

*На правах рукописи*

ПЕТУХОВ

Илья Сергеевич

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ  
ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ  
ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ,  
управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2009 г.

Работа выполнена в Балтийском государственном техническом университете «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Смирнова Наталия Николаевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Скороходов Дмитрий Алексеевич

кандидат технических наук, доцент  
Симаков Игорь Павлович

Ведущая организация: Институт проблем машиноведения РАН

Защита диссертации состоится «16» марта 2009 г. в 12 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.07 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «11» февраля 2009 г.

Ученый секретарь  
совета Д 212.238.07

/ Цехановский В.В. /

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Многие электроэнергетические объекты РФ являются по своей природе структурно-сложными техническими системами (ССТС) большой размерности. Для таких объектов можно выделить два основных направления по обеспечению надежности и безопасности эксплуатации:

1. Безаварийное функционирование производственных мощностей с учетом имеющихся сил и средств.
2. Оперативная ликвидация последствий аварийных ситуаций в случае их возникновения и возобновление функционирования системы.

Эти направления возникли, с одной стороны, в ответ на требования Ростехнадзора, а с другой стороны, из-за необходимости уменьшения издержек производства и повышения конкурентоспособности продукции. Для обеспечения безопасности эксплуатации электроэнергетических объектов по этим двум направлениям необходимы следующие математические методы и модели:

1. Методы оценки надежности отдельных элементов ССТС.
2. Методы оценки надежности и безопасности ССТС.
3. Модели выполнения переключений элементов ССТС.

На основе указанных методов и моделей целесообразно создание специализированного программного обеспечения, предоставляющего необходимую поддержку лицам, принимающим управляющие решения. Но следует отметить, что многие существующие математические методы и модели ССТС обладают рядом ограничений:

1. Методы оценки надежности отдельных элементов по статистическим данным в подавляющем большинстве случаев используют только экспоненциальный закон распределения.
2. Методы оценки надежности и безопасности ССТС не позволяют выполнять анализ систем большой размерности за приемлемое время. Большинство из них используют в качестве входных данных вероятности отказов элементов, и поэтому не применимы для анализа давно эксплуатируемых систем, для которых эти данные в явном виде отсутствуют и должны получаться из имеющейся статистики.
3. Модели выполнения переключений элементов ССТС не позволяют учитывать возможные состояния элементов, отличные от «работает» и «не работает».
4. Отсутствует единый формат описания ССТС, позволяющего избежать избыточности.

Устранить указанные недостатки возможно путем доработки существующих методов и алгоритмов, создания модели переключения элементов и комплексной модели ССТС. Исследования целесообразно завершить разработкой специализированного программного обеспечения и его внедрением на электроэнергетических объектах.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является повышение надежности электроэнергетических объектов за счет развития и агрегации существующих математических моделей оценки надежности, безопасности и выполнения переключений элементов в ССТС.

**Задачи исследования.** Главной научной задачей диссертационной работы является разработка комплекса методов, необходимых для построения системы поддержки принятия решений по обеспечению надежности функционирования ССТС. Для решения этой главной задачи поставлены и решены следующие частные научные и практические задачи:

1. Обоснование необходимости использования двухпараметрических законов распределения при выборе методов расчета надежности отдельных элементов ССТС.
2. Разработка модели переключения элементов ССТС, учитывающей требуемые работоспособные и неработоспособные состояния для каждого типа элементов, поддерживающей заданные критерии для выполнения переключений и позволяющей получать согласованную последовательность рекомендаций по переключениям.
3. Разработка технологии формализованного описания семантики ССТС и метода агрегации различных моделей анализа ССТС на основе единого формализованного описания.
4. Создание программного комплекса поддержки принятия решений по обеспечению надежности ССТС с использованием выбранных и разработанных методов и моделей.

**Объект исследований.** Объектом исследования является система электроэнергетики большой размерности и высокой структурной сложности.

**Предмет исследований.** Предметом исследования является надежность и безопасность функционирования системы электроэнергетики.

**Методы исследования.** При проведении исследований использовался системный подход, теория сложных систем, метод проверки статистических гипотез А.С. Агапова, логико-вероятностный метод И.А. Рябина, обобщенный структурный метод А.И. Губинского и В.Г. Евграфова, теория надежности. Разработанные теоретические положения и методы проверены в рамках экспериментов на базе созданного программного комплекса.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод отбора кратчайших путей успешного функционирования системы для оценки надежности ССТС в целом.
2. Модель переключения элементов ССТС, алгоритм выполнения согласованных переключений и метод формирования рекомендаций по выполнению переключений.
3. Метод агрегации модели оценки надежности отдельных элементов ССТС, модели оценки надежности и безопасности ССТС в целом и модели переключения элементов ССТС.

**Научная новизна:**

1. Метод отбора кратчайших путей успешного функционирования отличается учетом интегральной характеристики каждого пути, что

позволяет уменьшить время выполнения расчетов показателей надежности ССТС или завершить вычисления по достижении заданной точности.

2. Модель переключения элементов ССТС отличается возможностью учета требуемых дискретных состояний элементов (а не только «работоспособен» и «неработоспособен»), что позволяет проводить дискретно-событийное моделирование переключений с высокой степенью реалистичности в реальном масштабе времени.
3. Метод агрегации моделей анализа ССТС отличается использованием единого формализованного описания семантики ССТС, что позволяет избежать дублирования, повышает обоснованность принятия решений за счет синергетического эффекта от использования нескольких моделей, а также закладывает возможность будущего расширения разработанной системы поддержки принятия решений.

**Практическая ценность работы.** В диссертации изложены научно обоснованные подходы к развитию и агрегации существующих моделей и методов оценки надежности, безопасности и выработки управляющих решений по переключению элементов, направленные на создание систем поддержки принятия решений для ССТС. Одним из результатов работы является создание программного комплекса (имеется свидетельство о регистрации в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ), предназначенного для служб эксплуатации электроэнергетических объектов.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы использовались в ООО «Городской центр экспертиз» при создании алгоритмической модели автоматизированной структурно-логической оценки показателей надежности и риска объектов энергетики ОАО «ФСК ЕЭС», при разработке Декларации промышленной безопасности кислородного цеха ОАО «Северсталь», и при создании математической модели автоматизированной оценки показателей надежности и риска для объектов газотранспортных систем ООО «Тюментрансгаз» (подтверждено актами о внедрении).

Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры «Информационные системы и компьютерные технологии» БГТУ «Военмех» им. Д.Ф.Устинова для дисциплин «Проектирование информационных систем» и «Моделирование систем представления знаний» (подтверждено актом о внедрении).

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на IV Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике» в 2004 г., на XIII Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве» в 2004 г., на II международной научно-технической конференции «Инфокоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании» в 2006 г., на IV международной научно-технической конференции «Искусственный интеллект в XXI веке. Решения в условиях неопределенности» в 2006 г., на

общероссийской научно-технической конференции «Третьи Уткинские чтения» в 2007 г., VI международной конференции «Актуальные проблемы промышленной безопасности: от проектирования до страхования» в 2008 г.

**Личный вклад автора.** Основные научные положения, алгоритмы и их программная реализация, содержащиеся в диссертационной работе, получены автором самостоятельно.

**Публикации.** Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 14 научных работах, среди которых 3 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в перечне ВАК, 6 докладов на всероссийских и международных научно-практических конференциях, 1 учебное пособие и 4 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 70 наименований, и 5 приложений. Работа изложена на 144 страницах, содержит 40 рисунков, 7 таблиц, объем приложения составляет 15 страниц.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** показана актуальность темы исследования, описаны основные современные подходы к решению проблемы повышения безопасности эксплуатации ССТС и очерчены их основные ограничения и недостатки. На основе анализа определены цели и задачи настоящего исследования, отмечена его практическая ценность.

**В первой главе** проведен анализ существующих моделей, предназначенных для обеспечения безопасной эксплуатации ССТС. Подробно проанализированы модели, позволяющие рассчитывать показатели надежности отдельных элементов ССТС, и сформулированы требования к таким моделям, включающие в себя необходимость учета цензурированных статистических данных и возможность использования не только экспоненциального, но и иных законов распределений.

Выполнен анализ существующих подходов к моделированию ССТС для оценки надежности и безопасности, и выбран прямой подход к моделированию на основе математического описания при помощи графов связности, с последующим анализом посредством общего логико-вероятностного метода.

Рассмотрены два основных подхода к моделированию ССТС для выполнения переключений элементов – метод готовых решений и дискретно-событийное моделирование, и сделан аргументированный выбор в пользу второго подхода. Рассмотрены имеющиеся модели, позволяющие проводить дискретно-событийное моделирование. Сформулированы критические недостатки, которые необходимо исправить для достижения требуемой точности моделирования.

Сделаны выводы, что наиболее значительный эффект от использования рассмотренных направлений моделирования достигается при совместном их применении на протяжении определенного времени эксплуатации системы, и

что задача объединения результатов, выводов и рекомендаций, получаемых при использовании этих моделей, является актуальной в силу обеспечения требуемой информационной поддержки для лиц, принимающих управляющие решения при эксплуатации ССТС.

**Во второй главе** разработана модель оценки надежности и безопасности ССТС, позволяющая рассчитывать как показатели надежности отдельных элементов системы, так и общесистемные показатели надежности и безопасности на основании структурной схемы системы (схемы функциональной целостности) и эксплуатационных/справочных/паспортных данных о каждом элементе системы. При построении модели были учтены такие особенности находящейся в эксплуатации ССТС, как:

- Изменение структуры системы из-за модернизации, различных аварийных ситуаций и ремонтов.
- Частичное или полное отсутствие информации об отказах и ремонтах для некоторых элементов.

Обоснована необходимость использования двухпараметрических законов распределения (на примере нормального, логарифмически нормального и Вейбулла) для расчета надежности отдельных элементов ССТС. Для этого проведен анализ эксплуатационной статистики различных элементов электроэнергетической системы и вычислены средние наработки до отказа  $T_{CPЭ}$  для экспоненциального закона и  $T_{CP}$  для закона с наибольшим коэффициентом корреляции с выборочным законом. Вычислены расхождения средней наработки до отказа (1) и максимум разности вероятностей отказа (2):

$$\Delta T_{CP} = |T_{CPЭ} - T_{CP}| \quad (1)$$

$$\Delta P_{MAX} = \max |P_{Э}(t) - P(t)|, \quad (2)$$

где:  $P_{Э}(t)$  – вероятность отказа в предположении экспоненциального закона распределения,

$P(t)$  – вероятность отказа для закона с наибольшим коэффициентом корреляции с выборочным законом распределения.

Полученные значения для нескольких однотипных элементов электроэнергетической системы приведены в таблице 1. В первом столбце таблицы приведен закон с наибольшим коэффициентом корреляции с выборочным законом распределения, а во втором и третьем – рассчитанные значения параметров. В четвертом столбце приведена частота отказов. Как видно из таблицы, в ряде случаев  $\Delta T_{CP}$  превышает 1000 часов. На основе аналогичных расчетов по различным типам элементов сделан вывод, что расчет показателей надежности в предположении экспоненциального закона распределения приводит к существенному уменьшению точности расчетов. После этого выработаны алгоритмы оценки вероятностей работоспособности и отказа для элементов ССТС с учётом различных законов распределения, основанные на методе проверки статистических гипотез А.С. Агапова.

Таблица 1. Законы распределения для однотипных элементов

Закон распред.	1-й пар-р закона	2-й пар-р закона	$\lambda$	$T_{CP}$ (ч)	$T_{CPЭ}$ (ч)	$\Delta T_{CP}$
Лог. норм.	$\mu=7.726$	$\sigma=1.04$	$2.77 \cdot 10^{-4}$	3443,6	3843,6	400,0
Лог. норм.	$\mu=7.989$	$\sigma=1.120$	$2.03 \cdot 10^{-4}$	5936,7	4909,6	1027,1
Лог. норм.	$\mu=8.166$	$\sigma=0.915$	$1.93 \cdot 10^{-4}$	5300,1	5156,2	143,9
Лог. норм.	$\mu=8.120$	$\sigma=0.874$	$1.88 \cdot 10^{-4}$	5288,5	5288,8	0,3
Лог. норм.	$\mu=8.908$	$\sigma=0.742$	$8.6 \cdot 10^{-5}$	9679,3	11573,9	1894,6
Экспон.	$\lambda=1.19 \cdot 10^{-4}$	-	$1.19 \cdot 10^{-4}$	8337,2	8337,2	0
Лог. норм.	$\mu=8.177$	$\sigma=0.99$	$1.9 \cdot 10^{-4}$	5744,7	5248,2	496,5
Лог. норм.	$\mu=8.329$	$\sigma=0.964$	$1.59 \cdot 10^{-4}$	6531,2	6279,2	252,0
Вейбулла	$\alpha=1.39 \cdot 10^{-4}$	$\beta=1.03$	$1.81 \cdot 10^{-4}$	5455,3	5497,3	42,0
Лог. норм.	$\mu=8.37$	$\sigma=1.07$	$1.51 \cdot 10^{-4}$	7550,3	6596,0	954,3
Вейбулла	$\alpha=4.4 \cdot 10^{-4}$	$\beta=0.897$	$1.8 \cdot 10^{-4}$	5777,4	5529,4	248,0

Для расчета показателей надежности и безопасности ССТС в целом выбран один из логико-вероятностных методов – метод наращивания путей, предложенный И.А. Рябининым. Величина вероятностной добавки от вновь добавленного кратчайшего пути успешного функционирования (КПУФ) вычисляется по формуле полной вероятности. Для этого безусловная вероятность успешного функционирования данного пути  $P_i$  умножается на условную вероятность отказа всех предшествующих путей при условии, что элементы данного  $P_i$  пути в этих отказах не участвовали. Вычисление условных вероятностей  $P^{(0)}, P^{(1)}, \dots, P^{(d)}$  выполняется по формуле (3):

$$P^{(i+1)} = P^{(i)} + P\{P_{i+1} = 1\} \cdot P\{\bigwedge_{j=1}^i \overline{P_j} | P_{i+1} = 1\}, \quad (3)$$

где:  $P^{(0)} = 0$  – исходная условная вероятность безотказной работы системы при отсутствии всех путей,

$P^{(i)} = P\{\bigvee_{j=1}^i P_j = 1\}$  – вычисленная на предыдущем шаге условная вероятность безотказной работы системы при условии наличия в системе первых  $i$  путей,

$P\{P_{i+1} = 1\} = P\{\bigwedge_{j \in K_{P_{i+1}}} x_j = 1\}$  – вероятность успешного функционирования  $(i+1)$ -го КПУФ, определяемая произведением вероятностей безотказной работы элементов, входящих в этот путь,

$P\{\bigwedge_{j=1}^i \overline{P_j} | P_{i+1} = 1\}$  – условная вероятность отказа первых  $i$  путей при условии абсолютной надежности  $P_{i+1}$ -го пути.



Поскольку между размерами системы и соответствующими логическими моделями существует экспоненциальное соотношение – число конъюнкций  $K1$  и число слагаемых  $K2$  в формируемой вероятностной функции надежности всей ССТС оценивается формулами (4) и (5) – был разработан и апробирован метод отбора кратчайших путей успешного функционирования.

$$K1 = 2^n \quad (4)$$

$$K2 = 2^{K1} = 2^{2^n}, \quad (5)$$

где:  $n$  – число элементов рассматриваемой системы,  
 $K1$  – число конъюнкций в вероятностной функции,  
 $K2$  – число дизъюнкций в вероятностной функции.

Суть метода заключается оценке всех КПУФ системы сразу по нескольким критериям, каждый из которых имеет собственный вес. В качестве таких критериев предлагается использовать:

- Минимальное значение вероятности отказа элементов КПУФ (чем больше это значение, тем лучше);
- Значение безусловной вероятности работоспособности самого КПУФ (чем больше это значение, тем лучше);
- Количество элементов КПУФ (чем меньше это значение, тем лучше).

Отбор КПУФ, которые будут использоваться для расчета показателей надежности ССТС, производится на основе получаемой интегральной характеристики каждого КПУФ и с учетом требуемой точности расчета. Результаты работы метода отбора КПУФ рассмотрим на примере крупной распределительной подстанции ПС 750 кВ «Ленинградская» МЭС Северо-Запада ОАО «ФСК ЕЭС» (см. рис. 1).

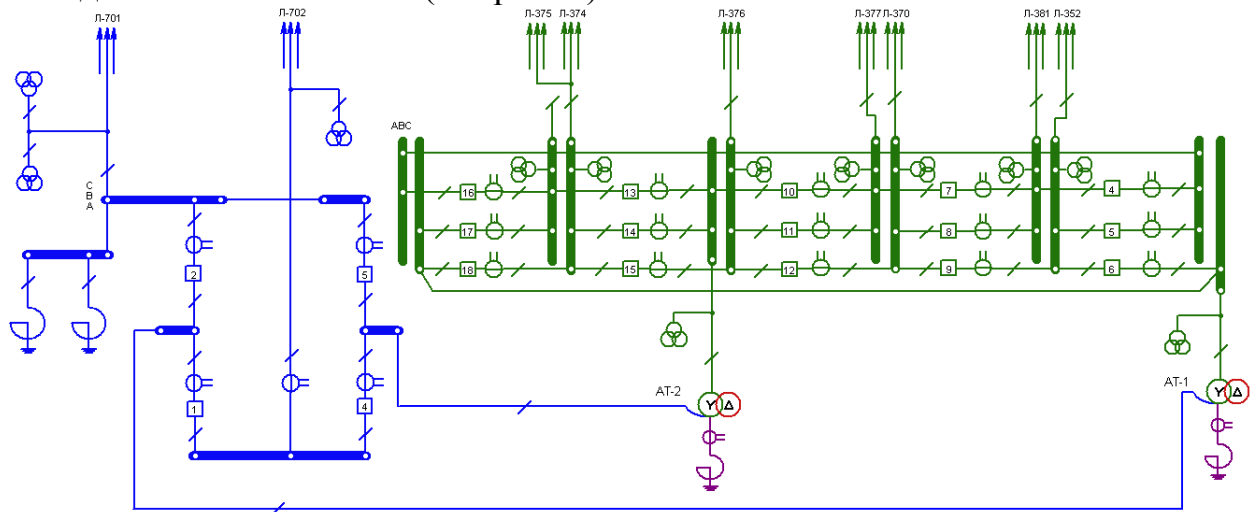


Рисунок 1. Структурная схема ПС 750 кВ «Ленинградская»

Например, для линии Л-701 существует более 590 кратчайших путей успешного функционирования. Как показано в таблице 2, метод отбора КПУФ позволяет учитывать только наиболее важные из них.

Таблица 2. Зависимость точности расчета от количества путей

Количество отобранных путей	6	25	45	61
Вероятность подачи энергии в линию Л-701	0,61	0,6254	0,6268	0,6270

Как видно из таблицы 2, подходящая для инженерных задач точность достигается при количестве путей в 10 раз меньшем, чем их общее количество. Таким образом, предложенный метод отбора КПУФ дает возможность существенно сократить время расчетов или остановить расчеты при достижении заданной точности.

Разработанная модель анализа надежности и безопасности отдельных элементов и системы в целом позволяет проводить анализ на основе реальных эксплуатационных данных, при этом с более высокой точностью, по сравнению с ранее использовавшимися моделями, и практически в реальном времени. Результаты применения модели показывают, что в ряде случаев разница между полученными показателями и использовавшимися до этого справочными показателями надежности превышает 100 раз, то есть справочные показатели оказываются серьезно завышенными.

**В третьей главе** разработана модель переключения элементов ССТС, позволяющая выдавать рекомендации при произвольной комбинации повреждений. Проведен анализ требований к модели и принято решение ограничить область применимости разрабатываемой модели такими классами систем, отдельные элементы которых удовлетворяют следующим условиям:

1. Известно количество входов и выходов.
2. Известны возможные состояния входов и выходов и возможность их работы в инверсном режиме.
3. Непрерывное множество состояний элемента можно аппроксимировать относительно небольшим множеством дискретных состояний.
4. Для каждого дискретного состояния элемента известны состояния всех входов и выходов.

Указанные ограничения позволили добиться баланса между сложностью описания принципов работы каждого элемента и реалистичностью поведения этого элемента с точки зрения выполнения его переключения из одного состояния в другое. Данный баланс является важным, поскольку составление описания элементов и взаимосвязей между ними в рамках существующих (более простых) моделей занимает несколько человеко-месяцев.

Для учета особенностей различных элементов и связей было введено понятие типов элементов и типов связей, и предложено использовать для каждого типа индивидуальные описания состояний и переходов между ними. Для учета зависимостей между элементами было предложено выделить и использовать понятие «порт элемента». Под портом элемента понимается любой вход или выход физического элемента, который учтён в модели посредством взаимосвязей между элементами. Было предложено строить модель из типизированных элементов, при этом все связи между элементами регламентировать множествами портов этих элементов. Например, обычный двухканальный электрический выключатель может быть задан как тип, имеющий два входных и два выходных порта, WiFi точка доступа – как тип с двумя входными и тремя выходными портами, клапан топливной системы с дистанционным управлением заслонкой – как тип с двумя входными и одним

выходным портом (рис. 2). Символами «>>» и «<<» на рисунке отмечены входные и выходные порты, соответственно.



Рисунок 2. Пример различных типов элементов

Каждый тип элемента в модели может иметь любое число допустимых состояний  $S_E$ , каждое из которых уникально и задается множеством (6):

$$S_E = \{N, P\}, \quad (6)$$

где:  $N$  – название состояния,

$P$  – множество состояний портов элемента в состоянии  $S_E$ .

Для каждого состояния элемента количество его портов является постоянной величиной, а состояние каждого порта меняется вместе с состоянием элемента. Состояние порта в некотором состоянии элемента  $S_E$  задается множеством  $S_P$  (7):

$$S_P = \{D, S\}, \quad (7)$$

где:  $D$  – направление работы порта («вход», «выход», «двунаправленный»),

$S$  – состояние порта («задействован», «не задействован», «неопределенное состояние»).

При необходимости, множество состояний порта  $S$  может быть расширено при обязательном соблюдении условия, что для каждого дискретного состояния  $S_E$  элемента известны значения характеристик входов и выходов (конкретные значения или диапазоны). На практике такое расширение может либо вообще не требоваться, либо быть необходимым лишь для нескольких типов элементов, поэтому не окажет существенного влияния на время создания модели и собственно время моделирования переключения.

Для учета резервных связей была разработана технология их описания тремя различными способами, не требующими дополнительных надстроек над моделью:

1. В случаях, когда резервные связи представляют собой  $n$ -кратное резервирование соединения между неизменными портами двух элементов, эти связи в модели представляются при помощи отдельного типа элементов с несколькими состояниями, каждое из которых соответствует включению  $i$ -го резерва. Этот способ позволяет представить в модели ситуации, когда резервные связи постоянно физически подключены к одному входу (контакту).
2. В случаях, когда резервная связь может соединять порт некоторого элемента с одним из нескольких альтернативных элементов, используются обычные связи. Особенностью их подключения является

соединение не с портом напрямую (поскольку порт позволяет только одно подключение), а через отдельный элемент – коммутатор (рис. 3).



Рисунок 3. Резервная связь через коммутатор

3. В случаях, когда элемент имеет несколько отдельных резервных портов, они просто соединяются обычными связями с требуемыми элементами.

Для описания перевода элемента из одного состояния в другое в разработанной модели была использована теория конечных автоматов, с дополнительно введенным понятием не прямых переходов. Состояния элемента представляются состояниями конечного автомата, переходам между состояниями соответствуют переходы из одного состояния конечного автомата в другое, а вся необходимая информация, связанная с переходом, представляется как вес перехода (рис. 4).

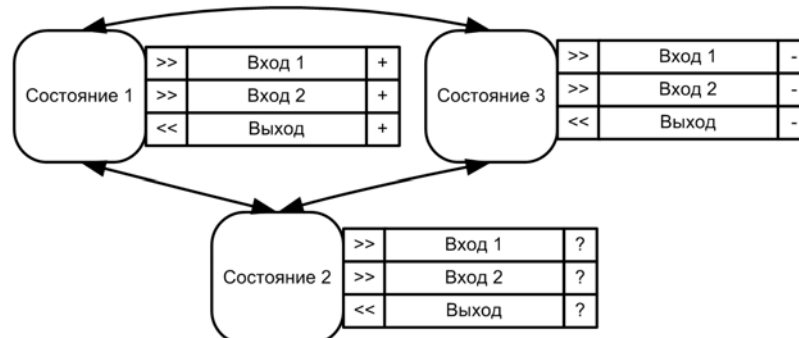


Рисунок 4. Пример конечного автомата.

С каждым состоянием в конечном автомате связано множество состояний портов (символами «>>» и «<<» отмечены входные и выходные порты, а знаками «+», «-» и «?» – их состояния), а с каждым переходом – характеристики этого перехода:

- Приоритет перехода.
- Затрачиваемое на переход время.
- Рекомендации экспертов по осуществлению перехода.

Для решения задачи переключения между двумя произвольными состояниями элемента может потребоваться совершить несколько переходов за один такт. Для описания такого перехода было введено понятие непрямого перехода. Непрямой переход между состояниями – это последовательность одиночных (прямых) переходов, которая позволяет из исходного состояния достичь целевое. Хотя не прямой переход и происходит за один такт, он выполняется в строгом соответствии с правилами прямых переходов и не

происходит в случае возникновения любых противоречий на любом из входящих в него прямых переходов.

Непрямых переходов между двумя состояниями может быть несколько, поэтому расширенная модель конечного автомата позволяет найти все такие переходы и упорядочить их по некоторому критерию. Было разработано несколько критериев, каждый из которых может использоваться как по отдельности, так и в составе комплексного критерия:

- Количество промежуточных состояний.
- Конъюнкция приоритетов прямых переходов.
- Совокупное время прямых переходов.

Рассмотрим в качестве примера состояния элемента и состояния его портов для клапана с дистанционным управлением, в котором направление работы портов не меняется в зависимости от состояния (рис. 5). Допустимые переходы между состояниями показаны на рисунке при помощи стрелок, и если предположить, что в настоящий момент клапан находится в закрытом состоянии и управление на него не подается, а целевым состоянием клапана является «открыт и управляем», то из рисунка видно, что такой переход возможен только через промежуточное состояние «закрыт и управляем». При выполнении данного перехода состояния портов будут меняться, и в конечном состоянии, если переход состоится, все порты клапана окажутся задействованными.

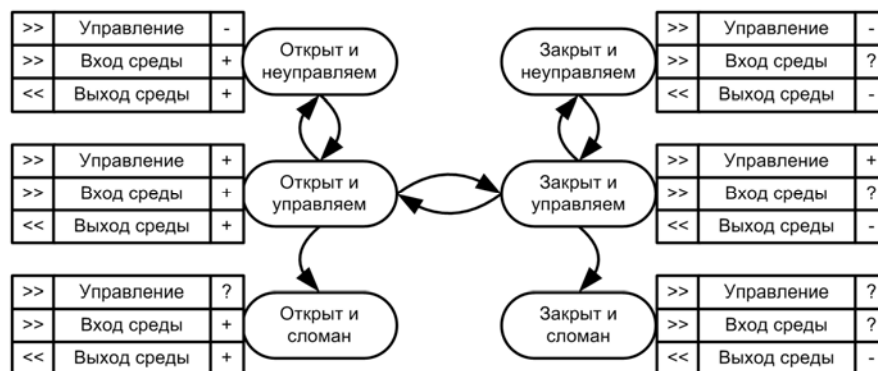


Рисунок 5. Пример состояний элемента и состояний его портов.

При любом переключении между состояниями элемента необходимо обеспечить переключение и всех связанных с ним элементов. Для того чтобы определить, какие элементы из связанных с исходным элементом необходимо переключить, достаточно проанализировать все порты (как входящие, так и исходящие), состояние которых изменилось при переходе. Поскольку порядок анализа портов невозможно определить по имеющейся информации об элементе и его состояниях, порядок анализа и переключения портов должен быть регламентирован. В разработанной модели переключения эта проблема решается путем задания порядка переключения портов для каждого из состояний элемента. Порядковый номер переключения портов позволяет изменять состояние портов элемента в строгом соответствии с реальным процессом.

Например, для такого элемента, как бытовой водонагреватель, существует жёсткое ограничение – не включать нагревательный элемент,

пока не подается вода, поскольку иначе нагревательный элемент выйдет из строя. Нумерация портов позволяет смоделировать эту особенность элемента. На рис. 6 для каждого состояния водонагревателя проставлены порядковые номера переключения портов, и поэтому при переходе в штатный режим работы сначала будет произведена попытка подачи воды (если она не подавалась в предыдущем состоянии, из которого делается переход), а уже после этого будет выполнен запрос на подачу электричества.

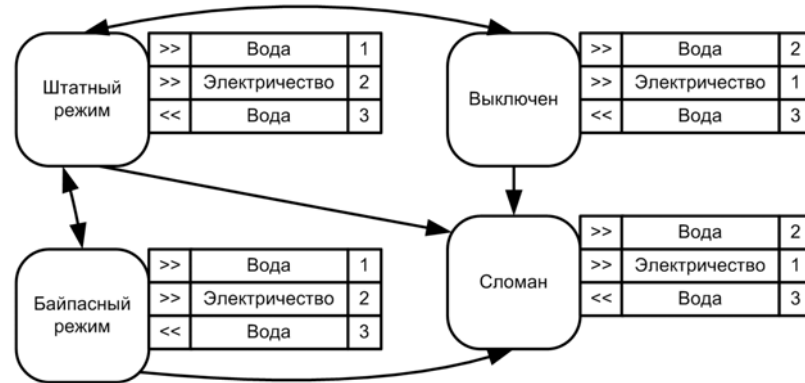


Рисунок 6. Порядок переключения портов

Разработанная в третьей главе модель переключения элементов обладает хорошими показателями быстродействия. Тестирование на автоматически сформированных структурах систем с более чем 2 млн. элементов показало, что в наихудших случаях, когда для выполнения требуемого переключения требуется переключить все остальные элементы системы, время получения решения составляет менее 1 минуты на современных ЭВМ. Для систем, состоящих из 20-40 тыс. элементов, время выполнения переключения составляет около 1 секунды в худшем случае; время получения решения для типового переключения составляет доли секунды. К плюсам разработанной модели можно отнести возможность обеспечения целостности модели (за счет введения понятия "тип элемента", учета портов элементов и порядка их переключения), достаточную степень точности для рассматриваемой цели моделирования, хорошую гибкость и масштабируемость. Недостатком модели можно считать высокую трудоемкость её создания по сравнению с моделями, учитывающими только два состояния элементов.

**В четвертой главе** разработана технология формализованного описания ССТС на основе семантической объектной сети – структуры данных, состоящей из объектов и связей, описывающих взаимоотношения между объектами. Свойства объектов и связей в такой сети могут быть совершенно произвольными, зависящими только от конкретного типа. Все связи в такой сети являются двусторонними, могут описывать как физические, так и логические связи между объектами. Для обеспечения представления семантической объектной сети служат три дополнительных понятия: схемы, гиперсвязи и слои. Схема – это некоторое множество объектов и связей между ними. Схемы предназначены для выделения любых множеств объектов и связей из их общей совокупности. Гиперсвязь – это связь между объектом на схеме или связью на схеме и другой схемой. Гиперсвязи

предназначены для организации взаимосвязей между схемами. Наконец, слой – это подмножество множества объектов и связей на схеме. Слой, обладая свойством видимости, позволяет визуально представлять сложные схемы.

Для обеспечения свойства сохраняемости формализованного описания с достаточной степенью универсальности разработана технология отображения семантической объектной сети во внешние хранилища данных.

Для объединения моделей в комплексную модель обеспечения надежности функционирования ССТС разработан метод агрегации моделей на основе единого описания ССТС. Общая структура комплексной модели обеспечения надежности функционирования ССТС приведена на рис. 7.



Рисунок 7. Структура комплексной модели ССТС

На основе созданной комплексной модели разработан программный комплекс, который зарегистрирован в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ (имеется свидетельство о регистрации). Комплекс был апробирован при анализе надежности электрической подстанции ПС 750 кВ «Ленинградская» МЭС Северо-Запада ОАО «ФСК ЕЭС».

**Заключение по результатам проведенных исследований.** Среди основных результатов диссертации можно отметить следующие:

1. Разработан метод отбора кратчайших путей успешного функционирования системы, который позволил уменьшить время выполнения расчетов показателей надежности ССТС или завершить вычисления по достижении заданной точности.
2. Разработана модель переключения элементов ССТС, учитывающая дискретные состояния элементов и состояния их входов и выходов, которая позволяет проводить дискретно-событийное моделирование переключений и получать согласованную последовательность переключений отдельных элементов для перевода всей системы в требуемое состояние.
3. Разработан метод агрегации моделей анализа ССТС, который повышает обоснованность принятия решений за счет синергетического эффекта от использования нескольких моделей; на основе метода агрегации моделей создан программный комплекс, дающий возможность эксплуатирующим организациям самостоятельно выполнять оценку надежности электроэнергетических объектов и получать оперативную информационную поддержку по выполнению переключений.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:****Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Петухов, И.С. Подход к созданию модели переключения технических средств больших технических систем [Текст] / И.С. Петухов // Вестник молодых учёных. – 2005. – №8 – серия «Технические науки» 1'2005. – с. 96–99.
2. Петухов, И.С. Моделирование структурно-сложных технических систем для решения задач оценки надежности, безопасности и переключения технических средств [Текст] / И.С. Петухов, Н.Н. Смирнова // Информационно-управляющие системы. – 2007. – №6. – с. 11–19.
3. Петухов, И.С. Применение модели оценки надежности производственных систем для кислородного цеха ОАО «Северсталь» [Текст] / И.С. Петухов [и др.] // Metallurg. – 2008. – №9. – с. 21–26.

**Публикации в других изданиях:**

4. Петухов, И.С. Система расчета показателей надежности и риска объектов энергетики со сложными структурно-логическими связями [Текст] / И.С. Петухов // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: Сб. ст. XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Нижний Новгород. – 2004. – с. 24.
5. Петухов, И.С. Автоматизированная система структурно-логической оценки показателей надежности и риска объектов энергетики [Текст] / И.С. Петухов // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: Сб. ст. IV Всерос. науч.-техн. конф. – Пенза. – 2004. – с. 154–156.
6. Петухов, И.С. Технология построения семантической объектной сети и ее отображение во внешнее хранилище данных [Текст] / И.С. Петухов // Инфокоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании: Вторая Междунар. науч.-технич. конф. – Ставрополь. – 2006. – Ч.1. – с. 238–239.
7. Петухов, И.С. Описание конечных автоматов с помощью семантической объектной сети [Текст] / И.С. Петухов // Искусственный интеллект в XXI веке. Решения в условиях неопределенности: IV Междунар. науч.-технич. конф. – Пенза. – 2006. – с. 29–31.
8. Петухов, И.С. Алгоритм переключения технических средств сложных технических систем в аварийных ситуациях [Текст] / И.С. Петухов // Третьи Уткинские чтения: Сб. ст. Общерос. науч.-технич. конф. – Санкт-Петербург. – 2007. – Т.2. – с. 47–50.
9. Петухов, И.С. Применение семантических объектных сетей при моделировании сложных технических систем [Текст] / И.С. Петухов // Актуальные вопросы ракетно-космической техники и технологий: сб. тр. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых БГТУ. – СПб.: Балтийский государственный технический университет. – 2007. – с. 192–193.
10. Петухов, И.С. Разработка программного обеспечения [Текст]: учебное пособие / И.С. Петухов; Под ред. Н.Н. Смирновой. – СПб.: Балтийский государственный технический университет. – 2007. – 57 с.



11. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005610505. Программный комплекс расчета показателей надежности и риска структурно-сложных схем «Energy System» / И.С. Петухов, А.А. Верхованцев, А.Н. Гуцин. – 2005.
12. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005613104. Программа сбора данных по проведению кренования от системы навигации и гиросtabilизации «Кренование-Сбор» / И.С. Петухов, А.А. Верхованцев, А.Ю. Никитин, А.Н. Гуцин. – 2005.
13. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005613105. Программа формирования отчетов по проведенному кренованию «Кренование-Отчет» / И.С. Петухов, А.А. Верхованцев, А.Ю. Никитин, А.Н. Гуцин. – 2005.
14. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005613106. Программный комплекс контроля остойчивости надводного корабля по данным от системы навигации и гиросtabilизации (решение задач кренования) «Кренование» / И.С. Петухов, А.А. Верхованцев, А.Ю. Никитин, А.Н. Гуцин. – 2005.

Подписано в печать 10.02.09. Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага документная  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ №16  
Балтийский государственный технический университет  
Типография БГТУ  
190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1