЬЕВИЧ

СИСТЕМА ОТОБРАЖЕНИЯ ДАННЫХ СИТУАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СЕТЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ

05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации (по энергетике)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Усл.п.л. – 1.5

Заказ №05260

Тираж: 100экз.

Копицентр «ЧЕРТЕЖ.ру»

ИНН 7701723201

107023, Москва, ул.Б.Семеновская 11, стр.12

(495) 542-7389

www.chertez.ru