

# ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

2015 **2**  
март-  
апрель

Сравнительный анализ  
российского и международных стандартов  
систем энергетического менеджмента  
стр. 10

Обоснование стоимости  
энергетических обследований  
с целью оптимизации затрат  
стр. 16

Повышение надёжности  
электроснабжения особо ответственных  
электропотребителей  
стр. 27



Об утверждении методики снижения класса (подкласса) условий труда при применении  
эффективных средств индивидуальной защиты  
стр. 50

ISSN 2071-2219



9 772071 221004

УДК 519.873

## Использование логико-вероятностных методов для оценки безопасности и надёжности ТЭС как структурно-сложных технических систем

**В. В. Барановский,***Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров,  
доктор технических наук, профессор***Т. Ю. Короткова,***Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров,  
кандидат технических наук, доцент***М. Ю. Коновалов,***Министерство обороны,  
заместитель начальника службы вспомогательного флота  
департамента транспортного обеспечения*

Представлены современные научные подходы, которые могут быть использованы для оценки надёжности и безопасности тепловых электростанций. Обоснована возможность применения логико-вероятностных методов исследования для количественной оценки надёжности и безопасности структурно-сложных систем, к которым относятся современные ТЭС.

**Ключевые слова:** безопасность, надёжность, структурно-сложная система, логико-вероятностный метод.

Современные тепловые электрические станции являются структурно-сложными техническими объектами, состоящими из большого числа элементов, отказы которых существенно влияют на безопасность работы станции в целом. Вероятность возникновения аварий на таких объектах стараются снизить до минимальных значений, так как масштабы их последствий значительны. Безопасность функционирования ТЭС как структурно-сложных систем во многом зависит и от человеческого фактора, поэтому в условиях дальнейшего нарастания сложности оборудования и систем автоматизированного управления вопросы надёжности и безопасности техники, порядка и организации управления ТЭС приобретают всё большее значение.

Под надёжностью структурно-сложной системы подразумевается её способность выполнять функциональное предназначение в течение необходимого времени, а под безопасностью – способность системы не причинять ущерба большого масштаба окружающей среде и самой себе [1]. Разработки, касающиеся вопросов повышения надёжности функционирования сложных систем, можно разделить на 4 группы.

1. Повышение надёжности сложной системы путём повышения надёжности отдельных её элементов.

2. Повышение надёжности путём создания моделей прогнозирования отказов отдельных элементов системы.

3. Повышение надёжности путём создания моделей прогнозирования и безопасности функциониро-

вания системы в целом с учётом взаимодействия и взаимовлияния отдельных элементов сложной системы [1–3].

4. Создание моделей переключения технических средств, помогающих эксплуатирующему персоналу в принятии решений при возникновении аварийных ситуаций [4].

Наиболее комплексно задача повышения надёжности и безопасности функционирования ТЭС как технически структурно-сложной системы может решаться с учётом влияния любого элемента, входящего в состав структуры ТЭС, на надёжность всей системы в целом с использованием математического моделирования и логико-вероятностных методов.

Логико-вероятностные методы предоставляют большие возможности при анализе влияния любого элемента на функционирование структурно-сложной системы, так как структура системы в этом случае описывается средствами математической логики, а количественная оценка надёжности и безопасности производится с использованием теории вероятностей [1]. Простые системы можно анализировать и исследовать, используя формулы полной вероятности. Однако решение задачи надёжности и безопасности сложных объектов методом простого перебора множества вариантов с использованием формулы полной вероятности является слишком трудоёмким и нецелесообразным. ТЭС как сложную техническую систему возможно описать, используя последовательные, параллельные и древовидные структурные модели, но лишь путём значительных упрощений и

всевозможных допущений, что также нецелесообразно для оценки безопасности и надёжности.

Разработанный логико-вероятностный метод использует набор таких операций, как конъюнкция, дизъюнкция, отрицание, и позволяет построить как монотонные, так и немонотонные объекты высокой структурной сложности. Исходными данными для логико-вероятностных моделей являются вероятности истинности отдельных аргументов в функциях алгебры логики, описывающих работоспособность системы (в теории надёжности) или её опасное состояние (в теории безопасности). Логико-вероятностный метод моделирования предусматривает разработку структурно-логической модели сложной системы, то есть схему функциональной целостности системы и задание критериев её функционирования.

С математической точки зрения схема функциональной целостности системы позволяет определить состояния системы, в которых она выполняет, и состояния, в которых она не выполняет свое функциональное назначение. Методика построения, основные элементы и графические объекты схемы функциональной целостности сложной системы представлены в [5].

Разрабатываемая схема функциональной целостности тепловой электростанции должна определять либо работоспособное состояние системы (прямой подход), либо состояние её отказа (обратный подход). В настоящей статье показан прямой подход к оценке надёжности и безопасности ТЭС, а в создаваемой схеме функциональной целостности тепловой электростанции использованы элементы, влияющие на выполнение целевой функции ТЭС – бесперебойного

снабжения потребителей электрической или электрической и тепловой энергией необходимого качества в соответствии с требованиями потребителей. Для практической реализации логико-вероятностных методов разработаны специальные программные средства.

Для примера рассмотрим схему ПГУ-450 Северо-Западной ТЭЦ (г. Санкт-Петербург), представленную в [6]. Для оценки надёжности системы энергоснабжения (рис. 1) тепловая схема перерабатывается в схему функциональной целостности (рис. 2), показывающую все элементы системы со связями между ними. Схема функциональной целостности – это специальная знаковая система описания условий работоспособности элементов структурно-сложных систем, разработанная профессором Можаяевым А. С. и реализованная в программном комплексе структурно-логического моделирования надёжности и безопасности сложных систем.

На рис. 2 обозначены функциональные вершины (окружности большего размера), выражающие условия реализации работоспособности конкретных элементов. Например, функциональная вершина 2 соответствует электрогенератору ГТУ-2, который реализует работоспособность в случаях, во-первых, собственной работоспособности, а также при обеспечении работоспособности газотурбинного двигателя ГТД-2. Также на схеме обозначены фиктивные вершины (окружности меньшего размера), показывающие условия реализации работоспособности нескольких элементов. Например, фиктивная вершина 1 обозначает,

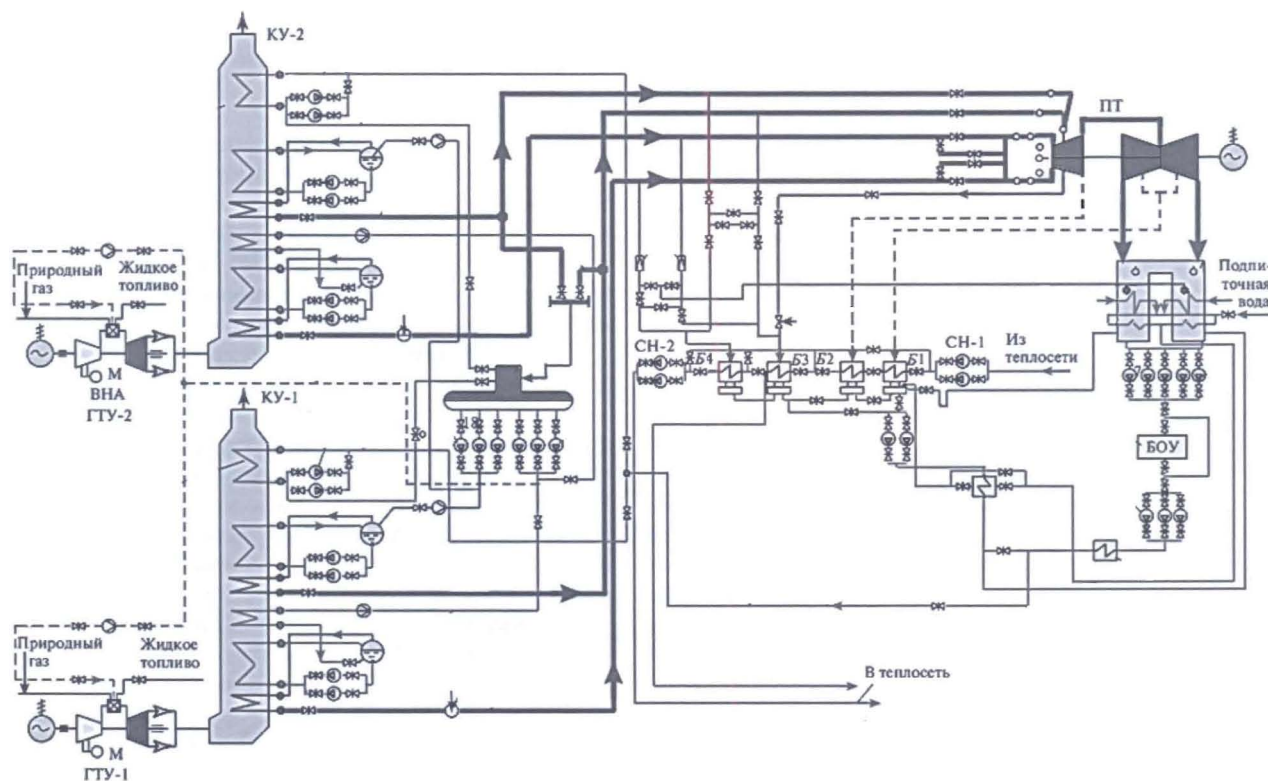


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема ПГУ-450

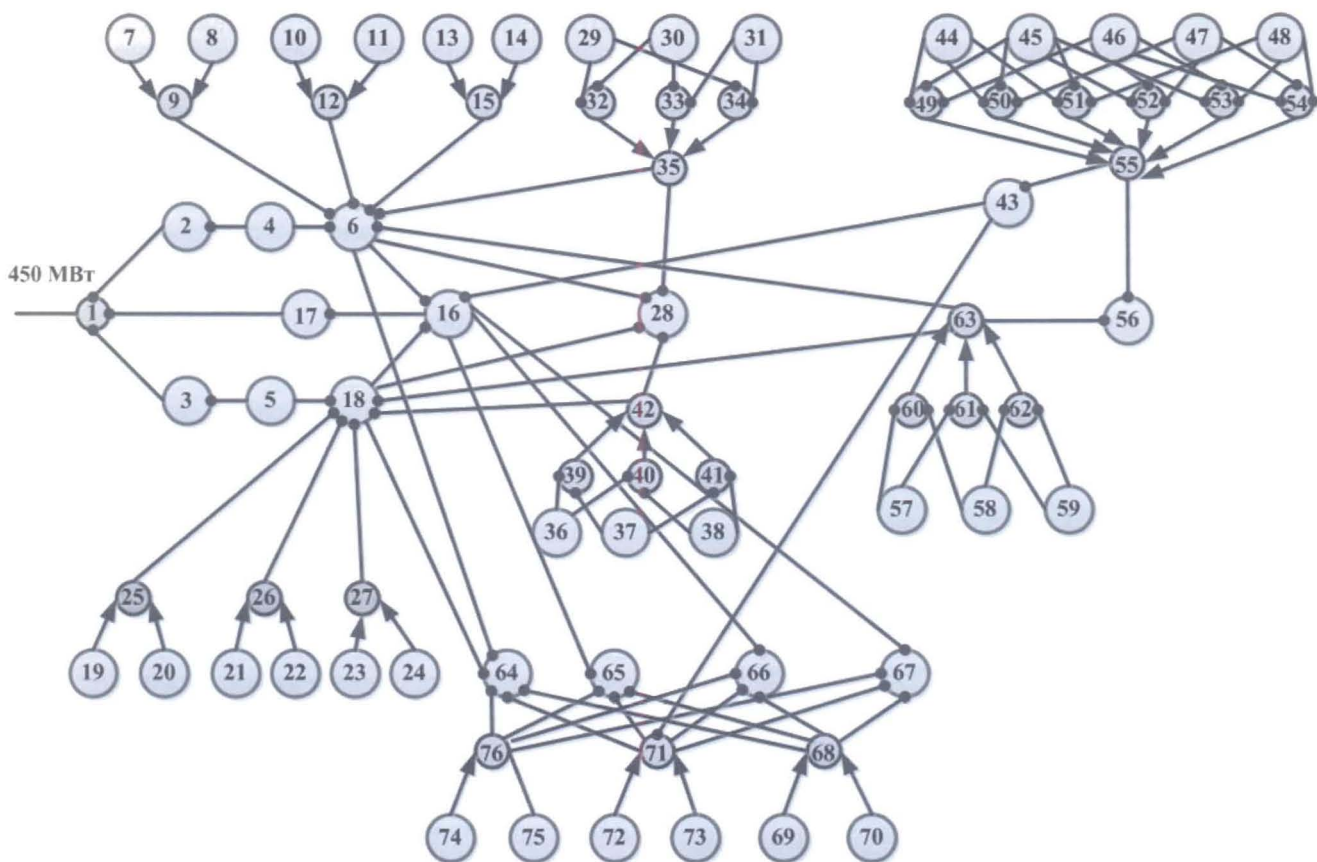


Рис. 2. Схема функциональной целостности системы

Таблица 1

| № элемента | Наименование                                                | Реализация системной функции элементами                                                                                                                                 |
|------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1          | Фиктивная вершина                                           | Условие реализации генерирования номинальной мощности ТЭС (450 МВт): в работоспособном состоянии должны находиться одновременно все три электрогенератора               |
| 2          | Электрогенератор ГТУ-2 (функциональная вершина)             | Условие реализации работоспособности электрогенератора ГТУ-2: в работоспособном состоянии должен находиться сам электрогенератор, а также газотурбинный двигатель ГТД-2 |
| 35         | Фиктивная вершина                                           | Условие реализации системной функции блоком конденсатных насосов: в работоспособном состоянии должны находиться два из трёх насосов                                     |
| 45         | Конденсатный насос первого подъема (функциональная вершина) | Условие реализации собственной работоспособности конденсатного насоса первого подъёма                                                                                   |

что для обеспечения функционирования системы в работоспособном состоянии должны находиться электрогенератор ГТУ-2, электрогенератор ГТУ-1 и электрогенератор паровой турбины одновременно.

Пример расшифровки элементов, обозначенных на рис. 2, и условий реализации ими системных функций представлен в табл. 1. Основное назначение схемы – показать вид связей между элементами. Указанная схема, а также значения показателей надёжности составляющих её элементов выводятся в программу расчёта, где и производится вычисление указанных показателей всей системы в целом. Пример отображения результатов расчёта показателей надёжности демонстрирует рис. 3.



Рис. 3. Расчётные значения надёжности системы

Примечательно, что кроме собственно количественных показателей надёжности или безопасности структурно-сложных систем программа позволяет выделить значимость и вклад каждого составляющего элемента в структурную надёжность или безопасность системы (рис. 4, 5). Это даёт возможность определить наиболее важные элементы системы, вносящие наибольший вклад в обеспечение её надёжности или безопасности, и в процессе проектирования системы обеспечить резервирование указанных элементов или акцентировать на них внимание при эксплуатации уже созданной системы в плане проведения регламентных работ и обеспечения запасных частей.



Рис. 4. Расчётные значения значимостей и вкладов элементов в общую надёжность системы



Рис. 5. Расчётные значения положительных вкладов элементов структурно-сложной системы

Понятия «надёжность» и «безопасность» нельзя взаимозаменять, так как надёжность характеризует свойство системы сохранять работоспособность при штатных ситуациях, а безопасность – способность системы не причинять ущерба большого масштаба окружающей среде и самой себе. Помимо смещения этих понятий зачастую за безопасность системы выдают её отказоустойчивость. Повышение надёжности элементов, введение структурной и временной избыточности, применение взаимозаменяемости и восстановления, а также другие меры гарантируют только отказоустойчивость системы, то есть её способность правильно функционировать при отказах нескольких элементов. Однако для структурно-сложных систем характерна возможность сложных (многократных) комбинаций событий, вероятность каждого из которых мала, а в сумме таких событий набирается немало. Усилия, направленные на повышение отказоустойчивости системы, необходимы, но недостаточны для обеспечения её безопасности. Даже специальные системы контроля и защиты, ориентированные на простой перебор возможных опасных ситуаций, не могут гарантировать защиты системы от произвольных комбинаций отказов, нарушений правил эксплуатации и иных неблагоприятных воздействий.

В моделях надёжности сложных технических систем основную роль играют элементный состав системы, связи между элементами, режимы работы системы и т. п., а в проблеме безопасности на первом плане должны находиться такие не учитываемые в теории надёжности компоненты, как среда, в которой функционирует система, защитные сооружения, неблагоприятные внешние воздействия, умышленные или безответственные действия человека. Специалист по безопасности должен рассматривать «психологию диверсанта», то есть продумывать, каким образом система может быть приведена в опасное состояние, в отличие от специалиста по надёжности, заботящегося о сохранении её работоспособности [1].

При проектировании структурно-сложных систем и разработке алгоритмов управления ими должны быть тщательно рассмотрены все множество опасных состояний, а также логика их возникновения (пожар, взрыв и т. д.). Знание условий возникновения неблагоприятных воздействий позволяет разработать безопасный алгоритм управления системой и заблаговременно принять соответствующие меры защиты.

При оценке безопасности сложных систем возникает проблема получения объективных статистических данных о безотказности элементов, входящих в состав структурно-сложной системы. Такая информация зачастую либо вообще отсутствует, либо труднодоступна. В этом случае представить возможность развития аварии, используя функцию алгебры логики, можно, однако оценить вероятность реализации негативного события и риск нельзя. Можно было бы предложить произвести объективную оценку условий, которые оказывают наибольшее влияние на возникновение негативного события, иначе говоря, определить факторы, подлежащие приоритетному учёту. Оценивая вес и значимость каждого условия, можно выделить события, на которые стоит обратить первостепенное внимание, и определить, с какими элементами технической системы они связаны.

Обеспечение надёжности и безопасности промышленных ТЭС на стадиях проектирования, модернизации и эксплуатации является одной из наиболее актуальных задач, с которыми приходится сталкиваться проектировщикам и персоналу тепловых электростанций. Традиционные методы оценки надёжности и безопасности ТЭС основаны на нормативно-технических документах, таких как, например [7–9], которые не в полной мере учитывают все особенности исследования структурно-сложных систем. Такими особенностями, как правило, являются учёт структурного построения системы, влияния отдельных элементов на функционирование системы в целом, оценка значимостей и вкладов элементов в структурную надёжность и безопасность системы, определение целей более конкретного сосредоточения материальных, технических и финансовых усилий по повышению надёжности и безопасности ТЭС.

Использование логико-вероятностных методов, адаптированных в аппаратном комплексе структурно-логического моделирования, не только не противоречит требованиям нормативно-технической документации, но и раскрывает более широкие возможности исследователям и инженерному персоналу по оценке надёжности и безопасности объектов, позволяя сконцентрировать внимание на определённых элементах в плане их резервирования, формирова-

ния необходимых комплектов запасного имущества (ЗИП), планирования регламентных работ и др. Таким образом, логико-вероятностные методы являются наиболее эффективными для анализа структурно-сложных систем и могут быть рекомендованы к применению инженерно-техническому персоналу, занимающемуся проектированием и эксплуатацией промышленных тепловых электрических станций.

## Литература

1. Рябинин И. А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2007. – 276 с.
2. Современное состояние и некоторые направления развития логико-вероятностных методов анализа систем / Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем. – СПб.: ИПМаш РАН, 1994. Вып. 1. – С. 23–53.
3. Петухов И. С. Автоматизированная система структурно-логической оценки показателей надёжности и риска объектов энергетики / Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: Сб. ст. IV Всероссийской научно-технической конференции. – Пенза, 2004. – С. 154–156.
4. Ярошенко А. В. Методология координированных переключений (универсальные методы исследования больших сложных технических систем). – СПб.: ВМА, 2004.
5. Громов В. Н., Можаяев А. С. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. – СПб.: Изд-во Военного инженерно-технического университета, 2000. – 145 с.
6. Основы современной энергетики: Курс лекций для менеджеров энергетических компаний / Под общ. ред. чл.-корр. РАН Е. В. Аметистова. Ч. 1. Трухний А. Д., Макаров А. А., Клименко В. В. Современная теплоэнергетика. – М.: Издательство МЭИ, 2002.
7. ГОСТ Р 51901.1-2002. Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем. (Принят и введен в действие постановлением Госстандарта РФ от 7 июня 2002 г. № 236-ст). – М.: ИПК «Изд-во стандартов», 2002. – 28 с.
8. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: ИПК «Изд-во стандартов», 2002. – 24 с.
9. ГОСТ 51898-2002. Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты. – М.: ИПК «Изд-во стандартов», 2002. – 8 с.

## Logical probabilistic methods for safety and reliability estimation of complex systems

**V. V. Baranovsky,**

*Saint Petersburg State technological university of plant polymers, Doctor of Science, professor*

**T. Yu. Korotkova,**

*Saint Petersburg State technological university of plant polymers, PhD, associate professor*

**M. Yu. Konovalov,**

*Ministry of Defence of the Russian Federation*

*We present current research approaches for safety and reliability estimation of complex systems such as thermal power stations. Logical probabilistic methods have many advancements in application to quantitative assessment of safety and reliability potential of power plants.*

**Keywords:** *safety, reliability, complex system, logical probabilistic method.*