

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Строительства, энергетики и транспорта

**Методические рекомендации по самостоятельной работе**  
по дисциплине  
**«Моделирование информационных структур систем электроснабжения»**  
для всех форм обучения направления  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (профиль Электроснабжение)

**Мурманск**  
**2021**

## ***ТЕМА 1. Моделирование в научно-технических исследованиях***

### ***1.1. Развитие методов моделирования сложных систем***

Моделирование означает осуществление каким-либо способом отображения или воспроизведения действительности для изучения имеющихся в ней объективных закономерностей. Моделирование предполагает исследование каких-либо явлений и процессов в различных объектах путем построения и изучения их моделей. На идее моделирования по существу базируется любой метод научного исследования.

Электродинамические модели успешно используются и в учебных целях. На модели широко проводится демонстрация различных переходных процессов и аварийных режимов, выполняются учебные работы по ликвидации аварийных режимов, воспроизводимых на модели, и таким образом осуществляется обучение студентов.

### ***1.2. Классификация методов моделирования***

Наглядное моделирование. К этой группе могут быть отнесены макеты, обычно являющиеся геометрическими копиями изучаемого или проектируемого объекта. Деревянные модели церквей и башен, на основе которых проводилось строительство, известны были давно. Еще в XVII веке ученый монах Арсений

Суханов привез патриарху Никону модели иерусалимских храмов. В храме Василия Блаженного были найдены макеты, которыми пользовались зодчие, создавая реальные конструкции и т.д. В настоящее время наглядное моделирование широко используется. Так примером наглядного моделирования может быть трехмерная модель озера Байкал со всеми его глубинами, выставленная в музее Лимнологического института РАН в пос. Листвянка.

Наглядное моделирование позволяет различные мысленные представления (гипотезы) реализовать в форме тех или иных воображаемых моделей, например, планетарные модели атомов (Резерфорд, Бор). Такие модели могут быть наглядными аналогами.

Символическое моделирование. Оно предусматривает прежде всего упорядоченную запись, к которой относятся, например, выполнение географических карт, химических моделей, представленных в виде условных знаков, отображающих поверхности планеты, или соотношение элементов во время химических реакций. К знаковым моделям относятся разнообразные знаковые построения и записи различных операций, основанные на топологии и теории графов. Например, знаковыми моделями являются так называемые «деревья графов», которые символически изображают различного рода состояния систем и происходящие в этих системах процессы.

Математическое моделирование. К математическим моделям можно отнести алгоритмы и программы, которые позволяют выполнить исследование различных свойств ЭЭС. Эти программы, составленные для вычислительных машин, отображают определенные процессы, имеющие место в ЭЭС. Студентам со знаниями электротехники хорошо знакомы модели, которые представлены схемами замещения различных элементов ЭЭС - генераторов, трансформаторов, линий электропередачи. Примером математического моделирования могут быть и экономические модели.

Натурное моделирование. Под этим видом моделирования понимают исследования «на натуре», т.е. непосредственно в реально функционирующих ЭЭС при специально подобранных условиях. Примером натурального моделирования могут служить опыты, проведенные в ЭЭС по определению устойчивости, пропускной способности линий электропередачи, качества напряжения и т.д. Натурное моделирование позволяет оценить отклик системы на те или иные в ней возмущения.

Физическое моделирование. При физическом моделировании исследования проводятся на объектах, обладающих физическим подобием, т.е. на объектах, сохраняющих полностью или хотя бы в основном природу явлений. Тогда характеристики оригинала можно получить по характеристикам модели соответствующим пересчетом через масштабные коэффициенты. Физическое моделирование применяется для изучения нестационарных течений рек, каналов, гидравлических сооружений и т.д.

Аналогово-цифровое моделирование. При этом виде моделирования физика исследуемого процесса не сохраняется. Моделирование основывается на изоморфизме уравнений, т.е. их способности описывать различные по своей природе явления и выявлять различные функциональные связи, используя изофункционализм уравнений (способность описывать отдельные стороны поведения систем без полного описания всего поведения). Здесь можно выделить следующие подгруппы моделирования.

Аналоговое моделирование, которое использует прямую, непосредственную аналогию между величинами, присущими одному явлению, и формально такими же и также входящими в уравнения процессов величинами, присущими другому явлению. Простейшие примеры аналоговых моделей - движение маятника, колебания корабля на волнах и изменения электрического тока в цепи, содержащей емкость и индуктивность.

Цифровое моделирование основывается на элементах, производящих математические операции дискретно. Цифровые модели могут быть специализированными, предназначенными для решения некоторых конкретных задач.

Гибридное моделирование является сочетанием моделей, упомянутых выше и выполненных в виде соединения элементов аналоговой модели и специализированных цифровых машин.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что означает моделирование?
2. Для чего необходимы модели?
3. Назовите известных Вам ученых в области моделирования.
4. Какие исследования проводились в электроэнергетике с использованием моделирования? Приведите примеры.
5. К чему может привести недооценка моделирования? Приведите примеры.
6. Что такое наглядное моделирование?
7. Что такое символическое моделирование?
8. Что подразумевается под математическим моделированием?
9. Чем отличается наглядное моделирование от физического моделирования?
10. Привести примеры натурного моделирования.

### ***ТЕМА 2. Объект исследования***

#### ***2.1. Классификация систем энергетики***

Электроэнергетические системы (ЭЭС), газоснабжающие системы (ГСС), нефтеснабжающие системы (ННС), теплоснабжающие системы (ТСС) и ядерно-энергетические системы (ЯЭС). Электроэнергетические системы обеспечивают производство, преобразование, передачу и распределение электрической и тепловой энергии. В качестве основной их функции обычно рассматривается электроснабжение потребителей.

Выполнение ЭЭС функций теплоснабжения учитывается в математических моделях обеспечения надежности ТСС, в которых в качестве одного из источников теплоты рассматривается ТЭЦ.

#### ***2.2. Электроэнергетические системы***

Производство электроэнергии в ЕЭЭС осуществляется тепловыми электростанциями (ТЭС) на органическом топливе (уголь, газ, мазут, сланцы, торф), атомными электрическими станциями (АЭС) и гидроэлектростанциями (ГЭС), суммарная установленная, мощность которых составляет около  $300\text{ГВт}$ . На ТЭС приходится более  $2/3$  мощности, доля ГЭС и АЭС соответственно 18 и 13%. Структура генерирующих мощностей в различных ОЭЭС, входящих в ЕЭЭС, различна; наибольший удельный вес ГЭС (более 50%) - в ОЭЭС Сибири, доля АЭС в ОЭЭС Северо-Запада и Центра существенно больше по сравнению с другими ОЭЭС. Больше половины установленной мощности ЕЭЭС размещено на станциях мощностью

более 1 ГВт. Основным генерирующим оборудованием на ТЭС являются конденсационные блоки единичной мощностью от 150 до 800 МВт. Максимальная мощность генерирующего оборудования АЭС составляет 1500 МВт, ГЭС - 640 МВт.

Протяженность электрических сетей 220-1500 кВ существенно превышает 100 тыс. км. Пропускная способность электропередач по «сечениям» на границах между ОЭЭС составляет 1--3 ГВт. Повышение пропускных способностей связей, с одной стороны, обеспечивает большую возможность обмена электроэнергией и взаимопомощи смежных районов ЕЭЭС при авариях, а с другой - способствует развитию аварийных процессов, которые, если они своевременно не локализуются, могут охватывать в пределе всю систему.

Развитие и усложнение структуры распределительных сетей, усложнение режимов их функционирования осложняет решение задачи обеспечения их надежности.

### ***2.3. Система, элемент, объект***

Отдельные части системы, представляющие собой законченные устройства, способные самостоятельно выполнять некоторые локальные функции в системе, называются элементами (например, генераторы, трансформаторы, выключатели, линии электропередачи и т.д.). Во всяком случае, элемент - это та часть системы, дальнейшая детализация которой не представляется целесообразной. Разбиение системы на элементы является делом произвольным и условным, так как оно зависит от самых различных факторов: от цели исследования, наличия тех или иных исходных данных и др. Кроме понятий система и элемент широко используется понятие подсистема, т.е. часть исследуемой системы, состоящей из элементов. В качестве подсистемы могут например быть РЭЭС, когда исследования выполняются для ОЭЭС. Условность подразделения системы на подсистемы и элементы состоит в том, что любой элемент, в свою очередь, может рассматриваться как подсистема или система. Например, воздушная ЛЭП состоит из таких элементов, как гирлянды изоляторов, опоры, фундаменты, провода, тросы, заземлители и т.д. То, что в одном исследовании является элементом, при детальном изучении может уже стать подсистемой или системой, и наоборот, система при рассмотрении некоторой суперсистемы может для исследователя приобрести характерные свойства элемента.

В тех случаях, где нет необходимости подчеркивать свойства, присущие только системам или только подсистемам и элементам, будем говорить об объектах. В качестве объекта могут рассматриваться система, ее подсистема или элемент.

### ***2.4. Функции объекта***

Функции объекта определяются, во-первых, его назначением, а во-вторых самим фактом его создания. Основной функцией, определяемой назначением ЭЭС, является

бесперебойное (в необходимом количестве) снабжение потребителей электрической энергией требуемого качества. Заданной функцией, связанной собственно с созданием ЭЭС, является недопущение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды, которые могут возникнуть в различных аварийных условиях. Ситуации, опасные для людей и окружающей среды возможны и при отсутствии аварийных условий (отказов), т.е. при нормальном функционировании объекта из-за низкого его технического совершенства.

### ***2.5. Объем выполнения заданных функций. Эффективность системы***

Заданную функцию система может выполнять в большем или меньшем объеме. Объем выполнения функции определяется заданным графиком электропотребления. Неудовлетворение спроса потребителя сверх заданного графика является проявлением технического несовершенства. Поэтому эффективность системы зависит как от ее надежности, так и от технического совершенства.

## **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ**

1. Что понимается под энергетическим комплексом?
2. Какие системы энергетики входят в энергетический комплекс?
3. Как осуществляется оперативно-диспетчерское управление Единой электроэнергетической системой?
4. Территориальная иерархия управления Единой электроэнергетической системой.
5. Структура генерирующих мощностей в ЕЭЭС и ОЭЭС.
6. Достоинства и недостатки объединения электроэнергетических систем в Единую электроэнергетическую систему.
7. Понятия: система, элемент, объект.
8. Основные функции электроэнергетической системы.
9. Положительные и отрицательные воздействия объектов электроэнергетических систем на человека и окружающую среду.

## ***ТЕМА 3. Основные понятия***

### ***3.1. Надежность как комплексное свойство***

Основные понятия, которые далее приводятся, соответствуют сборнику рекомендуемых терминов «Надежность систем энергетики» [1] и не противоречат ГОСТ 27.002-89.

Под надежностью понимается свойство объекта выполнять заданные функции в требуемом объеме при определенных условиях функционирования. Функциями электроэнергетических систем являются бесперебойное снабжение потребителей электроэнергией требуемого качества и недопущение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды [3].

*Безотказность* - свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное или рабочее состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

*Ремонтпригодность* - свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения его отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

*Живучесть* - свойство объекта противопоставлять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей.

*Безопасность* - свойство объекта не допускать ситуаций, опасных для людей и окружающей среды. Безопасность является единственным единичным свойством надежности, отражающим уровень выполнения функций, заданных фактором создания объекта, а не его назначения.

*Долговечность* - свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов. Долговечность является свойством лишь элемента, но не системы.

*Сохраняемость* - свойство объекта непрерывно сохранять исправное или только работоспособное состояние в течение и после хранения и (или) транспортировки. Так же как и долговечность, сохраняемость есть свойство, присущее только элементам, а не системе.

*Устойчивость* - свойство объекта непрерывно сохранять устойчивость в течение некоторого времени.

*Режимная управляемость* - свойство объекта поддерживать нормальный режим посредством управления.

## **3.2. Состояния, характеризующие надежность**

### **3.2.1. Классификация состояний**

Состояния любых объектов можно классифицировать по способности объекта выполнять заданные функции в заданном объеме и по выполнению им заданных функций в заданном объеме. Соответственно можно говорить об уровне его работоспособности и о уровне его функционирования.

Например, для электростанции уровень работоспособности характеризуется значением его включенной мощности (т.е. возможностью использования станций для покрытия нагрузки), а уровень функционирования - графиком фактически выдаваемой мощности в течение рассматриваемого периода времени.

### ***3.2.2. Состояния, определяющие способность объекта выполнять заданные функции***

*Работоспособное состояние* - состояние объекта, при котором он способен выполнять все или часть заданных функций в полном или частичном объеме.

*Полностью работоспособное состояние* - работоспособное состояние, при котором он способен выполнять все заданные функции в полном объеме.

*Частично работоспособное состояние* - работоспособное состояние объекта, при котором он способен выполнять часть заданных функций или хотя бы одну из них в частичном объеме.

*Неработоспособное состояние* - состояние объекта, при котором он не способен выполнять все заданные функции.

*Предельное состояние* - состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть приращена из-за неустранимого нарушения требования безопасности, или неустранимого снижения уровня работоспособности, или недопустимого снижения эффективности эксплуатации.

### ***3.2.3. Состояния, определяющие выполнение объектом заданных функций***

*Рабочее состояние* - состояние объекта, при котором он выполняет все или часть заданных функций в полном или частичном объеме.

*Полностью рабочее состояние* - рабочее состояние объекта, при котором он выполняет все заданные функции в полном объеме.

*Частично рабочее состояние* - рабочее состояние объекта, при котором он выполняет часть заданных функций или хотя бы одну из них в частичном объеме.

*Резервное состояние* - состояние объекта, при котором он осуществляет резервирование других объектов.



*Нерабочее состояние* - состояние объекта, при котором он не выполняет все заданные функции.

Обычно полностью рабочее состояние объекта соответствует полностью работоспособному состоянию, а частично рабочее - частично работоспособному. Однако частично работоспособный объект может находиться в полном рабочем состоянии, если его уровень работоспособности выше требований, предъявляемых к его работоспособности. Например, ЭЭС может обеспечивать потребителей электроэнергией в период снижения нагрузки при непосредственном отключении агрегатов электростанций.

Рабочее состояние объекта ЭЭС принято характеризовать следующими режимами его работы.

*Нормальный режим* - рабочее состояние объекта, при котором обеспечиваются значения заданных параметров режима работы и резервирования в установленных пределах.

*Утяжеленный режим* - рабочее состояние объекта, при котором независимо от значения заданных параметров режима не обеспечивается резервирование в установленных пределах.

*Ремонтный режим* - рабочее состояние объекта, при котором часть его элементов находится в состоянии предупредительного или аварийного ремонта.

*Аварийный режим* - рабочее состояние объекта, в котором он находится в результате отказа его элементов от момента возникновения отказа до его локализации.

*Послеаварийный режим* - рабочее состояние объекта, в котором он находится в результате отказа его элементов после локализации отказа до установления заданного режима.

Перечисленными режимами, как правило, характеризуются состояния ЭЭС, а не элементов. *Нормальный режим* всегда соответствует полностью рабочему состоянию, а *утяжеленный* - частично рабочему. В качестве основных параметров режима работы ЭЭС обычно рассматриваются частота электрического тока, напряжение на сборных шинах источников питания и узлов нагрузки, обеспечение потребности потребителей в электрической энергии. Резервирование характеризуется схемой коммутации системы, величиной резерва генерирующей мощности и его мобильностью, запасами пропускной способности линий электропередачи.

*Ремонтный режим* может быть как нормальным, так и утяжеленным. Если какой-либо элемент системы находится в состоянии предупредительного ремонта, то ремонтный режим является нормальным, т.к. ЭЭС рассчитывается на такое состояние элементов.

*Аварийный режим*, как правило, соответствует частичному рабочему состоянию. Однако, возможны случаи, когда аварийный режим соответствует полностью рабочему состоянию. Аварийные выводы элементов из работы компенсируются вводами в работу элементов, находящихся в резервном состоянии.

*Послеаварийный режим* ЭЭС обычно является утяжеленным, но может быть и нормальным, если обеспечиваются поддержание заданных параметров режима и требования к резервированию в системе.

Объект может находиться в двух резервных состояниях: нагруженного резерва и ненагруженного резерва.

*Состояние нагруженного резерва* - резервное состояние объекта, при котором он находится в работе.

*Состояние ненагруженного резерва* - резервное состояние объекта, при котором он не находится в работе.

*Нерабочее состояние объекта* ЭЭС подразделяется на состояние ремонта (предупредительного и аварийного) и простоя (зависимого и аварийного).

*Состояние предупредительного ремонта* - нерабочее состояние объекта, при котором ведутся работы по выявлению, предупреждению и устранению его неисправностей, которые могут привести к отказу объекта.

*Состояние аварийного ремонта* - нерабочее состояние объекта, при котором ведутся работы по восстановлению его работоспособности, нарушенной в результате отказа элементов объекта.

*Состояние зависимого простоя* - нерабочее состояние объекта, возникшее вследствие отключения других объектов или проведения на них работ, требующих отключения данного объекта, работоспособность которого при этом не нарушается.

*Состояние аварийного простоя* - нерабочее состояние объекта, при котором не ведутся работы по восстановлению его работоспособности, нарушенной в результате отказа элементов объекта.

Резервные и нерабочие состояния относятся обычно не к системам, а к их элементам.

### ***3.3. События, характеризующие надежность***

#### ***3.3.1. Классификация событий. Основные виды отказов***

*Отказ работоспособности* - событие, заключающееся в переходе объекта с одного уровня работоспособности на другой, более низкий.

*Отказ функционирования* - событие, заключающееся в переходе объекта с одного уровня функционирования на другой, более низкий. Не всякий отказ работоспособности объекта может привести к отказу его функционирования. Отказ функционирования будет иметь место в том случае, когда уровень работоспособности объекта будет ниже требуемого уровня его функционирования.

### 3.3.2. События, приводящие к снижению уровней работоспособности и функционирования

*Полный отказ работоспособности* - отказ работоспособности, приводящий объект в неработоспособное состояние.

*Частичный отказ работоспособности* - отказ работоспособности, приводящий объект в частично работоспособное состояние.

*Внезапный отказ работоспособности* - отказ работоспособности, характеризующийся внезапным снижением уровня работоспособности объекта.

*Постепенный отказ работоспособности* - отказ работоспособности, характеризующийся постепенным снижением уровня работоспособности объекта.

*Независимый отказ работоспособности* - отказ работоспособности объекта, не обусловленный отказами работоспособности других объектов.

*Зависимый отказ работоспособности* - отказ работоспособности объекта, обусловленный отказами работоспособности других объектов.

*Устойчивый отказ работоспособности* - отказ работоспособности, для восстановления которой требуется ремонт объекта.

*Неустойчивый отказ работоспособности* - отказ работоспособности, для восстановления которой требуется только отключение или изменение режима работы объекта без его ремонта.

*Полный отказ функционирования* - отказ функционирования, приводящий объект в нерабочее состояние.

*Частичный отказ функционирования* - отказ функционирования, приводящий объект в частично рабочее состояние.

*Внезапный отказ функционирования* - отказ функционирования, характеризующийся внезапным снижением уровня функционирования объекта.

*Постепенный отказ функционирования* - отказ функционирования, характеризующийся постепенным снижением уровня функционирования объекта.

*Независимый отказ функционирования* - отказ функционирования объекта, не обусловленный отказами функционирования других объектов.

*Зависимый отказ функционирования* - отказ функционирования, обусловленный отказами функционирования других объектов.

*Устойчивый отказ функционирования* - отказ функционирования, требующий для его ликвидации ремонта объекта.

*Неустойчивый отказ функционирования* - отказ функционирования, требующий для его ликвидации только отключения или изменения режима работы объекта без его ремонта.

Кроме перечисленных отказов, в группу отказов функционирования входят также: отказ срабатывания, излишнее срабатывание и ложное срабатывание. Эти понятия характеризуют отказ функционирования объектов дискретного действия.

*Отказ срабатывания* - отказ функционирования, заключающийся в невыполнении объектом требуемого срабатывания.

*Излишнее срабатывание* - отказ функционирования, заключающийся в срабатывании объекта при требовании срабатывания других объектов и отсутствии требования срабатывания данного объекта.

*Ложное срабатывание* - отказ функционирования, заключающийся в срабатывании объекта при отсутствии требования срабатывания данного и других объектов.

Примером отказа срабатывания может быть отказ срабатывания выключателя ЛЭП при коротком замыкании на ЛЭП из-за отказа работоспособности привода выключателя. Излишнее срабатывание может быть при срабатывании защиты сборных шин подстанции при КЗ на одной из ЛЭП, отходящих от этой подстанции. Ложным срабатыванием будет, например, срабатывание релейной защиты при обрыве в цепях напряжения.

При крупных нарушениях режима системы вместо понятия «отказ» используется понятие «авария».

*Авария* - событие, заключающееся в переходе объекта с одного уровня работоспособности или уровня функционирования на другой, существенно более низкой, с крупным нарушением режима работы объекта.

Авария может привести к разрушению объекта, массовому нарушению питания потребителей, созданию условий, опасных для людей и окружающей среды.

Фиксация факта отказа или аварии требует использования четких количественных критериев отказа и аварии. Критерием отказа (аварии) являются условия, в соответствии с которыми принимается решение о наличии или отсутствии отказа (аварии). Такие критерии либо устанавливаются ведомственной нормативно-технической документацией, либо специально оговариваются условиями, определяющими формирование решений по обеспечению требуемого уровня надежности.

Ограничение последствий отказов и повышение уровней работоспособности и функционирования возможно локализацией отказа функционирования и восстановлением функционирования объекта.

*Локализация отказа функционирования* - событие, заключающееся в ограничении последствий отказа функционирования объекта.

*Восстановление* - событие, заключающееся в повышении уровня работоспособности объекта или относительно уровня его функционирования.

Повышение уровня работоспособности системы возможно, например, проведением аварийного ремонта или вводом в работу элементов, находящихся в резерве.

Повышение уровня функционирования системы может, например, произойти в результате изменения режима работы системы, в частности, при суточном или сезонном снижении потребления электроэнергии.

### **3.3.3. Каскадные аварии**

Развитие аварии может происходить самыми различными путями, которые практически не повторяются. Возможны и множественные первичные возмущения в разных точках системы, в том числе из-за процессов, происходящих в природе: тайфуны, вихри, снегопады, цунами, резкие похолодания; но возможны и преднамеренные внешние воздействия.

Предотвращение каскадных аварий обеспечивается действием автоматики и оперативно-диспетчерского персонала. Большую роль в предотвращении каскадного развития аварий играет быстродействующая автоматика деления системы (в 47% случаев), которая предотвращает возникновение или продолжение асинхронного хода. Автоматика, обеспечивающая разгрузку ЛЭП и АЧР предотвращают каскадное развитие аварий, соответственно в 24% и 22% случаев.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ**

1. Назовите основные функции электроэнергетических систем.
2. Что понимается под надежностью электроэнергетических систем?
3. Назовите единичные свойства надежности. Дайте определение для каждого единичного свойства.
4. Назовите состояния, характеризующие надежность.
5. Какие Вы знаете режимы работы электроэнергетических систем?
6. Какие Вы знаете события, характеризующие надежность?
7. Чем отличается отказ функционирования от отказа работоспособности системы?
8. Виды отказов: полный или частичный, внезапный или постепенный, независимый или зависимый, устойчивый или неустойчивый.
9. Что такое авария? Чем отличается авария от отказа?
10. Что понимается под локализацией отказа?
11. Чем локализация отказа отличается от восстановления объекта?
12. Каскадная авария (привести примеры).
13. Соотношение свойств живучести, безопасности и безотказности.
14. Что понимается под энергетической безопасностью?

## **ТЕМА 4. Показатели надежности**

### **4.1. Общие требования к показателям надежности**

Показателем надежности называется количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта. Их соответственно подразделяют на единичные и комплексные показатели надежности. Поскольку надежность ЭЭС характеризуется несколькими единичными свойствами, то и численная оценка ее осуществляется несколькими (комплексом) показателями надежности. Показатели надежности могут иметь размерность, а могут и быть безразмерной величиной и изменяться в пределах от 0 до 1. Абсолютно надежному объекту соответствует 1, а абсолютно ненадежному - 0.

Критерии отказа должны иметь простой и понятный физический смысл, а состояние отказа и восстановления должно определяться быстро и доступными техническими средствами.

На выбор показателей надежности оказывают влияние вполне очевидные рекомендации: выбранный показатель надежности должен иметь простой физический смысл, допускать возможность опытной проверки или хотя бы подтверждения; общее число показателей надежности должно быть по возможности минимальным; выбранный показатель надежности должен быть достаточно чувствительным к действию различных факторов, влияющих на надежность.

Выбранные показатели надежности должны обеспечивать возможность взаимосогласования решений, принимаемых на различных иерархических уровнях управления ЭЭС.

#### **4.2.4. Основные показатели сохраняемости**

1. *Средний срок сохраняемости* - математическое ожидание срока сохраняемости.

2. *Гамма-процентный срок сохраняемости* - срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Эти показатели имеют смысл лишь для элементов (оборудования) ЭЭС, причем фаза хранения не является существенной в режиме использования оборудования, т.к. хранение это не резервное состояние и не состояние простоя. Методов расчета показателей сохраняемости не существует. Имеющиеся гипотезы о характере поведения объектов в режиме хранения и транспортировки не подтверждаются достоверной статистической информацией.

#### **4.2.5. Показатели устойчивости, режимной управляемости,**

### ***живучести и безопасности***

Если для таких специальных свойств ЭЭС как устойчивоспособность, режимная управляемость, живучесть и безопасность сформированы критерии, по которым все состояния ЭЭС делятся на две группы - *удовлетворяющие* и *неудовлетворяющие* этим критериям, то тогда состояния, неудовлетворяющие выбранному критерию, будут представлять собой отказ. Рассматривая отказ как случайное событие, показатели характеризующие эти свойства, могут быть такие же как и показатели безотказности: среднее время работы (или в более общем случае -наработка) до отказа; вероятность того, что отказ не произойдет в течение заданного времени и т.д.

Наиболее сложным вопросом при расчете показателей для устойчивоспособности, режимной управляемости, живучести и безопасности является выбор критериев отказа. Кроме того, при оценке уровня жидкости и безопасности приходится иметь дело с *первичными возмущениями*, вероятность которых оценить практически невозможно, т.е. приходится иметь дело с неопределенностью ситуации, когда нет или не может быть, в принципе, вероятностных характеристик тех или иных воздействий. В этом случае приходится рассматривать предельные или гарантированные оценки, когда параметры ЭЭС не выходили бы за допустимые границы в случае возникновения фиксированных в том числе и наиболее неблагоприятных воздействий в ЭЭС.

#### ***4.3. Комплексные показатели надежности***

1. *Коэффициент готовности.* Этот показатель характеризует совокупность свойств безотказности и ремонтпригодности. Коэффициентом готовности  $K_G(t)$  называется вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени  $t$ .

Иногда вводят в рассмотрение усредненный на интервале коэффициент готовности  $K_{Gt}$ . Этот показатель определяет, сколько времени в среднем рассматриваемый объект находится в исправном состоянии на интервале  $[0,t]$ .

Коэффициент готовности есть вероятность застать объект в работоспособном состоянии в бесконечно удаленный от начала отсчета момент времени. Возможно иное определение коэффициента готовности - это доля времени в течение которого объект находится в работоспособном состоянии при условии, что время наблюдения очень велико. Тогда коэффициент готовности можно определить через среднее время работы между отказами и среднее время восстановления.

Каждому из рассмотренных выше коэффициентов готовности можно привести в соответствие коэффициент простоя, характеризующий вероятность застать объект в

состоянии отказа. Количественно коэффициент простоя равен значению, дополняющему коэффициент готовности до единицы.

2. *Коэффициент оперативной готовности.* Определяется как вероятность того, что объект находясь в режиме ожидания, окажется работоспособным в произвольный момент времени и начиная с этого момента будет работать безотказно в течение заданного интервала времени  $(t, t + I_0)$ .

3. *Коэффициент технического использования.* Определяется как отношение математического ожидания времени пребывания объекта в работоспособном состоянии к суммарному времени эксплуатации.

4. *Средний недоотпуск электрической энергии.* Представляет собой математическое ожидание количества электроэнергии, недоотпущенной потребителям за заданный период времени.

5. *Коэффициент обеспеченности потребителей электрической энергией*

6. *Средний ущерб на один отказ.* Этот показатель представляет собой математическое ожидание ущерба, приходящегося на один отказ рассматриваемого объекта. Трудность аналитического определения ущерба определяется не только характеристиками рассматриваемого отказа, но и на какой фазе производственного процесса у потребителей произошел отказ и т.д. Зависимость ущерба от продолжительности отказа обычно нелинейная.

7. *Удельный ущерб* определяется как ущерб, отнесенный к одному кВт \* ч недоотпущенной электрической энергии.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Требования к показателям надежности.
2. Назовите единичные показатели надежности (безотказности, ремонтпригодности, безопасности, долговечности, сохраняемости, живучести, устойчивости и режимной управляемости).
3. Назовите комплексные показатели надежности.
4. Какие показатели используются для оценки риска?

## ***ТЕМА 5. Информация, используемая для моделирования систем электроснабжения***

### ***5.1. Характеристика используемой исходной информации***



При *долгосрочном планировании режимов работы ЭЭС* (с заблаговременностью от 1 года до 1 месяца) ошибка прогноза нагрузки характеризуется средним квадратическим отклонением, обычно равным 4-6% величины нагрузки ЭЭС. Погрешность в определении показателей надежности оборудования составляют  $\pm 35\%$ .

При *краткосрочном планировании режимов работы ЭЭС* (с заблаговременностью в сутки или несколько суток) среднее квадратическое отклонение ошибки прогноза нагрузки обычно составляет 1-3% суточного максимума. Погрешность показателей надежности, вычисленных только с учетом внезапных отказов оборудования составляет не более  $\pm 40\%$ .

## ***5.2. Наиболее характерные законы распределения***

### ***5.2.1. Экспоненциальный (показательный) закон распределения***

1. *Плотность вероятности (дифференциальная функция) времени между отказами*

2. *Вероятность безотказной работы*

3. *Вероятность отказа*

4. *Интенсивность отказов*

Независимость интенсивности отказов от времени работы системы составляет главную отличительную особенность экспоненциального закона распределения случайной величины.

5. *Среднее время безотказной работы*

6. *Дисперсия*

7. *Среднее квадратическое отклонение*

т.е. среднее квадратическое отклонение равно среднему времени безотказной работы.

На практике это свойство часто используют для проверки истинности гипотезы о существовании экспоненциального закона распределения. Для этого на основе статистических данных определяют среднее квадратическое отклонение. Их равенство может служить доказательством правдоподобия принятой гипотезы.

### ***5.2.2. Нормальный закон распределения (закон Гаусса)***

Нормальному закону распределения подчиняются только непрерывные случайные величины.

Нормальное распределение является двухпараметрическим и определяется параметрами  $\sigma$  и  $T_{CP}$ . Этот закон описывает распределение случайной величины, значения которой группируются около среднего значения и наблюдаются с определенной частотой.

При  $T_{CP} = 0$  и  $\sigma = 1$  получается центрированное и нормированное распределение.

*Случайная величина*, подчиняющаяся нормальному закону распределения, имеет следующие свойства:

- одинаковые положительные и отрицательные отклонения от средней арифметической  $T_{CP}$  равновероятны;
- меньшие отклонения более вероятны, чем большие;
- весьма большие отклонения от  $T_{CP}$  маловероятны.

### **5.3. Статистическая оценка законов распределения**

Для исследования надежности ЭЭС необходимо знать законы распределения наблюдаемых случайных величин: наработки на отказ, времени восстановления, числа отказов и т.д. При эксплуатации ЭЭС в течение некоторого времени  $t$  рассматриваемая случайная величина может принять  $n$  различных определенных значений. Совокупность этих случайных значений случайной величины в математической статистике получила название статической выборки объемом  $n$ . Если расположить отдельные значения случайной величины в возрастающем порядке и указать относительно каждого значения, как часто оно встречается в данной совокупности, то получим распределение случайной величины, или вариационный ряд, на основании которого можно определить аналитическую форму неизвестной плотности вероятностей  $f(t)$  или функцию распределения  $F(t)$  и оценить входящие в эту функцию параметры.

Определив таким образом частоту попадания случайной величины  $t$  в каждый интервал, получают интервальный вариационный ряд, который изображается в виде таблицы, в которой указаны интервалы и соответствующие им частоты.

Для наглядного изображения вариационного ряда прибегают к его графическому изображению, чаще всего к гистограмме и статистической функции распределения.

Статистическая функция распределения строится следующим образом. Над каждым отрезком оси абсцисс, соответствующим расстоянию между концами интервалов, проводится горизонтальная прямая на уровне ординаты, равной величине частоты, а затем концы горизонтальных отрезков соединяются вертикальными линиями.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как можно разделить исходную информацию по достоверности?
2. Как меняется точность исходной информации в зависимости от заблаговременности принятия решений? Привести примеры.
3. Какие Вы знаете законы распределения случайных величин?
4. Экспоненциальный закон распределения.
5. Нормальный закон распределения.
6. Закон распределения Вейбула-Гнеденко.
7. Закон распределения Пуассона.
8. Как построить статистическую функцию распределения?
9. Какие Вы знаете способы моделирования законов распределения?
10. Критерий Пирсона (схема применения этого критерия согласия).
11. Критерий Колмогорова (схема применения этого критерия согласия).
12. Чем характеризуется точность определения показателей надежности?
13. Чем характеризуется достоверность определения показателей надежности?

### ***ТЕМА 6. Методы моделирования систем электроснабжения для исследования надежности***

#### ***6.1. Классификация методов***

Методы исследования надежности на базе известных статистических или прогнозируемых данных о надежности элементов ЭЭС.

Эти методы требуют составления математической модели функционирования всех элементов системы и определения с помощью этой модели показателей надежности электроснабжения потребителей.

Методы исследования надежности на основе информации о характеристиках работы ЭЭС (или объектов ЭЭС) в целом или иначе их можно назвать методами статистического анализа надежности систем. Эти методы позволяют выполнить ретроспективный анализ надежности за некоторый прошедший период времени работы ЭЭС. Для этого необходимо собрать статистические сведения о характеристиках работы системы и с помощью этих данных вычислить показатели надежности электроснабжения потребителей.

#### ***6.2. Аналитические методы исследования надежности***

Эти методы используют теоремы теории вероятностей (сложения, умножения вероятностей, формулы полной вероятности и др.). В зависимости от принятых методов представления функционально-структурных связей системы и принятых допущений разработан ряд аналитических методов расчета показателей надежности. Рассмотрим метод расчета надежности, основанный на использовании универсальных производящих функций вероятностей. Этот метод может быть использован для расчета надежности схем, которые имеют так называемую приводимую структуру, т. е. такую структуру, где все элементы соединены последовательно и параллельно в смысле надежности. При этом под **последовательным соединением** понимается такая функциональная связь элементов в системе, что отказ системы наступает при отказе хотя бы одного из элементов. **Параллельным соединением** называется такая функциональная связь элементов в системе, что ее полный отказ наступает только при отказе всех элементов. Предположим, что каждый  $i$ -й элемент системы может находиться в одном из двух состояний - в состоянии полной работоспособности с вероятностью  $p_i$  или в состоянии отказа с вероятностью  $q$ . Если количество элементов в системе равно  $n$ , то число состояний системы ( $L$ ) составляет  $2^n$ .

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Достоинство и недостатки методов моделирования надежности.
2. Достоинство и недостатки методов статистического анализа
3. Возрастает ли надежность при увеличении числа последовательно соединенных элементов?
4. Возрастает ли надежность при увеличении числа параллельно соединенных элементов?

## ***ТЕМА 7. Составление различных моделей исследования надежности***

### ***7.1. Основные причины, вызывающие погрешность оценки надежности систем электроснабжения***

Основными причинами, вызывающими погрешность определения надежности ЭЭС являются упрощения моделей, ошибки в задании исходных данных и использование приближенных математических методов.

Погрешность, обусловленная возможными упрощениями моделей и неточностью исходных данных, обычно значительно больше погрешности из-за неточности математических методов. Поэтому вопрос о точности математических методов далее не будет рассматриваться.

Разрабатываемые модели должны быть в достаточной степени тождественны объекту исследования и в то же время просты и удобны для практического использования. Точность математической модели должна соответствовать точности исходных данных. При наличии большой погрешности исходных данных значительная детализация моделей будет давать лишь кажущийся, а не действительный эффект.

Точные видимо модели могут давать большую погрешность, чем упрощенные, т.к. более точные модели потребуют большего набора исходных данных возможно с уже существенно низкой точностью.

Таким образом, хотелось бы иметь взаимное соответствие объекта исследования модели, а модели - исходным данным. Для сопоставления математических моделей с различным уровнем детализации учитываемых факторов и учетом неточности исходных данных, необходимо иметь возможность оценки погрешности решения, во-первых, из-за упрощения моделей, а во-вторых, из-за неточности исходной информации.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ**

1. Назовите основные причины, вызывающие погрешность определения надежности систем электроснабжения.
2. Как можно оценить погрешность решения задачи из-за упрощения моделей?
3. Как можно оценить погрешность решения задачи из-за неточности исходных данных?
4. Когда упрощенная модель может давать более точное решение, чем сложная модель, учитывающая большее количество факторов и большее количество исходных данных?
5. Каким образом можно сопоставить различные математические модели с учетом точности исходных данных?

### *Литература*

1. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики. – М.: КноРус, 2013. - 278 с. ил.

2. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии. – М.: КноРус, 2015. – 724 с. ил.
3. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013. – 672 с. ил.
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013. – 672 с. ил.
5. Шаров Ю.В. Электроэнергетика. – М.: Инфра-М, 2015. – 384 с. ил.
6. Кудинов А.А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование: Учебное пособие. – М.: Инфра-М, 2015. – 376 с. ил.
7. Грунтович Н.В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования. – М.: Инфра-М, 2013. – 271 с. ил.
8. Анчарова Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений: Учебник. – М.: Инфра-М, 2015. – 416 с. ил.
9. Сибикин Ю.Д. Технология энергоснабжения: Учебник – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Форум, 2015. – 352 с. ил.
10. Сибикин Ю.Д. Электрические подстанции. – М.: РадиоСофт, 2014. – 141 с. ил.
11. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии/ под ред. В.В. Денисова. – М.: Феникс, 2015. – 382 с. ил.
12. Шабад В.К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.: Академия, 2013. – 193 с. ил.
13. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – М.: КноРус, 2015. – 240 с. ил.
14. Важов В.Ф. Техника высоких напряжений: Учебник. – М.: Инфра-М, 2015. – 264 с. ил.
15. Ушаков В.Я. Электроэнергетические системы и сети. – М.: Юрайт, 2015. – 446 с. ил.
16. Климова Г.Н. Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение. 2-е изд. – М.: Юрайт, 2015. – 179 с. ил.
17. Бачаров Ю.Н. Техника высоких напряжений. – М.: Юрайт, 2015. – 264 с. ил.
18. Хрущев Ю.В. Электроэнергетические системы и сети. Электрические переходные процессы. – М.: Юрайт, 2015. – 153 с. ил.
19. Исмагилов Ф.Р. Основные вопросы проектирования воздушных линий электропередач: Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2015. – 211 с. ил.
20. Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Основы электроснабжения. – СПб.: Лань, 2013. – 432 с. ил.
21. Почаевец В.С. Электрические подстанции: Учебник. – М.: Маршрут, 2012. – 492 с. ил.