

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Государственный университет аэрокосмического приборостроения»**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**по дисциплине «Надежность электромеханических и электроэнергетиче-
ских систем и комплексов»**

Санкт-Петербург

2021

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Государственный университет аэрокосмического приборостроения»

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

по дисциплине «Надежность электромеханических и электроэнергетических
систем и комплексов»

Санкт-Петербург

2021

УДК 621.311

Составители: Соленая О.Я., Соленый С.В., Беляева А.В.

Рецензенты: доктор технических наук, профессор Сериков С.А., кандидат технических наук, доцент Голубков В.А.

Учебное пособие содержит материалы для подготовки студентов очной формы обучения в области основ теории надежности электроэнергетических систем и методов их практического применения, которые изучают курс надежности электромеханических и электроэнергетических систем и комплексов, и может быть полезна студентам очной и очно-заочной формы обучения соответствующих специальностей.

Подготовлена к публикации кафедрой электромеханики и робототехники по рекомендации методической комиссии института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ	8
1.1. Понятия теории надежности	8
1.2. Комплексное свойство надежности электроэнергетических систем.....	10
2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЭС	13
2.1. Единичные показатели надежности.	14
2.2. Комплексные показатели надежности	17
2.3. Показатели надежности электросетевых объектов	19
2.4. Оценка надежности электроэнергетических систем по законам распределения	20
3 ПОНЯТИЕ ОТКАЗА	28
3.1. Классификация отказов	29
3.2. Поток отказов элементов и их свойства	31
3.3. Метод анализа безопасности с помощью дерева отказов	32
4 ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ В РАСЧЕТАХ НАДЕЖНОСТИ ЭЭС	36
4.1. Основные понятия теории вероятностей	36
4.1.1. Основы теории множеств	36
4.1.2. Алгебра событий	37
4.1.3. Основные законы и правила теории вероятностей	39
4.1.4. Формула полной вероятности и формула Байеса (формула вероятностей гипотез) ...	41
4.2. Случайные величины и их характеристики.....	43
5 КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЭС	45
5.1. Причины отказов основных элементов электроэнергетических систем	45
5.1.1. Причины отказов энергетических блоков	45
5.1.2. Причины отказов синхронных генераторов	46
5.1.3. Причины отказов силовых трансформаторов	49
6 МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СХЕМ	56
7 МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ	62
7.1. Системы с последовательным соединением элементов.....	63
7.2 Системы с параллельным соединением элементов.....	65
7.3 Мостиковые схемы.....	66
8 ПОСЛЕДСТВИЯ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ПО МЕТОДУ ПРИВЕДЕННЫХ ЗАТРАТ	71
9 СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	79
10 РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (УСТРОЙСТВА)	85
10.1. Методика расчета надежности.....	85
10.2. Типовые примеры расчета надежности технической системы.....	86
10.3. Применение теории графов к анализу и расчету надежности технической системы	88

10.4. Рекомендации по повышению надежности технической системы (устройства)....	96
10.5. Расчетно-графическая работа по дисциплине «Основы надежности».....	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	112
Приложение 1	113
Приложение 2	116
Приложение 3	117
Приложение 4	118
Приложение 5	119

ВВЕДЕНИЕ

Существует проблема надежности электроэнергетических систем (ЭЭС). Она связана с задачами определения и оптимизации показателей надежности объектов на стадиях разработки элементов, планирования развития электроэнергетических систем, проектирования отдельных систем и объектов, а также в процессе эксплуатации. Даже при хорошем качестве оборудования и высоком уровне эксплуатации отказы оборудования в работе неизбежны в силу ряда объективных причин случайного характера и, прежде всего, из-за того, что в условиях эксплуатации оборудование может подвергаться нерасчетным воздействиям, учет которых при его разработке потребовал бы введения неоправданно больших запасов.

Основная задача электрической сети – обеспечение устойчивого снабжения электрической энергией потребителей, подсоединенных к сети. Из этого следует, что качество работы электрической сети оценивают надежностью электроснабжения потребителей.

Нормальный режим работы электроэнергетической системы позволяет обеспечивать потребителей электроэнергией заданного качества и нужного количества. Но даже при хорошем качестве электрооборудования и высоком уровне эксплуатации отказов в работе ЭЭС не избежать. Отказы в электрической сети могут возникать в частности из-за повреждения в оборудовании в конструкциях электросетевых объектов, аппаратуре и конструкциях электросетевых объектов или появления недопустимых режимных параметров в элементах сети, требующее принятия неотложных действий по их устранению. Также они происходят из-за того, что в условиях эксплуатации нагрузка превышает допустимые нормы, учет которых потребовал бы больших запасов при проектировании системы.

Проблема надежности управления энергосистем (как и других технических систем) за последние 2-3 десятилетия резко обострилась. Это вызвано следующими причинами:

1. Резким увеличением сложности энергосистем, включающих миллионы потребителей, тысячи узлов и элементов;

2. Экстремальностью условий эксплуатации многих элементов энергосистем (высокие скорости, ускорения, температуры и давления, вибрация, повышенная радиация и т.д.);

3. Повышение требований к качеству работы (эффективность, высокие параметры энергии);

4. Увеличение ответственности функций, выполняемых энергосистемой, высокой экономической и технической ценой отказа);

5. Полной или частичной автоматизацией, широким использованием ПЭВМ для управления, и, как следствие, исключением или уменьшением непосредственного контроля человеком работы энергосистемы и ее элементов.

В большинстве случаев причинами отказов в ЭЭС являются повреждения электроэнергетического оборудования или отклонение режимных параметров в элементах сети до недопустимых пределов, которые требуют принятия срочных мер по их ликвидации.

1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Понятия теории надежности

Электроэнергетика является основой для повышения экономического потенциала государства. Важный показатель любой ЭЭС – бесперебойность подачи электроэнергии, соответственно ее надежность. Надежность электроснабжения потребителей напрямую зависит от надежной работы электрических станций и систем.

Сложность электроэнергетической системы определяется числом ее элементов (генераторы, трансформаторы, линии электропередачи (ЛЭП), коммутационные аппараты и др.) и наличием связей между ними, которые функционально связаны единством процесса производства, распределения и потребления электрической энергии.

Объединение электроэнергетических систем и создание такого органически взаимосвязанного комплекса ЭЭС, как Объединенная энергосистема Центральной Азии (ОЭС ЦА), способствуют повышению надежности электроснабжения за счет возможности взаимопомощи энергосистем друг другу в аварийных ситуациях и других непредвиденных отклонениях от планируемого баланса мощности и энергии.

В отрасли электроэнергетики важной задачей является оценка степеней надежности ЭЭС и ее выбор. Этим обусловлена заинтересованность к проблеме надежности в последние годы в нашей стране и за рубежом.

Надежность интерпретируется как свойство объекта или системы, способное осуществлять в должном объеме и на протяжении конкретного периода времени указанные функции, соблюдая нормативные эксплуатационные показатели.

В свою очередь под **объектом** понимают элемент определенного назначения, который рассматривается на протяжении всего жизненного цикла. В качестве объекта могут выступать приборы, технические изделия и их составные элементы.

Обеспечение потребителей электроэнергией, соответствующей нормативам ГОСТ, является первостепенной задачей электроэнергетической системы. Таким образом, свойство надежности ЭЭС – снабжение потребителей электроэнергией в условиях не соответствующих стандартам ГОСТ и ПУЭ.

Надежность систем электроснабжения зависит от надежности составляющих ее элементов, будь то трансформаторы, ЛЭП и др.

Надежность функционирования электроэнергетической системы определяется, схемами электрических станций, техническими характеристиками основного электрооборудования, пропускной способностью электрических сетей, внешними воздействиями на ЭЭС и др.

Обеспечение надежности электроснабжения нередко связано с дополнительными финансовыми затратами, т.к. для определения надежности электроснабжения необходимо определить уровень эксплуатации электрооборудования, схему электроснабжения, число независимых источников питания и надежность элементов ЭЭС.

Оценку надежности необходимо проводить на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации. На этапе проектирования обеспечение надежности играет наибольшую роль, поскольку в этот период закладывается основа для качественного изготовления оборудования и минимизируется влияние эксплуатации на ее функциональную надежность. Однако, в период эксплуатации электрооборудование может подвергаться нерасчетным воздействиям, учет которых на стадии проектирования потребовал бы введения неоправданно больших запасов.

Основные задачи анализа надежности ЭС и ЭЭС:

- 1) оценка показателей надежности на стадии проектирования;
- 2) обеспечение и поддержание необходимого уровня надежности системы и ее элементов;
- 3) повышение надежности системы, путем технических решений.

Важность решения задачи повышения надежности систем электроснабжения возрастает в связи с усложнением структуры электрических сетей, появлением в них новых элементов. В настоящее время используются различные методы

оценки надежности ЭЭС и ее компонентов, но задача разработки новых методов и решений остается актуальной по сей день.

1.2. Комплексное свойство надежности электроэнергетических систем

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенное сочетание этих свойств.

1. *Безотказность* – свойство объекта непрерывно находиться в рабочем состоянии на протяжении конкретного периода времени (наработки).

2. *Долговечность* – свойство объекта находиться в рабочем состоянии до состояния предела с необходимыми перерывами на ремонт. Предельное состояние – состояние объекта или изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация затруднена или недопустима.

3. *Ремонтпригодность* – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей, к поддержанию и восстановлению работоспособности путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

4. *Сохраняемость* – свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и (или) транспортировки.

5. *Устойчивость* – способность системы удерживать установившийся режим работы или восстанавливать его при воздействии внешних факторов (воздействий).

6. *Режимная управляемость* – свойство системы поддерживать нормальный режим работы элементов и изменять его по заданному алгоритму.

7. *Живучесть* – способность системы сопротивляться различным разрушающим воздействиям, не допуская массового отключения потребителей.

8. *Безопасность* – свойство системы, позволяющее обеспечивать безаварийную работу ЭЭС.

Наличие вышеперечисленных свойств составляют желаемую ЭЭС, однако поддержание этих свойств не всегда возможно. В данном учебном пособии основное внимание уделено расчету показателей надежности систем электроснабжения, характеризующих свойство безотказности и ремонтпригодности.

Исправное состояние – состояние объекта (или системы), при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неисправное состояние – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособное состояние – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неработоспособное состояние – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособный объект может быть неисправным, например, если он не удовлетворяет эстетическим требованиям, причем ухудшение внешнего вида объекта не препятствует его применению по назначению.

Для сложных объектов возможны *частично неработоспособные* состояния, при которых объект способен выполнять требуемые функции с пониженными показателями или способен выполнять лишь часть требуемых функций.

Дефект – каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям.

Повреждение – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Различают внезапный и постепенный отказы.

Внезапный отказ характеризуется скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта.

Постепенный отказ возникает в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта.

Отказы, определяемые этапами создания или существования объекта, подразделяются на *конструктивные, производственные* и *эксплуатационные*.

Конструктивный отказ возникает из-за несовершенства или нарушения установленных правил и норм проектирования и конструирования.

Производственный отказ вызывается несовершенством или нарушением технологии производства, изготовления или ремонта.

Эксплуатационный отказ возникает из-за нарушения установленных правил и условий эксплуатации.

Критичность отказа – совокупность признаков, характеризующих последствия отказа.

Различают *критичные* и *некритичные* отказы. Последние подразделяются на существенные и несущественные.

Критичный отказ – отказ системы или ее элемента, тяжесть последствий которого в пределах данного анализа признана недопустимой и требует принятия специальных мер по снижению вероятности данного отказа и/или возможного ущерба, связанного с его возникновением.

Независимый отказ – отказ, не обусловленный другими отказами. Например, отказ механизма системы фокусировки вследствие его заклинивания.

Зависимый отказ – отказ, обусловленный другими отказами. Например, отказ двигателя механизма системы фокусировки вследствие нарушения работы системы электропитания.

Наработка – продолжительность или объем работы объекта. Нарботка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километрах пробега и т.п.), так и целочисленной (число рабочих циклов, запусков и т.п.).

Ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Назначенный ресурс – суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

Назначенный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния. При достижении объектом назначенного ресурса (назначенного срока службы) в зависимости от его состояния может быть принято решение о продолжении эксплуатации или о ее прекращении.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте характеристику электроэнергетическим системам.
2. Дайте определение надежности объекта.
3. Дайте определение надежности ЭЭС.
4. Основные задачи анализа надежности ЭЭС?
5. Дайте определение комплексным свойствам надежности ЭЭС.
6. Перечислите комплексные свойства надежности ЭЭС.
7. Как связаны понятия «долговечность» и «предельное состояние»?

2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЭС

Показатель надежности – количественная характеристика одного или нескольких свойств, определяющих надежность объекта. Они делятся на единичные и комплексные. Единичные характеризуют одно свойство объекта и

применяются для характеристики отдельных элементов системы, комплексные дают представление о нескольких свойствах и характеризуют систему в целом.

2.1. Единичные показатели надежности.

Существуют показатели безотказности и восстанавливаемости.

Вероятность того, что на заданном интервале времени и при заданных условиях работы отказ не произойдет называется **вероятностью безотказной работы** $P(t)$. Данный показатель является невозрастающей функцией времени (от 1 до 0).

$$P(t) = P(T_0^3 t),$$

где t – время безотказной работы.

Вероятность того, что в пределах заданной наработки возникнет хотя бы один отказ называется **вероятностью отказа** $Q(t)$. Данный показатель надежности характеризует противоположное событие.

$$Q(t) = P(T < t),$$

Для $Q(t)$ характерна интегральная функция распределения случайной величины:

$$-Q(t) = 0 \text{ при } t = 0; Q(t) = 1 \text{ при } t = \infty; Q(t_i) \geq Q(t_j) \text{ при } t_i > t_j.$$

Из вышесказанного можно сделать вывод, что $P(t) + Q(t) = 1$.

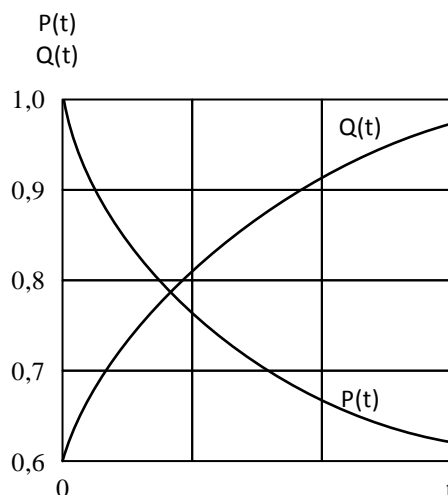


Рисунок 1.1 Графики вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказа $Q(t)$

Отношение числа отказавших элементов к исходному числу испытуемых элементов за единицу времени называется **частотой отказов** $a(t)$. В большинстве случаев используют метод статической оценки.

$$a(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(\Delta t)},$$

где $n(\Delta t)$ – число отказавших элементов на интервале времени Δt .

Производная от функции распределения случайной величины - **плотность распределения**, обозначается как $f(t)$.

$$f(t) = \frac{Q(t)}{dt} = Q'(t) - P'(t).$$

Статические оценки для вероятности безотказной работы $P(t)$ от 0 до t и для функции распределения наработки до отказа $F(t)$ определяются формулами:

$$P'(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}; \quad F'(t) = \frac{n(t)}{N},$$

где N – число элементов в начале испытаний;

$n(t)$ – число отказавших элементов за время t .

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – это условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что отказ не возник до рассматриваемого времени.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{P'(t)}{P(t)} = -\frac{d}{dt}[\ln P(t)],$$

где $\ln P(t) = -\int_0^t \lambda(t) dt$; ;

$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$ – экспоненциальный закон надежности.

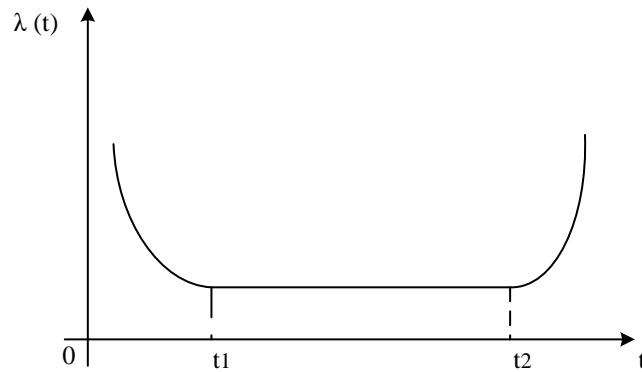


Рисунок 1.2 График интенсивности отказов технического объекта.

Участок от $0-t_1$: интенсивность отказов уменьшается (в техническом объекте обнаруживаются и устраняются дефекты).

Участок t_1-t_2 : период "стабильной" работы ($\lambda = const$).

Участок $t_1 > t_2$: интенсивность отказов возрастает (период «старения» технического объекта).

Средняя наработка на отказ (T) – отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение заданной наработки. Средняя наработка на отказ:

$$T = \frac{t}{M[r(t)]},$$

где t – суммарная наработка;

$r(t)$ – число отказов, произошедших в период наработки;

$M[r(t)]$ – мат. ожидание данного числа.

Средняя наработка до отказа (T_1) – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа.

Статистическая оценка T_1 :

$$T_1' = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tau_j,$$

Частота отказов (ω , 1/год), частота плановых ремонтов (μ , 1/год), среднее время восстановления (T_B , год), средняя продолжительность планового ремонта (T_p , год) являются **единичными показателями** надежности ЭЭС.

Частота отказов элементов обусловлена количеством повреждений оборудования в единицу времени.

$$\omega = n_0 / (n \Delta t),$$

где n_0 – число отказавших элементов;

n – общее число комплектов оборудования;

Δt – расчетный период времени.

Частота отказов равна обратной величине времени наработки на отказ (T_B). T_B является средним временем восстановления элемента.

Вероятность восстановления ($Q_B(t) = P(T_B \leq t), t \geq 0$) и не восстановления элемента ($P_B(t) = P(T_B \geq t)$) являются основными показателями восстанавливаемости. Так же функции $Q_B(t)$ и $Q(t)$ – интегральные функции распределения случайной величины, подчиняется закону:

$$a_B(t) = Q'_B(t) = -P'_B(t).$$

2.2. Комплексные показатели надежности

Данные показатели оценивают одновременно несколько свойств надежности технической системы. К комплексным показателям относятся:

1) **Коэффициент готовности** (K_G) – вероятность того, что объект будет в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме периодов, в которых не предусматривается эксплуатация.

$$K_G = T_{O,CP} / (T_{O,CP} + T_{B,CP}),$$

где $T_{O,CP}$ – среднее время до отказа;

$T_{B,CP}$ – среднее время ремонта.

2) **Коэффициент вынужденного простоя** объекта или аварийного состояния (K_{II}):

$$K_{II} = 1 - K_G = T_{B,CP} / (T_{O,CP} + T_{B,CP}).$$

3) **Коэффициент технического использования** ($K_{Т.И.}$) – отношение математического ожидания времени пребывания объекта в работоспособном состоянии ко всему времени эксплуатации (время технического обслуживания, ремонтов) за весь период T_k , при условии, что $T_k \geq T_{\Sigma}$:

$$k_{Т.И.} = \frac{T_P}{T_{\Sigma}},$$

где T_P – время работоспособного состояния объектов;

T_{Σ} – суммарное время эксплуатации.

4) **Вероятность состояния отказа** (P) – произведение частоты отказов на время восстановления элемента системы:

$$P = \omega T_B.$$

Вероятность планового ремонта:

$$P^P = \mu T_P.$$

Вероятность безотказной работы:

$$R = 1 - P.$$

5) **Средний недоотпуск электроэнергии** ($\Delta \bar{\mathcal{E}}_{CP}$) – математическое ожидание количества электроэнергии, недоотпущенной потребителям за заданный период времени:

$$\Delta \bar{\mathcal{E}} = \int_0^{\infty} t_D f(t_D) dt_D \int_0^{\infty} P_D f(P_D) dP_D = \bar{P}_D \bar{t}_D.$$

где P_D , t_D – случайные величины дефицита мощности и продолжительности существования состояний, при которых появляется дефицит мощности у потребителей;

$f(t_D, P_D)$ – плотность вероятности данной системы случайных величин.

Средний недоотпуск электроэнергии является одним из важных показателей надежности. Для оценки системы в целом расчет среднего недоотпуска электроэнергии является одним из конечных целей при расчете надежности энергетической системы. очень важный показатель надежности, его оценка для узлов

нагрузки и системы в целом является одной из конечных целей расчетов надежности.

6) *Средний ущерб на один отказ* – математическое ожидание ущерба.

7) *Удельный ущерб* относится к единице недоотпуска электрической энергии, ограничиваемой мощностью, единице времени.

Средний ущерб на один отказ и удельный ущерб применяются в расчетах при экономической оценке надежности системы.

2.3. Показатели надежности электросетевых объектов

Электросетевые объекты относятся к среднему иерархическому уровню электрической сети. К электросетевым объектам относят ЛЭП, узлы электрических подстанций, внешнее электроснабжение выделенного узла нагрузки, комплекс релейной защиты и автоматики и др.

Необходимый уровень надежности можно обеспечить:

- применением абсолютно надежных элементов в структуре объекта;
- применением принципов резервирования и избыточности;
- использованием перегрузочных способностей элементов

В частности избыточность в ЛЭП проявляется в возможности передачи по линии необходимой мощности рассматривается не только применительно к нормальной схеме работы электрической сети, но и для случаев изменения режима работы линии в аварийных ситуациях и при проведении ремонта в сети. По этой причине линии выполняются в двухцепном и более исполнении для того, чтобы при отключении одной цепи не вносить существенных ограничений на выполнение линией своих функций по передаче электроэнергии.

Оценка надежности электроснабжения потребителей различается по продолжительности перерывов в электроснабжении: кратковременный перерыв, перерыв средней продолжительности, длительный перерыв.

При изучении безотказной работы объекта используют параметр потока отказов – интенсивность отказов

$$\omega = \frac{\lambda \cdot 100}{L},$$

где L – длина ЛЭП в км.

В таблице 1 приведены рекомендации Международной электротехнической комиссии для классов надежности воздушных линий электропередач (ВЛЭП).

Таблица 1. Уровни и показатели надежности линий электропередачи

Уровни надёжности	1	2	3
Период повторяемости расчетных нагрузок (среднее время между отказами) [число лет]	50	150	500
Интенсивность потока отказов [отк/год]	0.02	0.0067	0.002
Вероятность безотказной работы в течение года [о.е.]	0.98	0.993	0.998
Вероятность безотказной работы в течение срока службы линии, равному 50 лет, [о.е.]	0.368	0.716	0.905

Согласно указанным рекомендациям в любом случае линии должны иметь как минимум 1-ый уровень надёжности.

Уровень надёжности 2-ой применяется обычно для линий напряжением свыше 230 кВ и для линий более низкого напряжения, но являющихся основным или единственным источником питания для ответственной нагрузки.

Уровень надёжности 3-ий применяется обычно для линий с напряжением свыше 230 кВ, которые являются основным или единственным источником питания для ответственной нагрузки.

Таким образом, для оценки надёжности объектов достаточно контролировать (нормировать) два показателя: интенсивность (параметр) потока отказов – λ и среднее время восстановления после отказа – $T_{\text{в}}$. Остальные показатели могут быть получены расчётным путём.

2.4. Оценка надежности электроэнергетических систем по законам распределения

Законом распределения случайной величины называется всякое соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями.

При исследовании надежности систем электроснабжения, как правило, используются теоретические законы нормального и экспоненциального распределения, закон Пуассона и распределение Вейбулла.

Таблица 1.1 - Основные соотношения математического ожидания и среднеквадратического отклонения при различных законах распределения

Распределение	m	σ
Экспоненциальное $Exp(\lambda)$	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda}$
Равномерное $U(a,b), a \geq 0$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{b-a}{2\sqrt{3}}$
Гамма $\Gamma(\alpha, \beta)$	$\alpha\beta$	$\sqrt{\alpha\beta}$
Усеченное нормальное $TN(m_0, \sigma_0)$	$m_0 + k\sigma_0$	$\sigma_0 \sqrt{1 + k \frac{m_0}{\sigma_0} - k^2}, k = \frac{c}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{m_0^2}{2\sigma_0^2}},$ $c = \frac{1}{0,5 + \Phi_0(\frac{m_0}{\sigma_0})}$
Релея $R(\lambda)$	$\sqrt{\frac{\pi}{4\lambda}}$	$\sqrt{\frac{4-\pi}{4\lambda}}$
Вейбулла $W(\alpha, \beta)$	$\beta\Gamma(1 + \frac{1}{\alpha})$	$\beta\sqrt{\Gamma(1 + \frac{2}{\alpha}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{\alpha})}$
Нормальное $N(m, \sigma), m > 3\sigma$	m	σ

Таблица 2.2 - Основные соотношения для количественных характеристик надежности при различных законах распределения времени работы до отказа

Наименование закона распределения	Частота отказов (плотность распределения)	Вероятность безотказной работы	Интенсивность отказов	Средняя наработка до первого отказа
Экспоненциальный	$\lambda e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	$\lambda = const$	$1 / \lambda$
Релея	$\frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{t}{\sigma^2}$	$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma$

Наименование закона распределения	Частота отказов (плотность распределения)	Вероятность безотказной работы	Интенсивность отказов	Средняя наработка до первого отказа
Гамма	$\lambda_0 \frac{(\lambda_0 t)^{\kappa-1}}{(\kappa-1)!} e^{-\lambda_0 t}$	$e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{\kappa-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$	$e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{\kappa-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$	$\frac{\kappa}{\lambda_0}$
Вейбулла λ_0 – интенсивность отказов; κ – параметр формы	$\lambda_0 \kappa t^{\kappa-1} e^{-\lambda_0 t^\kappa}$	$e^{-\lambda_0 t^\kappa}$	$\lambda_0 \kappa t^{\kappa-1} e^{-\lambda_0 t^\kappa}$	$\frac{T(\frac{1}{\kappa} + 1)}{\frac{1}{\lambda_0^\kappa}}$
Нормальный	$\frac{1}{F(\frac{T_1}{\sigma})\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{F(\frac{T_1-t}{\sigma})}{F(\frac{T_1}{\sigma})}$	$\frac{e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma F(\frac{T_1-t}{\sigma})}$	$T_1 + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}\sigma F(\frac{T_1}{\sigma})} e^{-\frac{T_1^2}{2\sigma^2}}$

Нормальный закон распределения.

Надежность системы зависит от качества его составляющих элементов. Следовательно, нормальным законом распределения можно считать суммирование законов распределения большого количества незначительных событий. Данный закон используется при малом количестве внезапных отказов.

При расчете вероятности $P(t_1 \leq t \leq t_2)$ случайной величины t на интервале $t_1 \div t_2$ с использованием функции Лапласа необходимо найти

$$P(t_1 \leq t \leq t_2) = \Phi(x_2) - \Phi(x_1) = \Phi\left(\frac{t_2 - \bar{t}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{t_1 - \bar{t}}{\sigma}\right).$$

Обратная задача: вычислить наработку, при заданной вероятности безотказной работы. В данном случае используют квантили нормального распределения

$$t = \bar{t} + x \cdot \sigma,$$

где x – квантиль нормированного нормального распределения, приведенная в таблицах.

Пример №1. Нарботка объекта до отказа имеет нормальное распределение. Математическое ожидание $\mu = 1000$ часов, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 200$ часов. Определите вероятность безотказной работы $P(T)$ объекта в течение 400 часов.

Решение:

$P(T)$ можно вычислить с помощью функции распределения

$$P(400) = 1 - F(400) = 1 - \frac{1}{200 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{400} e^{-\frac{(x-1000)^2}{2 \cdot 200^2}} dx.$$

Используем табулированное нормированное нормальное распределение $\Phi(x)$. Определим квантиль распределения

$$x = \frac{x - \mu}{\sigma} = \frac{400 - 1000}{200} = -3.$$

Для отрицательного значения квантили $P(T)$ равна

$$P(T) = 1 - \Phi(-x) = \Phi(x).$$

Вычисляем значение $P(T)$, используя табулированную функцию $\Phi(x)$:

$$P(400) = \Phi(3) = 0,99865.$$

Ответ: вероятность безотказной работы объекта в течение 400 часов составляет 99,865 %.

Пример 2. Определить $P(T)$ подшипника качения в течение 1500 часов, если его ресурс по износу подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием 3500 часов и среднеквадратическим отклонением 1000 часов.

Решение:

Вычисляем квантиль нормированного нормального распределения

$$x = \frac{x - \mu}{\sigma} = \frac{1500 - 3500}{1000} = -2.$$

$P(T)$ равно:

$$P(1500) = 1 - \Phi(-2) = \Phi(2) = 0,9772.$$

Ответ: $P(T)$ подшипника в течение 1500 час составляет 97,72 %.

Экспоненциальный закон распределения.

Экспоненциальное распределение – абсолютно непрерывное распределение, моделирующее время между двумя последовательными свершениями одного и того же события.

Экспоненциальный закон распределения применяется для анализа сложных систем, работающих в тяжелых условиях, где преобладают внезапные отказы. Главной его особенностью является независимость потока отказов от времени эксплуатации.

Основные характеристики надежности при экспоненциальном законе распределения приведены на рис. 1.3.

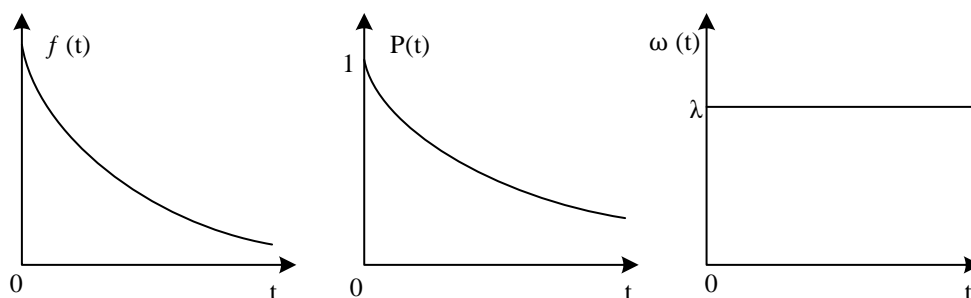


Рисунок 1.3.

Пример 1. Нарботка на отказ сложной технической системы подчиняется экспоненциальному закону распределения с параметром $\lambda = 15 \cdot 10^{-5} \text{ час}^{-1}$.

Определить вероятность безотказной работы системы в течение 100 часов и найти среднее значение наработки на отказ.

Решение:

Определим вероятность безотказной работы при наработке T через функцию распределения экспоненциального закона

$$P(T) = 1 - F(x) = 1 - e^{-\lambda \cdot x}.$$

После подстановки конкретных значений получим

$$P(100) = 1 - e^{-15 \cdot 10^{-5} \cdot 100} = 0,985.$$

Следовательно, вероятность наработки 100 часов составляет 98,5 %. Среднее значение наработки может быть определено через параметр распределения λ

$$T_o = \mu = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{15 \cdot 10^{-5}} = 6677 \text{ час.}$$

Пример 2. Интенсивность отказов электрического элемента равна $\lambda = 10^{-6}$ 1/час. Отказы подчиняются экспоненциальному закону распределения случайной величины. Найти вероятность безотказной работы элемента в течение 10000 часов.

Решение:

Используем формулу для вероятности безотказной работы при экспоненциальном распределении

$$P(10000) = P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-10^{-6} \cdot 10000} = 0,99,$$

следовательно, вероятность безотказной работы элемента $P(10000) = 99 \%$.

Распределение Вейбулла.

Распределение Вейбулла применяется для аппроксимации статистических данных о времени восстановления. Это распределение может быть использовано также в качестве характеристики надежности систем в течение времени их приработки.

Пример 1. Определить вероятность безотказной работы генератора в течение 1000 час., если его наработка на отказ описывается распределением Вейбулла с параметрами $\alpha = 2$ и $\lambda = 6,667 \cdot 10^{-7}$.

Решение:

Вероятность безотказной работы равна

$$P(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t^\alpha} = e^{-6,667 \cdot 10^{-7} \cdot 1000^2} = 0,513.$$

Следовательно, вероятность безотказной работы генератора в течение 1000 час. составляет 51,3 %.

Пример 2. Случайная наработка изделия до отказа распределена по закону Вейбулла с параметрами $\alpha = 2$, $\lambda = 10^{-6}$. Найти вероятность безотказной работы изделия при заданной наработке $T_\gamma = 300$ час.

Решение:

Используем формулу для расчета вероятности безотказной работы при распределении Вейбулла

$$P(300) = e^{-\lambda \cdot T_\gamma^\alpha} = e^{-10^{-6} \cdot 300^2} = e^{-10^{-6} \cdot 9 \cdot 10^4} = 0,9139.$$

Следовательно, вероятность безотказной работы в течение 300 час составляет 91,39 %.

Гамма распределение.

Пример. Определить вероятность безотказной работы изделия в течение 1000 часов, если наработка до отказа этого изделия подчиняется гамма-распределению с параметрами $\alpha = 4$ и $\lambda = 10^{-3}$.

Решение:

Используем выражение для вероятности безотказной работы

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t t^{\alpha-1} e^{-\lambda t} dt.$$

Для вычисления выражения можно использовать таблицы гамма-распределения или компьютерные программы. Ниже показан Mathcad-документ для вычисления вероятности:

$$\alpha := 4, \lambda := 10^{-3}, t := 1000$$

$$z := \int_0^t t^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda t} dt, \quad y := 1 - \frac{z \cdot \lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)}, \quad y = 0,981$$

В результате вычисления получим $P(1000) = 0,981 = 98,1$ %.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение показателю надежности.
2. В чем различие между единичным и комплексным показателем надежности?
3. В чем отличие между интенсивностью отказов и частотой отказов?

4. Перечислите законы распределения надежности.
5. Дайте определение нормальному закон распределения надежности.
6. Дайте определение экспоненциальному закону распределения надежности.
7. Дайте определение закону гамма распределения надежности.
8. Дайте определение закону Вейбулла распределения надежности.
9. Перечислите показатели надежности, характеризующие свойство безотказности ЭЭ оборудования.
10. Перечислите показатели надежности, характеризующие свойство ремонтнопригодности ЭЭ оборудования.
11. Какие показатели надежности относятся к комплексным?

3 ПОНЯТИЕ ОТКАЗА

Электроэнергетические объекты характеризуются различными состояниями: рабочим, работоспособным, резервным, отказа, аварийного ремонта, проста, предупредительного ремонта.

Постоянными условиями для функционирования электроэнергетического оборудования являются:

- 1) поддержание нормального состояния контактов, обмоток и токоведущих частей (без перегрева и коррозии);
- 2) сохранение изоляции на допустимом уровне;
- 3) поддержание допустимого напряжения;
- 4) поддержание заданных параметров режима работы оборудования и т.д.

Отказ (повреждение) – это нарушение работоспособности объекта, т.е. система или элемент перестает выполнять целиком или частично свои функции. Приведенное определение отказа является качественным. Обычно возникает вопрос, что является критерием отказа?

Отказом называется событие, заключающееся в переходе объекта с одного уровня работоспособности или функционирования на другой, более низкий, или в полностью неработоспособное состояние. Понятие отказа в теории надежности является одним из основных.

Нарушением работоспособного состояния называется выход хотя бы одного заданного параметра за установленный допуск. Так, например, поставляемая системой электроснабжения потребителю энергия характеризуется рядом параметров, в том числе напряжением U и частотой f . По условию работы потребителей допускается определенное отклонение параметров от их номинальных значений $(U_{ном}, f_{ном})$. Данное отклонение параметров $(\Delta U_{дон}, \Delta f_{дон})$ и приводит к отказу системы. (рис. 3.1).

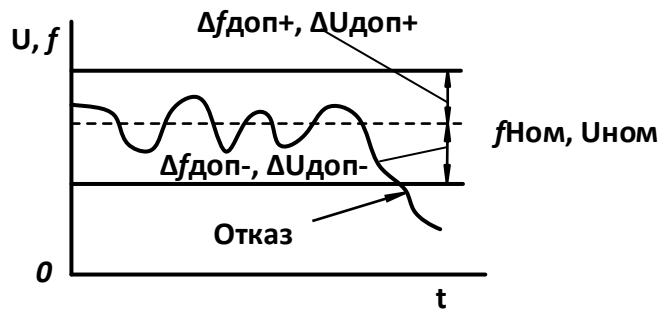


Рисунок 3.1

Элементы системы по характеру функционирования могут быть **восстанавливаемые** – при возникновении отказа рабочее состояние объекта может быть восстановлена путем технического обслуживания, ремонтов, **невосстанавливаемые** – при возникновении отказа объект не подлежит восстановлению (данные объекты работоспособны только до 1-го отказа).

3.1. Классификация отказов

Электроэнергетические объекты в целом следует считать восстанавливаемыми.

Отказы классифицируются по ряду признаков:

- 1) по степени нарушения работоспособности: полные и частичные;
- 2) по характеру процессов проявления: внезапные и постепенные;
- 3) по связи с другими отказами: зависимые и независимые;
- 4) по времени существования: устойчивые и неустойчивые (сбои).

Частичный отказ переводит объект в состояние частичной работоспособности; **полный** отказ приводит объект к неработоспособному состоянию (для восстановления функционирования объекта требуется ремонт).

Если отказ какого-либо элемента в системе не является причиной отказа других элементов, то такой отказ является **независимым**. Если при отказе элемента изменилась вероятность появления отказов других элементов, то такие отказы являются **зависимыми**.

Внезапные отказы проявляются в результате резкого изменения основных параметров системы или элемента. При **постепенных** отказах наблюдается плавное изменение параметров в результате старения или износа элементов.

Устойчивый отказ нарушения работоспособности объекта может быть ликвидирован только посредством ремонта (для восстанавливаемого объекта).

Сбой – самоустраняющийся отказ, приводящий к кратковременной потере работоспособности (не требуется ремонта аппаратуры).

Перебегающий отказ – многократно возникающий сбой одного и того же характера. В данном случае отказ многократно возникает и сам устраняется.

У объектов, функционирующих не постоянно во времени, отказы могут быть следующих видов:

- отказ срабатывания, заключающийся в невыполнении объектом требуемого срабатывания;
- ложное срабатывание, заключающееся в срабатывании при отсутствии требования;
- излишнее срабатывание, заключающееся в срабатывании при требовании срабатывания других элементов.

Примерами таких объектов могут быть различные системы релейной защиты, противоаварийной автоматики, в определенной мере выключатели и т. п.

Причинами отказов оборудования являются повреждения и неисправности.

Повреждения в энергетике – это разрушение оборудования, поломка деталей, нарушение целостности электрических и магнитных цепей, порча изоляции.

Неисправность – это разрегулировка механизмов без разрушения и порчи объекта, ошибки при сборке и обслуживании, недосмотр персонала.

Отказы характеризуются случайностью момента их возникновения, поэтому их можно трактовать как случайные события. Следовательно, основным математическим аппаратом для изучения отказов является теория вероятностей и ее положения.

3.2. Поток отказов элементов и их свойства

Функционирование восстанавливаемого объекта за длительный период времени может быть представлено графически *потоком отказов и восстановлений* или бесконечно коротких импульсов – при нулевом времени восстановления (рис. 3.2,а), либо прямоугольных импульсов – при конечном времени восстановления (рис. 3.2,б). Поток событий – последовательность событий, происходящих одно за другим в какие-то моменты времени (имеется в виду поток однородных событий, различающихся только моментом их появления).

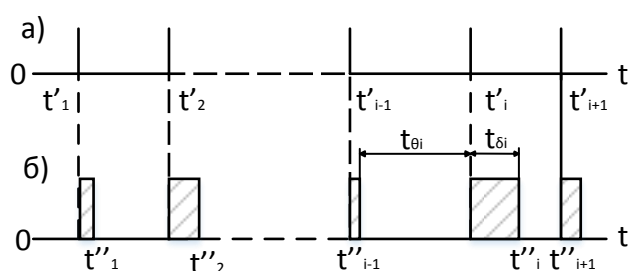


Рисунок 3.2

Строго говоря, реальные потоки отказов элементов электрических систем нестационарны, так как интенсивность отказов λ зависит от времени эксплуатации t . График зависимости λ от t называется характеристикой жизни объекта (рис. 2.3).

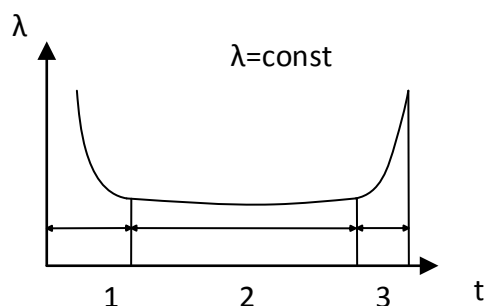


Рисунок 3.3

Здесь:

1 - период приработки – период выявления скрытых дефектов монтажа и изготовления (повышенная аварийность, «выжигание» дефектов (1 – 3 года));

2 - период нормальной работы; характеризуется примерно постоянной интенсивностью отказов. Отказы в основном носят внезапный характер и обусловлены случайными причинами;

3 - период износа и старения характеризуется повышением интенсивности отказов вследствие необратимых физико-химических процессов в изоляции, разрегулировкой механических частей, коррозией металлических частей элементов и др.

Кроме того, воздушные ЛЭП и связанные с ними коммутационные аппараты имеют также сезонную неравномерность отказов (грозы, сильные ветра, гололед).

При оценке надежности систем электроснабжения и электрических систем обычно выделяют интервалы стационарности и моделируют поток отказов простейшим стационарным потоком. При этом значительно упрощается математическое описание и процесс вычислений.

Простейший стационарный поток обладает следующими основными свойствами: стационарностью, ординарностью и отсутствием последствия.

Свойство стационарности выражается в постоянстве интенсивности отказов (не зависит от времени); для стационарного потока событий вероятностный режим не изменяется во времени, т.е. среднее число событий в единицу времени постоянно.

Ординарность заключается в очень малой вероятности совпадения отказов, которой можно пренебречь. Поток событий является ординарным, если вероятность совмещения двух и более отказов элемента в один и тот же момент времени настолько мала, что является событием невозможным.

Отсутствие последствия означает, что события возникают независимо друг от друга, и заключается в том, что число отказов в один период времени не зависит от числа отказов в предыдущие периоды.

Ординарные потоки без последствия называются *пуассоновскими*. Стационарный пуассоновский поток является *простейшим*.

3.3. Метод анализа безопасности с помощью дерева отказов

Основной целью анализа безопасности является уменьшение вероятности аварий и связанных с ними человеческих жертв, экономических потерь и нарушений в окружающей среде.

При решении данных задач может быть применена теория графов. При этом следует придерживаться терминологии, принятой в теории, не касаясь подробностей самой теории графов.

Причинные взаимосвязи устанавливаются с помощью дерева отказов, которое затем подвергается количественному и качественному анализу. Данный метод является логическим методом локализации наиболее опасных участков системы.

Ценность данного метода заключается в следующем:



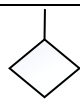


- 1) анализ ориентируется на отыскание отказов;
- 2) выявляются такие аспекты системы, которые имеют важное значение для рассматриваемых отказов;
- 3) обеспечивается графический, наглядный материал для той части руководства, которая детально не информируется о проводимых изменениях конструкции;
- 4) обеспечивается возможность проведения качественного или количественного анализа надежности системы;
- 5) метод позволяет специалисту поочередно сосредотачиваться на отдельных конкретных отказах системы;
- 6) обеспечивается глубокое проникновение в процесс работы системы;
- 7) отыскивается оптимальное решение возможности снижения вероятности аварии (несчастного случая).





Дерево отказов и диаграммы причин-последствий являются сложными логическими структурами, их построение и количественный анализ требуют знаний булевой алгебры, теории множеств и других разделов математики. Дерево отказов – это ориентированное дерево и лежит оно в основе словесно-графического способа.

Основная структура дерева отказов может быть представлена в виде:

- 1) отказ системы, или происшествие (конечное событие);
- 2) дерево отказов состоит из последовательностей событий, которые ведут к отказам системы или происшествию;
- 3) последовательности событий строятся с помощью логических знаков «И», «ИЛИ» и др.;
- 4) событие над логическим знаком и все события, которые имеют элементарные причины отказов, помещаются в прямоугольнике, а само событие описано в этом прямоугольнике;
- 5) последовательности в конечном итоге ведут к исходным причинам, для которых имеются данные по частоте отказов. Эти исходные причины обозначают кругом. Они представляют разрешающую способность данного дерева отказов.

Таблица 3.1 – Символы для построения дерева отказов

Символ	Описание	
	Событие, вводимое логическим элементом	Возникает в результате взаимодействия событий, происходящих через логическую ячейку
	Первичное, базовое исходное событие	Обеспечено достаточными данными (имеются сведения по интенсивности отказов), не требует дальнейшего исследования
	Событие, недостаточно детально разработанное (не разлагаемое первичное событие)	Причины события не исследуются
	Логический знак «И»	Выходное событие происходит, когда имеют место все входные события
	Логический знак «Приоритетное И»	Выходное событие происходит, когда все входные события осуществляются в строгом порядке слева направо

	Логический знак «ИЛИ»	Выходное событие происходит, если имеется одно или несколько входных событий
	Логический знак « m из n » (голосование)	Выходное событие происходит, если поступает не менее m из n входных событий
	Логический знак «Исключающее ИЛИ»	Выходное событие происходит, если случается одно (но не оба) из входных событий
	Логический знак «Запрет»	Входное событие вызывает выходное, если происходит условное событие

Преимущество дерева отказов заключается в том, что данный анализ ориентируется на нахождение отказов, позволяет показать в явном виде ненадежные места системы, дает возможность выполнять качественный или количественный анализ надежности системы.

Вопросы для самоконтроля

1. Понятие отказа в теории надежности.
2. По каким признакам классифицируются отказы?
3. Приведите примеры отказов различных типов.
4. Повреждения и неисправности объектов.
5. Характеристика жизни объекта.
6. Потoki отказов элементов.
7. Какими свойствами обладают потоки отказов элементов?
8. Какие потоки называются простейшими?
9. Что такое дерево отказов?
10. Опишите основную структуру дерева отказов?

4 ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ В РАСЧЕТАХ НАДЕЖНОСТИ ЭЭС

4.1. Основные понятия теории вероятностей

При рассмотрении физических или технических задач приходится встречаться со случайными явлениями. Отличительной особенностью случайного события является то, что при выполнении в точности всех условий проведения эксперимента невозможно получить заранее определенный результат.

4.1.1. Основы теории множеств

Исход, произошедший или не произошедший в результате эксперимента называется *событием*. Каждому из таких событий соответствует определенное число, называемое его *вероятностью*, которое является мерой возможного совершения данного события.

Теория вероятностей – раздел математики, изучающий закономерности в случайных событиях. Отказ является случайным событием. Теории вероятностей опирается на элементарные понятия теории множеств.

Множество – некоторая совокупность объектов, называемых элементами этого множества. Пример: конечное множество M натуральных чисел от 1 до 200 можно записать, как

$$M = \{1, 2, \dots, 200\} = \{i - \text{целое}; 1 \leq i \leq 200\}.$$

Допустим, что выполняется эксперимент, в котором неизвестен конечный результат, либо результат является случайным. В таком случае множество Ω всех вероятных исходов эксперимента представляет собой пространство элементарных событий. При этом каждый из элементов $\alpha \in \Omega$ является элементарным событием.

В случае, если множество Ω состоит из n -го количества элементов, то выделяются 2^n подмножества (события).

Событие Ω является *достоверным событием*, т.к. осуществляется при любом опыте. *Невозможным* событием называется пустое множество \emptyset , т.к. данное событие заранее не может произойти.

События A, B называются *зависимыми (независимыми)*, если вероятность каждого из них зависит (не зависит) от того произошло или нет другое событие.

Событие A называется *противоположным*, если данное событие не осуществляется (обозначается \bar{A}).

События A и \bar{A} составляют *полную группу событий* – совокупность событий, при которой должно произойти хотя бы одно из событий данной совокупности.

Для множеств характерны важные преобразования, которые представлены в простой геометрической форме – диаграмме Эйлера-Венна. На диаграмме прямоугольником изображается пространство Ω , в форме плоских фигур, ограниченных плоскими линиями – различные множества. Диаграмма, иллюстрирующая множества $C \subset B \subset A$, приведена на рис. 4.1.

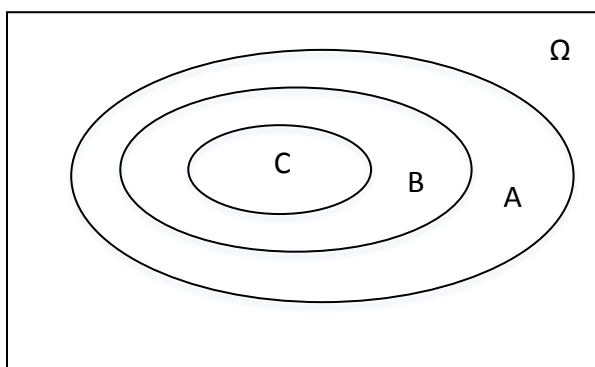


Рисунок 4.1

Диаграмма показывает, что множество B является подмножеством A , множество C – подмножеством B и подмножеством A .

4.1.2. Алгебра событий

Алгебра событий – это результат взаимодействия двух и более случайных событий, а так же умение выражать интересующие нас события через другие.

Отметим, что все вводимые ниже понятия справедливы тогда, когда события о которых идет речь, представляют собой подмножества одного и того же пространства элементарных событий Ω .

Суммой случайных событий $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ называется событие, которое состоит в осуществлении хотя бы одного из данных событий $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$. Сумма событий обозначается:

$$A = A_1 \vee A_2 \vee \dots \vee A_n = \bigcup_{i=1}^n A_i, \quad (4.1)$$

где \vee –логическое сложение событий,

\bigcup - логическая сумма событий.

Произведением случайных событий $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ называется событие, которое предусматривает совместное появление (совмещение) всех данных событий $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$. Произведение событий обозначается

$$A = A_1 \wedge A_2 \wedge \dots \wedge A_n = \bigcap_{i=1}^n A_i, \quad (4.2)$$

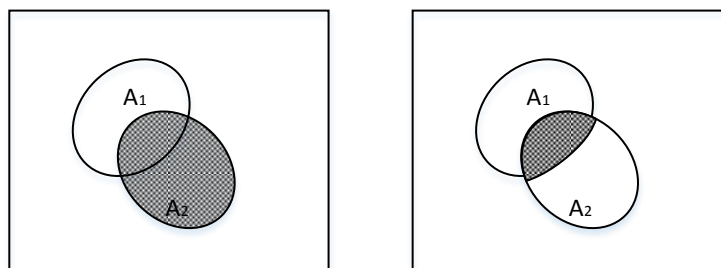
где \wedge - логическое умножение событий,

\bigcap - логическое произведение событий.

Исходя из определений суммы и произведения случайных событий следует

$$\begin{aligned} A &= A \vee A; A = A \vee \emptyset; \Omega = A \vee \Omega; \\ A &= A \wedge A; \emptyset = A \wedge \emptyset; A = A \wedge \Omega. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Диаграммы Эйлера-Венна двух событий A_1 и A_2 приведены на рис. 4.2 а, б. (логическая сумма (а) и логическое произведение (б)).



а)

б)

Рисунок 4.2

Противоположное событие \bar{A} показано на рис. 4.3. Исходя из определения противоположного события следует

$$(\bar{\bar{A}}) = A; \bar{\Omega} = \emptyset; \bar{\emptyset} = \Omega. \quad (4.4)$$

Также другие свойства противоположных событий рассмотрены в законах де Моргана, поясняемых рис. 4.4.

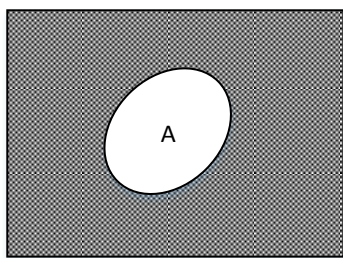


Рисунок 4.3

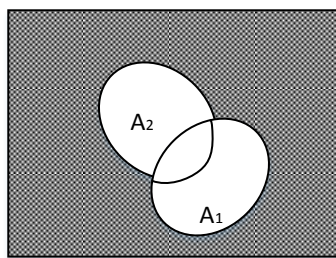


Рисунок 4.4

4.1.3. Основные законы и правила теории вероятностей

При вычислении вероятности сложных событий используют теоремы сложения и умножения вероятностей.

Теорема сложения вероятностей.

Вероятность появления одного из нескольких несовместных событий $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ равна сумме A их вероятностей:

$$P(A) = P\left\{\bigcup_{i=1}^n A_i\right\} = \sum_{i=1}^n P(A_i) \quad (4.4)$$

Сумма вероятностей двух противоположных событий A и \bar{A} :

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1 \quad (4.5)$$

Условная вероятность – вероятность наступления события A при условии, что событие B уже произошло:

$$P(A|B) = P(AB) / P(B). \quad (4.6)$$

Теорема умножения вероятностей.

Вероятность произведения (совместного появления) двух событий A_1 и A_2 равна вероятности одного из них, умноженной на условную вероятность другого, в предположении, что первое событие произошло:

$$P(A_1 \wedge A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2 | A_1) = P(A_2) \cdot P(A_1 | A_2). \quad (4.7)$$

Для любого конечного числа событий теорема умножения имеет вид

$$P\left\{\bigcap_{i=1}^n A_i\right\} = P(A_1 | A_2 \dots A_n) \cdot P(A_2 | A_3 \dots A_n) \cdot \dots \cdot P(A_{n-1} | A_n) \cdot P(A_n). \quad (4.8)$$

В случае, если события A_1 и A_2 независимы, то соответствующие условные вероятности

$$P(A_1 | A_2) = P(A_1); P(A_2 | A_1) = P(A_2),$$

поэтому теорема умножения вероятностей принимает вид

$$P(A_1 \wedge A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2), \quad (4.9)$$

а для конечного числа n независимых событий

$$P\left\{\bigcap_{i=1}^n A_i\right\} = \prod_{i=1}^n P\{A_i\}. \quad (4.10)$$

Следствием правил сложения и умножения вероятностей является **теорема о повторении опытов (схема Бернулли)**: *опыты считаются независимыми, если вероятность того или иного исхода каждого из них не зависит от того, какие исходы имели другие опыты.*

Пусть в некотором опыте вероятность события A равна $P(A) = p$, а вероятность того, что оно не произойдет $P(\bar{A}) = q$, причем, согласно (4.13)

$$P(A) + P(\bar{A}) = p + q = 1.$$

Если проводится n независимых опытов, в каждом из которых событие A появляется с вероятностью p , то вероятность того, что в данной серии опытов событие A появляется ровно m раз, определяется по выражению

$$P_n(m) = \{\text{событие } \Phi \text{ произошло } m \text{ раз}\} = C_n^m p^m q^{n-m}, \quad (4.11)$$

где $C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$ – биномиальный коэффициент.

Например, вероятность однократной ошибки при чтении 32-разрядного слова в формате ЭВМ, представляющего комбинацию 0 и 1, при вероятности ошибки чтения двоичного числа $p = 10^{-3}$, составляет по (4.12)

$$P_{32}(0) = 1 \cdot (10^{-3})^0 \cdot (0,999)^{32} \approx 0,969,$$

где $q = 1 - p = 0,999$; $n = 32$; $m = 1$.

Вероятность отсутствия ошибки чтения при $m = 0$, $C_{32}^0 = 1$

$$P_{32}(0) = 1 \cdot (10^{-3})^0 \cdot (0,999)^{32} \approx 0,969,$$

Часто возникают задачи определения вероятностей того, что некоторое событие A произойдет по меньшей мере m раз или не более m раз. Подобные вероятности определяются сложением вероятностей всех исходов, которые составляют рассматриваемое событие.

Расчетные выражения для такого типа ситуаций имеют вид:

$$P \{ \text{Событие } A \text{ произойдет в } n \text{ опытах менее } m \text{ раз} \} = \sum_{i=0}^{m-1} P_n(i);$$

$$P \{ \text{Событие } A \text{ произойдет в } n \text{ опытах более } m \text{ раз} \} = \sum_{i=m+1}^n P_n(i);$$

$$P \{ \text{Событие } A \text{ произойдет в } n \text{ опытах не более } m \text{ раз} \} = \sum_{i=0}^m P_n(i);$$

$$P \{ \text{Событие } A \text{ произойдет в } n \text{ опытах не менее } m \text{ раз} \} = \sum_{i=m}^n P_n(i),$$

где $P_n(i)$ определяется по (4.12).

При больших m вычисление биномиальных коэффициентов C_n^m и возведение в большие степени p и q связано со значительными трудностями, поэтому целесообразно применять упрощенные способы расчетов. Приближение, называемое *теоремой Муавра-Лапласа*, используется, если $npq \gg 1$, а $|m - np| < (npq)^{0,5}$, в таком случае выражение (4.12) записывается:

$$P_n(m) = C_n^m p^m q^{n-m} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi npq}} \exp\left(-\frac{(m - np)^2}{2npq}\right). \quad (4.12)$$

4.1.4. Формула полной вероятности и формула Байеса (формула вероятностей гипотез)

В практике решения большого числа задач формула полной вероятности (ФПВ) и формула Байеса, являющиеся следствием основных теорем, находят широкое применение.

Формула полной вероятности.

Если по результатам опыта можно сделать n исключаящих друг друга предположений (гипотез) H_1, H_2, \dots, H_n , представляющих полную группу несовместных событий (для которой $\sum_i = 1^n$), то вероятность события A , которое может появиться только с одной из этих гипотез, определяется:

$$P(A) = P(H_i) \cdot P(A | H_i), \quad (4.13)$$

где $P(H_i)$ – вероятность гипотезы H_i ;

$P(A | H_i)$ – условная вероятность события A при гипотезе H_i .

Поскольку событие A может появиться с одной из гипотез H_1, H_2, \dots, H_n , то $A = AH_1 \vee AH_2 \vee \dots \vee AH_n$, но H_1, H_2, \dots, H_n несовместны, поэтому

$$P(A) = P(A \wedge H_1) + \dots + P(A \wedge H_n) = \sum_{i=1}^n P(AH_i).$$

В виду зависимости события A от появления события (гипотезы) H_i $P(AH_i) = P(H_i) \cdot P(A | H_i)$, откуда и следует выражение (4.14).

Формула Байеса (формула вероятностей гипотез).

Если до опыта вероятности гипотез H_1, H_2, \dots, H_n были равны $P(H_1), P(H_2), \dots, P(H_n)$, а в результате опыта произошло событие A , то новые (условные) вероятности гипотез вычисляются:

$$P(A | H_i) = \frac{P(H_1) \cdot P(A | H_i)}{\sum_{i=1}^n P(H_i) \cdot P(A | H_i)} = \frac{P(H_1) \cdot P(A | H_i)}{P(A)}. \quad (4.14)$$

Доопытные (первоначальные) вероятности гипотез $P(H_1), P(H_2), \dots, P(H_n)$ называются *априорными*, а послеопытные - $P(H_1 | A), \dots, P(H_n | A)$ – *апостериорными*.

Формула Байеса позволяет «пересмотреть» возможности гипотез с учетом полученного результата опыта.

Доказательство формулы Байеса следует из предшествующего материала. Поскольку $P(H_i \wedge A) = P(H_i) \cdot P(A | H_i) = P(H_i) \cdot P(H_i | A)$:

$$P(H_i | A) = \frac{P(H_i \wedge A)}{P(A)} = \frac{P(H_i) \cdot P(A | H_i)}{P(A)},$$

откуда, с учетом (4.14), получается выражение (4.15).

Если после опыта, давшего событие A , проводится еще один опыт, в результате которого может произойти или нет событие A_1 , то условная вероятность этого последнего события вычисляется по (4.15), в которую входят не прежние вероятности гипотез $P(H_i)$, а новые - $P(H_i | A)$:

$$P(A_1 | A) = \sum_{i=1}^n P(H_i | A) \cdot P(A_1 | H_i A). \quad (4.15)$$

Выражение (4.15) называют формулой для *вероятностей будущих событий*.

4.2. Случайные величины и их характеристики.

Случайной величиной X называется величина, которая в результате опыта может принять то или иное значение, причем заранее неизвестное. Различают дискретные и непрерывные случайные величины.

Дискретная случайная величина – величина, принимающая только отдельные (разрозненные) друг от друга значения, которые можно заранее перечислить (например, число агрегатов, вышедших одновременно из работы).

Если дискретная случайная величина X принимает значения X_1, X_2, \dots, X_m с заданными вероятностями P_1, P_2, \dots, P_m , то соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями, называется *законом распределения*.

Для дискретных случайных величин закон распределения вероятностей наиболее просто задать с помощью таблиц распределения.

Непрерывная случайная величина – величина, возможные значения которой непрерывно заполняют некоторый промежуток (интервал) – например, изменения нагрузки.

5 КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЭС

5.1. Причины отказов основных элементов электроэнергетических систем

В процессе эксплуатации элементов в материалах, из которых они изготовляются, вследствие термических, механических воздействий, электромагнитных полей, агрессивной среды, снижения показателей качества электроэнергии накапливаются необратимые изменения, снижающие прочность, нарушающие координацию и взаимодействие частей. Эти изменения в случайные моменты времени могут приводить к отказу элемента.

Отказ возникает вследствие теплового, вибрационного старения изоляции трансформаторов, кабельных линий, генераторов, коррозии металлических частей проводов, опор, оболочек кабельных линий, износа дугогасительных камер, коммутационных аппаратов при отключении токов коротких замыканий, а также вследствие деформации материалов, диффузии одного материала в другой.

5.1.1. Причины отказов энергетических блоков

Отказы энергоблоков электростанций определяются в основном отказами теплосилового, гидромеханического оборудования и генераторов (табл. 5.1). Период приработки мощных энергоблоков зависит от номинальной мощности, от степени освоения в производстве. Головные блоки имеют период приработки от пяти до десяти, серийные - от двух до пяти лет.

Значительную роль в обеспечении надежности генерации энергии играет надежность комплекса оборудования и механизмов собственных нужд, которая, в свою очередь, зависит в основном от степени резервирования механизмов топливоподачи и топливоснабжения, циркуляционного, водоснабжения, питательных насосов и вентиляторов, а также от условий успешного включения и самозапуска электродвигателей механизмов при работе АВР.

Существенный вклад в уровень надежности генерации вносит надежность электрических машин, генераторов, трансформаторов и электродвигателей собственных нужд. Знание причин отказов электрических машин необходимо для

построения системы профилактических мероприятий, контроля, испытаний, диагностики, планово-предупредительных и капитальных ремонтов, обеспечивающей высокий уровень безотказности.

Таблица 5.1. Показатели надежности генерирующих блоков

Причина отключения	λ , год ⁻¹	\bar{t}_g , ч	t_{nl} ч/год	λ_{nl} , год ⁻¹
Отказ:				
генератора	0,10 - 1,5	50 - 180	-	-
цепи возбуждения	0,01 - 0,05	2	-	-
гидротурбины и другого гидросилового и гидротехнического оборудования	0,03 - 0,05	200 - 300	200 - 800	1 - 2
паровой турбины и оборудования машинного зала	0,5 - 3,5	20 - 100	900 - 1600	5 - 20
парогенератора и другого оборудования котельного цеха	2 - 8	36 - 100	300 - 1000	5 - 20
Ложное срабатывание РЗ	0,01 - 0,05	0,1 - 12	-	-
Ошибка персонала	0,02 - 0,06	0,1 - 12	-	-

5.1.2. Причины отказов синхронных генераторов

Отказы синхронных машин из-за повреждений обмотки статора происходят в два раза чаще, а из-за повреждений активной стали - в десять раз реже, чем из-за повреждений обмотки ротора. Повреждения системы возбуждения соизмеримы по частоте с повреждениями ротора. Частота отказов из-за повреждений подшипников, подпятников и системы охлаждения вдвое меньше, чем из-за повреждений обмотки ротора.

Повреждение обмотки статора происходит, как правило, вследствие электрического пробоя изоляции. Участки с пониженной прочностью изоляции появляются из-за дефектов изготовления и монтажа и развития их в процессе эксплуатации, ремонтов. Изоляция разрушается в пазах за счет вибрации активной стали при ее слабой запрессовке. Недостаточное крепление лобовых частей приводит к их деформации и трещинам в изоляции. Лобовые части обмоток подвергаются дополнительным динамическим воздействиям при коротких замыканиях, несинхронных включениях и вибрациях. Перемещение обмотки при ослаблении крепления приводит к истиранию изоляции и усталостным повреждениям меди.

Электрическая прочность микалентной компаундированной изоляции существенно снижается в результате тепловых перегрузок, которые могут быть вызваны местными замыканиями сегментов активной стали, витковыми замыканиями и ухудшением условий охлаждения.

Повреждение изоляции обмотки статора может быть вызвано также появлением течи в воздухо- или газоохладителях и попаданием воды или масла на обмотку.

Наиболее частая причина повреждений активной стали - ослабление ее запрессовки. В процессе работы усилия от магнитного тяжения, вращающего момента, массы сердечника и вибраций приводят к расшатыванию цилиндра активной стали, износу брусков несущих ребер, контактной коррозии и дальнейшему ослаблению крепления стали. Из-за местных нарушений целостности изоляционной пленки на поверхности листов возникают контуры циркуляционных токов, что приводит к местному разогреву, выгоранию пленки на соседних местах, выплавлению стали и разрушению корпусной изоляции.

Значительное число повреждений в турбогенераторах приходится на бандажный узел ротора, где развиваются усталостные трещины и коррозия. Заклинивание ротора при разрыве бандажа, а также температурные напряжения в теле ротора могут привести к тяжелым авариям с поломкой вала.

Одна из главных причин повреждений обмотки ротора турбогенератора - смещение ее при изменении температуры и как следствие - витковые замыкания

и перекрытие каналов непосредственного охлаждения. До 40 % причин отказов роторов приходится на повреждение токоподводов и токосъемного узла, особенно у гидрогенераторов, где при длительных и частых форсировках возбуждения наблюдаются разрывы и расплавление паек между полюсных соединений.

Так же как и обмотка статора, обмотка ротора подвержена действию влаги, частиц металла и ржавчины. Замыкание обмотки ротора на корпус само по себе не представляет опасности для машин и не приводит к отказу. Однако второе замыкание может вызвать прохождение через тело ротора больших токов и сильную вибрацию вследствие магнитной асимметрии, а значит, аварийное отключение.

Основные неисправности и повреждения подшипников и подпятников, приводящие к отказу генераторов: выплавление баббита, повреждение вкладышей и цапф подшипниковыми токами, вытекание масла. Чаще всего подшипниковые токи вызваны асимметрией магнитной системы машины: неравномерным зазором, несимметричным размещением сегментов активной стали и наличием осевых вентиляционных каналов. Пульсирующий магнитный поток, пронизывающий контур с весьма малым активным сопротивлением (из вала, подшипников и фундаментной плиты), вызывает ЭДС от 3 до 15 В и соответствующий ток в цепи этого контура. Токи в подшипниках возникают также в результате продольного намагничивания вала при витковых замыканиях в обмотке ротора и коротких замыканиях в обмотке статора, при замыкании на корпус в цепи возбуждения в сочетании с замыканием на землю во внешней цепи ротора.

Длительное протекание даже небольших подшипниковых токов приводит к разложению масла и электроэрозии вкладышей. В целях борьбы с этим явлением обычно подшипник генератора изолируется со стороны, возбуждителя с помощью слоя гетинакса или текстолита толщиной 2 - 5 мм. Маслопроводы снабжаются изолирующими вставками. На гидрогенераторах изолируются верхний и нижний направляющие подшипники, подпятник, подшипники регуляторного генератора и маслоприемник турбины. Сопротивление изоляции должно быть не меньше 1 МОм и непрерывно контролироваться специальным прибором.

Наиболее распространены отказы подшипников вследствие вытекания масла и отказы подпятников гидрогенераторов вследствие износа сегментов. Приработочные отказы подпятников и подшипников прекращаются через полгода после пуска агрегата, а износые отказы начинаются после 4 -5 лет эксплуатации.

Надежность работы машины в значительной степени зависит от уровня вибрации. Внезапное увеличение вибрации почти всегда свидетельствует о повреждении. Допустимая амплитуда вибрации подшипников для турбогенераторов не более 40 мкм, для гидрогенераторов не более 100 - 180 мкм.

5.1.3. Причины отказов силовых трансформаторов

Основными причинами повреждения трансформаторов являются:

- нарушения изоляции обмоток вследствие воздействия внешних и внутренних перенапряжений, сквозных токов коротких замыканий, дефектов изготовления. Причинами повреждения изоляции обмоток трансформаторов зачастую являются износ и старение ее вследствие перегрузок, недостаточного охлаждения. Трансформаторы выходят из строя также вследствие повреждения устройств, регулирующих напряжения (особенно автоматических под нагрузкой);
- повреждения вводов трансформаторов вследствие перекрытия изоляции;
- повреждения контактных соединений;
- упуск масла.

Частота отказов трансформаторов в значительной степени зависит от габаритов, класса напряжения и условий эксплуатации (табл. 5.2), однако даже у трансформаторов 500 кВ она не превышает 0,03 - 0,05 в стационарном режиме. Верхние границы указанных в таблице диапазонов относятся к трансформаторам большей мощности с РПН.

Таблица 5.2. Показатели надежности трансформаторов

Напряжение,	λ , год ⁻¹	\bar{t}_e , ч	t_{nl} , ч/ГОД	λ_{nl} , ГОД ⁻¹
-------------	-------------------------------	-----------------	------------------	------------------------------------

6 -20	0,008 - 0,080	60 - 100	10 - 15	0,25
35	0,005 - 0,020	90 - 150	25 - 30	0,3 - 0,7
110	0,005 - 0,050	100 - 200	30 - 40	0,3 - 1,0
220	0,02 - 0,08	150 - 250	40 - 50	0,4 - 1,0
330	0,05 - 0,10	200 - 300	50 - 60	0,5 - 1,5
500	0,05 - 0,15	250 - 350	60 - 80	0,5 - 2,0

Распределение числа отказов (в процентах) между элементами конструкции трансформаторов с различным высшим напряжением представлена в таблице 5.3.:

Таблица 5.3. Распределение числа отказов

Элемент конструкции трансформаторов	<100 кВ	≥100 кВ
Витковая и продольная изоляция	60	25
Вводы	1	13
Переключатели	-	27
Баки, прокладки, система охлаждения	1	2
Главная изоляция	19	16
Отводы, контакты	-	6
Магнитопроводы	16	11

Повреждение продольной изоляции происходит из-за нарушения электродинамической устойчивости обмоток и недостаточной электрической прочности витковой изоляции в начальной части обмоток, а также из-за дефектов, допущенных при изготовлении. Уменьшение электродинамической устойчивости обмоток трансформаторов малой и средней мощности обусловлено тем, что опрессовка их производится с помощью клиньев. В процессе эксплуатации вследствие усадки картона и клиньев опрессовка ослабевает.

У трансформаторов третьего габарита и выше опрессовка обмотки производится с помощью болтов и колец. Однако и у них за счет усадки картона стягивающее усилие уменьшается. При прохождении сквозного тока короткого за-

мыкания обмотка смещается, появляются трещины в витковой изоляции, вследствие чего уменьшается электрическая прочность изоляции. Пробой изоляции происходит чаще всего во время грозы из-за неэффективности защиты от перенапряжений.

Возможно также разбухание дополнительной катушечной изоляции обмоток высшего и среднего напряжения и как следствие поломка конструктивных элементов обмотки.

Кроме механических и усталостных процессов в обмотке происходит и тепловое старение изоляции как результат повышения температуры окружающей среды при плановых и аварийных перегрузках.

Отказы высоковольтных вводов трансформаторов в основном вызваны загрязнением от химических уносов, а отказы переключателей - механическим износом.

Все вышеуказанные процессы, развиваясь во времени, постепенно приводят трансформатор к такому состоянию, когда очередное внешнее воздействие (сквозное короткое замыкание или перенапряжение) вызывает механическое или электрическое повреждение изоляции, которое переходит во внутреннее короткое или витковое замыкание. Трансформатор отключается релейной защитой, и его выводят в аварийный ремонт.

Приблизительное распределение причин отказов трансформаторов и автотрансформаторов (в процентах): заводские дефекты - 35, грозовые повреждения - 25, неправильная эксплуатация - 20, неудовлетворительный ремонт - 10, старение изоляции - 10.

Ремонт трансформаторов малых габаритов (до 20 кВ) производится централизованно, а поврежденный трансформатор заменяется в течение короткого времени (единицы часов). Ремонт трансформаторов больших габаритов осуществляется на месте достаточно длительное время (десятки и сотни часов), при этом применяются подъемные механизмы.

Линии электропередач (ЛЭП) – наиболее часто повреждаемые элементы электрических систем из – за территориальной рассредоточенности и подверженности влиянию внешних неблагоприятных условий среды.

Основные причины отказов *воздушных ЛЭП*: наличие гололедно-ветровых нагрузок, перекрытий изоляции вследствие грозových разрядов; повреждение опор и проводов автотранспортом и другими механизмами; дефекты изготовления опор, проводов, изоляторов; перекрытия изоляции из-за птиц; несоответствия опор, проводов, изоляторов природно-климатическим зонам страны; неправильный монтаж опор и проводов; несоблюдение сроков ремонта и замены оборудования.

Эти причины приводят в основном к ослаблению или нарушению механической прочности опор, проводов, изоляторов; поломке деталей опор, коррозии и гниению металлических и деревянных частей.

Вибрация, «пляска» и обрыв проводов, разрушение опор и их частей сопровождается, как правило, короткими замыканиями (одно- и многофазными) ЛЭП.

Основной причиной отказов *кабельных ЛЭП* является нарушение их механической прочности землеройными машинами и механизмами (до 70% от всех повреждений), что, естественно, зависит от интенсивности проведения земляных работ в местах прокладки кабелей и способов прокладки (непосредственно в земле, трубах, блоках, туннелях). Наибольшая повреждаемость возникает при прокладке кабелей непосредственно в земле.

Значительную долю повреждений кабельных линий составляют электрические пробой в кабельных муфтах (соединительных) и на концевых воронках, участках кабелей, проложенных с большим уклоном.

Вследствие старения и износа изоляции (междуфазной и поясной), попадания влаги в кабельную линию, коррозии металлических частей, усиливающейся при появлении блуждающих токов, возникновения неравномерностей в вязкой пропитке по длине кабеля из-за разности уровней по горизонту повреждения возникают существенно реже.

Отказы кабельных линий также сопровождаются короткими замыканиями.

Продолжительность восстановления кабельных линий существенно больше по сравнению с воздушными и составляет десятки часов.

Коммутационные аппараты являются более сложными с точки зрения надежности электрической системы. Они подразделяются на автоматические (выключатели, отделители с короткозамыкателями, автоматы, предохранители) и неавтоматические (разъединители и рубильники). Отказы коммутационных аппаратов происходят при выполнении ими операций (отключение коротких замыканий, нагрузок, оперативных переключениях и др.) и в стационарном состоянии.

Основными причинами отказов коммутационных аппаратов являются: несрабатывание приводов, механические повреждения, износ дугогасительных камер, обгорание контактов, перекрытие изоляции при внешних и внутренних перенапряжениях.

Отказы устройств релейной защиты и автоматики в расчетах надежности электрических сетей часто также учитываются в отказах выключателей. При моделировании отказов выключателей все повреждения целесообразно привести к двум видам (с точки зрения последствий для системы): отказы выключателей, приводящие к необходимости срабатывания смежных выключателей с одной его стороны (левой или правой, в том числе и его ложное срабатывание), и отказы выключателей, приводящие к необходимости срабатывания смежных выключателей с двух его сторон (левой или правой, в том числе и отказы в стационарном состоянии). Отказы также подразделяются на отказы при отключении и включении, например при автоматическом вводе резерва (АВР).

Продолжительность восстановления коммутационных аппаратов возрастает с увеличением номинального напряжения электроустановок и, как правило, соизмерима с продолжительностью восстановления воздушных ЛЭП (единицы, десятки часов).

Коммутационных аппараты в отличие от ЛЭП и трансформаторов относятся к элементам дискретно – непрерывного действия, поэтому их модели в расчетах надежности, как правило, более сложные по сравнению с моделями элементов непрерывного действия.

Элементы электрических сетей, которые подвергаются аварийному ремонту после возникновения повреждений, нередко подвергаются также и профилактическому, предупредительному ремонту, осуществляемому в тех случаях, когда отдельные части элементов изношены. Такой ремонт увеличивает интервал времени между отказами. Это обстоятельство позволяет сделать предположение, что элемент после аварийного ремонта восстанавливается до состояния «нового».

Работа реального элемента электрической сети в установившемся режиме практически не зависит от вида распределений продолжительности работы и продолжительности восстановления и достаточно хорошо отражается поведением элемента с показательными распределениями этих интервалов времени.

Для неустановившихся значений вероятностей состояния (работы или отказа) виды распределений оказывают более существенное влияние, особенно на вероятность нахождения в состоянии отказа. Однако следует иметь в виду, что значительное усложнение математических моделей по сравнению с показательными распределениями часто не оправдывается достигаемыми значениями уточнений результатов.

Количественными оценками показателей надежности (справочные данные) основного оборудования электрических станций и ЭЭС являются:

- параметр потока отказов (частота отказов) $\omega(\lambda)$, 1/год;
- среднее время восстановления элемента T_B , год (час);
- параметр потока преднамеренных отключений (частота плановых ремонтов) $\mu(\lambda_n)$, 1/год;
- средняя продолжительность планового ремонта T_p , год (час).

Частота отказов элементов (собственная частота) оценивается числом повреждений оборудования в единицу времени и определяется как отношение числа отказавшего оборудования n_0 за расчетный период Δt к общему числу комплектов оборудования n :

$$\omega = n_0 / (n\Delta t).$$

Частота отказов измеряется количеством отказов за год и равна обратной величине времени наработки на отказ T .

Показатели надежности основных элементов систем электроснабжения приводятся в Приложении.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем причина различия справочных показателей надежности воздушных и кабельных линий электропередачи?
2. Проведите анализ причин повреждаемости трансформаторов.
3. Причины повреждаемости выключателей различных типов.
4. Как статистически определяется частота отказов элементов систем электроснабжения?
5. Как определяется для оборудования наработка на отказ?
6. Как изменяется интенсивность отказов элементов в различные периоды эксплуатации?
7. Назовите особенности моделирования отказов коммутационных аппаратов.
8. Что значит для линий электропередач коэффициент учета неустойчивых отказов?

6 МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СХЕМ

Надежность является, как известно, экономической категорией, поэтому в общем случае уровень надежности изменяется (как правило, повышается) за счет увеличения уровня затрат на сооружение и эксплуатацию электрических систем. Поэтому при проектировании и эксплуатации электрических систем стараются отыскать и осуществить такие решения, при которых соблюдалось бы оптимальное соотношение между затратами на производство и распределение электроэнергии и технико-экономическими последствиями от недоотпуска электроэнергии (ущерб) вследствие нарушений питания потребителей из-за отказов оборудования.

Прогнозирование ущерба основывается не только на знании технологии и экономических характеристик работы потребителей, но и на показателях надежности различных подсистем электрической системы, в частности подсистем распределения электроэнергии. Для них характерны многочисленность элементов; сложность структур; территориальная распределенность; воздействие внешних постоянно меняющихся факторов; в общем случае резервирование функций отказавшего элемента не одним элементом, а несколькими; наличие элементов как непрерывного действия (генераторы, линии передач, трансформаторы), так и дискретно – непрерывного действия (коммутация и защитная аппаратура); наличие автоматического и оперативного способов локализации повреждений, постоянно меняющиеся нагрузки и параметры режимов.

Большая часть повреждений в электрических системах связана с нарушением электрической изоляции элементов, поэтому от момента возникновения повреждения до его локализации зона неблагоприятного влияния, как правило, велика (теоретически охватывает все электрически и электромагнитно связанные элементы). Причем для отдельных видов потребителей (например, некоторые предприятия химической промышленности) сам факт возникновения повреждения, при котором понижается напряжение, является отказом.

Перечисленные особенности электрических систем и сетей обуславливают достаточно сложные задачи анализа надежности, в числе которых можно указать основные:

1. Выявление основных «механизмов» возникновения состояний отказа элементов.
2. Обоснование и освоение методов определения показателей надежности простейших структур электрических систем.
3. Разработка моделей отказов и методов определения показателей надежности сложных схем электрических систем на основе декомпозиции сложных структур с ориентацией на целенаправленные приемы принятия решений.
4. Оценка живучести сложных схем.
5. Технико–экономическая оценка последствий перерывов электропитания потребителей.

Как уже указывалось, теория надежности основывается на вероятностно-статистической природе поведения сложных систем. Поэтому основным методом решения поставленных задач является математическое, вероятностное моделирование процессов функционирования на основе ретроспективной информации о показателях надежности оборудования и режимах электропотребления.

Объединенные в сложный элемент простые элементы могут быть соединены между собой последовательно или параллельно.

При последовательном соединении отказ одного из простых элементов приводит к отказу всего сложного элемента. Частота отказов сложного элемента при последовательном соединении n простых элементов равна сумме частот отказов всех простых элементов:

$$\omega_{сл} = \sum_i^n \omega_i . \quad (6.1)$$

Вероятность отказа, равно как и вероятность состояния отказа, такого сложного элемента определяется на основании положения теории вероятности о возникновении хотя бы одного из возможных случайных независимых и совместных событий. На примере сложного элемента, состоящего из двух простых

последовательно соединенных элементов можно записать функцию неработоспособности или отказа:

$$P(A+B) = \bar{A}B + A\bar{B} + \bar{A}\bar{B} = A(1-\bar{B}) + \bar{B}(1-\bar{A}) + \bar{A}\bar{B} = \bar{A} + \bar{B} - \bar{A}\bar{B}, \quad (6.2)$$

где \bar{A}, \bar{B} — события противоположные событиям A, B .

Переходя к вероятностным обозначениям, получаем:

$$P_{сл} = P(A) + P(B) - P(AB). \quad (6.3)$$

Произведение вероятностей отказов простых элементов в электроэнергетике, как показала практика, является бесконечно малой величиной, поэтому $P(AB) \rightarrow 0$, а вероятность отказа сложного элемента $P_{сл} = P(A) + P(B)$ или в общем виде, т. е. вероятность отказа сложного элемента при последовательном соединении простых элементов равна сумме вероятностей отказов этих элементов.

За частоту плановых ремонтов сложного элемента принимается наибольшая частота вывода в плановый ремонт какого-либо простого элемента

$$\mu_{сл} = \max \mu_i. \quad (6.4)$$

Вероятность планового ремонта для сложного элемента

$$P_{сл}^p = \mu_{сл} T_{р.сл}, \quad (6.5)$$

где $T_{р.сл}$ — среднее время планового ремонта сложного элемента. Расчет этого времени вызывает затруднения, так как на практике при выводе в ремонт оборудования, состоящего из отдельных элементов, совмещают ремонт этих элементов, а не ведут его последовательно по элементам. В общем виде:

$$T_{р.сл} = \left[\max T_{рj} \mu_j + \sum_{\text{зр}}^{n-1} T_{рзr} (\mu_{зr} - \mu_i) \right] / \max \mu_i. \quad (6.6)$$

При параллельном соединении элементов условием отказа является отказ всех элементов, входящих в данный сложный элемент. Параллельное соединение характерно для схем с резервированием, например, схем электроснабжения собственных нужд ЭС по двум параллельным кабелям.

Частота отказов сложного элемента, состоящего из двух параллельно соединенных элементов:

$$\omega_{сл} = \omega_1 P_2 + \omega_2 P_1, \quad (6.7)$$

где ω_1, ω_2 — частота отказов первого и второго элементов;

P_1, P_2 — вероятность отказа первого и второго элементов.

Вероятность отказа, равно как и вероятность состояния отказа, такого сложного элемента определяется на основании положений теории вероятности об одновременном возникновении двух независимых совместных событий. Функция неработоспособности в символах алгебры логики $P(AB) = \bar{A}\bar{B}$, или в вероятностной записи $P_{\text{с.л.}} = P(A)P(B)$.

В общем виде вероятность состояния отказа сложного элемента равна произведению вероятностей отказов простых параллельно соединенных элементов:

$$P_{\text{с.л.}} = \prod_i^n P_i. \quad (6.8)$$

Среднее время восстановления сложных элементов:

$$T_{\text{с.л.}} = P_{\text{с.л.}} / \omega_{\text{с.л.}}. \quad (6.9)$$

При параллельном соединении двух однотипных элементов

$$T_{\text{в.с.л.}} = \prod_j^2 P_i / (\omega_1 P_2 + \omega_2 P_1) = \omega^2 T_B^2 / 2\omega^2 T_B = T_B / 2. \quad (6.10)$$

Частота и продолжительность плановых ремонтов элементов, производимых не одновременно, определяются так же, как для простых элементов.

Различают частоту устойчивых, неустойчивых и суммарных отказов линий. Частота устойчивых отказов ω^y , 1/год, учитывает только отказы, не устраняемые действием автоматического повторного включения (АПВ). Неустойчивые отказы, например, однофазные замыкания линии на землю при грозовых перенапряжениях, устраняются действием АПВ.

Отношение частоты устойчивых отказов к суммарной частоте отказов называется коэффициентом неуспешных действий АПВ $K_{\text{АПВ}} = \omega^y / \omega < 1$. Значение $K_{\text{АПВ}}$ принимается по статистическим данным о работе защитных устройств, в случае отсутствия АПВ $K_{\text{АПВ}} = 1$.

Остальные показатели надежности ВЛ и КЛ рассчитываются так же, как показатели простых элементов.

Особую группу среди сложных элементов образуют коммутационные аппараты (КА), к которым относят выключатели, выключатели нагрузки, отделители, короткозамыкатели, автоматические выключатели на напряжение ниже 1 кВ. Характерной особенностью работы КА является их автоматическое отключение при отказах смежных элементов. Отказы КА могут происходить в статическом состоянии, при производстве оперативных переключений, при автоматических отключениях отказавших смежных элементов. Коммутационный аппарат является связующим для двух элементов, которые по отношению к нему рассматриваются как смежные, например для линии и системы сборных шин, генератора и силового трансформатора.

Отказы КА в статическом состоянии и при оперативных переключениях, если рассматривать наиболее вероятные случаи КЗ в КА, приводят в режим КЗ один либо оба смежных элемента, в зависимости от состояния КА и вида разрушения при КЗ.

Важнейшей характеристикой надежности КА является относительная частота отказов при автоматическом отключении поврежденного элемента схемы:

$$a_{ABT} = K_a / K_{ABT}, \quad (6.11)$$

где K_a — число отказов КА;

K_{ABT} — общее число отключений.

Кроме того, различают относительную частоту отказов КА при переключениях:

$$a_{оп} = K_o / K_{оп}, \quad (6.12)$$

где K_o — количество отказов при выполнении коммутационных операций, в том числе отключений КЗ;

$K_{оп}$ — общее число операций.

В обоих случаях учитываются отказы собственно КА и отказы его привода и защитных устройств.

Относительная частота отказов при автоматическом отключении поврежденных элементов выступает в качестве условной вероятности случайного события при зависимых отказах. В самом деле, если произошло КЗ на воздушной линии (событие), то отказ выключателя при автоматическом отключении (событие) может произойти как следствие отключения токов КЗ. Одновременный отказ двух элементов происходит с вероятностью:

$$P(AB) = P(A/B)P(B), \quad (7.13)$$

где $P(B) = \omega_{\text{Л}} T_{\text{В.Л}}$.

Здесь $\omega_{\text{Л}}$ — частота отказов ВЛ;

$T_{\text{В.Л}}$ — среднее время восстановления ВЛ.

Тогда:

$$P(AB) = a_{\text{АВТ}} \omega_{\text{Л}} T_{\text{В.Л}}. \quad (7.14)$$

Вопросы для самоконтроля

1. Детерминистические методы расчета надежности.
2. Вероятностные методы расчета надежности схем по средним значениям вероятностей состояния элементов (обобщенный метод).
3. Расчет надежности системы последовательных элементов.
4. Как проводится анализ надежности системы с параллельным соединением элементов?
5. Расчет надежности сложных схем с помощью эквивалентирования.
6. Анализ надежности мостиковых схем.
7. Как проводится учет преднамеренных отключений элементов систем электроснабжения?
8. Аналитические вероятностные методы расчета надежности сложных схем.

7 МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Современный период развития техники характеризуется разработкой и внедрением сложных технических систем и комплексов. Создаются и успешно применяются полностью автоматизированные технологические комплексы. При разработке, испытаниях и эксплуатации таких комплексов особое значение имеют вопросы прогнозирования и обеспечения надежности.

Важность этой проблемы обусловлена тем, что надежность в сложившихся представлениях определяется не только как одно из основных свойств системы, характеризующее её способность выполнять заданные функции.

Данная проблема решается путем проведения структурно-логического анализа, который позволяет оценить надежность объекта, обнаружить ненадежные детали и узлы, а так же определить оптимальные меры по увеличению показателей надежности. Структурно-логические схемы надежности наглядно демонстрируют работоспособность всей системы и взаимосвязь элементов данной системы. При построении схемы учитывается влияние отказа на работоспособность системы, что является одним из критериев определения вида соединения элементов.

Параллельное соединение – отказ любого элемента не приводит к отказу всей системы, рабочее состояние сохранится до полного отказа всех элементов (рис. 7.1).

Последовательное соединение – отказ любого элемента приводит к отказу всей системы (рис. 7.2).

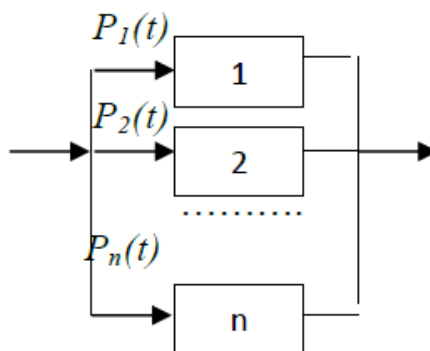


Рисунок 7.1 Элементы с параллельным соединением

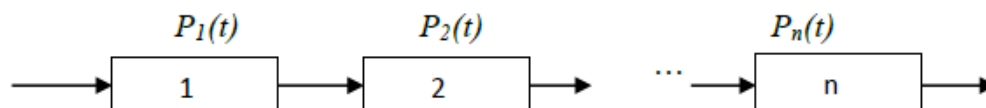


Рисунок 7.2 Элементы с последовательным соединением

Пример последовательного соединения: простейшая схема электрических соединений, состоящая из выключателя, ЛЭП и трансформатора. Пример параллельного соединения: соединение потребителей электрической энергии в квартире. Так, электрические лампочки, чайник, утюг и пр. включаются параллельно.

В ЭЭС для повышения надежности используют параллельное или последовательное соединение коммутирующих элементов (рис. 3), по причине того, что вид возникающих отказов напрямую влияет на надежность структурной схемы. Отказ таких изделий происходит по причине обрыва цепи и замыкания.

Электрическая схема	Структурная схема надежности при отказе типа	
	обрыв	замыкание

Рисунок 7.3 Схемы соединения коммутационных элементов при различных видах отказов

7.1. Системы с последовательным соединением элементов

Системой с последовательным соединением элементов называется система, в которой отказ любого элемента приводит к отказу всей системы (рис 7.1). Такое соединение элементов в технике встречается наиболее часто, поэтому его называют основным соединением.

В системе с последовательным соединением для безотказной работы в течении некоторой наработки t необходимо и достаточно, чтобы каждый из ее n элементов работал безотказно в течении этой наработки. Считая отказы элементов независимыми, вероятность одновременной безотказной работы n элементов определяется по теореме умножения вероятностей: вероятность совместного появления независимых событий равна произведению вероятностей этих событий:

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = \prod_{i=1}^n (-q_i(t)), \quad (7.1)$$

(далее аргумент t в скобках, показывающий зависимость показателей надежности от времени, опускаем для сокращения записей формул). Соответственно, вероятность отказа такой системы

$$Q = 1 - P = 1 - \prod_{i=1}^n p_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i). \quad (7.2)$$

Если система состоит из равнонадежных элементов ($p_i = p$), то

$$P = p^n, \quad Q = 1 - (1 - p)^n. \quad (7.3)$$

Из формул (7.1) - (7.3) очевидно, что даже при высокой надежности элементов надежность системы при последовательном соединении оказывается тем более низкой, чем больше число элементов (например, при $p = 0.95$ и $n = 10$ имеем $P = 0.60$, при $n = 15$ $P = 0.46$, а при $n = 20$ $P = 0.36$). Кроме того, поскольку все сомножители в правой части выражения (7.1) не превышают единицы, вероятность безотказной работы системы при последовательном соединении не может быть выше вероятности безотказной работы самого ненадежного из ее элементов (принцип “хуже худшего”) и из малонадежных элементов нельзя создать высоконадежной системы с последовательным соединением.

Если все элементы системы работают в периоде нормальной эксплуатации и имеет место простейший поток отказов, наработки элементов и системы подчиняются экспоненциальному распределению

$$P = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right] = \exp(-\lambda t), \quad (7.4)$$

где

$$\lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i = const \quad (7.5)$$

есть интенсивность отказов системы. Таким образом, интенсивность отказов системы при последовательном соединении элементов и простейшем потоке отказов равна сумме интенсивностей отказов элементов.

Из (7.4) - (7.5) следует, что для системы из n равнонадёжных элементов ($\lambda_i = \lambda$)

$$\lambda_i = n\lambda, T_0 = \frac{T_{0i}}{n}, \quad (7.6)$$

т.е. интенсивность отказов в n раз больше, а средняя наработка в n раз меньше, чем у отдельного элемента.

7.2 Системы с параллельным соединением элементов

Системой с *параллельным соединением элементов* называется система, отказ которой происходит только в случае отказа всех ее элементов. Такие схемы надежности характерны для технических систем, в которых элементы дублируются или резервируются, т.е. параллельное соединение используется как метод повышения надежности. Однако такие системы встречаются и самостоятельно (например, системы двигателей четырехмоторного самолета или параллельное включение диодов в мощных выпрямителях).

Для отказа системы с параллельным соединением элементов в течение наработки t необходимо и достаточно, чтобы все ее элементы отказали в течение этой наработки. Так что отказ системы заключается в совместном отказе всех элементов, вероятность чего (при допущении независимости отказов) может быть найдена по теореме умножения вероятностей как произведение вероятностей отказа элементов:

$$Q = q_1 q_2 \dots q_n = \prod_{i=1}^n q_i = \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (7.7)$$

Соответственно, вероятность безотказной работы

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (7.8)$$

Для систем из равнонадежных элементов ($p_i = p$)

$$Q = q^n, \quad P = 1 - (1 - p)^n, \quad (7.9)$$

т.е. надежность системы с параллельным соединением повышается при увеличении числа элементов (например, при $p = 0.9$ и $n = 2$ $P = 0.99$, а при $n = 3$ $P = 0.999$).

Поскольку $q_i < 1$, произведение в правой части (7.7) всегда меньше любого из сомножителей, т.е. вероятность отказа системы не может быть выше вероятности самого надежного ее элемента (“лучше лучшего”) и даже из сравнительно ненадежных элементов возможно построение вполне надежной системы.

При экспоненциальном распределении наработки выражение (7.9) принимает вид

$$P = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n, \quad (7.10)$$

откуда после интегрирования и преобразований средняя наработка системы определяется

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = T_{0i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}, \quad (7.11)$$

где $T_{0i} = 1/\lambda_i$ - средняя наработка элемента. При больших значениях n справедлива приближенная формула

$$T_0 = T_{0i} \left(\ln n + \frac{1}{2n} + 0.577 \right). \quad (7.12)$$

Таким образом, средняя наработка системы с параллельным соединением больше средней наработки ее элементов (например, при $n = 2$ $T_0 = 1.5T_{0i}$, при $n = 3$ $T_0 = 1.83T_{0i}$).

7.3 Мостиковые схемы

Мостиковая структура (рис. 7.5, а, б) не сводится к параллельному или последовательному типу соединения элементов, а представляет собой параллельное соединение последовательных цепочек элементов с *диагональными* элементами, включенными между узлами различных параллельных ветвей. Работоспособность такой системы определяется не только количеством отказавших элементов, но и их положением в структурной схеме. Например, работоспособность ТС, схема которой приведена на рис. 7.5, а, будет утрачена при одновременном отказе элементов 1 и 2, или 4 и 5, или 2, 3 и 4 и т.д.. В то же время отказ элементов 1 и 5, или 2 и 4, или 1, 3 и 4, или 2, 3 и 5 к отказу системы не приводит.

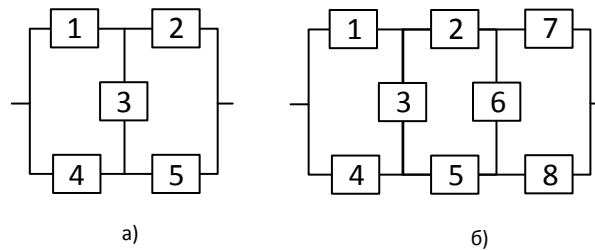


Рис.7.5 Мостиковые схемы

Таблица 7.1 Состояния мостиковой системы

N Сост	Состояние элементов					Состояние системы	Вероятность состояния	
							в общем случае	при равнонадежных элементах
1						+	$P_1P_2P_3P_4P_5$	p^5
2						+	$P_1P_2P_3P_4q_5$	$p^4q = p^4(1-p)$
3						+	$P_1P_2P_3q_4P_5$	
4						+	$P_1P_2q_3P_4P_5$	
5						+	$P_1q_2P_3P_4P_5$	
6						+	$q_1P_2P_3P_4P_5$	
7						-	$P_1P_2P_3q_4q_5$	$p^3q^2 = p^3(1-p)^2$
8						+	$P_1P_2q_3P_4q_5$	
9						+	$P_1q_2P_3P_4q_5$	
10						+	$q_1P_2P_3P_4q_5$	
11						+	$P_1P_2q_3q_4P_5$	
12						+	$P_1q_2P_3q_4P_5$	
13						+	$q_1P_2P_3q_4P_5$	

14						+	$p_1q_2q_3p_4p_5$	$p^2q^3 = p^2(1-p)^3$	
15						+	$q_1p_2q_3p_4p_5$		
16						-	$q_1q_2p_3p_4p_5$		
17						-	$p_1p_2q_3q_4q_5$		
18						-	$p_1q_2p_3q_4q_5$		
19						-	$q_1p_2p_3q_4q_5$		
20						-	$p_1q_2q_3q_4p_5$		
21						+	$q_1p_2q_3q_4p_5$		
22						-	$q_1q_2q_3p_4p_5$		
23						+	$p_1q_2q_3p_4p_5$		
24						-	$q_1p_2q_3p_4q_5$	$p q^4 = p (1-p)^4$	
25						-	$q_1q_2p_3q_4p_5$		
26						-	$q_1q_2p_3p_4q_5$		
27						-	$p_1q_2q_3q_4q_5$		
28						-	$q_1p_2q_3q_4q_5$		
29						-	$q_1q_2p_3q_4q_5$		
30						-	$q_1q_2q_3p_4q_5$		
31						-	$q_1q_2q_3q_4p_5$		
32						-	$q_1q_2q_3q_4q_5$		$q^5 = (1-p)^5$

Для расчета надежности мостиковых систем можно воспользоваться **методом прямого перебора**, как это было сделано для систем “m из n“, но при анализе работоспособности каждого состояния системы необходимо учитывать не только число отказавших элементов, но и их положение в схеме. Вероятность безотказной работы системы определяется как сумма вероятностей всех работоспособных состояний:

$$\begin{aligned}
 P = & p_1p_2p_3p_4p_5 + p_1p_2p_3p_4q_5 + p_1p_2p_3q_4p_5 + p_1p_2q_3p_4p_5 + \\
 & + p_1q_2p_3p_4p_5 + q_1p_2p_3p_4p_5 + p_1p_2q_3p_4q_5 + p_1q_2p_3p_4q_5 + \\
 & + q_1p_2p_3p_4q_5 + p_1p_2q_3q_4p_5 + p_1q_2p_3q_4p_5 + q_1p_2p_3q_4p_5 + \\
 & + p_1q_2q_3p_4p_5 + q_1p_2q_3p_4p_5 + q_1q_2q_3p_4p_5 + p_1q_2q_3p_4q_5.
 \end{aligned} \tag{7.13}$$

В случае равнонадёжных элементов

$$P = p^5 + 5p^4q + 8p^3q^2 + 2p^2q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2. \tag{7.14}$$

Метод прямого перебора эффективен только при малом количестве элементов n , поскольку число состояний системы составляет 2^n . Некоторое упрощение достигается, если в таблицу состояний включать только сочетания, отвечающие работоспособному (или только неработоспособному) состоянию системы в целом.

Для анализа надежности ТС, структурные схемы которых не сводятся к параллельному или последовательному типу, можно воспользоваться также *методом логических схем с применением алгебры логики* (булевой алгебры). Применение этого метода сводится к составлению для ТС формулы алгебры логики, которая определяет условие работоспособности системы. При этом для каждого элемента и системы в целом рассматриваются два противоположных события - отказ и сохранение работоспособности.

Для составления логической схемы можно воспользоваться двумя методами - минимальных путей и минимальных сечений.

Минимальным путем называется последовательный набор работоспособных элементов системы, который обеспечивает ее работоспособность, а отказ любого из них приводит к ее отказу.

Минимальных путей в системе может быть один или несколько. Очевидно, система с последовательным соединением элементов имеет только один минимальный путь, включающий все элементы. В системе с параллельным соединением число минимальных путей совпадает с числом элементов и каждый путь включает один из них.

Для расчета верхней границы вероятности безотказной работы системы служит *метод минимальных сечений*.

Минимальным сечением называется набор неработоспособных элементов, отказ которых приводит к отказу системы, а восстановление работоспособности любого из них - к восстановлению работоспособности системы. Как и минимальных путей, минимальных сечений может быть несколько. Очевидно, система с параллельным соединением элементов имеет только одно минимальное сечение,

включающее все ее элементы (восстановление любого восстановит работоспособность системы). В системе с последовательным соединением элементов число минимальных путей совпадает с числом элементов, и каждое сечение включает один из них. Логические схемы мостиковой системы методами минимальных путей и минимальных сечений представлены на рис. 7.6, 7.7.

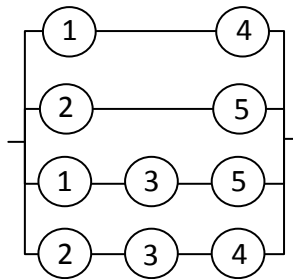


Рисунок 7.6 Логическая схема мостиковой системы по методу минимальных путей

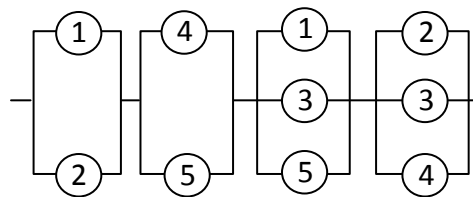


Рис. 7.7 Логическая схема мостиковой системы по методу минимальных сечений

8 ПОСЛЕДСТВИЯ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ПО МЕТОДУ ПРИВЕДЕННЫХ ЗАТРАТ

Недоотпуск электроэнергии объясняется перерывами и ограничениями в электропотреблении. Размер убытков определяет надёжность схемы электрической сети.

Исходные данные для анализа надёжности схем электрической сети:

- показатели надёжности и плановых ремонтов её элементов;
- характеристики нагрузки и источников питания;
- расчётная схема сети.

При анализе учитываются следующие показатели надёжности и плановых ремонтов:

- T_B – время вынужденного простоя (восстановление, средняя продолжительность аварийного ремонта, год/отказ);
- ω_B – параметр потока вынужденных отказов (средняя частота отказа), отказ/год;
- $K_B = \omega_B T_B$ – коэффициент вынужденного простоя (коэффициент восстановления);
- ω_n – средняя частота плановых ремонтов, простой/год;
- T_n – средняя длительность планового ремонта (простоя), год/простой;
- $K_n = \omega_n T_n$ – коэффициент планового простоя.

К характеристикам источников питания относятся:

- установленная мощность электростанции;
- резерв мощности ЭС, который может быть передан в сеть через районную подстанцию.

Как было отмечено, недоотпуск электроэнергии возникает при ограничениях и перерывах ($\varepsilon=1$) в электропотреблении потребителей. Со всех видов

ограничения потребления будем учитывать только ограничения при разделе источников питания. Этот вид ограничений – наиболее типичен для разрабатываемых в проекте простой структуры схем сети, запитанных от двух источников.

Перерывы электроснабжения. Рассматривается каждый потребитель по формуле:

$$Y_i = Y_{ei} + Y_{ni}, \quad (8.1)$$

где Y_{ei} – ущерб потребителей от простоя в результате аварии,

Y_{ni} – ущерб от простоя при плановых ремонтах.

При полном ограничении питания потребителей имеем:

$$Y_i = P_{\max} (\alpha_{\varepsilon=1} K_{ei} + \beta_{\varepsilon=1} K_{ni}), \quad (8.2)$$

где K_{ei} – коэф.вынужденного простоя, $K_{Bi} = \omega_B T_B$;

K_{ni} – коэф.планового простоя, $K_{ni} = \omega_n T_n$;

P_{\max} – максимум нагрузки i -го потребителя.

В случае частичного ограничения питания потребителей ущерб составит величину:

$$Y_i = P_{\max} (\alpha \varepsilon_{\delta} K_{ei} + \beta \varepsilon_n K_{ni}), \quad (8.3)$$

$$\varepsilon_B = P_{\varepsilon.отк} / P_{\max}; \quad \varepsilon_{II} = P_{n.отк} / P_{\max};$$

α – дельный ущерб от аварийных отключений питания потребителя;

β – удельный ущерб от плановых отключений питания;

$P_{n.отк}, P_{\varepsilon.отк}$ – отключаемая часть нагрузки на время восстановления аварийных повреждений или плановых ремонтах сети.

Ущерб от недоотпуска электроэнергии по сети равняется сумме ущербов всех “ n ” потребителей.

Показатели надёжности K_{ei}, K_{ni} рассчитываются на основе преобразования расчётной схемы надёжности i -го потребителя. В схеме надёжности каждая линия отображается блоком и задаётся показателями T_B, K_n, ω_n . Учитываются только

те линии, которые связывают данный потребитель с источниками питания. Источники питания считаются бесконечной мощности и закорачиваются в одном узле.

Двухцепные линии 35-220 кВ замещаются тремя блоками. Два параллельных блока учитывают отказы отдельных линий и задаются показателями $T'_B, T_n, \omega'_B, \omega_n$. Последовательный блок учитывает одновременно отказ двух линий и задаётся показателями ω_B'', T_B'' .

Преобразования (упрощения) расчётных схем выполняются на основе эквивалентирования (расчёта эквивалентных показателей надёжности) последовательно и параллельно соединяемых блоков. Процесс преобразований схемы сводится к получению результирующего блока, показатели надёжности и плановых ремонтов которого совпадают с показателями надёжности электроснабжения потребителя, для которого составлялась схема. Эти показатели используются для определения ущербов по формуле. Параллельно соединённые элементы сети обеспечивают высокую степень надёжности и в ряде случаев могут не учитывать при определении ущерба от недоотпуска энергии.

Оптимальность технического решения, выбранного при проектировании и эксплуатации системы электроснабжения означает, что заданный производственный эффект (располагаемая мощность, отпускаемая энергия, уровень надёжности и качества) получается с минимальными возможными затратами материальных и трудовых ресурсов.

При определении оптимального варианта из некоторого числа возможных, обеспечивающих выполнение технического задания, необходимо вычислить приведенные затраты на сооружение и эксплуатацию энергетического объекта.

В зависимости от длительности сооружения и условий поочередного ввода приведенные затраты исчисляются по-разному.

Если строительство и пуск в эксплуатацию осуществляются в течение года, то

$$Z = E_n K + I, \quad (8.4)$$

где E_n – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений K ,
в энергетике $E=0,12$;

I – издержки эксплуатации.

Если объект строится на протяжении T лет, то

$$Z = \sum_{t=1}^T E_n K_t (1 + E_{n,n})^{\tau-t} + I, \quad (8.5)$$

где E_n – нормативный коэффициент приведения разновременных затрат, определяемый финансовой политикой государства для каждой отрасли народного хозяйства (в энергетике $E_{ПП} = 0,08$);

K_t – капиталовложения в t -м году;

τ - год приведения затрат, который может быть любым, но одним и тем же для всех сравниваемых вариантов (чаще всего приводят затраты к первому году окончания строительства и даже более позднему сроку).

Если в период многолетнего строительства частично эксплуатируются вновь созданные основные фонды, а это происходит при развитии энергосистем и объединений, то

$$Z = \sum_{t=1}^T (E_n K_t + \delta I_t + \delta V_t) (1 + E_{n,n})^{\tau-e}, \quad (8.6)$$

где δI_t – приращение издержек в году t по сравнению с годом $t-1$.

Оптимальным вариантом считается тот, у которого приведенные затраты, определяемые по формулам (9.4)...(9.6), минимальны.

Сравниваемые варианты по ряду причин обладают неодинаковой степенью надежности. Несоблюдение условия одинаковой надежности или качества в сравниваемых вариантах приводит к нарушению основного требования – равенства производственного и народнохозяйственного эффекта.

При сравнении вариантов с неодинаковой надежностью требуется вводить в расчётные формулы члены, учитывающие возможный народнохозяйственный ущерб от отказов оборудования и установок, или члены, учитывающие затраты на повышение надежности до нормативного уровня.

Затраты, обусловленные аварийным (и запланированным) перерывом электроснабжения, можно рассматривать как средние дополнительные помимо основных затрат на сооружение объекта и его нормальную эксплуатацию. Расчётные формулы (9.4)...(9.6) примут вид:

$$Z = E_n K + I + Y; \quad (8.7)$$

$$Z = \sum_{t=1}^T E_n K_t (1 + E_{n,n})^{t-1} + I + Y; \quad (8.8)$$

$$Z = \sum_{t=1}^T (E_n K_t + \delta I_t + \delta Y_t) - (1 + E_{n,n})^{t-1}, \quad (8.9)$$

где Y и δY_t – средний годовой народнохозяйственный ущерб на стадии нормальной эксплуатации и приращение ущерба в t -м году;

$$\delta Y_t = Y_t - Y_{t-1}; \quad \delta I_t = I_t - I_{t-1}.$$

Средний ущерб можно рассчитать по формулам, в которых используется удельная оценка ущерба. Оценка удельного ущерба получается в результате обработки фактических данных о последствиях большого числа аварий, экономический ущерб от которых определяется.

Экономический ущерб является лишь частью народно-хозяйственного ущерба, который может иметь еще социальные и экологические составляющие, не оцениваемые в денежном выражении. Экономический ущерб складывается из ущерба потребителей и ущерба (потери и затраты) энергоснабжающей организации. Причины экономического ущерба: простой, недоиспользование, непроизводительный расход или уничтожение ресурсов, снижение качества продукции, перерасход элементов производства. Экономический ущерб подразделяется на основной, дополнительный, прямой и косвенный.

Составляющие экономического ущерба:

- затраты на аварийный ремонт (восстановление) оборудования или потери, связанные с его недоамортизацией из-за досрочной ликвидации;
- стоимость дополнительных потерь электроэнергии в сети из-за отклонения электрического режима от оптимального;
- стоимость топлива, расходуемого на пуск энергоблоков, растопку котлоагрегатов и поддержание горения в топках во время аварийной разгрузки или останова агрегатов электростанций;
- затраты на демонтаж и транспортировку оборудования при отправке на ремонтный завод или завод изготовитель;
- дополнительные затраты на выработку электроэнергии на замещающих агрегатах;
- затраты на содержание резервного оборудования;
- потери, связанные с простоем оборудования и обслуживающего персонала, при аварийном отключении потребителей;
- ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям при отключении с предупреждением во время прохождения максимума;
- ущерб от внезапного отключения потребителей и недоотпуска энергии за время восстановления электроснабжения.

Оценки удельного ущерба y_n (в сумах на перерыв электроснабжения) и $y_{\text{ч}}$ (в сумах на час перерыва), полученные на основе оценок фактического экономического ущерба, позволяют рассчитать народнохозяйственный ущерб при проектировании систем электроснабжения:

$$Y = \sum_{r=1}^{N_r} \sum_{i=1}^{N_i} \Lambda(i, r) [y_n], \quad (8.10)$$

$$Y = (1) + 8760 y_{\text{ч}}(l) \tau(i, r),$$

где $\tau(i, r)$ - среднее время восстановления питания 1-го потребителя при R-й аварии;

N_i - число потребителей;

$\Lambda(i, r)$ - частота аварий с погашением 1-го потребителя.

При рассмотрении установок системы электроснабжения народнохозяйственный ущерб определяется с помощью оценки удельного ущерба $Y_R(\Delta W)$ от недоотпуска энергии и прироста приведенных затрат ΔC_p на 1кВт.ч энергии, выработанной на резервных станциях:

$$Y = \sum_{R=1}^N [y_k(\Delta W)\Delta W_{cR} + \Delta C_p(\Delta W_{cR})], \quad (8.11)$$

где ΔW_{CT} – недоотпуск энергии в системе и снижение выработки энергии станцией.

Похожие оценки величины $Y_R(\Delta W)$ получаются по формулам. При плановом ограничении потребителей в часы максимума нагрузки:

$$Y_R\Delta W = 0,1;$$

при кратковременном отключении с предупреждением, а также при снижении частоты без отключения

$$Y_R\Delta W = 0,3;$$

при внезапном автоматическом отключении от частотных устройств противоаварийной автоматики

$$Y_R\Delta W = 0,5 + 5\Delta P';$$

где $\Delta P'$ – отношение аварийного снижения нагрузки потребителей к номинальной мощности нагрузки энергосистемы;

при внезапном автоматическом отключении для предотвращения нарушений устойчивости

$$Y_R\Delta W = 1 + 10\Delta P'.$$

Вопросы для самоконтроля

1. В чем сущность экономического критерия принятия решения по надежности?
2. В результате каких процессов возникает ущерб от ненадежности?
3. Чем отличается прямой ущерб от дополнительного?

4. Почему отключения потребителей с предварительным предупреждением могут снизить величину народнохозяйственного ущерба?
5. Какими факторами обусловлен экологический ущерб вследствие отказов систем электроснабжения?
6. Перечислите составляющие экономического ущерба.
7. Как рассчитать народнохозяйственный ущерб при проектировании систем электроснабжения на основе известных данных по удельным ущербам?

9 СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Надёжность (как свойство технического объекта выполнять заданные функции в заданном объёме при определённых условиях) зависит от большого количества факторов случайного и неслучайного характера. Средства и методы изменения количественных характеристик этого свойства ЭЭС отличаются многообразием. На практике, особенно при эксплуатации электрических станций, сетей и ЭЭС как технических систем обычно ставится задача изменения показателей надёжности в сторону повышения её уровня.

Основной метод повышения надёжности электрических станций и ЭЭС – выявление наиболее ненадёжных («узких») частей системы передачи и распределения электроэнергии и изменение уровня надёжности в результате введения различных форм избыточности:

- Резервирования.
- Совершенствования конструкций и материалов.
- Квалифицированное и своевременное проведение ремонтов электрооборудования.
- Техническое обслуживание.
- Контроля и управления процессами
- Защиты и автоматизации.

Повышение надёжности электроэнергетических систем и распределительных сетей направлено на создание:

- рациональных схем электрических соединений (схем распредустройств подстанций и электростанций);
- оптимальное насыщение сети автоматическими устройствами и устройствами АВР;
- насыщение сети неавтоматическими коммутационными аппаратами;

- установки регулирующих и компенсирующих реактивную мощность устройств у потребителей, препятствующих снижению напряжения в послеаварийных состояниях;
- оборудования подстанций устройствами телеизмерения и телемеханизации;
- автоматизации на базе ЭВМ оперативных переключений в сложных сетях;
- совершенствование релейной защиты и автоматики (уменьшение зон нечувствительности);
- увеличение логических возможностей автоматики и релейной защиты в результате использования микропроцессорной техники и т.д.

В воздушных и кабельных сетях повышают надёжность следующими средствами:

- введение устройств поиска повреждений;
- сокращение продолжительности аварийных ремонтов;
- внедрение ремонтов под напряжением;
- обеспечением ремонтных баз запасными частями электроустановок и транспортом;
- оптимизацией профилактических ремонтов, осмотров, замен износившихся частей;
- автоматизацией установок, компенсирующих токи однофазных замыканий в сетях с изолированной нейтралью (6-35 кВ).

Все мероприятия и средства повышения надёжности в ЭЭС, за исключением совершенствования релейной защиты и автоматики, требуют значительных материальных и трудовых затрат. Поэтому, большое значение имеет совершенствование схем электрических станций и электроэнергетических систем.

При создании рациональных и надёжных схем сетей ЭЭС следует стремиться по возможности к сокращению числа трансформаций электроэнергии,

распределению функций отказавшего элемента не на один, а на несколько элементов, в том числе и частично на сети более низких напряжений, снижению чрезмерного насыщения сетей автоматической коммутационной аппаратурой, так как сами аппараты могут быть источником аварий.

Для этого применяется комплекс средств повышения устойчивости режимов работы ЭС.

- Улучшение характеристик основных элементов ЭС с помощью конструктивных изменений. В частности, улучшение параметров генераторов, т.е. снижение X_d , X'_d , увеличение T_j , повышение потолка возбуждения и быстродействия возбuditелей, снижения индуктивного сопротивления ЛЭП путём расщепления проводов, уменьшение времени действия релейной защиты и выключателей и т.п.
- Улучшение характеристик основных элементов ЭС средствами автоматизации. Это применения АРВ, в частности АРВ сильного действия с форсировкой возбуждения при глубоких посадках напряжения, АПВ трёхфазного и по фазного, быстродействующих защит, регулирования первичных двигателей и т.п.
- Дополнительные средства повышения устойчивости – продольная ёмкостная компенсация, переключательные пункты на ЛЭП, электрическое торможение, синхронные компенсаторы с АРВ сильного действия, поперечные регулируемые реакторы или компенсаторы и т.п.
- Мероприятия эксплуатационного характера – выбор схемы соединений, обеспечивающей наиболее устойчивость; регулирование или ограничение перетока мощности по межсистемным связям; отключения части генераторов или экстренная нагрузка турбин; форсирование продольной ёмкостной компенсации; отключение поперечных реакторов; отключение части нагрузки; деление систем на не синхронно работающие районы; предотвращение нарушения устойчивости и т.п.

Из названных средств, средства автоматизации и мероприятия эксплуатационного характера требуют меньших затрат и широко используются. Надёжность режимов работы ЭС обеспечивается иерархической (в структурном и временном разрезах) системой противоаварийной режимной автоматики:

- Устройство автоматического ограничения (регулирования) перетоков мощности (АОПМ) по межсистемным ЛЭП.
- Устройства автоматического управления мощностью для сохранения устойчивости АУМСУ).
- Устройства автоматического прекращения(предотвращения) асинхронного хода АПАХ).
- Автоматическая частотная разгрузка (АЧР).
- Автоматический частотный пуск гидрогенераторов(АЧП) для быстрой ликвидации аварии.
- Частотное автоматическое, повторное включения (ЧАПВ) потребителей.

АОПМ служит для предотвращения нарушения статистической устойчивости при относительно медленном изменении перетока мощности, вызванного ошибкой прогнозирования графиков нагрузки ЭС небольшими небалансами мощности из-за отключения генераторов или нерегулярных колебаний нагрузки. Автоматика контролирует перетоки мощности по отдельным связям. При достижении заданной величины (уставки) увеличивает или уменьшает нагрузки выделенных станций.

АУМСУ обеспечивает динамическую устойчивость при больших возмущениях режима (к.з., потеря генерирующей мощности) и статистическую устойчивость после аварийного режима АУМСУ охватывает район противоаварийного управления (например, схему выдачи мощности станции(ий)). АУМСУ работают по программному принципу:

- контроль до аварийной схемы и режима,
- получение и оценка информации по возмущению на основе расчёта устойчивости,
- выдача управляющих команд АУМСУ воздействует на отключение генераторов, разгрузку турбин, отключение потребителей (САОН), деление ЭС. Сочетание этих средств подбирается с учётом U_{\min} у потребителей от недоотпуска электроэнергии. АУМСУ не рассчитаны на устранение каскадных аварий.

АПАХ отделяют выпавшие из синхронизма части ЭС, т.е. локализуют аварию. В отделившихся частях – дефицит мощности, действует АЧР, сохраняя питание ответственных потребителей.

Возможны два подхода к выбору средств и проведению мероприятий изменения уровня надежности:

1. Ранжирование всех намечаемых мероприятий в соответствии со значениями затрат по уравнению (9.7) и отбор только тех из них, которые удовлетворяют условию минимума целевой функции. Так как перечисленные средства повышения надежности обычно применяют комплексно, то существует многообразие вариантов их реализации, поэтому однозначное выполнение условия (9.7), в особенности для систем электроснабжения сложных конфигураций с сетями разных номинальных напряжений, представляет собой сложную научно-техническую задачу, требующую для решения применения методов многокритериальной (векторной) оптимизации.

В практических расчетах обычно намечаются альтернативные варианты схем систем электроснабжения с различной степенью резервирования потребителей и выбирается вариант, соответствующий минимуму приведенных затрат с учетом ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям.

Этот прием обычно применяется при проектировании систем электроснабжения.

2. Отбор и ранжирование только тех мероприятий повышения надежности, затраты на которые увеличивают затраты базового варианта не более чем на некоторую относительно малую величину δZ (например, не более чем на 5%). В этом подходе также не исключается применение комплекса мероприятий, поэтому число вариантов может быть велико, но задача решается несколько проще по сравнению с первым подходом. Меняя значение δZ , можно создавать схемы систем электроснабжения, обеспечивающие заданный уровень надежности электроснабжения. Этот подход целесообразен при эксплуатации систем электроснабжения.

Как первый, так и второй подход в качестве неотъемлемой составной части алгоритма принятия решений предусматривает необходимость количественной оценки показателей надежности из множества вариантов, методы получения которых были изложены ранее.

Вопросы для самоконтроля

1. С какой целью электроприемники в электрических системах подразделяются на категории по надежности?
2. Что является критерием для отнесения электроприемника к той или иной категории?
3. Какой основной прием используется для повышения надежности сложных многоэлементных схем?
4. Перечислите капиталоемкие и малозатратные мероприятия повышения надежности.
5. Назовите основные средства повышения надежности распределительных сетей.
6. В чем особенности повышения надежности электроснабжения промышленных сетей?
7. Какие два взаимодополняющих подхода существуют для выбора мероприятий повышения надежности?
8. Каким образом введение дифференциального тарифа на электроэнергию в зависимости от уровня надежности электроснабжения создало бы условия оптимизации уровня надежности?

10 РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (УСТРОЙСТВА)

10.1. Методика расчета надежности

Последовательность расчета надежности исследуемой технической системы (устройства) целесообразно проводить в следующем порядке.

1. Формулируется понятие отказа.

В сложных системах имеются элементы, выход из строя которых не приводит к отказу системы, а лишь ухудшает некоторые параметры (точность, качество переходного процесса и т.п.). Поэтому следует, во-первых, определить, что следует понимать под отказом в данной системе, а во-вторых, выбрать то число элементов, которое должно быть учтено при расчете надежности всего изделия.

2. Составляется схема надежности.

В некоторых технических системах не все элементы работают в течение времени работы всей системы. Это должно быть учтено выделением их в отдельные группы самостоятельного расчета с указанием времени их работы. При этом целесообразно составлять схему расчета надежности таким образом, чтобы элементами расчета были конструктивно оформленные блоки.

3. Определяются интенсивности отказов элементов по соответствующим таблицам или графикам. Если в течение работы системы отдельные элементы имеют не постоянную интенсивность отказов, но существуют четко выраженные временные интервалы, в течение которых интенсивность отказов практически постоянна, то для расчета надежности используется *эквивалентная интенсивность отказов*, которая определяется по выражению:

$$\lambda_{\text{экс}} = (\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2 + \lambda_3 t_3 + \dots) / t,$$

где λ_i , t_i – интенсивность отказов в соответствующий временной интервал;
 t – суммарное время работы данного элемента.

4. Составляется таблица расчета интенсивности отказов изделия.

В таблицу вносятся значения интенсивностей отказов всех элементов системы и при необходимости значения поправочных коэффициентов (для уточняющего расчета). Таблица также должна содержать графы, куда заносятся рассчитанные значения интенсивностей отказов идентичных элементов.

5. Рассчитываются количественные характеристики надежности.

Данные расчета заносятся в итоговые таблицы и приводятся в виде графиков. По результатам расчета составляется технический отчет, который должен содержать:

- структурную схему надежности системы с необходимыми пояснениями;
- формулировку понятия отказа системы;
- расчетные формулы для количественных характеристик надежности;
- пример расчета, итоговые таблицы и графики;
- выводы и рекомендации.

10.2. Типовые примеры расчета надежности технической системы

При расчете надежности полагают, что число элементов каждого типа и интенсивности отказов элементов λ_i данного типа известны. Режим работы элементов принимают номинальным. При этом в расчет принимаются только те элементы, при отказе которых система выходит из строя. Значения λ_i берутся из статистических таблиц интенсивностей отказов элементов технических систем.

В таблице студенту необходимо привести состав основных конструктивных элементов исследуемой технической системы (устройства) и их количество. В качестве примера приведены таблицы 10.1 (устройства) и 10.2 (системы).

Таблица 10.1 – Интенсивность отказов деталей синхронного электродвигателя

№ п/п	Наименование детали	Количество, деталей, N	Интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}, ч^{-1}$	$N \cdot \lambda \cdot 10^{-6}, ч^{-1}$
1	Подшипники	2	0,5	1
2	Обмотка	3	0,5	1,5
3	Статор	1	1	1
4	Ротор	1	0,4	0,4

5	Корпус	1	0,02	0,02
6	Вывода обмотки	1	0,3	0,3
7	Изоляция	1	1,4	1,4
8	Контактные кольца	2	1,2	2,4
9	Жалюзи	4	0,2	0,8
10	Пусковая обмотка	1	0,02	0,02
11	Нажимная шайба	2	0,1	0,2
12	Диффузор	1	0,2	0,2
14	Вентилятор	2	0,3	0,6
15	Станина	1	1,3	1,3
$\sum \lambda$				$11,14 \cdot 10^{-6}$

Таблица 10.2 – Интенсивность отказов деталей печатной платы

№ п/п	Наименование детали	Количество, деталей, N	Интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}, ч^{-1}$	$N \cdot \lambda \cdot 10^{-6}, ч^{-1}$
1	Микросхемы	5	0,02	0,1
2	Реле	4	0,25	1
3	Трансформаторы	1	0,17	0,17
4	Разъемы	5	0,01	0,05
5	Резисторы	7	0,016	0,112
6	Конденсаторы	10	0,1	1
$\sum \lambda$				2,432

Расчет надежности разрабатываемого устройства осуществляется по формуле:

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

где t – время эксплуатации, принимаем: 100, 300, 500, 1000, 2500, 5000 часов,

λ – интенсивность отказов.

Вероятность безотказной работы устройства за время t представлена в табл. 10.3.

Таблица 10.3 – Вероятность безотказной работы

Время, t	Вероятность безотказной работы, $P(t)$
100	0,998
300	0,996
500	0,994
1000	0,988
2500	0,971

5000	0,944
------	-------

По полученным значениям строим график зависимости вероятности безотказной работы от времени (рис. 10.1).

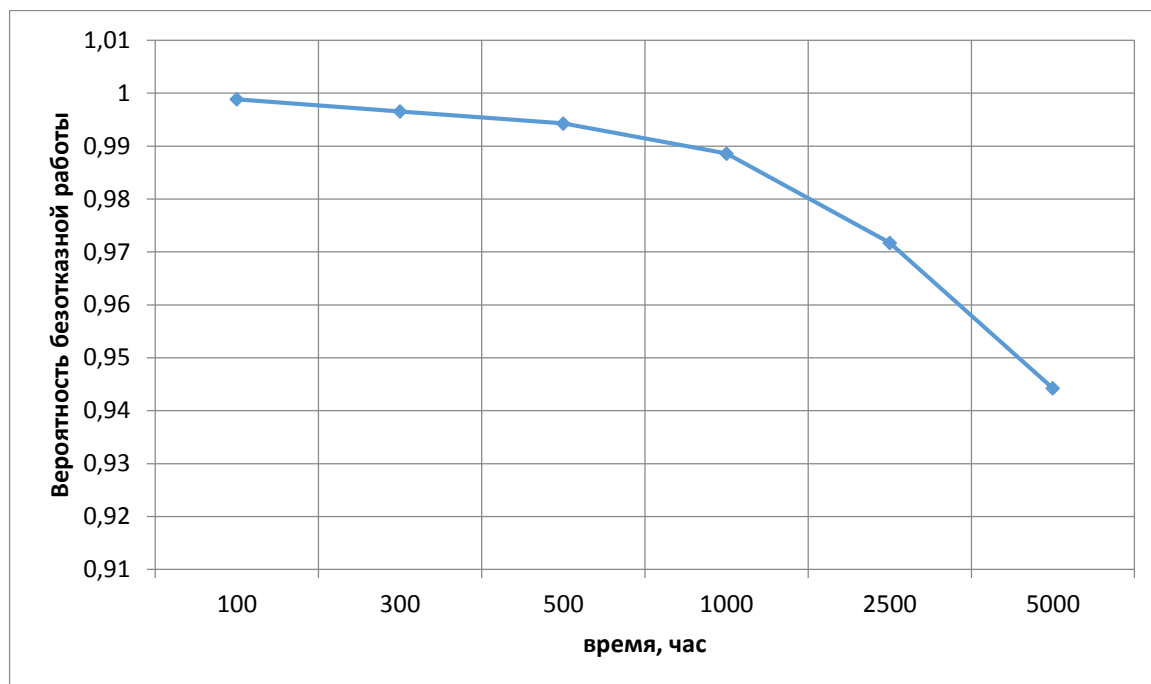


Рисунок 10.1 – Зависимость вероятности безотказной работы от времени

Время безотказной работы:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{1}{11,14 \cdot 10^{-6}} = 89766 \text{ ч.}$$

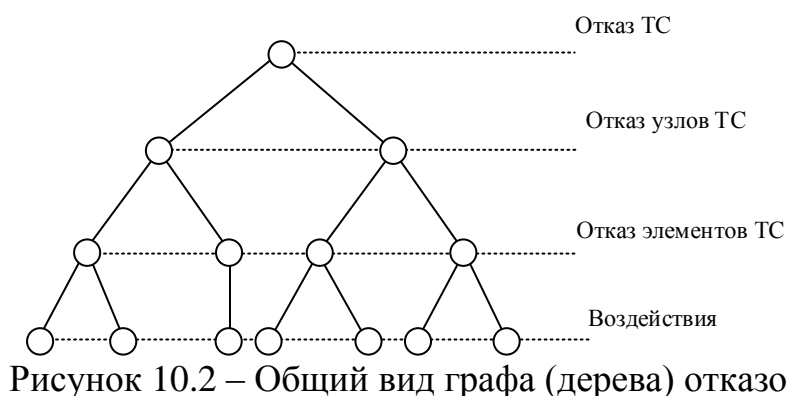
Следовательно, срок безотказной работы двигателя составляет приблизительно 10 лет.

Приводится вывод, насколько расчетное время безотказной работы исследуемого устройства соответствует значениям, указанным в нормируемых технических параметрах.

10.3. Применение теории графов к анализу и расчету надежности технической системы

После того, как рассчитаны показатели надежности, ставится задача определения причин отказов и выработки мероприятий для увеличения срока службы. Решению этих задач помогает построение *графов (деревьев) отказов и событий*, приводящих систему в состояние отказа. В ряде случаев возможно с помощью графов оценить вероятность безотказной работы системы.

Дерево отказов позволяет проследить причинно-следственные связи между отказом системы, отказами ее элементов и воздействиями, приводящими к отказам (см рис. 10.2).



Дерево отказов позволяет наглядно показать ненадежные компоненты системы, выполнить качественный и количественный анализ надежности. Особенно важно, что у разработчиков и пользователей системы появляется возможность наглядного обоснования конструктивных изменений, направленных на повышение ее надежности.

При изображении дерева отказов используют логические символы И, ИЛИ, исключающее ИЛИ, приоритетное И, НЕ и др.

Пример.

Пусть имеется система электроснабжения, состоящая из двух генераторов – основного (ОГ) и резервного (РГ), и автоматического переключателя (АП), обеспечивающего включение резервного источника при отказе основного (рис. .3). Дерево отказов с учетом логической связи между элементами системы приведено на рис. 10.4.

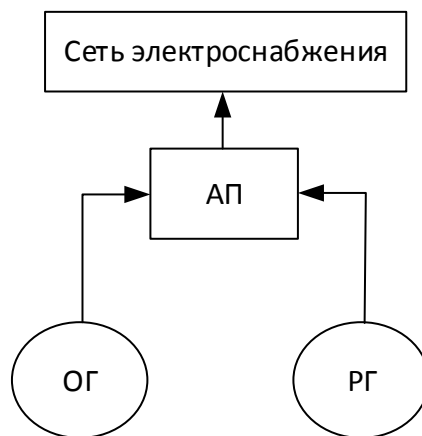


Рисунок 10.3 – Структура системы электроснабжения

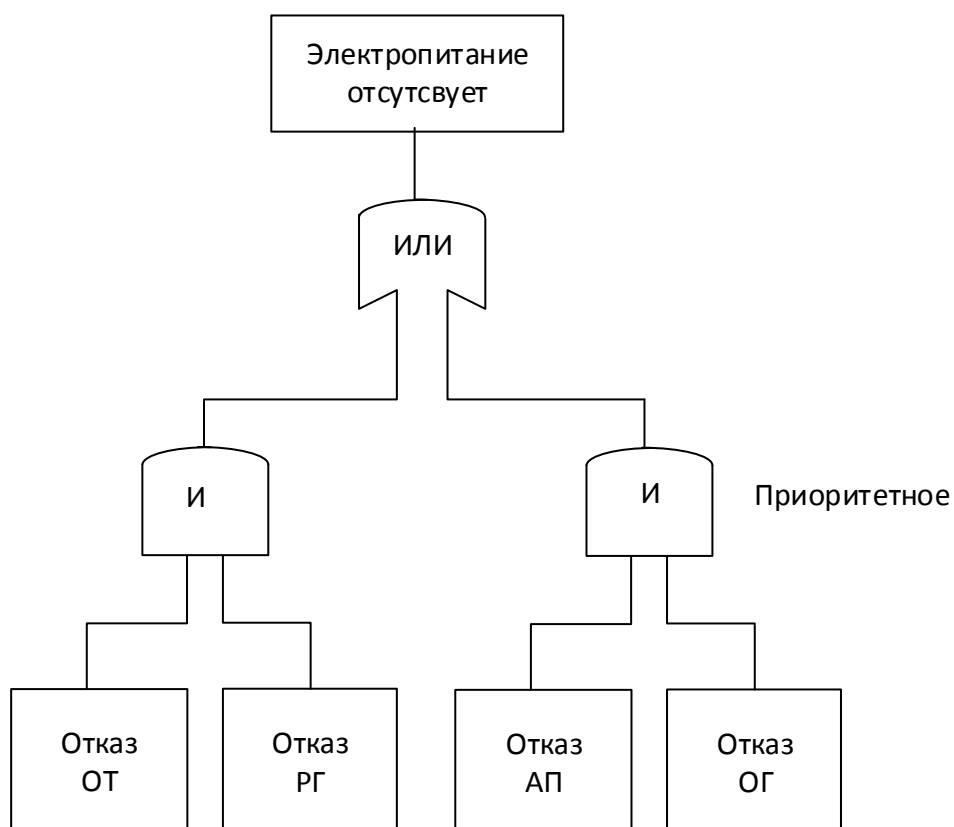


Рисунок 10.4 – Дерево отказов технической системы.

Граф (рис. 10.4) показывает, что электропитание отсутствует, если отказывают оба генератора или отказывают вначале автоматический переключатель, затем основной источник.

Таким образом, принцип построения дерева отказов заключается в анализе отказного состояния системы «сверху вниз»; другими словами – в последовательных ответах на вопрос: по каким причинам может произойти отказ системы.

Деревья строятся для любых видов отказов: первичных, вторичных и инициированных.

Отказ элемента называют *первичным*, если он происходит в допустимых условиях эксплуатации системы. В этом случае дерево отказов развивается вверх до той точки, где первичные отказы элементов вызывают отказ системы. В качестве иллюстрации сказанного рассмотрим пример построения дерева отказов для электрической схемы рис. 10.5. В рассматриваемой схеме могут иметь место первичные отказы (отказ каждого элемента). Для данной схемы дерево отказов имеет вид, представленный на рис. 10.6.

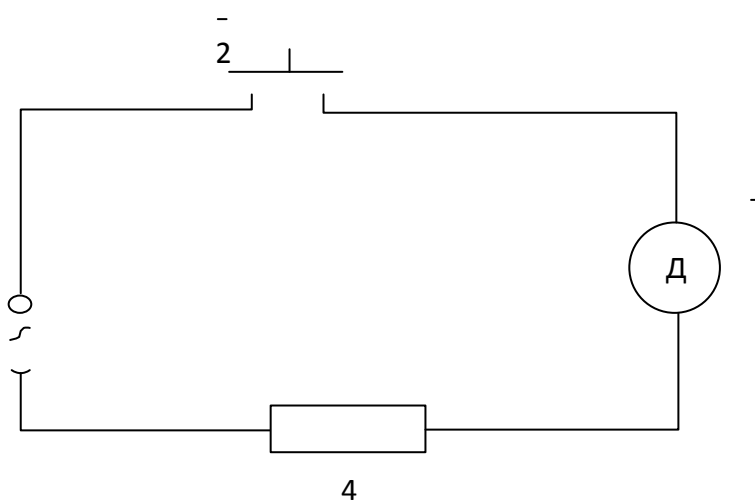


Рисунок 10.5 – Схема включения электродвигателя:
1 – сеть; 2 – выключатель; 3 – двигатель; 4 – предохранитель

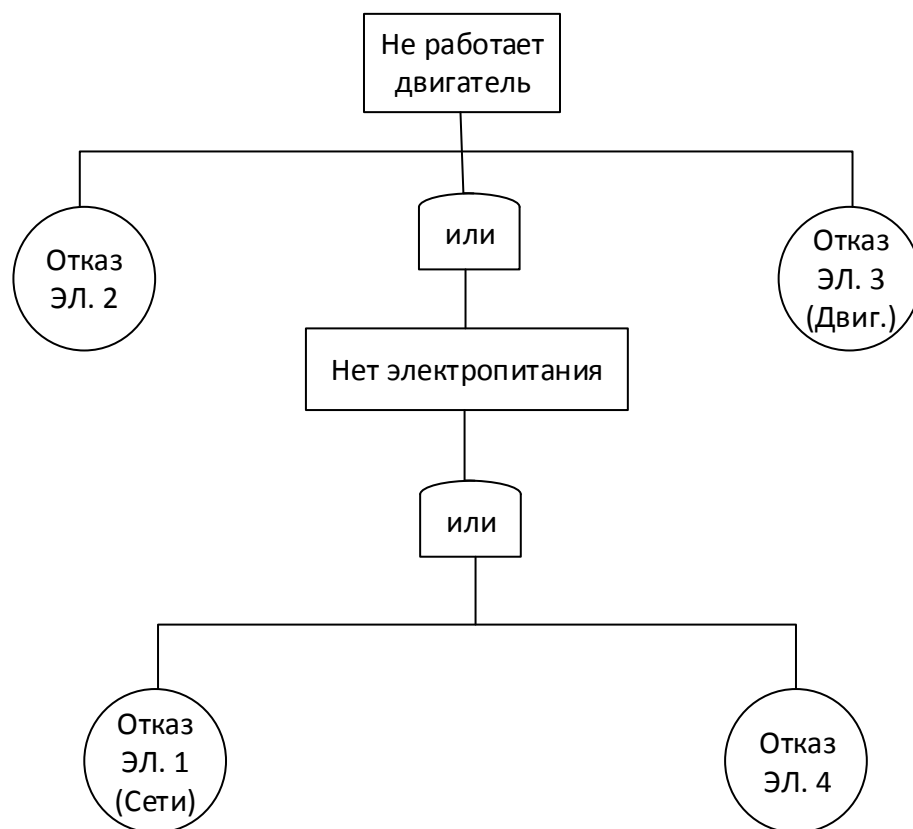


Рисунок 10.6 – Дерево отказов электрической схемы (рис. 6.4)

Вторичные отказы вызываются неблагоприятным воздействием внешних факторов или недопустимыми нагрузками элементов в процессе эксплуатации системы. На рис. 10.7 показано дерево отказов для схемы рис. 10.5 в случае, когда имеют место как первичные, так и вторичные отказы.

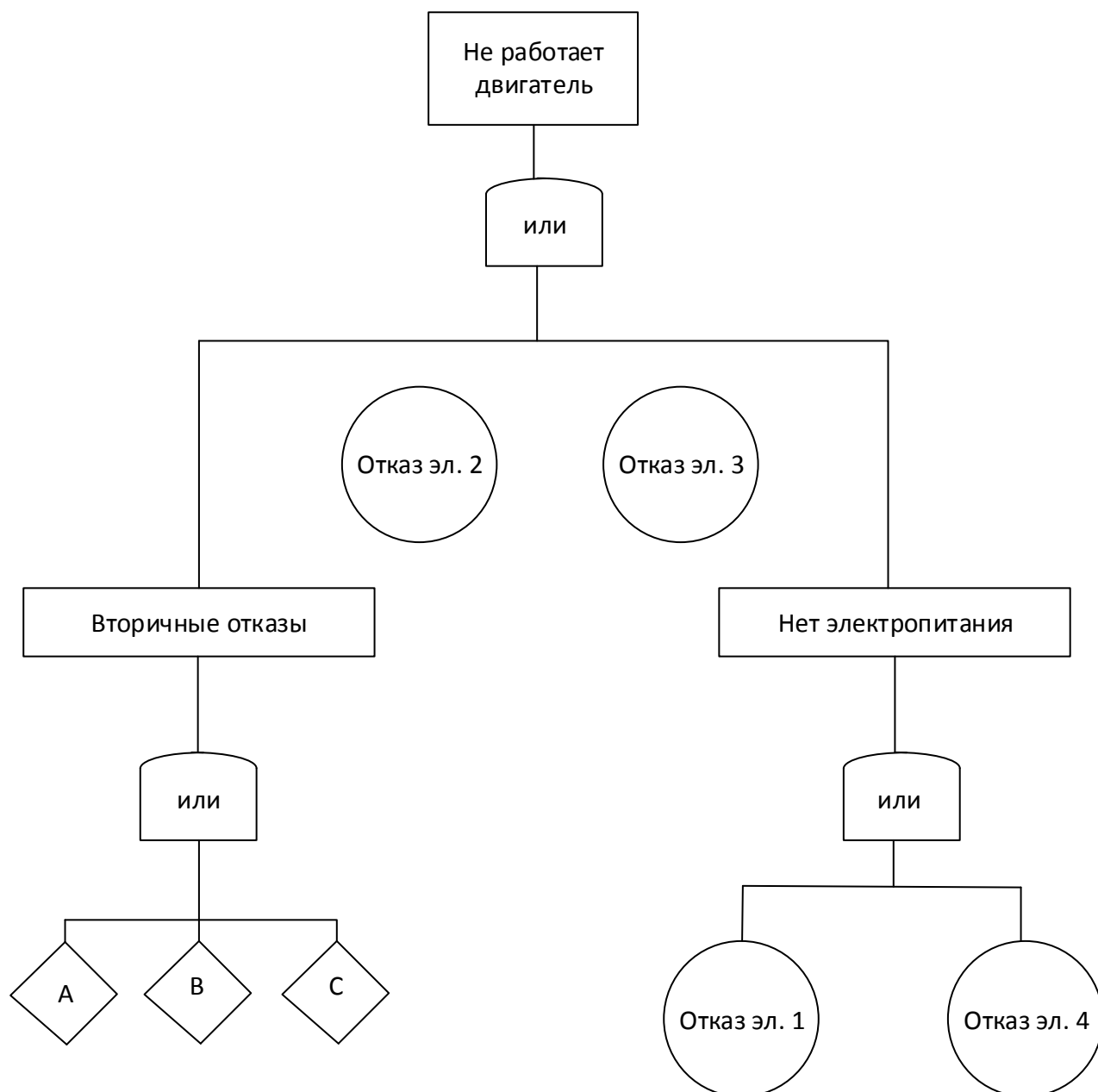


Рисунок 10.7 – Дерево первичных и вторичных отказов:

А – неправильное техническое обслуживание двигателя (отсутствие смазки подшипников), В – неправильная эксплуатация двигателя (переработка по времени двигателя, рассчитанного на повторно-кратковременный режим, перегрузка двигателя по моменту, приводящая к повышению тока сверх допустимого и к срабатыванию предохранителя), С – воздействие окружающей среды (повышенная влажность воздуха, повлекшая окисление контактов включателя)

Инициированные отказы возникают при ошибках оператора. Типичными примерами являются не приведение в действие устройств управления (выключателей) или приведение их в действие в ненадлежащем порядке.

Дерево событий дает представление о всех возможных режимах системы – рабочих и отказных – с возможностью вычисления вероятностей этих режимов.

Задавшись фиксированным значением времени наблюдения определяем вероятность безотказной работы каждого элемента. Рассмотрим порядок построения дерева событий для электрической схемы (рис. 6.4).

Вероятности работоспособных состояний и отказов элементов схемы сведены в табл. 10.4. Дерево событий показано на рис. 6.7.

Таблица 10.4 – Данные надежности элементов исходной схемы

Элемент	Вероятность работоспособного состояния P	Вероятность отказа $Q = 1 - P$
Электродвигатель	0.97	0.03
Выключатель	0.95	0.05
Предохранитель	0.98	0.02
Сеть	0.99	0.01

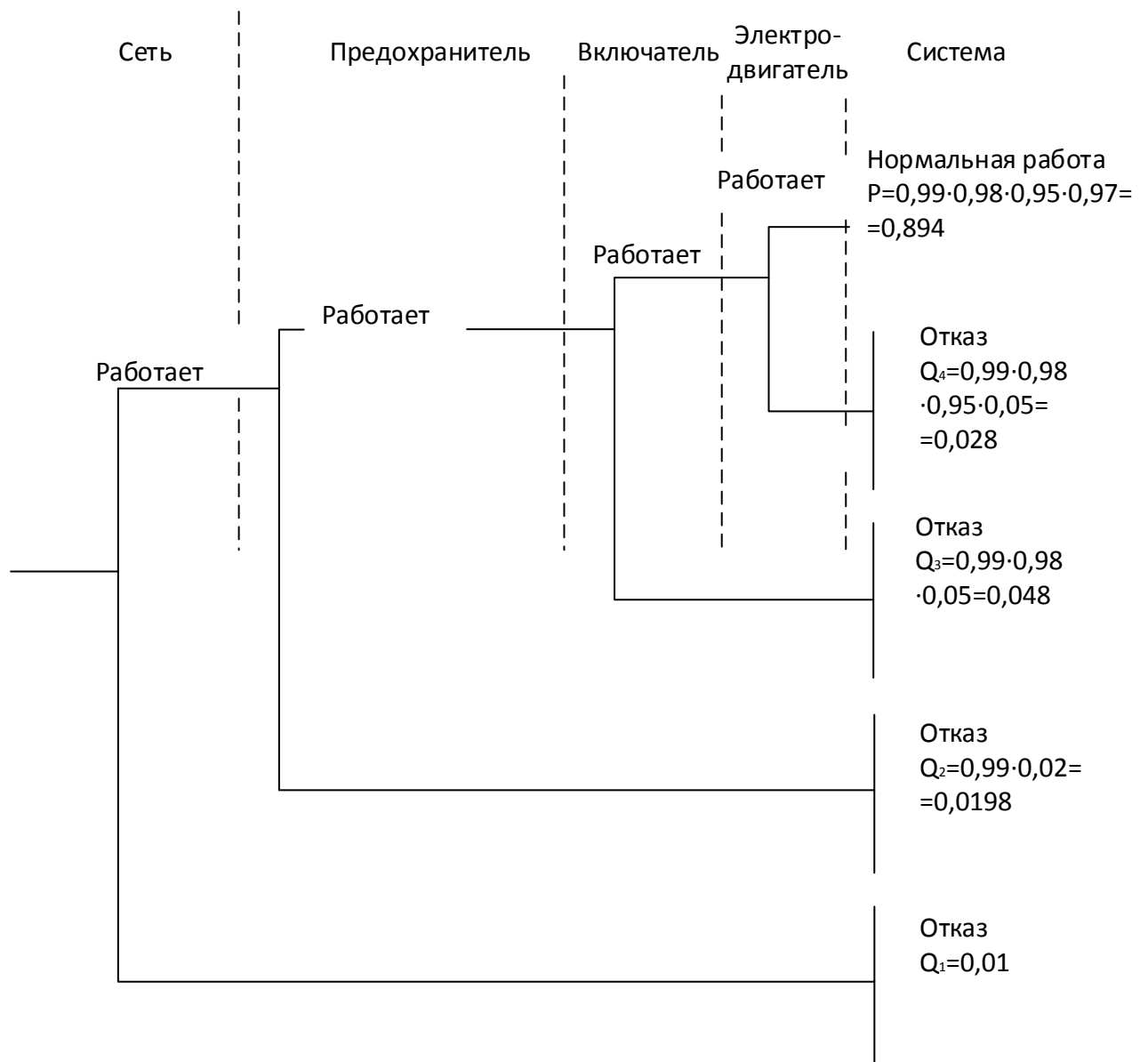


Рисунок 10.8 – Дерево событий для электрической схемы (рис. 10.5)

Рассмотрим порядок построения дерева событий для электрической схемы рис. 10.5, содержащей следующие элементы: сеть, предохранитель, включатель и электродвигатель.

Сеть может находиться в двух состояниях – нормальной работы и в отказном. В свою очередь остальные элементы схемы могут находиться в таких же состояниях. Схема функционирует нормально, если все ее элементы работоспособны. Вероятность безотказной работы всей схемы равна произведению вероятностей безотказной работы ее элементов, т.к. имеем последовательную структуру надежности, когда отказ любого элемента приводит к отказу всей схемы:

$$P = P_c \cdot P_{np} \cdot P_{вкл} \cdot P_{эод} = 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,95 \cdot 0,97 = 0,894.$$

Рассчитаем вероятности всех возможных отказных режимов схемы.

Если отказывает сеть, то вероятность отказа схемы Q_1 равна вероятности отказа сети: $Q_c = 0,01$ (см. табл. 10.4).

Если сеть находится в рабочем состоянии, а предохранитель отказывает, то имеем два независимых события, одно из которых состоит в том, что сеть находится в рабочем состоянии, другое – в том, что предохранитель отказывает. Вероятности этих событий равны соответственно 0,99 и 0,02 (табл. 10.4). Вероятность совместного наступления этих событий, приводящего к отказу схемы, по формуле для произведения независимых событий равна:

$$Q_2 = 0,99 \cdot 0,02 = 0,0198.$$

Аналогично можно рассчитать вероятности оставшихся режимов отказа:

$$Q_3 = 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,05 = 0,048;$$

$$Q_4 = 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,95 \cdot 0,03 = 0,028.$$

Т.к. режимы отказов можно считать несовместными событиями, то вероятность отказа электрической схемы равна сумме вероятностей всех режимов отказа:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0,01 + 0,0198 + 0,048 + 0,028 = 0,106.$$

Вероятность безотказной работы схемы равна

$$P = 1 - Q = 1 - 0,106 = 0,894,$$

что совпадает с результатом расчета вероятности безотказной работы на рис. 10.8.

10.4. Рекомендации по повышению надежности технической системы (устройства)

Основные пути повышения надежности можно свести к следующему.

1 *Рациональное резервирование:*

- за счет отдельной или параллельной работы линий, трансформаторов в зависимости от условий и требований;

- за счет выбора числа независимых источников питания с учетом категории потребителей.

2 *Использование перегрузочной способности элементов системы электроснабжения*, что обеспечивает надежное питание потребителей при эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий. Режимы перегрузки особенно важны при повреждениях или отключениях линий, трансформаторов, секций шин, отдельных аппаратов.

3 *Совершенствование технического обслуживания*: оптимизация периодичности и глубины капитальных ремонтов, снижение продолжительности аварийных ремонтов.

4 *Повышение качества ремонта оборудования*, что увеличивает межремонтные сроки, снижает затраты труда и материальных средств.

5 *Применение, правильный выбор и компоновка современного оборудования*.

6 *Внедрение автоматизации и телемеханизации*, что позволяет повысить еще и безопасность обслуживания, эффективность управления объектами и избежать ошибочных действий персонала.

7 *Повышение надежности РЗ и автоматики* за счет применения микропроцессорной элементной базы, правильной эксплуатации и технического обслуживания.

8 *Выбор наиболее целесообразного времени вывода оборудования в ремонт*, а именно совмещение ППР электрооборудования с ППР технологического оборудования, заблаговременный перевод объекта на временное питание от резервных источников и др.

9 *Уменьшение числа трансформаций*, где это возможно, и в первую очередь трансформаций 10/6 кВ, что повышает также экономичность системы электроснабжения за счет уменьшения потерь электроэнергии.

10 *Применение самозапуска ответственных двигателей (АД и СД).* Самозапуск необходим для обеспечения устойчивости технологических процессов непрерывных производств при КЗ, отключениях выключателя в цепи питания узла нагрузки и т.д.

11 *Обеспечение пожарной безопасности электротехнических сооружений, внедрение устройств телесигнализации и локализации пожаров.*

12 *Использование гарантированных ИП (дизель-генераторов, аккумуляторных батарей и т.п.).*

13 *Внедрение ремонтов под напряжением.*

14 *Снижение насыщения сетей автоматической коммутационной аппаратурой, так как сами аппараты могут быть источником аварий.*

15 *Компенсация реактивной мощности (КРМ).*

16 *Повышение статической и динамической устойчивости системы.*

17 *Повышение качества электроэнергии.*

18 *Повышение качества и уровня эксплуатации электрооборудования (правильное применение смазочных материалов, своевременная чистка светильников, правильная замена изношенных деталей и др.).*

10.5. Расчетно-графическая работа по дисциплине «Основы надежности»

Задание 1. Оценка показателей надежности технических систем

По заданной статистической выборке отказов оборудования сложной технической системы определить основные показатели надежности системы и построить статистическую функцию распределения.

Вариант	Статистика отказов	Вариант	Статистика отказов	Вариант	Статистика отказов
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
1.	03.07.00 12:00 08.07.00 12:00 09.07.00 12:00 14.07.00 12:00 15.07.00 12:00 15.07.00 13:00 16.07.00 15:00 17.07.00 12:00 18.07.00 12:00 23.07.00 12:00 25.07.00 14:00 26.07.00 12:00 27.07.00 12:00 30.07.00 12:00 31.07.00 12:00	2.	03.08.07 12:00 04.08.07 12:00 07.08.07 12:00 08.08.07 12:00 10.08.07 12:00 11.08.07 12:00 12.08.07 12:00 14.08.07 12:00 15.08.07 12:00 17.08.07 12:00 19.08.07 12:00 19.08.07 13:00 23.08.07 12:00 26.08.07 12:00 29.08.07 12:00	3.	02.03.07 12:00 04.03.07 12:00 04.03.07 13:00 06.03.07 12:00 07.03.07 12:00 10.03.07 12:00 12.03.07 12:00 13.03.07 12:00 19.03.07 12:00 19.03.07 13:00 20.03.07 12:00 23.03.07 12:00 24.03.07 12:00 25.03.07 12:00 29.03.07 13:00
4.	11.01.00 12:00 15.01.00 13:00 16.01.00 12:00 17.01.00 13:00 18.01.00 12:00 25.01.00 12:00 26.01.00 12:00 26.01.00 13:00 27.01.00 12:00 30.01.00 12:00 31.01.00 12:00	5.	05.12.00 12:00 08.12.00 12:00 10.12.00 12:00 13.12.00 12:00 21.12.00 12:00 22.12.00 12:00 24.12.00 12:00 24.12.00 13:00 25.12.00 12:00 31.12.00 12:00	6.	05.10.07 12:00 08.10.07 12:00 09.10.07 12:00 11.10.07 12:00 12.10.07 12:00 14.10.07 12:00 15.10.07 12:00 16.10.07 12:00 16.10.07 13:00 26.10.07 12:00 30.10.07 12:00
7.	06.03.00 14:00 07.03.00 12:00 07.03.00 18:00 13.03.00 12:00 14.03.00 12:00 17.03.00 16:00 20.03.00 12:00 21.03.00 13:00 22.03.00 14:00 27.03.00 12:00 28.03.00 13:00 29.03.00 12:00	8.	02.02.07 12:00 06.02.07 12:00 06.02.07 13:00 07.02.07 12:00 12.02.07 12:00 14.02.07 12:00 15.02.07 12:00 16.02.07 12:00 18.02.07 12:00 18.02.07 13:00 19.02.07 12:00 21.02.07 12:00	9.	07.11.07 12:00 09.11.07 12:00 10.11.07 12:00 12.11.07 12:00 13.11.07 12:00 14.11.07 12:00 16.11.07 12:00 20.11.07 12:00 26.11.07 12:00 26.11.07 13:00 29.11.07 12:00

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
10.	03.04.00 12:00 04.04.00 12:00 05.04.00 12:00 05.04.00 13:00 05.04.00 14:00 09.04.00 12:00 11.04.00 12:00 13.04.00 12:00 18.04.00 12:00 24.04.00 12:00 24.04.00 13:00	11.	05.09.00 12:00 06.09.00 12:00 06.09.00 13:00 09.09.00 12:00 13.09.00 12:00 20.09.00 12:00 21.09.00 12:00 23.09.00 12:00 23.09.00 13:00 26.09.00 12:00 29.09.00 12:00	12.	01.12.07 12:00 08.12.07 12:00 11.12.07 12:00 11.12.07 13:00 13.12.07 12:00 14.12.07 12:00 20.12.07 12:00 26.12.07 12:00 26.12.07 13:00
13.	04.05.00 12:00 11.05.00 12:00 12.05.00 12:00 17.05.00 12:00 21.05.00 12:00 26.05.00 12:00 26.05.00 13:00 28.05.00 14:00 30.05.00 12:00 31.05.00 12:00 31.05.00 13:00	14.	01.06.07 12:00 03.06.07 12:00 04.06.07 12:00 06.06.07 12:00 11.06.07 12:00 11.06.07 13:00 13.06.07 12:00 13.06.07 13:00 14.06.07 12:00 15.06.07 12:00 19.06.07 12:00 25.06.07 12:00 27.06.07 12:00	15.	04.08.00 12:00 07.08.00 12:00 09.08.00 12:00 11.08.00 12:00 11.08.00 13:00 16.08.00 12:00 17.08.00 12:00 17.08.00 13:00 17.08.00 14:00 18.08.00 12:00 19.08.00 12:00 20.08.00 13:00 22.08.00 12:00 22.08.00 13:00
16.	03.06.00 12:00 04.06.00 12:00 05.06.00 12:00 06.06.00 12:00 07.06.00 12:00 07.06.00 13:00 16.06.00 12:00 17.06.00 12:00 20.06.00 12:00 20.06.00 13:00 22.06.00 12:00 26.06.00 12:00 27.06.00 12:00	17.	03.07.07 12:00 05.07.07 12:00 07.07.07 12:00 10.07.07 12:00 11.07.07 12:00 11.07.07 13:00 15.07.07 12:00 15.07.07 13:00 17.07.07 12:00 21.07.07 12:00 25.07.07 12:00 26.07.07 12:00	18.	02.10.00 12:00 08.10.00 13:00 12.10.00 12:00 17.10.00 12:00 23.10.00 13:00 26.10.00 12:00 26.10.00 13:00 30.10.00 12:00
19.	01.05.00 12:00 04.05.00 10:00 05.05.00 12:00 05.05.00 18:00 07.05.00 14:00 09.05.00 12:00 11.05.00 12:00 15.05.00 19:00 18.05.00 12:00 24.05.00 18:00 31.05.00 13:00	20.	02.07.07 12:00 04.07.07 12:00 04.07.07 13:00 06.07.07 12:00 07.07.07 12:00 10.07.07 12:00 12.07.07 12:00 13.07.07 12:00 19.07.07 12:00 19.07.07 13:00 20.07.07 12:00	21.	05.09.00 12:00 07.09.00 12:00 08.09.00 13:00 09.09.00 12:00 15.09.00 12:00 20.09.00 12:00 21.09.00 12:00 23.09.00 12:00 25.09.00 13:00 26.09.00 12:00 29.09.00 12:00

			23.07.07 12:00 25.07.07 12:00		
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
22.	01.09.00 12:00 03.09.00 12:00 06.09.00 13:00 09.09.00 12:00 15.09.00 12:00 20.09.00 12:00 21.09.00 12:00 23.09.00 12:00 25.09.00 13:00 26.09.00 12:00 29.09.00 12:00				

Методика расчета

Пример.

Согласно данным наблюдения за работоспособностью технической системы в течение 1 месяца эксплуатации произошло $n = 12$ отказов ее элементов.

Проведем оценку надежности системы.

Данные о возникновении отказов приведены в таблице 1. Определим интервалы времени между отказами и представим их в порядке возрастания и определим натуральный логарифм.

Таблица 1 – Статистические данные об отказах

Время наблюдения	Интервал x_i , час	$\ln x_i$	Интервалы x_i в порядке возрастания
02.01.15 12:00	48	3,871	1
04.01.15 12:00	24	3,178	1
05.01.15 12:00	96	4,564	24
09.01.15 12:00	1	0,000	48
09.01.15 13:00	71	4,263	48
12.01.15 12:00	120	4,787	71
17.01.15 12:00	96	4,564	71
21.01.15 12:00	1	0,000	72
21.01.15 13:00	71	4,263	96
24.01.15 12:00	72	4,277	96
27.01.15 12:00	48	3,871	120
29.01.15 12:00			

Проверим, насколько справедлива статистическая функции распределения отказов экспоненциальной. Для этой цели воспользуемся критерием согласия Бартлетта. Статистика, которая лежит в основе этого критерия, имеет вид:

$$B_r = \frac{2 \cdot r \cdot \left[\ln \left(\frac{t_r}{r} \right) - \frac{1}{r} \cdot \left(\sum_{i=1}^r \ln(x_i) \right) \right]}{1 + \frac{(r+1)}{6 \cdot r}},$$

где x_i – случайный интервал времени между событиями;

$r = n - 1 = 12 - 1 = 11$ – количество интервалов времени между отказами за время наблюдения;

$t_r = \sum_{i=1}^r x_i = 648$ ч. – сумма случайных интервалов времени x_i .

При экспоненциальном распределении статистика B_r должна удовлетворять двухстороннему критерию χ^2 с $r - 1$ степенями свободы:

$$\chi_{0,05;r-1}^2 \leq B_r \leq \chi_{0,95;r-1}^2.$$

В нашем случае определяем: $B_{11} = 12,18$.

Из таблиц, приведенных в приложении 1, находим, что:

$$\chi_{0,05;11}^2 = 4,57; \chi_{0,95;11}^2 = 19,67.$$

Следовательно, $B_{11} = 12,18$ удовлетворяет двухстороннему критерию χ^2 с $r - 1$ степенями свободы и попадает в заданный интервал:

$$4,57 \leq 12,18 \leq 19,67.$$

Это означает, что аппроксимация статистической функции распределения не противоречит экспоненциальной по критерию согласия Бартлетта.

Определим показатели надежности рассматриваемой системы.

Вероятность возникновения отказа:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t},$$

где λ – параметр потока появления отказа

$$\lambda = \frac{1}{T} = \frac{r}{\sum_{i=1}^r x_i} = \frac{11}{648} = 1,6 \cdot 10^{-2} \frac{1}{ч},$$

откуда:

$$F(t) = 1 - e^{-1,6 \cdot 10^{-2} t}.$$

Построим функцию распределения интервалов времени между появлением отказов. Для этого определим распределение случайной величины x_i во времени.

Наметим 5 точек на графике с шагом 40 ч.

$$F(t) = P\{x < t\},$$

$$F_1(t) = P\{x < 30\} = \frac{3}{11} = 0,27,$$

$$F_2(t) = P\{x < 60\} = \frac{5}{11} = 0,45,$$

...,

$$F_5(t) = P\{x < 150\} = \frac{11}{11} = 1.$$

По полученному значению параметра потока появления отказа рассматриваемой системы для заданных точек определим значение вероятности возникновения отказа (табл. 2).

Таблица 2 – Распределение вероятности возникновения отказа во времени

t , час	$F(t)$
0	0
30	0,27
60	0,45
90	0,73
120	0,91
150	1,00

В программной среде MathCad строим график функции распределения интервалов времени между отказами.

$$f := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.27 \\ 0.45 \\ 0.73 \\ 0.91 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \lambda := 0.016 \frac{1}{\text{час}} \quad x := \begin{pmatrix} 0 \\ 30 \\ 60 \\ 90 \\ 120 \\ 150 \end{pmatrix}$$

$$F(t) := 1 - e^{-\lambda \cdot t}$$

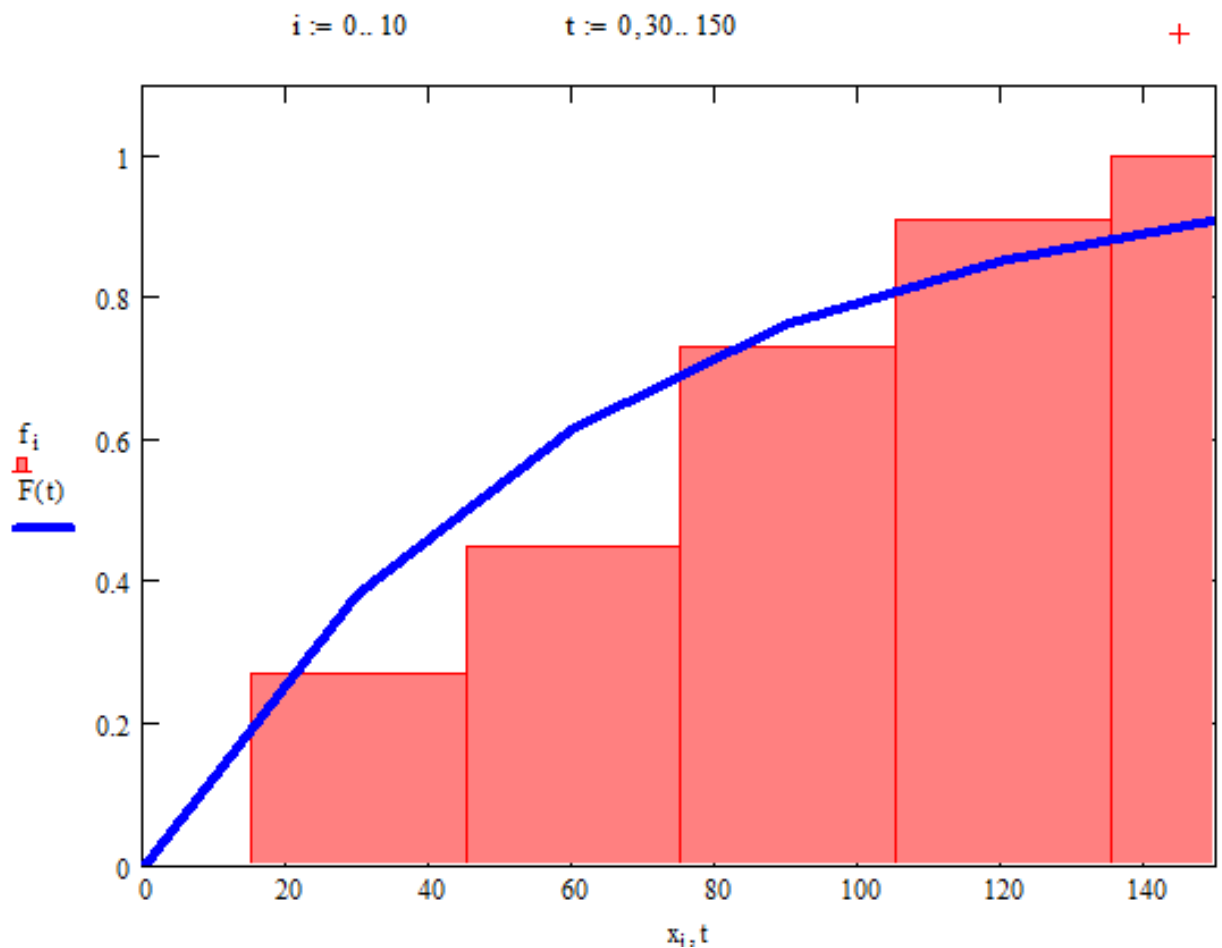


Рисунок 1 – Статистическая и экспоненциальная функции распределения случайной величины x_i

Математическое ожидание:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^r (x_i)}{r} = \frac{648}{11} = 58,9 \text{ ч.}$$

Дисперсия:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^r (x_i - M)^2}{r-1} = 1511 \text{ ч.}$$

Среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{D} = 38,87 \text{ ч.}$$

Коэффициент вариации:

$$V = \frac{\sigma}{M} = 0,65.$$

Определим параметр потока отказов ω , верхнюю ω_B и нижнюю ω_H границы доверительного интервала с доверительной вероятностью $\beta = 0,95$. Значения r_1 и r_2 определим с помощью таблиц, приведенных в приложении 2.

$$\omega = \frac{r}{t_r} = \frac{11}{648} = 0,016 \text{ 1/час.}$$

$$\omega_H = \frac{\omega}{r_1} = \frac{0,016}{1,8} = 0,0094 \text{ 1/час.}$$

$$\omega_B = \frac{\omega}{r_2} = \frac{0,016}{0,6} = 0,026 \text{ 1/час.}$$

Параметр потока отказов попадает в доверительный интервал

$$\beta_{0,95} = \left[0,0094 \frac{1}{\text{ч}}; 0,026 \frac{1}{\text{ч}} \right], \text{ т.е.:}$$

$$P\{9,4 \cdot 10^{-3} < \omega < 2,6 \cdot 10^{-2}\} \geq 0,95.$$

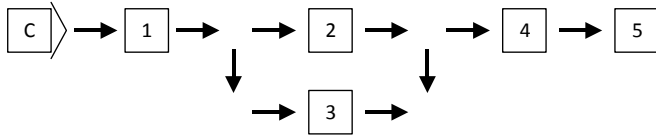
Задание 2. Расчет структурной схемы надежности.

Для заданной структурной схемы надежности технической системы оценить величины вероятности безотказной работы $P_c(t)$ и наработки на отказ T_0 при заданной интенсивности отказов элементов и длительности рабочего цикла.

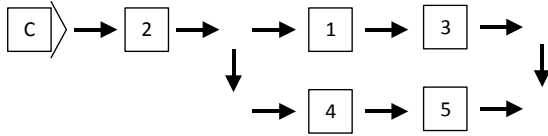
Таблица 3 – Исходные данные

Вариант	Интенсивность отказов элементов						Время цикла, час
	Номер элемента						
	1	2	3	4	5	6	
1	0,02	0,07	0,06	0,02	0,04	0,01	1
2	0,07	0,06	0,07	0,07	0,06	0,08	2
3	0,05	0,05	0,06	0,06	0,01	0,06	3
4	0,08	0,02	0,09	0,09	0,06	0,07	4
5	0,03	0,09	0,02	0,09	0,05	0,01	5
6	0,08	0,06	0,03	0,05	0,04	0,05	1
7	0,04	0,08	0,07	0,01	0,03	0,09	2
8	0,06	0,05	0,01	0,04	0,03	0,03	3
9	0,06	0,09	0,09	0,08	0,07	0,05	4
10	0,02	0,06	0,08	0,06	0,03	0,02	5
11	0,03	0,03	0,06	0,02	0,09	0,07	1
12	0,07	0,03	0,06	0,07	0,07	0,07	2
13	0,09	0,09	0,06	0,09	0,09	0,08	3
14	0,03	0,03	0,08	0,08	0,09	0,03	4
15	0,02	0,09	0,06	0,04	0,06	0,08	5
16	0,07	0,01	0,01	0,01	0,07	0,05	1
17	0,07	0,01	0,06	0,04	0,01	0,04	2
18	0,09	0,02	0,04	0,07	0,07	0,09	3
19	0,05	0,09	0,02	0,04	0,08	0,07	4
20	0,07	0,09	0,06	0,09	0,03	0,07	5
21	0,08	0,02	0,09	0,09	0,06	0,07	6
22	0,03	0,09	0,02	0,09	0,05	0,01	7

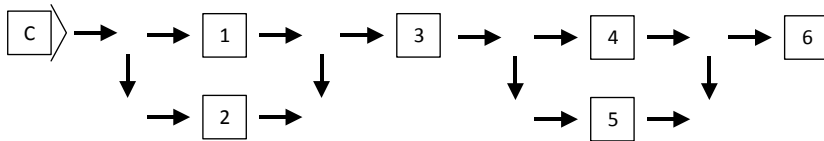
Вариант 1



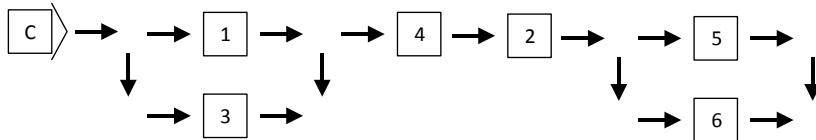
Вариант 2



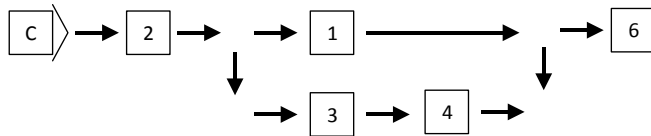
Вариант 3



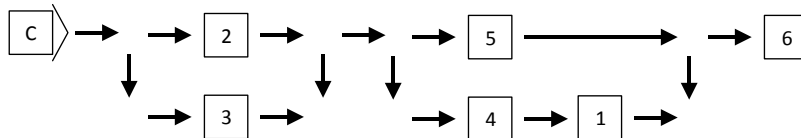
Вариант 4



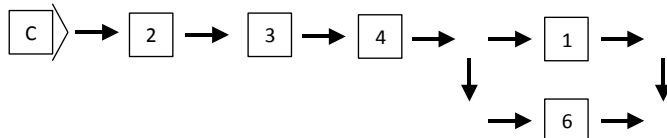
Вариант 5



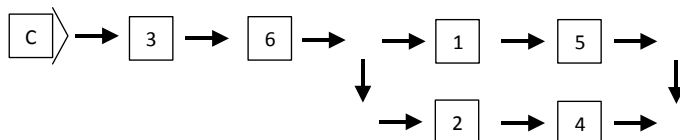
Вариант 6



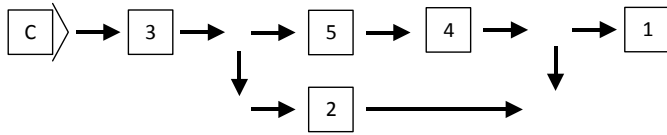
Вариант 7



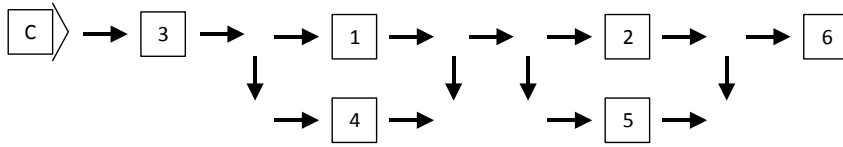
Вариант 8



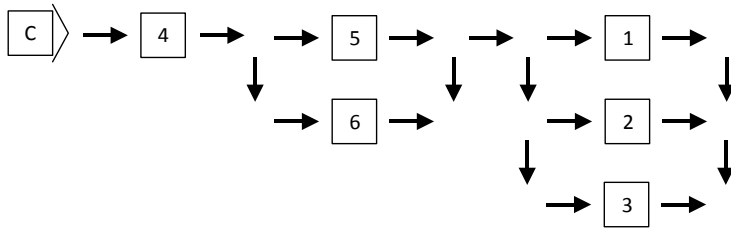
Вариант 9



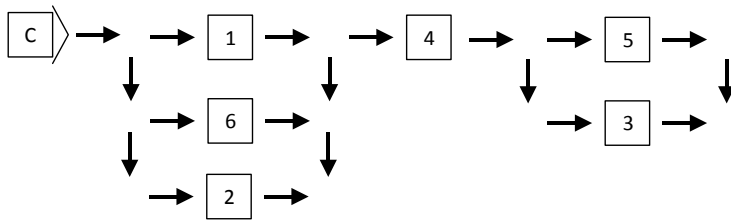
Вариант 10



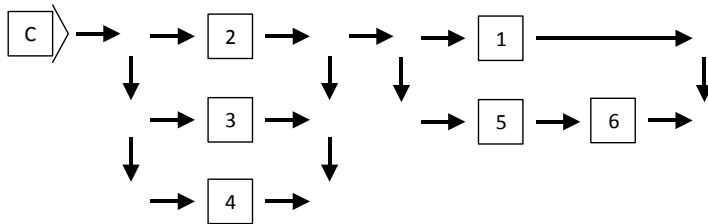
Вариант 11



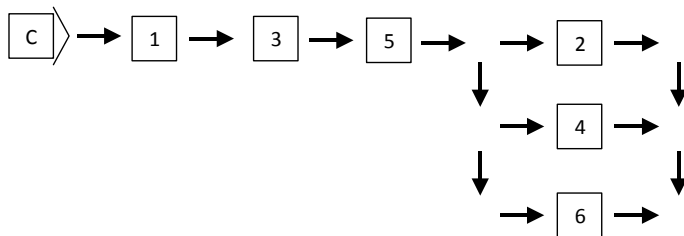
Вариант 12



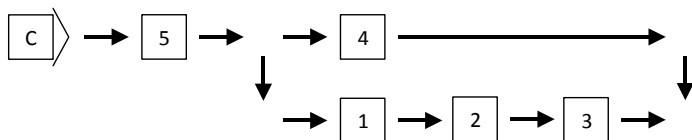
Вариант 13



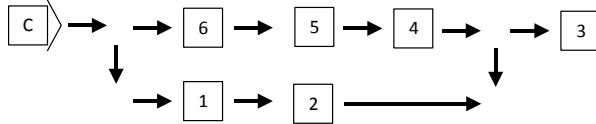
Вариант 14



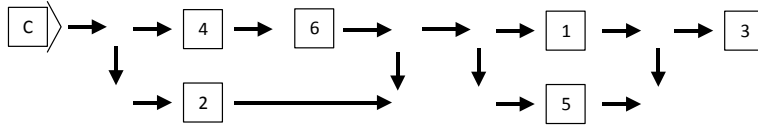
Вариант 15



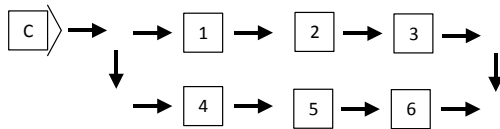
Вариант 16



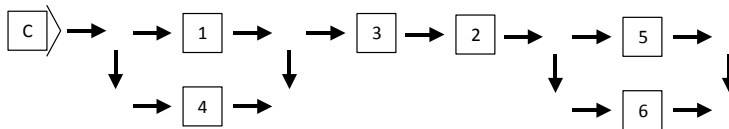
Вариант 17



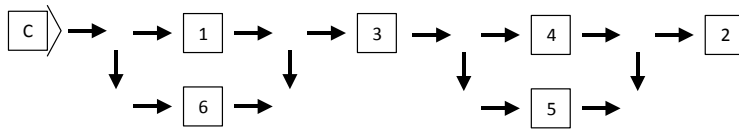
Вариант 18



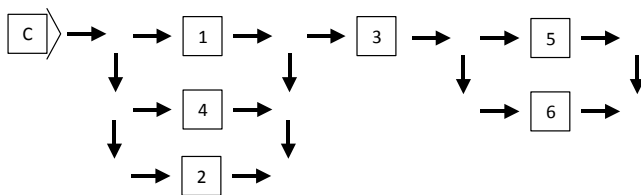
Вариант 19



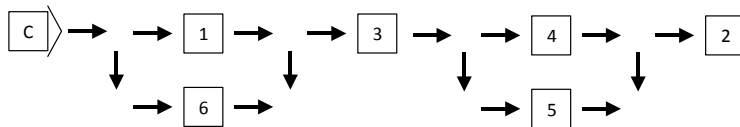
Вариант 20



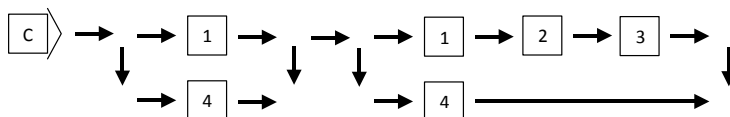
Вариант 21



Вариант 22



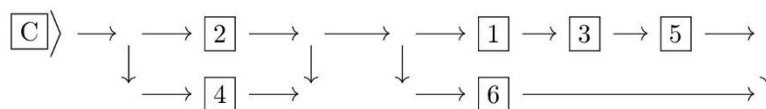
Не знаю что за
варик, но это
последняя
картинка



Методика расчета

Пример.

Определить показатели надежности для заданной структурной схемы технической системы.



Интенсивность отказов элементов						Время цикла, час
Номер элемента						
1	2	3	4	5	6	
0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	3

Определим вероятность безотказной работы каждого элемента структурной схемы по формуле:

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

$$P_1(3) = e^{-0,04 \cdot 3} = 0,887;$$

$$P_2(3) = e^{-0,05 \cdot 3} = 0,861;$$

$$P_3(3) = e^{-0,06 \cdot 3} = 0,835;$$

$$P_4(3) = e^{-0,07 \cdot 3} = 0,811;$$

$$P_5(3) = e^{-0,08 \cdot 3} = 0,787;$$

$$P_6(3) = e^{-0,09 \cdot 3} = 0,763.$$

Разделим схему на 3 участка и определим надежность каждого:

$$1: P_1 = 1 - (1 - P_2)(1 - P_4) = 1 - (1 - 0,861)(1 - 0,811) = 0,973.$$

$$2: P_3 = P_1 \cdot P_3 \cdot P_5 = 0,887 \cdot 0,835 \cdot 0,787 = 0,582.$$

$$3: P_3 = 1 - (1 - P_2)(1 - P_6) = 1 - (1 - 0,861)(1 - 0,763) = 0,901.$$

Надежность системы:

$$P_c(3) = P_1 \cdot P_3 = 0,973 \cdot 0,901 = 0,876.$$

Интенсивность отказа системы:

$$\lambda_c = \frac{\ln P_c(t)}{-t} = \frac{\ln(0,876)}{-3} = 0,444.$$

Наработка на отказ системы:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{0,444} = 2,25 \text{ ч.}$$

Список литературы

1. Электротехнический справочник: Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии./ Под общ. ред. профессоров МЭИ. – М.: Издательство МЭИ, 2004, 964 с.
2. Гук Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике: Учеб. пособие для ВУЗов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990-208 с.
3. Фокин Ю.А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
4. Фокин Ю.А., Туфанов В.А. Оценка надежности систем электроснабжения. М.: Энергоиздат, 1981. – 224 с.
5. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем: Пер. с англ. – М.: "Мир", 1984. – 318 с.
6. Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах: Пер. с англ./ Под ред. Ю. Н. Руденко. М.: Энергоатомиздат, 1983.
7. Зорин В.В., Тисленко В.В., Клеппель Ф., Адлер Г. Надежность систем электроснабжения. Киев: Вища школа, 1984. – 192 с.
8. Гук Ю. Б. Анализ надежности электроэнергетических установок. Л.: Энергоатомиздат, 1988.
9. Китушин В. Г. Надежность энергетических систем: Учеб. пособие для электроэнергетич. спец. ВУЗов. – М.: Высш. шк., 1984. – 256 с.
10. Розанов М. Н. Надежность электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 200 с.
11. Фокин Ю. А. Надежность и эффективность сетей электрических систем. М.: Высш. шк., 1989. - 151 с.

Квантили распределения χ^2

Число степеней свободы ν	Вероятность P														
	0,01	0,025	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,975	0,99
1	0,0002	0,0010	0,0039	0,0158	0,0642	0,1485	0,2750	0,4549	0,7083	1,0742	1,6424	2,7055	3,8415	5,0239	6,6349
2	0,0201	0,0506	0,1026	0,2107	0,4463	0,7133	1,0217	1,3863	1,8326	2,4079	3,2189	4,6052	5,9915	7,3778	9,2103
3	0,1148	0,2158	0,3518	0,5844	1,0052	1,4237	1,8692	2,3660	2,9462	3,6649	4,6416	6,2514	7,8147	9,3484	11,3449
4	0,2971	0,4844	0,7107	1,0636	1,6488	2,1947	2,7528	3,3567	4,0446	4,8784	5,9886	7,7794	9,4877	11,1433	13,2767
5	0,5543	0,8312	1,1455	1,6103	2,3425	2,9999	3,6555	4,3515	5,1319	6,0644	7,2893	9,2364	11,0705	12,8325	15,0863
6	0,8721	1,2373	1,6354	2,2041	3,0701	3,8276	4,5702	5,3481	6,2108	7,2311	8,5581	10,6446	12,5916	14,4494	16,8119
7	1,2390	1,6899	2,1673	2,8331	3,8223	4,6713	5,4932	6,3458	7,2832	8,3834	9,8032	12,0170	14,0671	16,0128	18,4753
8	1,6465	2,1797	2,7326	3,4895	4,5936	5,5274	6,4226	7,3441	8,3505	9,5245	11,0301	13,3616	15,5073	17,5345	20,0902
9	2,0879	2,7004	3,3251	4,1682	5,3801	6,3933	7,3570	8,3428	9,4136	10,6564	12,2421	14,6837	16,9190	19,0228	21,6660
10	2,5582	3,2470	3,9403	4,8652	6,1791	7,2672	8,2955	9,3418	10,4732	11,7807	13,4420	15,9872	18,3070	20,4832	23,2093
11	3,0535	3,8157	4,5748	5,5778	6,9887	8,1479	9,2373	10,3410	11,5298	12,8987	14,6314	17,2750	19,6751	21,9200	24,7250
12	3,5706	4,4038	5,2260	6,3038	7,8073	9,0343	10,1820	11,3403	12,5838	14,0111	15,8120	18,5493	21,0261	23,3367	26,2170
13	4,1069	5,0088	5,8919	7,0415	8,6339	9,9257	11,1291	12,3398	13,6356	15,1187	16,9848	19,8119	22,3620	24,7356	27,6882
14	4,6604	5,6287	6,5706	7,7895	9,4673	10,8215	12,0785	13,3393	14,6853	16,2221	18,1508	21,0641	23,6848	26,1189	29,1412
15	5,2293	6,2621	7,2609	8,5468	10,3070	11,7212	13,0297	14,3389	15,7332	17,3217	19,3107	22,3071	24,9958	27,4884	30,5779
16	5,8122	6,9077	7,9616	9,3122	11,1521	12,6243	13,9827	15,3385	16,7795	18,4179	20,4651	23,5418	26,2962	28,8454	31,9999
17	6,4078	7,5642	8,6718	10,0852	12,0023	13,5307	14,9373	16,3382	17,8244	19,5110	21,6146	24,7690	27,5871	30,1910	33,4087
18	7,0149	8,2307	9,3905	10,8649	12,8570	14,4399	15,8932	17,3379	18,8679	20,6014	22,7595	25,9894	28,8693	31,5264	34,8053
19	7,6327	8,9065	10,1170	11,6509	13,7158	15,3517	16,8504	18,3377	19,9102	21,6891	23,9004	27,2036	30,1435	32,8523	36,1909
20	8,2604	9,5908	10,8508	12,4426	14,5784	16,2659	17,8088	19,3374	20,9514	22,7745	25,0375	28,4120	31,4104	34,1696	37,5662

21	8,897 2	10,28 29	11,59 13	13,23 96	15,44 46	17,18 23	18,76 83	20,33 72	21,99 15	23,85 78	26,17 11	29,61 51	32,67 06	35,47 89	38,93 22
22	9,542 5	10,98 23	12,33 80	14,04 15	16,31 40	18,10 07	19,72 88	21,33 70	23,03 07	24,93 90	27,30 15	30,81 33	33,92 44	36,78 07	40,28 94
23	10,19 57	11,68 86	13,09 05	14,84 80	17,18 65	19,02 11	20,69 02	22,33 69	24,06 89	26,01 84	28,42 88	32,00 69	35,17 25	38,07 56	41,63 84
24	10,85 64	12,40 12	13,84 84	15,65 87	18,06 18	19,94 32	21,65 25	23,33 67	25,10 63	27,09 60	29,55 33	33,19 62	36,41 50	39,36 41	42,97 98
25	11,52 40	13,11 97	14,61 14	16,47 34	18,93 98	20,86 70	22,61 56	24,33 66	26,14 30	28,17 19	30,67 52	34,38 16	37,65 25	40,64 65	44,31 41
26	12,19 81	13,84 39	15,37 92	17,29 19	19,82 02	21,79 24	23,57 94	25,33 65	27,17 89	29,24 63	31,79 46	35,56 32	38,88 51	41,92 32	45,64 17
27	12,87 85	14,57 34	16,15 14	18,11 39	20,70 30	22,71 92	24,54 40	26,33 63	28,21 41	30,31 93	32,91 17	36,74 12	40,11 33	43,19 45	46,96 29
28	13,56 47	15,30 79	16,92 79	18,93 92	21,58 80	23,64 75	25,50 93	27,33 62	29,24 86	31,39 09	34,02 66	37,91 59	41,33 71	44,46 08	48,27 82
29	14,25 65	16,04 71	17,70 84	19,76 77	22,47 51	24,57 70	26,47 51	28,33 61	30,28 25	32,46 12	35,13 94	39,08 75	42,55 70	45,72 23	49,58 79
30	14,95 35	16,79 08	18,49 27	20,59 92	23,36 41	25,50 78	27,44 16	29,33 60	31,31 59	33,53 02	36,25 02	40,25 60	43,77 30	46,97 92	50,89 22
31	15,65 55	17,53 87	19,28 06	21,43 36	24,25 51	26,43 97	28,40 87	30,33 59	32,34 86	34,59 81	37,35 91	41,42 17	44,98 53	48,23 19	52,19 14
32	16,36 22	18,29 08	20,07 19	22,27 06	25,14 78	27,37 28	29,37 63	31,33 59	33,38 09	35,66 49	38,46 63	42,58 47	46,19 43	49,48 04	53,48 58
33	17,07 35	19,04 67	20,86 65	23,11 02	26,04 22	28,30 69	30,34 44	32,33 58	34,41 26	36,73 07	39,57 18	43,74 52	47,39 99	50,72 51	54,77 55
34	17,78 91	19,80 63	21,66 43	23,95 23	26,93 83	29,24 21	31,31 30	33,33 57	35,44 38	37,79 54	40,67 56	44,90 32	48,60 24	51,96 60	56,06 09
35	18,50 89	20,56 94	22,46 50	24,79 67	27,83 59	30,17 82	32,28 21	34,33 56	36,47 46	38,85 91	41,77 80	46,05 88	49,80 18	53,20 33	57,34 21
36	19,23 27	21,33 59	23,26 86	25,64 33	28,73 50	31,11 52	33,25 17	35,33 56	37,50 49	39,92 20	42,87 88	47,21 22	50,99 85	54,43 73	58,61 92
37	19,96 02	22,10 56	24,07 49	26,49 21	29,63 55	32,05 32	34,22 16	36,33 55	38,53 48	40,98 39	43,97 82	48,36 34	52,19 23	55,66 80	59,89 25
38	20,69 14	22,87 85	24,88 39	27,34 30	30,53 73	32,99 19	35,19 20	37,33 55	39,56 43	42,04 51	45,07 63	49,51 26	53,38 35	56,89 55	61,16 21
39	21,42 62	23,65 43	25,69 54	28,19 58	31,44 05	33,93 15	36,16 28	38,33 54	40,59 35	43,10 53	46,17 30	50,65 98	54,57 22	58,12 01	62,42 81
40	22,16 43	24,43 30	26,50 93	29,05 05	32,34 50	34,87 19	37,13 40	39,33 53	41,62 22	44,16 49	47,26 85	51,80 51	55,75 85	59,34 17	63,69 07
41	22,90 56	25,21 45	27,32 56	29,90 71	33,25 06	35,81 31	38,10 55	40,33 53	42,65 06	45,22 36	48,36 28	52,94 85	56,94 24	60,56 06	64,95 01
42	23,65 01	25,99 87	28,14 40	30,76 54	34,15 74	36,75 50	39,07 74	41,33 52	43,67 86	46,28 17	49,45 60	54,09 02	58,12 40	61,77 68	66,20 62
43	24,39 76	26,78 54	28,96 47	31,62 55	35,06 53	37,69 75	40,04 96	42,33 52	44,70 63	47,33 90	50,54 80	55,23 02	59,30 35	62,99 04	67,45 93
44	25,14 80	27,57 46	29,78 75	32,48 71	35,97 43	38,64 08	41,02 22	43,33 52	45,73 36	48,39 57	51,63 89	56,36 85	60,48 09	64,20 15	68,70 95
45	25,90 13	28,36 62	30,61 23	33,35 04	36,88 44	39,58 47	41,99 50	44,33 51	46,76 07	49,45 17	52,72 88	57,50 53	61,65 62	65,41 02	69,95 68

46	26,65 72	29,16 01	31,43 90	34,21 52	37,79 55	40,52 92	42,96 82	45,33 51	47,78 74	50,50 71	53,81 77	58,64 05	62,82 96	66,61 65	71,20 14
47	27,41 58	29,95 62	32,26 76	35,08 14	38,70 75	41,47 44	43,94 17	46,33 50	48,81 39	51,56 19	54,90 56	59,77 43	64,00 11	67,82 06	72,44 33
48	28,17 70	30,75 45	33,09 81	35,94 91	39,62 05	42,42 01	44,91 54	47,33 50	49,84 01	52,61 61	55,99 26	60,90 66	65,17 08	69,02 26	73,68 26
49	28,94 06	31,55 49	33,93 03	36,81 82	40,53 44	43,36 64	45,88 95	48,33 50	50,86 60	53,66 97	57,07 86	62,03 75	66,33 86	70,22 24	74,91 95
50	29,70 67	32,35 74	34,76 43	37,68 86	41,44 92	44,31 33	46,86 38	49,33 49	51,89 16	54,72 28	58,16 38	63,16 71	67,50 48	71,42 02	76,15 39

Значение коэффициентов r_1 и r_2 при доверительной вероятности α

m	$\alpha = 0,99$		$\alpha = 0,95$		$\alpha = 0,9$		$\alpha = 0,8$	
	r_1	r_2	r_1	r_2	r_1	r_2	r_1	r_2
1	100	0,15	19,5	0,21	9,50	0,26	4,48	0,33
2	13,5	0,24	5,63	0,32	3,77	0,38	2,42	0,47
3	6,88	0,30	3,66	0,39	2,73	0,45	1,95	0,55
4	4,85	0,35	2,93	0,44	2,29	0,50	1,74	0,60
5	3,91	0,38	2,54	0,48	2,05	0,54	1,62	0,63
6	3,36	0,41	2,29	0,51	1,90	0,57	1,54	0,66
8	2,75	0,46	2,01	0,55	1,72	0,62	1,43	0,70
10	2,42	0,50	1,83	0,59	1,61	0,65	1,37	0,73
15	2,01	0,56	1,62	0,65	1,46	0,70	1,28	0,78
20	1,81	0,60	1,51	0,69	1,37	0,74	1,24	0,81
25	1,68	0,64	1,44	0,72	1,33	0,76	1,21	0,83
30	1,60	0,66	1,39	0,74	1,29	0,78	1,18	0,84
40	1,50	0,70	1,32	0,77	1,24	0,81	1,16	0,87
50	1,43	0,73	1,28	0,79	1,21	0,83	1,14	0,88
60	1,38	0,75	1,25	0,81	1,19	0,84	1,12	0,89
80	1,32	0,78	1,21	0,83	1,16	0,86	1,10	0,90
100	1,28	0,80	1,19	0,85	1,14	0,88	1,09	0,91
150	1,22	0,83	1,15	0,87	1,12	0,90	1,07	0,93
200	1,19	0,85	1,13	0,89	1,10	0,91	1,06	0,94
250	1,17	0,86	1,11	0,90	1,09	0,92	1,06	0,95
300	1,15	0,88	1,10	0,91	1,08	0,93	1,05	0,95
400	1,13	0,89	1,09	0,92	1,07	0,94	1,04	0,96
500	1,11	0,90	1,08	0,93	1,06	0,94	1,04	0,96
600	1,10	0,91	1,07	0,94	1,05	0,95	1,04	0,97
800	1,09	0,92	1,06	0,94	1,05	0,96	1,03	0,97
1000	1,08	0,93	1,05	0,95	1,04	0,96	1,03	0,97

Основные соотношения для количественных характеристик надежности при различных законах распределения времени работы до отказа

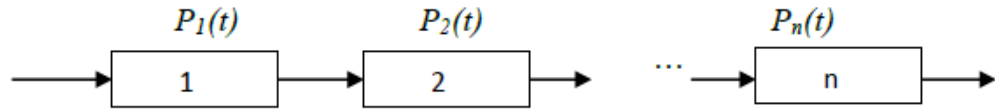
Наименование закона распределения	Частота отказов (плотность распределения)	Вероятность безотказной работы	Интенсивность отказов	Средняя наработка до первого отказа
Экспоненциальный	$\lambda e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	$\lambda = const$	$1 / \lambda$
Релея	$\frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{t}{\sigma^2}$	$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma$
Гамма	$\lambda_0 \frac{(\lambda_0 t)^{\kappa-1}}{(\kappa-1)!} e^{-\lambda_0 t}$	$e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{\kappa-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$	$e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{\kappa-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$	$\frac{\kappa}{\lambda_0}$
Вейбулла λ_0 – интенсивность отказов; κ – параметр формы	$\lambda_0 \kappa t^{\kappa-1} e^{-\lambda_0 t^\kappa}$	$e^{-\lambda_0 t^\kappa}$	$\lambda_0 \kappa t^{\kappa-1} e^{-\lambda_0 t^\kappa}$	$\frac{T(\frac{1}{\kappa} + 1)}{\frac{1}{\lambda_0^\kappa}}$
Нормальный	$\frac{1}{F(\frac{T_1}{\sigma})\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{F(\frac{T_1-t}{\sigma})}{F(\frac{T_1}{\sigma})}$	$\frac{e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma F(\frac{T_1-t}{\sigma})}$	$T_1 + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}\sigma F(\frac{T_1}{\sigma})} e^{-\frac{T_1^2}{2\sigma^2}}$

Значение гамма-функции

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,00	1,00000	1,25	0,90640	1,50	0,88623	1,75	0,919906
1,01	0,99433	1,26	0,90440	1,51	0,88659	1,76	0,92137
1,02	0,98884	1,27	0,90250	1,52	0,88704	1,77	0,92376
1,03	0,98355	1,28	0,90072	1,53	0,88757	1,78	0,92623
1,04	0,97884	1,29	0,89904	1,54	0,88818	1,79	0,92877
1,05	0,97350	1,30	0,89747	1,55	0,88887	1,80	0,93188
1,06	0,96874	1,31	0,89600	1,56	0,88964	1,81	0,93408
1,07	0,96415	1,32	0,89464	1,57	0,89049	1,82	0,93685
1,08	0,95973	1,33	0,89388	1,58	0,89142	1,83	0,93369
1,09	0,95546	1,34	0,89222	1,59	0,89243	1,84	0,94261
1,10	0,95135	1,35	0,89115	1,60	0,89352	1,85	0,94561
1,11	0,94740	1,36	0,89018	1,61	0,89468	1,86	0,94869
1,12	0,94359	1,37	0,88931	1,62	0,89592	1,87	0,95184
1,13	0,93993	1,38	0,88854	1,63	0,89724	1,88	0,95507
1,14	0,93642	1,39	0,88785	1,64	0,89864	1,89	0,95838
1,15	0,93304	1,40	0,88726	1,65	0,90012	1,90	0,96177
1,16	0,92980	1,41	0,88676	1,66	0,90167	1,91	0,96523
1,17	0,92670	1,42	0,88636	1,67	0,90330	1,92	0,96877
1,18	0,92373	1,43	0,88604	1,68	0,90500	1,93	0,97240
1,19	0,92089	1,44	0,88581	1,69	0,90678	1,94	0,97610
1,20	0,91817	1,45	0,88566	1,70	0,90864	1,95	0,97988
1,21	0,91558	1,46	0,88560	1,71	0,91057	1,96	0,98374
1,22	0,91311	1,47	0,88563	1,72	0,91258	1,97	0,98768
1,23	0,91075	1,48	0,88575	1,73	0,91467	1,98	0,99171
1,24	0,90852	1,49	0,88595	1,74	0,91683	1,99	0,99581
						2,00	1,00000

Структурные модели надежности сложных систем

Объекты с последовательным соединением элементов



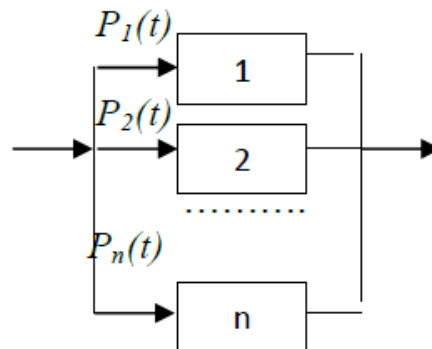
$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t),$$

$$Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n \{Q_i(t)\},$$

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t),$$

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_c} = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \right)^{-1}.$$

Объекты с параллельным соединением элементов



$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)],$$

$$Q_c(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t) = \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)],$$

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_c} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right) = \frac{1}{\lambda_c} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \right).$$