

3120



Министерство образования  
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Электроснабжение»

**В.А. Анищенко**  
**И.В. Колосова**

**ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ  
СИСТЕМ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

**Пособие**

Минск 2007

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Электроснабжение»

В.А. Анищенко  
И.В. Колосова

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Пособие  
для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение»  
специализации 1-43 01 03 01 «Электроснабжение  
промышленных предприятий»

Минск 2007

УДК ~~658.26~~:621.311(075.8)

~~ББК 31.29я7~~

А 67

Рецензенты:

Н.Б. Карницкий, Н.Н. Бобко

**Анищенко, В.А.**

А 67 Основы надежности систем электроснабжения: пособие для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» специализации 1-43 01 03 01 «Электроснабжение промышленных предприятий» / В.А. Анищенко, И.В. Колосова. – Мн.: БНТУ, 2007. – 151 с.

ISBN 978-985-479-537-9.

Пособие по дисциплине «Надежность систем электроснабжения» для студентов дневного и заочного отделений специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» специализации 1-43 01 03 01 «Электроснабжение промышленных предприятий» разработано в соответствии с учебной программой дисциплины.

Излагаются основы теории и методы расчета надежности при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения. Приводятся решения типовых примеров по основным разделам теории надежности. Для закрепления теоретических знаний предусматривается выполнение контрольного задания, состоящего из 9 практических задач.

УДК 658.26:621.311(075.8)  
ББК 31.29я7

ISBN 978-985-479-537-9

© Анищенко В.А.,  
Колосова И.В., 2007  
© БНТУ, 2007

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1. Термины и определения надежности	7
2. Причины и характер повреждений основных элементов систем электроснабжения	9
2.1. Воздушные линии электропередачи	9
2.2. Кабельные линии электропередачи	10
2.3. Силовые трансформаторы	10
2.4. Электрические двигатели	11
2.5. Коммутационные электрические аппараты	11
2.6. Релейная защита и автоматика	12
3. Модели отказов в системах электроснабжения	14
3.1. Виды отказов	14
3.2. Классификация отказов	14
3.3. Типы отказов	17
4. Количественные характеристики основных показателей надежности	18
4.1. Вероятность безотказной работы. Частота и интенсивность отказов	18
4.2. Изменение интенсивности отказов во времени	22
4.3. Расчетные формулы для экспоненциального закона надежности	23
5. Показатели надежности ремонтируемых объектов	29
6. Определение надежности систем по показателям надежности входящих в них элементов	37
6.1. Теорема сложения вероятностей	37
6.2. Теорема умножения вероятностей	38
6.3. Формула полной вероятности	39
6.4. Теорема гипотез	39
6.5. Формула Бернулли	40
6.6. Надежность систем с последовательным соединением элементов	40
6.7. Надежность систем с параллельным соединением элементов	44

7.	Способы резервирования систем электроснабжения. . . . .	46
7.1.	Виды резервирования. . . . .	46
7.2.	Надежность систем при постоянном общем резервировании. . . . .	49
7.3.	Надежность систем при резервировании замещением. . . . .	56
7.4.	Надежность систем при постоянном отдельном резервировании. . . . .	57
7.5.	Надежность систем со смешанным соединением элементов. . . . .	60
7.6.	Приближенный метод преобразования треугольника в звезду и обратно. . . . .	64
7.7.	Приближенный метод исключения элементов. . . . .	67
8.	Особенности расчета надежности схем электроснабжения. . . . .	71
8.1.	Учет преднамеренных отключений. . . . .	71
8.2.	Преднамеренные отключения при последовательном соединении элементов. . . . .	72
8.3.	Преднамеренные отключения при параллельном соединении элементов. . . . .	76
8.4.	Влияние организации обслуживания на надежность схем. . . . .	79
8.5.	Влияние надежности коммутационной аппаратуры и устройств релейной защиты и автоматики на надежность схем. . . . .	81
8.6.	Расчет показателей надежности схем электроснабжения. . . . .	86
8.7.	Расчет показателей надежности электроустановок. . . . .	89
9.	Надежность нерезервированных сетей систем электроснабжения. . . . .	93
9.1.	Показатели надежности систем электроснабжения. . . . .	93
9.2.	Воздушные линии без коммутационных аппаратов. . . . .	95
9.3.	Воздушные линии с коммутационными аппаратами. . . . .	98
9.4.	Определение времени поиска поврежденного участка. . . . .	99
10.	Надежность резервированных сетей систем электроснабжения. . . . .	105

10.1. Воздушные линии с глухим присоединением потребителей. . . . .	105
10.2. Линии с присоединением потребителей по петлевой схеме. . . . .	106
10.3. Многократно резервируемые линии. . . . .	109
11. Надежность автоматизированных сетей систем электроснабжения. . . . .	111
11.1. Нерезервируемые сети с глухим присоединением потребителей к линии. . . . .	111
11.2. Резервируемые сети. . . . .	112
11.3. Расчет надежности систем электроснабжения с учетом структурно-иерархических уровней. . . . .	113
12. Резервирование релейно-контактных схем. . . . .	115
12.1. Особенности надежности работы релейно-контактных элементов. . . . .	115
12.2. Расчет показателей надежности резервированных релейно-контактных схем. . . . .	116
13. Техническая диагностика. . . . .	120
13.1. Общие сведения о технической диагностике. . . . .	120
13.2. Тестовая диагностика систем автоматического регулирования. . . . .	121
13.3. Функциональная диагностика измерительной информации. . . . .	123
14. Организация контроля достоверности на предприятиях. . . . .	126
14.1. Номенклатура показателей надежности промышленных изделий. . . . .	126
14.2. Сбор и обработка информации. . . . .	127
14.3. Испытания на надежность. . . . .	128
14.4. Анализ надежности при помощи дисперсионного анализа. . . . .	131
14.5. Контроль качества и надежности. . . . .	134
15. Контрольное задание для самостоятельной работы. . . . .	139
Литература. . . . .	150

## ВВЕДЕНИЕ

Под надежностью в технике понимают вероятность того, что устройство или система в полном объеме выполняет свои функции в течение заданного промежутка времени при заданных условиях работы.

Надежность систем электроснабжения (СЭС) определяется в целом надежностью составляющих их электроустановок: электростанций, электросетей, трансформаторных подстанций, электроприемников. Для проектирования электроустановок и систем и поддержания их надежности в процессе эксплуатации необходимо иметь ее численные меры.

Первые систематические исследования надежности в электроэнергетике относятся к середине XX века и были посвящены расчетам требуемой резервной мощности электростанций. Затем начались исследования надежности систем передачи и распределения энергии, включая надежность электросетей и потребителей электроэнергии.

Электроустановки в процессе эксплуатации оказываются под воздействием разнообразных факторов: повышенной влажности, агрессивных сред, пыли, неблагоприятных атмосферных явлений, а также механических и электрических нагрузок. При этом изменяются основные свойства материалов электроустановок, что приводит к возникновению коротких замыканий, вызывающих отключение электроустановок или электросетей, т.е. перерывам в подаче электроэнергии.

Перерывы электроснабжения приводят к простоям производства, снижению объема выпускаемой продукции, порче основного технологического оборудования. Следует также учитывать, что существуют технологические процессы, не допускающие даже кратковременных перерывов электроснабжения. В связи с этим возникает потребность принимать обоснованные решения по выбору способов повышения надежности бесперебойного электроснабжения за счет резервирования различных элементов системы электроснабжения, совершенствования организации технического обслуживания, оперативной диагностики неисправных элементов.

Несмотря на многообразие электроустановок систем электроснабжения, методы расчета их надежности основываются на единой теоретической основе. Используемый математический аппарат теории надежности построен на таких разделах современной математики, как теория вероятностей, математическая статистика, теория массового обслуживания, математическая логика и др.

# 1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

В настоящее время действует ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Термины и определения», в соответствии с которым установлена единая терминология при рассмотрении надежности, в т.ч. систем электроснабжения.

Расширенное определение надежности: надежность – это свойство объекта (системы) или технического устройства выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Таким образом, надежность – это сложное свойство, включающее в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохранность.

**Безотказность** – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени.

**Долговечность** – свойство объекта сохранять работоспособность длительно, с возможными перерывами на ремонт, вплоть до разрушения или другого предельного состояния (например, по условиям безопасности).

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

**Отказ** – событие, состоящее в полной или частичной утрате объектом работоспособного состояния; соответственно отказы подразделяются на полные и частичные.

**Среднее время безотказной работы (наработка на отказ)** – продолжительность работы объекта до первого отказа или в промежутке между двумя смежными отказами.

**Ресурс** – длительность работы устройства от начала эксплуатации или ее возобновления после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния (по экономическим, техническим соображениям или по условиям безопасности).

**Срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации объекта от ее начала или возобновления после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния.



**Старение** – процесс постепенного изменения параметров объекта, вызываемый действием различных факторов, независимых от режима работы объекта.

**Износ** – процесс постепенного изменения параметров объекта, вызываемый действием механических, тепловых, химических и других факторов, наличие которых зависит от режима работы объекта.

**Восстанавливаемость** – свойство объекта, позволяющее в случае отказа устранить повреждение, получить значения параметров, удовлетворяющие требованиям функционирования; соответственно имеют место восстанавливаемые (ремонтируемые) объекты, или объекты многократного использования.

**Невосстанавливаемость** – свойство объекта однократного использования, который не поддается восстановлению в случае отказа; соответственно имеют место невосстанавливаемые, т.е. неремонтируемые объекты.

**Резервирование** – способ повышения надежности объекта путем включения дополнительных элементов при проектировании или в процессе эксплуатации.

**Кратность резервирования** – отношение числа резервных элементов к числу соответствующих основных элементов объекта.

**Сохранность** – свойство объекта сохранять значения параметров во время хранения и транспортировки.

**Гибкость** – приспособленность объекта к сохранению работоспособности путем обеспечения различных режимов работы.

**Живучесть** – возможность обеспечить работоспособность объекта в аварийных режимах.

**Готовность** – способность обеспечить функционирование объекта в произвольный момент времени.

**Оперативная готовность** – способность обеспечить исправное состояние объекта в произвольный момент времени и проработать безотказно заданное время.

## 2. ПРИЧИНЫ И ХАРАКТЕР ПОВРЕЖДЕНИЙ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Самым ненадежным элементом СЭС являются линии электропередачи (ЛЭП) из-за их большой протяженности и влияния на них большого числа различных внешних воздействий. В городских сетях около 85 % отключений приходится на долю ЛЭП, а в сельских сетях – 90...95 %. Отказом линии электропередачи называется всякое вынужденное отключение при ее повреждениях.

### 2.1. Воздушные линии электропередачи

Различают *устойчивые* повреждения воздушных линий (опоры, провода, изоляторы) и *неустойчивые* (*самовосстанавливающиеся*). Последние ликвидируются путем успешного действия устройств автоматического повторного включения (АПВ) или ручного включения.

Основными причинами повреждения воздушных линий (ВЛ) являются:

- грозовые перекрытия изоляции;
- гололедно-изморозевые отложения;
- ветровые нагрузки;
- вибрация и пляска проводов;
- возгорание деревянных опор;
- ослабление прочности деталей опор;
- повреждение опор и проводов автотранспортом и др.

Внешние воздействия приводят к перекрытию изоляции, разрушению изоляторов, обрыву проводов, падению опор.

Повреждения ВЛ возможны и в нормальных условиях работы из-за:

- превышения фактических электрических нагрузок расчетных значений;
- дефектов, возникших при изготовлении опор, проводов, изоляторов;
- неправильного применения типов проводов, опор, изоляторов по природно-климатическим зонам;
- нарушения правил монтажа и сооружения ВЛ;
- недостатков эксплуатации (несоблюдения сроков и объемов проверок, текущих и капитальных ремонтов).

## 2.2. Кабельные линии электропередачи

Основной причиной повреждений кабельных линий (КЛ) является нарушение их механической прочности строительными машинами и механизмами при земляных работах. По этой причине в городских электросетях происходят 60...70 % всех повреждений КЛ. Другими причинами являются старение межфазной и поясной изоляции, электрическая и химическая коррозия покрытия, перегрузка кабеля, попадание влаги в кабель, нарушение изоляции грызунами.

Повреждаемость КЛ зависит от способа прокладки КЛ (в земле, блоках, трубах, тоннелях), разности горизонтальных уровней участка КЛ (при больших перепадах происходит стекание масла и осушение изоляции), агрессивности окружающей среды, величины блуждающих токов и наличия защиты от них, интенсивности ведения строительных работ в зоне прокладки КЛ, срока эксплуатации, режима работы.

Электрические пробой чаще происходят не на целом кабеле, а в местах установки соединительных муфт, на концевых воронках, вертикальных участках кабеля.

## 2.3. Силовые трансформаторы

Этот вид оборудования повреждается значительно реже, чем линии электропередачи, однако его отказ ведет к более тяжким последствиям и восстановление работоспособности требует длительного времени.

Основные причины повреждения силовых трансформаторов:

– повреждение изоляции обмоток трансформатора из-за дефектов конструкции и изготовления, а также от воздействия внешних перенапряжений в сети и токов короткого замыкания;

– повреждение переключателей (в основном регулируемых под нагрузкой), обусловленное конструктивными и технологическими дефектами;

– повреждение вводов, в основном при воздействии внешних перенапряжений в сети (перекрытие внешней или внутренней изоляции, механические повреждения, некачественные контактные соединения).

Ремонт трансформаторов больших габаритов производится на месте. Он требует, как правило, выемки керна трансформатора, применения подъемных механизмов и может длиться несколько суток.

Ремонт трансформаторов малых габаритов на напряжение 6–20 кВ производится централизованно в мастерских предприятий электрических сетей.

Основные способы повышения надежности эксплуатации трансформаторов:

- тщательная приемка в эксплуатацию с выполнением контрольных испытаний;
- периодические осмотры и проверки в процессе эксплуатации с соблюдением требуемых сроков и объема испытаний;
- соблюдение режимов работы трансформаторов, не допускающих значительной перегрузки в течение длительного времени;
- установка в сети средств снижения мощности коротких замыканий (реакторов) и величины перенапряжений (разрядников).

## **2.4. Электрические двигатели**

Наибольшая часть отказов электродвигателей происходит из-за повреждений обмоток статора, что чаще всего связано с межвитковыми и межфазными короткими замыканиями, обрывом фазы и замыканиями на корпус.

Для ротора характерными отказами являются выплавление алюминиевой обмотки; затир ротора и статора, происходящий из-за неточного совпадения осей ротора и статора, износа подшипников, одностороннего магнитного притяжения, недопустимого прогиба вала.

У подшипников имеют место усталостные повреждения из-за переменных циклических напряжений и бринелирование поверхностей качения в результате несоосности валов двигателя и редуктора, дисбаланса ротора, резких колебаний нагрузки двигателей, внешних ударных и вибрационных воздействий.

Состояние подшипников зависит от состояния их смазки, которая с течением времени теряет свои смазывающие свойства из-за постепенного возрастания вязкости.

## **2.5. Коммутационные электрические аппараты**

Отказы коммутационных аппаратов (автоматических выключателей, разъединителей, короткозамыкателей, отделителей) происхо-

дят при отключении коротких замыканий, выполнении ими различных операций, а также в стационарном состоянии.

Основная причина повреждений коммутационных аппаратов – механические повреждения, связанные с несовершенством конструкции, нарушением технологии изготовления или правил эксплуатации. Среди них следует выделить дефекты контактных соединений, неполадки в электроприводе, повреждения из-за ошибочных действий персонала, а также отказы при выполнении операций включения из-за некачественной регулировки, настройки или вследствие обледенения.

Электрические повреждения коммутационных аппаратов вызываются перекрытием изоляции при внешних и внутренних перенапряжениях, пробоем внутрибаковой изоляции выключателей и пр.

Следует отметить большую повреждаемость линейных разъединителей 6 – 10 кВ из-за недостатков их конструктивного исполнения.

Для короткозамыкателей причиной отказов могут быть также самопроизвольные включения, а для отделителей – отказы в бестоковую паузу.

К отказам предохранителей относятся их повреждения, а также неселективные и ложные срабатывания.

## **2.6. Релейная защита и автоматика**

Отказами устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) являются:

- отказы в срабатывании при наличии требования (команды) на срабатывание;
- ложные срабатывания при отсутствии требования (команды) на срабатывание;
- срабатывания при несоответствии командного импульса, т.е. неселективные срабатывания.

Причиной этих отказов являются повреждения элементов (резисторов, диодов, транзисторов, тиристоров, конденсаторов, реле), из которых состоят схемы РЗА.

Для резисторов и полупроводниковых приборов характерен отказ типа «обрыв» (до 90 %), для конденсаторов – типа «короткое замыкание» (до 80 %).

Пайки, печатный монтаж из-за плохого их выполнения имеют до 95 % отказов типа «обрыв».

Основным источником отказов реле является контактная система, а причиной отказов – разрегулировка контактов, их сваривание, образование на их поверхности непроводящих пленок из-за коррозии, загрязнения, эрозии.

Для маломощных реле характерны отказы из-за ложных срабатываний под действием вибрационных и ударных нагрузок.

### 3. МОДЕЛИ ОТКАЗОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

#### 3.1. Виды отказов

Различают два вида отказов:

- отказ в работоспособности объекта;
- отказ в электроснабжении, т.е. отказ функционирования;

При анализе надежности СЭС имеют в виду два процесса:

- изменение уровня функционирования;
- изменение уровня способности выполнять заданные функции в заданном объеме, т.е. изменение спроса электроэнергии потребителем.

Возникновение отказа работоспособности объекта не всегда влечет за собой отказ в электроснабжении и, наоборот, отказ в электроснабжении потребителя не всегда вызывается отказом работоспособности объекта.

Разделение отказов на полные и частичные отражают то, что СЭС и ее части являются объектами с изменяющимся уровнем эффективности функционирования. Например, при повреждении секционированной ЛЭП отключается только часть линии, что означает частичный отказ ЛЭП. Ограниченное и некачественное электроснабжение является типичным отказом функционирования СЭС в отличие от полного перерыва электроснабжения потребителя (полного отказа).

#### 3.2. Классификация отказов

По продолжительности различают следующие отказы в электроснабжении:

– длительные перерывы в электроснабжении потребителей, вызываемые многочисленными повреждениями в СЭС, например, гололедно-ветровыми разрушениями опор и проводов ЛЭП (на период до нескольких суток);

– прекращение питания потребителей на время восстановления работоспособности отказавшего элемента СЭС (от 4 до 24 ч);

– прекращение питания потребителей на время, необходимое для включения резервного элемента вручную оперативно-выездными бригадами предприятий электрических сетей (от 1,5 до 6 ч);

– прекращение питания потребителей на время оперативных переключений, выполняемых дежурным персоналом на подстанциях (несколько минут);

– кратковременные перерывы питания потребителей на время автоматического ввода резервного питания (АВР) или автоматического отключения поврежденного участка сети (несколько секунд).

С точки зрения информативности отказы бывают:

– внезапные, когда потребитель не получает никакой информации об отказе;

– внеплановые отключения, сведения о которых поступают потребителю незадолго до момента отключения;

– плановые отключения, о которых потребитель предупреждается заблаговременно.

*Критериями отказов* являются их признаки (проявления), позволяющие установить факт нарушения работоспособного состояния. Они приводятся в нормативно-технической документации на объекты энергетики.

В зависимости от характеристики нарушения, степени повреждения и их последствий учитываются:

– аварии;

– отказы в работе I степени;

– отказы в работе II степени;

– потребительские отключения.

Аварии бывают станционные, электросетевые, теплосетевые, системные.

*На предприятиях электрической сети аварией* считается:

– нарушение нормальной работы электрической сети напряжением 6 кВ и выше, вызвавшие: а) перерыв электроснабжения одного и более потребителей I категории, имеющих питание от двух независимых источников, на срок, превышающий время действия устройств АПВ или АВР; б) перерыв электроснабжения потребителей I категории при несоответствии схемы питания требованиям Правил устройств электроустановок (ПУЭ) (т.е. не обеспеченным электроснабжением от двух независимых источников питания) на срок более 2,5 ч, а для сельскохозяйственных потребителей – более 10 ч; в) перерыв электроснабжения одного и более потребителей II категории на срок более 2,5 ч; а для сельскохозяйственных потребителей II категории – более 10 ч; г) перерыв электроснабжения одно-



го и более потребителей III категории на срок более 24 ч; д) недоотпуск электроэнергии потребителям в размере 20 тыс. кВт·ч и более независимо от длительности перерыва электроснабжения;

– разрушение силового трансформатора мощностью 10 МВ·А и более, если восстановление его невозможно или нецелесообразно;

– повреждение ВЛ 110 кВ и выше, требующее восстановления в течение 24 ч, а также повреждение КЛ 110 кВ, требующее восстановления в течение 36 ч;

– пожар на подстанции с высшим напряжением 110 кВ и выше, вызвавший ее обесточивание на срок 8 ч и более.

*Системными авариями* считаются:

– нарушение устойчивости работы энергосистемы и разделение ее на части, вызвавшее отключение потребителей на общую мощность более 5 % от нагрузки энергосистемы;

– работы энергосистемы с частотой ниже 49,5 Гц длительностью более 1 ч;

– многочисленные отключения или повреждения ЛЭП напряжением 6 кВ и выше из-за стихийного явления, приведшие к отключению потребителей на общую мощность более 10 % нагрузки энергосистемы.

*Отказом в работе I степени* являются:

– нарушение нормальной работы электрической сети, вызвавшее перерыв электроснабжения одного и более потребителей I категории при несоответствии схемы их питания требованиям ПУЭ, либо одного и более потребителей II категории на срок от 0,5 до 2,5 ч, а для сельскохозяйственных потребителей – от 2 до 10 ч; одного и более потребителей III категории на срок от 8 до 24 ч; недоотпуск электроэнергии потребителям от 5 до 20 тыс. кВт·ч;

– повреждение основного электрооборудования сетей, требующее восстановительного ремонта в установленные сроки;

– повреждение ВЛ или КЛ 35 (110) кВ, требующее восстановительного ремонта в срок до 24 (36) ч.

К *отказам в работе II степени* относятся нарушения нормальной работы электрических сетей, в том числе:

– перерывы в электроснабжении потребителей, не являющиеся аварией I степени;

– повреждение ~~некоторых~~ видов оборудования;

- невыполнение диспетчерского графика электрической нагрузки или оперативного задания диспетчера;
- автоматическое отключение или ошибочное отключение оборудования персоналом;
- обесточивание участков электросети напряжением ниже 6 кВ.

Под *потребительским отключением* понимают отключение оборудования из-за неправильных действий персонала потребителя.

### 3.3. Типы отказов

Как показывает практика, даже наилучшая конструкция, совершенная технология и правильная эксплуатация не исключают полностью отказы.

Различают три характерных типа отказов, присущих любым объектам.

I. *Отказы приработочные*, обусловленные дефектами проектирования, изготовления, монтажа. Они в основном устраняются путем «отбраковки» при испытании или наладке объекта. Доля этих отказов снижается по истечении периода приработки объекта.

II. *Отказы внезапные (случайные)*, вызванные воздействием различных случайных факторов и характерные преимущественно для периода нормальной эксплуатации объекта. Особенностью таких отказов является невозможность их предсказания.

III. *Отказы постепенные*, происходящие в результате износа и старения объекта. Долговечность работы системы можно увеличить за счет периодической замены наиболее ненадежных составляющих элементов.

## 4. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Рассматриваемые здесь показатели применяются для оценки надежности как невозстанавливаемых (одноразового использования), так и подлежащих ремонту, т.е. восстанавливаемых объектов до появления первого отказа.

### 4.1. Вероятность безотказной работы. Частота и интенсивность отказов

*Вероятность безотказной работы  $P(t)$*  – вероятность того, что в заданном интервале времени  $(0, t)$  в системе или элементе не произойдет отказ.

Статистически  $P(t)$  определяется как отношение числа элементов  $N(t)$ , безотказно проработавших до момента  $t$ , к первоначальному числу наблюдаемых элементов  $N(0)$ :

$$P(t) = N(t)/N(0).$$

Число работоспособных в течение времени  $(0, t)$  элементов

$$N(t) = N(0) - n(0, t)$$

где  $n(0, t)$  – число отказавших за время  $(0, t)$  элементов.

Очевидно, что  $0 \leq P(t) \leq 1$ ,  $P(0) = 1$ ,  $P(\infty) = 0$ .

*Вероятность появления отказа  $Q(t)$*  – вероятность того, что в заданном интервале времени  $(0, t)$  произойдет отказ.

Статистическая оценка  $Q(t)$ :

$$Q(t) = n(0, t)/N(0).$$

Таким образом, всегда имеет место соотношение

$$P(t) + Q(t) = 1.$$

*Частота отказов*  $a(t)$  – производная от вероятности появления отказа, означающая вероятность того, что отказ элемента произойдет за единицу времени  $(t, t + \Delta t)$ :

$$a(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}.$$

Для определения величины  $a(t)$  можно использовать статистическую оценку:

$$a(t) = \frac{n(t, \Delta t)}{N(0) \cdot \Delta t}, \quad (4.1)$$

где  $n(t, \Delta t)$  – число элементов, отказавших в интервале времени от  $t$  до  $t + \Delta t$ .

Точность статистической оценки (4.1) возрастает с увеличением первоначального числа наблюдаемых элементов и уменьшением временного интервала  $\Delta t$ .

Частота отказов, вероятность безотказной работы и вероятность появления отказа связаны следующими зависимостями:

$$P(t) = \int_t^{\infty} a(x) dx,$$

$$Q(t) = \int_0^t a(x) dx.$$

*Интенсивность отказов*  $\lambda(t)$  – условная вероятность отказа после момента  $t$  за единицу времени  $\Delta t$  при условии, что до момента  $t$  отказа элемента не было.

Интенсивность отказов связана с частотой отказов и вероятностью безотказной работы

$$\lambda(t) = a(t)/P(t). \quad (4.2)$$

Так как  $P(t) \leq 1$ , то всегда выполняется соотношение  $\lambda(t) \geq a(t)$ .

Статистически интенсивность отказов определяется следующим образом:

$$\lambda(t) = \frac{n(t, \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t}. \quad (4.3)$$

Различие между частотой и интенсивностью отказов в том, что первый показатель характеризует вероятность отказа за интервал  $(t, t + \Delta t)$  элемента, взятого из группы элементов произвольным образом, причем неизвестно, в каком состоянии (работоспособном или неработоспособном) находится выбранный элемент. Второй показатель характеризует вероятность отказа за тот же интервал времени элемента, взятого из группы оставшихся работоспособными к моменту  $t$  элементов.

Отметим важную особенность, вытекающую из формулы (4.2) для высоконадежных элементов и систем: если  $P(t) \geq 0,99$ , то  $a(t) \approx \lambda(t)$ . Поэтому в практических расчетах возможна при указанном условии взаимная замена  $a(t)$  и  $\lambda(t)$ .

Интегрируя выражение (4.2), получаем формулу для определения вероятности безотказной работы в зависимости от интенсивности отказов и времени:

$$P(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(x) dx \right]. \quad (4.4)$$

Рассмотренные показатели надежности связаны между собой соотношениями, приведенными в сводной табл. 4.1.

Таблица 4.1

Известный показатель	Формулы для определения неизвестных показателей			
	$P(t)$	$Q(t)$	$a(t)$	$\lambda(t)$
$P(t)$	—	$1 - P(t)$	$-\frac{dP(t)}{dt}$	$-\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}$
$Q(t)$	$1 - Q(t)$	—	$\frac{dQ(t)}{dt}$	$\frac{1}{1 - Q(t)} \frac{dQ(t)}{dt}$
$a(t)$	$\int_t^{\infty} a(x) dx$	$\int_0^t a(x) dx$	—	$\frac{a(t)}{\int_t^{\infty} a(x) dx}$
$\lambda(t)$	$\exp \left[ - \int_0^t \lambda(x) dx \right]$	$1 - \exp \left[ - \int_0^t \lambda(x) dx \right]$	$\lambda(t) \exp \left[ - \int_0^t \lambda(x) dx \right]$	—

## 4.2. Изменение интенсивности отказов во времени

Типичная функция интенсивности отказов во времени (в течение срока службы объекта) имеет U-образный характер (рис. 4.1).

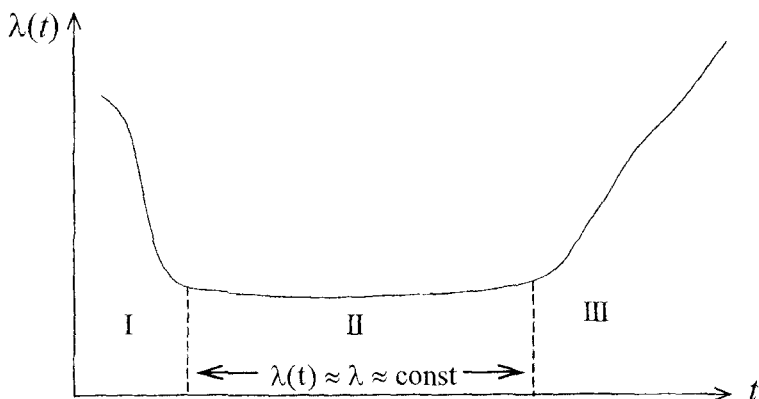


Рис. 4.1

В начальный период I преобладают приработочные отказы. После него наступает наиболее продолжительный период нормальной эксплуатации II, в котором на объект действуют случайные факторы. Последние вызывают внезапные отказы, интенсивность которых в период нормальной эксплуатации практически не зависит от времени.

В период старения и износа III в основном имеют место постепенные отказы, возникающие вследствие накопления ухудшений физико-химических свойств объекта.

Для основных элементов СЭС период приработки длится до 3–5 лет. Процессы старения и износа проявляются для ВЛ на опорах из пропитанной древесины через 15–20 лет после ввода в эксплуатацию, для трансформаторов и КЛ — через 20–30 лет (в первую очередь за счет старения изоляции). Старение и износ коммутационной аппаратуры наступает через 40–50 лет. Обычно эта аппаратура морально устаревает раньше, нежели физически. В основном элементы СЭС высоконадежны. Время их безотказной работы значительно превышает время восстановления.

Средняя наработка на отказ (среднее время безотказной работы)  $T$  представляет собой математическое ожидание наработки объекта до первого отказа. Этот показатель геометрически представляет собой площадь под кривой вероятности безотказной работы:

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (4.5)$$

### 4.3. Расчетные формулы для экспоненциального закона надежности

Учитывая, что для объектов СЭС интенсивность отказов в период нормальной эксплуатации практически неизменна, т.е.  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ , приведенные в табл. 4.1 соотношения между основными показателями надежности можно представить с учетом этого условия в более простой и наглядной форме:

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (4.6)$$

$$Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t), \quad (4.7)$$

$$a(t) = \lambda \exp(-\lambda t). \quad (4.8)$$

Формулы (4.6) – (4.8) характеризуют экспоненциальный закон надежности, т.е. экспоненциальное распределение времени безотказной работы при отказах с постоянной интенсивностью.

Формула (4.5) для определения средней наработки на отказ для экспоненциального закона принимает вид

$$T = 1/\lambda. \quad (4.9)$$

Для статистической оценки величины  $T$  применяется формула

$$T = \sum_{i=1}^{N(0)} t_i / N(0), \quad (4.10)$$

где  $t_i$  – время безотказной работы  $i$ -го элемента (объекта).



Если рассматривается один часто выходящий из строя элемент, то в формуле (4.10) под  $t_i$  понимается время безотказной работы на  $i$ -м интервале времени, а под  $N(0)$  – число временных интервалов.

Для экспоненциального закона надежности средняя наработка элемента до первого отказа равна среднему времени безотказной работы между соседними отказами. Поскольку в период нормальной эксплуатации  $\lambda = \text{const}$ , то и  $T = \text{const}$ .

На рис. 4.2 представлены в графической форме зависимости основных показателей надежности от времени при экспоненциальном законе. Площадь заштрихованной области численно характеризует среднюю наработку на отказ.

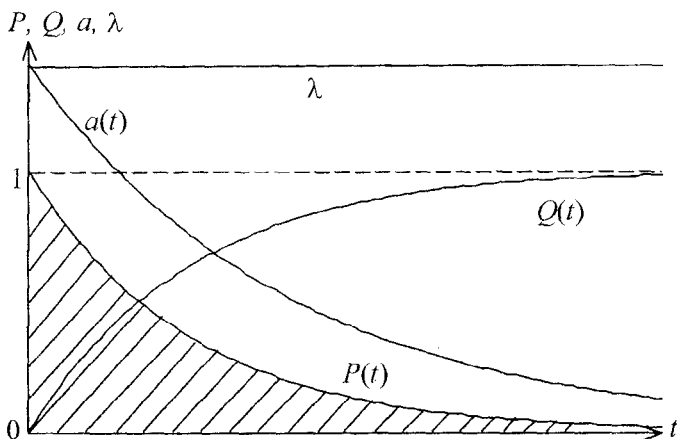


Рис. 4.2

Подавляющее большинство объектов СЭС характеризуется очень малыми численными значениями интенсивности отказов и, соответственно, большими значениями средней наработки на отказ. Поэтому экспоненты, получаемые по формулам (4.6) – (4.8), имеют в реальном масштабе очень пологий вид. Это дает основание заменить их прямыми, касательными к экспонентам в точке  $t = 0$ . Математически это означает разложение экспоненты в ряд Тейлора и отбрасывание членов ряда, имеющих высокий порядок малости.

Так как

$$\exp(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots,$$

то, полагая далее  $x = -\lambda t$ , а также ограничившись линейными членами ряда, получим упрощенные формулы для расчета показателей надежности:

$$P(t) = 1 - \lambda t, \quad (4.11)$$

$$Q(t) = \lambda t, \quad (4.12)$$

$$a(t) = \lambda(1 - \lambda t). \quad (4.13)$$

Упрощенные формулы допустимо применять при  $\lambda \ll 1$  год<sup>-1</sup>.

Графическая интерпретация перехода от точных формул (4.6)–(4.8) к приближенным (4.11)–(4.13) представлена на рис. 4.3.

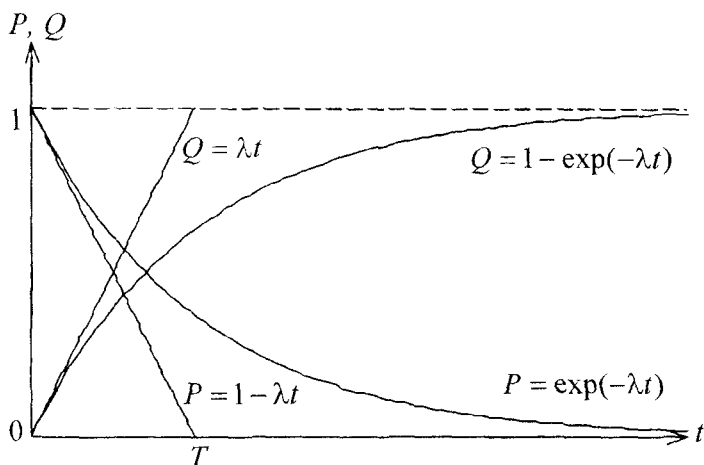


Рис. 4.3

Экспоненциальный закон хорошо описывает внезапные отказы, т.е. он справедлив для периода нормальной эксплуатации. Для опи-

сания изменений показателей надежности в начальный период эксплуатации и при старении и износе элементов в теории надежности используются другие законы распределения.

В табл. 4.2 приведены расчетные значения показателей надежности основных элементов СЭС. Данные этой таблицы носят ориентировочный характер. В дальнейшем при решении примеров будут использоваться в основном эти значения показателей надежности.

Таблица 4.2

Элемент	Условное обозначение на схемах	Интенсивность отказов $\lambda$ , год <sup>-1</sup>	Среднее время восстановления $T_B$ , ч	Интенсивность преднамеренных отключений $\nu$ , год <sup>-1</sup>	Среднее время обслуживания $T_0$ , ч
1	2	3	4	5	6
Воздушная линия 35, 110 кВ одноцепная, на 1 км длины	Л	0,08	8	0,15	8
Воздушная линия 35, 110 кВ двухцепная, на 1 км длины	2Л	0,008	10	0,01	8
Воздушная линия 6, 10 кВ одноцепная, на 1 км длины	Л	0,25	6	0,25	5,8
Кабельная линия 6, 10 кВ, на 1 км длины	К	0,10	25	0,5	3
Две кабельные линии в одной траншее, на 1 км длины	2К	0,05	15	0,05	3
Воздушная линия 0,38 кВ, на 1 км длины	Л	0,20	4	0,3	5
Трансформатор с высшим напряжением 35, 110 кВ	Т	0,03	30	0,4	22
Трансформатор с высшим напряжением 6, 10 кВ	Т	0,035	8	0,3	8
Ячейка выключателя 35, 110 кВ	Q	0,02	7	0,3	6
Ячейка выключателя 6, 10 кВ внутренней установки	Q	0,015	6	0,2	6
Ячейка выключателя 6, 10 кВ КРУН наружной установки	Q	0,05	5	0,3	5
Ячейка отделителя (ОД) или короткозамыкателя (КЗ) 35, 110 кВ	QR (QK)	0,05	4	0,3	5
Ячейка разъединителя 35, 110 кВ	QS	0,005	4	0,25	4

1	2	3	4	5	6
Ячейка разъединителя 6, 10 кВ внутренней установки	QS	0,002	3	0,2	3,5
Ячейка разъединителя 6, 10 кВ КРУН наружной установки	QS	0,01	3	0,2	3,5
Ячейка предохранителя 6, 10 кВ	FU	0,05	2,5	0,2	3
Линейный разъединитель 6, 10 кВ	QS	0,08	4,5	—	—
Шины ОРУ 35, 110 кВ, на I присоединение	Ш	0,001	5	0,15	6
Шины РУ 6, 10 кВ, на I присоединение	Ш	0,001	4	0,16	5
Сборка НИ-0,4 кВ ТП	С 0.4	0,007	4	0,2	5

**Пример 4.1.** Определить для трансформатора с высшим напряжением 10 кВ следующие показатели надежности: а) вероятности безотказной работы, появления отказа и частоту отказов для момента времени  $t = 6$  месяцев; б) среднюю наработку на отказ. Интенсивность отказов трансформатора (см. табл. 4.2)  $\lambda = 0,035 \text{ год}^{-1}$ .

**Решение.** Численные показатели надежности, рассчитанные по точным формулам (4.6) – (4.8):

$$P(0,5) = \exp(-0,035 \cdot 0,5) = 0,9827;$$

$$Q(0,5) = 1 - \exp(-0,035 \cdot 0,5) = 0,0173;$$

$$a(0,5) = \lambda P(0,5) = 0,035 \cdot 0,9827 = 0,03439;$$

$$T = \frac{1}{0,035} = 28,6 \text{ лет.}$$

Результаты расчетов показателей надежности по упрощенным формулам (4.11) – (4.13):

$$P(0,5) = 1 - 0,035 \cdot 0,5 = 0,9825;$$

$$Q(0,5) = 0,0175;$$

$$a(0,5) = 0,03438.$$

Рассматриваемый пример подтверждает правомочность расчета показателей надежности по упрощенным формулам при  $\lambda \ll 1 \text{ год}^{-1}$ .

**Пример 4.2.** Проводилось наблюдение за работой пяти однотипных элементов. Было зарегистрировано время безотказной работы элемента 1 – 250 суток, элемента 2 – 295 суток, элемента 3 – 340 суток, элемента 4 – 210 суток, элемента 5 – 190 суток. Определить среднее время безотказной работы и интенсивность отказов элементов данного типа.

*Решение.* Согласно формуле (4.10) получаем

$$T = \frac{1}{5}(250 + 295 + 340 + 210 + 190) = 257 \text{ суток};$$

$$\lambda = \frac{1}{T} = \frac{1}{257} = 0,003891 \text{ суток}^{-1}.$$

## 5. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ РЕМОНТИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассматриваемые в разделе 4 показатели надежности характеризуют только процессы отказов. Для оценки надежности объектов многоразового использования необходимы дополнительные показатели, учитывающие также процессы восстановления (ремонта) элементов (объектов).

*Параметр потока отказов  $\omega(t)$*  – математическое ожидание числа отказов, происшедших за единицу времени начиная с момента  $t$  при условии, что все элементы, вышедшие из строя, заменяются работоспособными, т.е. число наблюдаемых элементов сохраняется одинаковым в процессе эксплуатации.

Для экспоненциального закона надежности интенсивность и параметр потока отказов не зависят от времени и совпадают, т.е.  $\lambda(t) = \omega(t) = \lambda = \omega = \text{const}$ .

*Вероятность восстановления  $S(t)$*  – вероятность того, что отказавший элемент будет восстановлен в течение заданного времени  $t$ , т.е. вероятность своевременного завершения ремонта.

Очевидно то, что  $0 \leq S(t) \leq 1$ ,  $S(0) = 0$ ,  $S(\infty) = 1$ .

Для определения величины  $S(t)$  используется следующая статистическая оценка:

$$S(t) = N_B / N_B(0), \quad (5.1)$$

где  $N_B(0)$  – число элементов, поставленных на восстановление в начальный момент времени  $t = 0$ ;  $N_B$  – число элементов, время восстановления которых оказалось меньше заданного времени  $t$ , т.е. восстановленных на интервале  $(0, t)$ .

*Вероятность невозможности восстановления (несвоевременного завершения ремонта)  $G(t)$*  – вероятность того, что отказавший элемент не будет восстановлен в течение заданного времени  $t$ .

Статистическая оценка величины  $G(t)$

$$G(t) = \frac{N_B(0) - N_B}{N_B(0)}. \quad (5.2)$$

Из анализа выражений (5.1) и (5.2) следует, что всегда

$$S(t) + G(t) = 1.$$

На рис. 5.1 в графической форме представлены изменения  $S(t)$  и  $G(t)$  во времени.

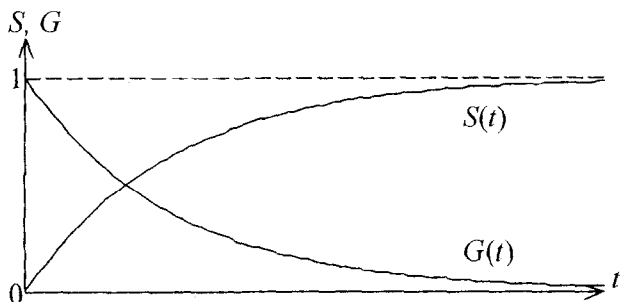


Рис. 5.1

Частота восстановления  $a_B(t)$  — производная от вероятности восстановления

$$a_B(t) = \frac{dS(t)}{dt} = -\frac{dG(t)}{dt}.$$

Для численного определения величины  $a_B(t)$  используется статистическая оценка:

$$a_B(t) = \frac{n_B(t, \Delta t)}{N_B(0) \cdot \Delta t}, \quad (5.3)$$

где  $n_B(t, \Delta t)$  — число восстановленных элементов на интервале времени от  $t$  до  $t + \Delta t$ .

Интенсивность восстановления  $\mu(t)$  — условная вероятность восстановления после момента  $t$  за единицу времени  $\Delta t$  при условии, что до момента  $t$  восстановления элемента не произошло.

Интенсивность восстановления связана с частотой восстановления:

$$\mu(t) = a_B(t)/G(t).$$

Статистически интенсивность восстановления определяется следующим образом:

$$\mu(t) = \frac{n_B(t, \Delta t)}{(N_B(0) - N_B) \cdot \Delta t}. \quad (5.4)$$

Сравнение формул для определения частоты (5.3) и интенсивности (5.4) восстановления показывает, что они отличаются числом элементов в знаменателе. В отличие от процесса отказов, который развивается во времени естественным образом, процесс восстановления является целиком искусственным (ремонт элемента) и тем самым полностью определяется организационно-технической деятельностью эксплуатационного персонала. Поэтому кривая интенсивности восстановления, аналогичная кривой интенсивности отказов, здесь отсутствует. Так как установлены обоснованные нормативы времени на проведение ремонтных работ, то принимают интенсивность восстановления независимой от времени:  $\mu(t) = \mu = \text{const}$ . Численные значения интенсивности восстановления сведены в справочные таблицы по видам оборудования и ремонтов.

Для экспоненциального распределения времени восстановления, т.е. при постоянной интенсивности восстановления, по аналогии с процессом отказов (формулы (4.3) и (4.4)) имеем следующие зависимости:

$$S(t) = 1 - \exp(-\mu t),$$

$$G(t) = \exp(-\mu t).$$

Среднее время восстановления  $T_B$  представляет собой математическое ожидание времени восстановления и численно соответствует площади под кривой вероятности невозстановления:



$$T_B = \int_0^{\infty} G(t) dt .$$

Статистическая оценка величины  $T_B$ :

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^{N_B(0)} t_{Bi}}{N_B(0)} ,$$

где  $t_{Bi}$  – длительность восстановления  $i$ -го элемента (объекта).

Для отдельно рассматриваемого элемента под  $t_{Bi}$  понимается длительность восстановления после  $i$ -го отказа, а под  $N_B(0)$  – число отказов данного элемента.

При экспоненциальном распределении времени восстановления, когда интенсивность восстановления  $\mu = \text{const}$ , аналогично (4.9) имеем соотношение

$$T_B = 1/\mu ,$$

т.е. среднее время восстановления численно равно средней по множеству однотипных элементов (объектов) продолжительности восстановления, приходящейся на один объект. Поскольку  $\mu = \text{const}$ , то и  $T_B = \text{const}$ .

В табл. 5.1 сведены показатели надежности, характеризующие процесс выхода из строя элементов, и аналогичные им показатели, характеризующие встречный процесс восстановления элементов.

Таблица 5.1

Процесс отказов		Процесс восстановления	
Вероятность безотказной работы	$P(t)$	Вероятность невозвращения	$G(t)$
Вероятность отказа	$Q(t)$	Вероятность восстановления	$S(t)$
Частота отказов	$a(t)$	Частота восстановления	$a_B(t)$
Интенсивность отказов	$\lambda(t)$	Интенсивность восстановления	$\mu(t)$
Средняя наработка на отказ	$T$	Среднее время восстановления	$T_B$

В случае, когда требуется оценить надежность работы элемента безотносительно к времени его работы, используются рассматриваемые ниже показатели.

*Коэффициент готовности*  $K_r$  – вероятность того, что элемент работоспособен в произвольный момент времени.

Для определения величины  $K_r$  отдельного элемента используется следующая статистическая оценка:

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{i=1}^n t_{vi}}, \quad (5.5)$$

где  $t_{pi}$  –  $i$ -й интервал времени исправной работы элемента,  $t_{vi}$  –  $i$ -й интервал времени восстановления элемента после  $i$ -го отказа,  $n$  – число отказов.

Разделив численно знаменатель выражения (5.5) на число отказов  $n$ , произошедших за рассматриваемое время, получим следующее выражение:

$$K_r = \frac{T}{T + T_B}. \quad (5.6)$$

Таким образом, коэффициент готовности равен вероятности пребывания элемента в работоспособном состоянии в произвольный момент времени в рассматриваемом периоде.

Коэффициент готовности имеет смысл *надежностного коэффициента полезного действия*, так как числитель представляет собой полезную составляющую, а знаменатель – общие затраты времени.

Коэффициент готовности является важным показателем надежности, так как характеризует готовность элемента к работе и позволяет также оценить его эксплуатационные качества (удобство эксплуатации, стоимость эксплуатации) и требуемую квалификацию обслуживающего персонала.

*Коэффициент простоя*  $K_{\Pi}$  – вероятность того, что элемент неработоспособен в любой момент времени.

Статистическая оценка величины  $K_{\Pi}$ :

$$K_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{в}i}}{\sum_{i=1}^n t_{\text{р}i} + \sum_{i=1}^n t_{\text{в}i}}.$$

По аналогии с коэффициентом готовности получаем зависимость для коэффициента простоя:

$$K_{\Pi} = \frac{T_{\text{в}}}{T + T_{\text{в}}}.$$

Очевидно, что всегда имеет место равенство

$$K_{\Gamma} + K_{\Pi} = 1. \quad (5.7)$$

*Относительный коэффициент простоя*  $K_{\text{по}}$  – отношения коэффициента простоя к коэффициенту готовности:

$$K_{\text{по}} = K_{\Pi} / K_{\Gamma} = T_{\text{в}} / T.$$

*Коэффициент технического использования*  $K_{\text{ти}}$  учитывает дополнительные преднамеренные отключения элемента, необходимые для проведения планово-предупредительных ремонтов:

$$K_{\text{ти}} = \frac{T}{T + T_{\text{в}} + T_0}, \quad (5.8)$$

где  $T_0$  – среднее время обслуживания, т.е. среднее время нахождения элемента в отключенном состоянии для производства планово-предупредительных ремонтов (профилактики).

Коэффициент оперативной готовности  $K_{ог}$  – вероятность того, что элемент работоспособен в произвольный момент времени  $t$  и безошибочно проработает в течение заданного времени  $\tau(t, t + \tau)$ :

$$K_{ог} = K_{г}P(\tau).$$

Для определения величины  $K_{ог}$  используется статистическая оценка

$$K_{ог} = N_t(\tau)/N(0),$$

где  $N_t(\tau)$  – число элементов, исправных в момент времени  $t$  и безотказно проработавших в течение времени  $\tau$ ;  $N(0)$  – первоначальное число наблюдаемых элементов в момент времени  $t = 0$ .

Коэффициент оперативной готовности позволяет количественно оценить надежность объекта в аварийных условиях, т.е. до окончания выполнения какой-то эпизодической функции.

**Пример 5.1.** Проводилось наблюдение за работой элемента на интервале времени  $t = 1300$  ч, в течение которого было зафиксировано  $N(0) = 14$  отказов. Требуется определить среднюю наработку на отказ, если известно среднее время восстановления  $T_{в} = 2$  ч, а вывод элемента из работы для проведения профилактических ремонтов не производился.

**Решение.** Используем формулу (4.10). С учетом времени восстановления элемента после отказов получаем

$$T = \frac{1}{14}[1300 - (14 - 1) \cdot 2] = 91 \text{ ч.}$$

**Пример 5.2.** Определить коэффициенты готовности, простоя и коэффициент технического использования для трансформатора с высшим напряжением 35, 110 кВ.

*Решение.* Из табл. 4.2 берем исходные показатели надежности (для резервированной системы)  $\lambda = 0,03 \text{ год}^{-1}$ ,  $T_B = 30 \text{ ч}$ ,  $T_O = 11 \text{ ч}$ . Тогда  $T = 1/\lambda = 1/0,03 = 33,33 \text{ года}$ . Расчеты по формулам (5.6), (5.7), (5.8) дают следующие результаты:

$$K_{\Gamma} = \frac{8760 \cdot 33,3}{8760 \cdot 33,3 + 30} = 0,999897;$$

$$K_{\Pi} = 1 - 0,999897 = 0,000103;$$

$$K_{\text{ти}} = \frac{8760 \cdot 33,3}{8760 \cdot 33,3 + 11} = 0,999859.$$

## 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ НАДЕЖНОСТИ ВХОДЯЩИХ В НИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Надежность систем зависит не только от составляющих их элементов, но и от способа соединения последних. Предполагается, что элементы находятся в двух состояниях – работоспособном или неработоспособном, а пропускная способность элементов не ограничена.

Расчеты надежности систем основаны на использовании основных теорем теории вероятностей.

*Суммой двух событий A и B* называется событие C, состоящее в выполнении события A или события B или обоих вместе.

Если события A и B несовместны, то появления обоих этих событий вместе исключено, и сумма событий A и B сводится к появлению события A или события B.

Следовательно, *суммой событий A и B* называется событие C, состоящее в появлении хотя бы одного из этих событий.

*Произведением двух событий A и B* называется событие C, состоящее в совместном выполнении события A и события B.

### 6.1. Теорема сложения вероятностей

Вероятность суммы двух *несовместных* событий равна сумме вероятностей этих событий:

$$p(A + B) = p(A) + p(B).$$

Для *n* событий

$$p(C) = p(A_1) + p(A_2) + \dots + p(A_n).$$

Из теории вероятностей следует:

– если события  $A_1, A_2, \dots, A_n$  образуют полную группу несовместных событий, то сумма их вероятностей равна единице;

– сумма вероятностей противоположных событий равна единице.

В случае, когда события A и B *совместны*, вероятность суммы этих событий выражается формулой:

$$p(A + B) = p(A) + p(B) - p(AB). \quad (6.1)$$

## 6.2. Теорема умножения вероятностей

Предварительно введем понятие о зависимых и независимых событиях.

Событие  $A$  называется *независимым* от события  $B$ , если вероятность события  $A$  не зависит от того, произошло событие  $B$  или нет.

Событие  $A$  называется *зависимым* от события  $B$ , если вероятность события  $A$  меняется в зависимости от того, произошло событие  $B$  или нет.

Вероятность события  $A$ , вычисленная при условии, что имело место событие  $B$ , называется *условной вероятностью* события  $A$  и обозначается  $p(A|B)$ .

Теорема умножения вероятностей формулируется следующим образом: вероятность произведения двух событий равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого, вычисленную при условии, что первое имело место, т.е.

$$p(AB) = p(A)p(B|A) = p(B)p(A|B).$$

Из теоремы умножения вероятностей следует, что если событие  $A$  не зависит от события  $B$ , то и событие  $B$  не зависит от события  $A$ , т.е. если  $p(A) = p(A|B)$ , то  $p(B) = p(B|A)$ . Таким образом, зависимость или независимость событий всегда взаимны. В связи с этим можно дать следующее новое определение независимых событий: два события называются независимыми, если появление одного из них не изменяет вероятности появления другого.

Понятие независимости событий может быть распространено на случай произвольного числа событий. Несколько событий называются независимыми, если любое из них не зависит от любой совокупности остальных.

Вероятность произведения двух независимых событий равна произведению вероятности этих событий:

$$p(AB) = p(A)p(B).$$

Для  $n$  независимых событий

$$p(C) = p(A_1)p(A_2)\dots p(A_n), \quad (6.2)$$

т.е. вероятность произведения независимых событий равна произведению вероятностей этих событий.

### 6.3. Формула полной вероятности

Данная формула является следствием теорем сложения и умножения вероятностей. Пусть требуется определить вероятность некоторого события  $A$ , которое может произойти вместе с одним из событий  $H_1, H_2, \dots, H_n$ , образующих полную группу несовместимых событий, называемых гипотезами. В этом случае вероятность события  $A$  вычисляется как сумма произведений вероятности каждой гипотезы на условную вероятность события при этой гипотезе, т.е.

$$p(A) = \sum_{i=1}^n p(H_i)p(A/H_i). \quad (6.3)$$

Формула (6.3) называется формулой полной вероятности.

### 6.4. Теорема гипотез

Теорема гипотез (формула Байеса) является следствием теоремы умножения и формулы полной вероятности. Пусть имеется полная группа несовместимых гипотез  $H_1, H_2, \dots, H_n$ . Вероятности этих гипотез до опыта известны и равны соответственно  $p(H_1), p(H_2), \dots, p(H_n)$ . Произведен опыт, в результате которого обнаружено появление некоторого события  $A$ . Тогда вероятности этих гипотез в связи с появлением события  $A$  изменятся и примут значения

$$p(H_i/A) = \frac{p(H_i)p(A/H_i)}{\sum_{i=1}^n p(H_i)p(A/H_i)}.$$

Если в результате произведенного опыта событие  $A$  не обнаружено, вероятности гипотез в связи с непоявлением этого события ( $\bar{A}$ ) примут значения



$$p(H_i/\bar{A}) = \frac{p(H_i)p(\bar{A}/H_i)}{\sum_{i=1}^n p(H_i)p(\bar{A}/H_i)}$$

### 6.5. Формула Бернулли

В теории надежности большую роль играет формула (схема) Бернулли. Предположим, что производится последовательность  $n$  независимых испытаний, в каждом из которых событие  $A$  может произойти с одной и той же вероятностью  $p$ . Спрашивается, чему равна вероятность того, что событие  $A$  произойдет при  $m$  каких-то испытаниях, а при остальных  $n - m$  не произойдет. Если обозначить эту вероятность через  $p_n(m)$  и ввести обозначение  $q = 1 - p$ , то имеет место формула Бернулли:

$$p_n(m) = C_n^m p^m q^{n-m},$$

где  $C_n^m$  — означает число сочетаний из  $n$  элементов по  $m$  ( $n \geq m$ ):

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!} = \frac{1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot n}{1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot m \cdot 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot (n-m)}$$

Формула Бернулли вытекает из закона больших чисел. По мере приближения  $m$  к  $n$  имеем

$$\lim_{m \rightarrow n} C_n^m = 1 \quad \text{и} \quad \lim_{m \rightarrow n} p_n(m) = p^n.$$

### 6.6. Надежность систем с последовательным соединением элементов

Последовательным (основным) называется соединение элементов, при котором выход из строя хотя бы одного из них приводит к отказу всей системы, т.е. последовательная структура работоспособна, если все ее элементы работоспособны.

Следует отметить, что в производственной системе элементы физически могут быть соединены и параллельно, однако по надежности они при этом могут соединяться как параллельно, так и последовательно.

Схема замещения (по надежности) системы с последовательной структурой представлена на рис. 6.1.

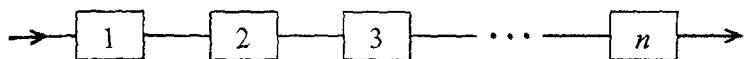


Рис. 6.1

Предполагая, что отказы элементов являются независимыми событиями, определяем на основе формулы (6.2) вероятность работоспособности (безотказной работы) последовательной структуры по формуле

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = P_1(t)P_2(t)P_3(t)\dots P_n(t), \quad (6.4)$$

где  $P_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента,  $n$  – число элементов.

Вероятность отказа последовательной структуры

$$Q_C(t) = 1 - P_C(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - Q_i(t)], \quad (6.5)$$

где  $Q_i(t)$  – вероятность отказа  $i$ -го элемента.

Если все элементы равнонадежны, т.е.  $P_i(t) = P(t)$ ,  $Q_i(t) = Q(t)$ , то формулы (6.4) и (6.5) принимают вид:

$$P_C(t) = [P(t)]^n,$$

$$Q_C(t) = 1 - [1 - Q(t)]^n.$$

Формулу (6.4) с учетом зависимости (4.4) можно представить в виде

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^n \exp \left[ - \int_0^t \lambda_i(x) dx \right], \quad (6.6)$$

где  $\lambda_i(x)$  – интенсивность отказов  $i$ -го элемента.

Для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы, т.е. при постоянной во времени интенсивности отказов каждого элемента, формула (6.6) упрощается и принимает вид

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp(-t \sum_{i=1}^n \lambda_i). \quad (6.7)$$

Интенсивность отказов системы с последовательной структурой в целом на основании формул (4.6) и (6.7) можно определить по формуле

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n. \quad (6.8)$$

Среднее время безотказной работы системы с учетом формул (4.9) и (6.8) будет

$$T_C = 1/\lambda_C = 1 / \sum_{i=1}^n T_i^{-1},$$

где  $T_i$  – среднее время безотказной работы  $i$ -го элемента.

Среднее время восстановления системы

$$T_{BC} = \lambda_C^{-1} \sum_{i=1}^n \lambda_i T_{Bi} = T_C \sum_{i=1}^n \lambda_i T_{Bi}, \quad (6.9)$$

где  $T_{Bi}$  — время восстановления  $i$ -го элемента, является математическим ожиданием времени восстановления, взвешенным по интенсивности отказов и последовательно соединенных элементов.

**Пример 6.1.** Определить интенсивность отказов, среднее время восстановления, среднее время безотказной работы и вероятность безотказной работы в течение 1 года, системы, состоящей из 5 последовательно соединенных элементов со следующими показателями надежности:

$$\lambda_1 = 0,50 \text{ год}^{-1}; \quad T_{B1} = 16,0 \text{ ч};$$

$$\lambda_2 = 0,32 \text{ год}^{-1}; \quad T_{B2} = 8,0 \text{ ч};$$

$$\lambda_3 = 0,30 \text{ год}^{-1}; \quad T_{B3} = 6,0 \text{ ч};$$

$$\lambda_4 = 0,64 \text{ год}^{-1}; \quad T_{B4} = 12,5 \text{ ч};$$

$$\lambda_5 = 0,001 \text{ год}^{-1}; \quad T_{B5} = 15,0 \text{ ч}$$

*Решение.* Интенсивность отказов системы

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^5 \lambda_i = 0,50 + 0,32 + 0,30 + 0,64 + 0,001 = 1,761 \text{ год}^{-1}.$$

Среднее время восстановления

$$T_{BC} = \lambda_C^{-1} \sum_{i=1}^5 \lambda_i \cdot T_{Bi} = 1,761^{-1} (0,50 \cdot 16,0 + 0,32 \cdot 8,0 + \\ + 0,30 \cdot 6,0 + 0,64 \cdot 12,5 + 0,001 \cdot 15,0) = 11,57 \text{ ч}.$$

Среднее время безотказной работы

$$T_C = \lambda_C^{-1} = 1/1,761 = 0,568 \text{ год} = 4974 \text{ ч}.$$

Вероятность безотказной работы за  $t = 1$  год

$$P_C(1) = \exp(-1,761 \cdot 1) = 0,17.$$

### 6.7. Надежность систем с параллельным соединением элементов

Параллельным соединением называется структура, отказ которой наступает при отказе всех элементов, входящих в структуру.

Параллельную структуру называют также избыточной или резервированной, поскольку она содержит элементов больше, чем это необходимо для ее нормальной работы. При отказе одного или нескольких элементов функция структуры выполняется оставшимися в работе элементами, если последние удовлетворительно выполняют функции отказавших.

Схема замещения (по надежности) системы с параллельной структурой представлена на рис. 6.2.

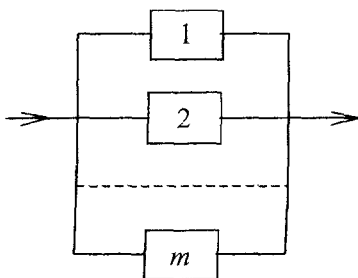


Рис. 6.2

В общем случае отказ параллельной структуры предполагает, что все  $m$  элементов находятся в состоянии простоя, т.е.

$$Q_C(t) = \prod_{i=1}^m Q_i(t) = Q_1(t)Q_2(t)\dots Q_m(t). \quad (6.10)$$

Вероятность безотказной работы системы

$$P_C(t) = 1 - \prod_{i=1}^m Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_i(t)].$$

При равнонадежных элементах  $[P_i(t) = P(t), Q_i(t) = Q(t)]$  имеем

$$Q_C(t) = [Q(t)]^m, \quad (6.11)$$

$$P_C(t) = 1 - [1 - P(t)]^m. \quad (6.12)$$

Как и для систем с последовательным соединением элементов, здесь предполагается независимость отказов всех элементов. Кроме того, пропускная способность элементов не ограничивается.

Число параллельно соединенных элементов в СЭС редко бывает больше трех. Вероятность того, что будут работать один или два элемента (при  $m = 2$ ) будет в соответствии с формулой (6.1) равна

$$P_C(t) = P_1(t) + P_2(t) - P_1(t)P_2(t). \quad (6.13)$$

Вероятность отказа обоих элементов

$$Q_C(t) = Q_1(t)Q_2(t) = [1 - P_1(t)][1 - P_2(t)] = 1 - P_C(t).$$

## 7. СПОСОБЫ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

### 7.1. Виды резервирования

На стадии проектирования СЭС для обеспечения требуемой надежности приходится во многих случаях как минимум дублировать отдельные элементы и даже отдельные системы, т.е. использовать резервирование.

Резервирование характерно тем, что оно позволяет повысить надежность системы по сравнению с надежностью составляющих ее элементов. Повышение надежности отдельно взятых элементов требует больших материальных затрат. В этих условиях резервирование, например, за счет введения дополнительных элементов, является эффективным средством обеспечения требуемой надежности систем.

Если при последовательном соединении элементов общая надежность системы (т.е. вероятность безотказной работы) ниже надежности самого ненадежного элемента, то при резервировании общая надежность системы может быть выше надежности самого надежного элемента.

Резервирование осуществляется путем введения избыточности. В зависимости от природы последней резервирование бывает:

- структурное (аппаратное);
- информационное;
- временное.

*Структурное резервирование* заключается в том, что в минимально необходимый вариант системы, состоящей из основных элементов, вводятся дополнительные элементы, устройства или даже вместо одной системы предусматривается использование нескольких одинаковых систем.

*Информационное резервирование* предусматривает использование избыточной информации. Его простейшим примером является многократная передача одного и того же сообщения по каналу связи. Другим примером являются коды, применяемые в управляющих ЭВМ для обнаружения и исправления ошибок, возникающих в результате сбоя и отказов аппаратуры.

*Временное резервирование* предусматривает использование избыточного времени. Возобновление прерванного в результате отка-

за функционирования системы происходит путем ее восстановления, если имеется определенный запас времени.

Существуют два метода повышения надежности систем путем структурного резервирования:

1) *общее резервирование*, при котором резервируется система в целом;

2) *раздельное (поэлементное) резервирование*, при котором резервируются отдельные части (элементы) системы.

Схемы общего и раздельного структурного резервирования представлены соответственно на рис. 7.1 и 7.2, где  $n$  – число последовательных элементов в цепи,  $m$  – число резервных цепей (при общем резервировании) или резервных элементов для каждого основного (при раздельном резервировании).

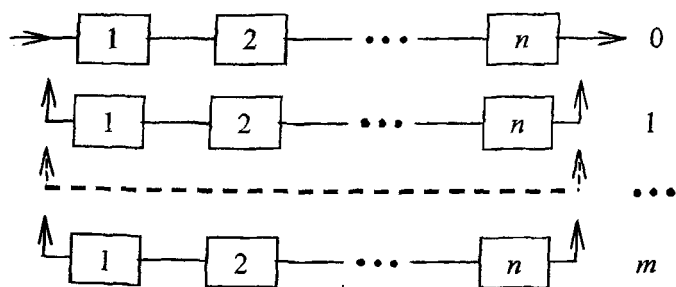


Рис. 7.1

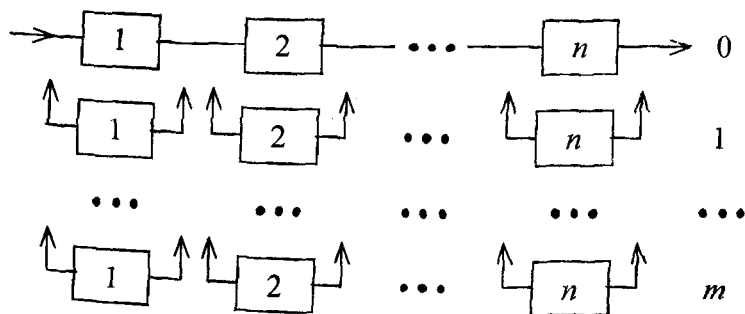


Рис. 7.2



При  $m = 1$  имеет место дублирование, а при  $m = 2$  – троирование.

Обычно стремятся по возможности применять раздельное резервирование, т.к. при этом выигрыш в надежности часто достигается значительно меньшими затратами, чем при общем резервировании.

В зависимости от способа включения резервных элементов различают постоянное резервирование, резервирование замещением и скользящее резервирование.

*Постоянное резервирование* – это такое резервирование, при котором резервные элементы участвуют в работе объекта наравне с основными. В случае отказа основного элемента не требуется специальных устройств, вводящих в действие резервный элемент, поскольку он включается в работу одновременно с основным.

*Резервирование замещением* – это такое резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного. При резервировании замещением необходимы контролирующие и переключающие устройства для обнаружения факта отказа основного элемента и переключения с основного на резервный.

*Скользящее резервирование* представляет собой разновидность резервирования замещением, при котором основные элементы объекта резервируются элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший элемент.

Оба вида резервирования (постоянное и замещением) имеют свои преимущества и недостатки.

Достоинством постоянного резервирования является простота, т.к. в этом случае не требуются контролирующие и переключающие устройства, понижающие надежность системы в целом, и, самое главное, отсутствует перерыв в работе. Недостатком постоянного резервирования является нарушение режима работы резервных элементов при отказе основных.

Включение резерва замещением обладает следующим преимуществом: не нарушает режима работы резервных элементов, сохраняет в большей степени надежность резервных элементов, позволяет использовать один резервный элемент на несколько рабочих (при скользящем резервировании).

В зависимости от режима работы резервных элементов различают нагруженный (горячий) и ненагруженный (холодный) резерв.

*Нагруженный (горячий) резерв* в энергетике называют также *вращающимся* или *включенным*. В данном режиме резервный элемент находится в том же режиме, что и основной. Ресурс резервных элементов начинает расходоваться с момента включения в работу всей системы и вероятность безотказной работы резервных элементов в этом случае не зависит от того, в какой момент времени они включаются в работу.

*Облегченный (теплый) резерв* характеризуется тем, что резервный элемент находится в менее нагруженном режиме, чем основной. Поэтому, хотя ресурс резервных элементов также начинает расходоваться с момента включения всей системы в целом, интенсивность расхода ресурса резервных элементов до момента их включения вместо отказавших значительно ниже, чем в рабочих условиях. Этот вид резерва обычно размещается на агрегатах, работающих на холостом ходу, и, следовательно, в данном случае ресурс резервных элементов срабатывается меньше по сравнению с рабочими условиями, когда агрегаты несут нагрузку. Вероятность безотказной работы резервных элементов в случае этого вида резерва будет зависеть как от момента их включения в работу, так и от того, насколько отличаются законы распределения вероятности безотказной работы их в рабочем и резервном условиях.

В случае *ненагруженного (холодного) резерва* резервные элементы начинают расходовать свой ресурс с момента их включения в работу вместо основных. В энергетике этим видом резерва служат обычно отключенные агрегаты.

Расчеты надежности систем с параллельно включенными элементами зависят от способа резервирования.

## 7.2. Надежность систем при постоянном общем резервировании

Отказ систем с постоянным резервированием, когда имеет место нагруженный резерв, возникает при одновременном нахождении в состоянии отказа всех элементов, соединенных параллельно, каждый из которых способен передавать требуемую мощность.

Будем считать, что резервируемые и резервные элементы равнонадежны, т.е.  $p_i(t) = p(t)$  и  $q_i(t) = q(t)$ . Для удобства вероятности

безотказной работы и появления отказов отдельных элементов обозначаем в этом и последующем разделах прописными буквами.

С учетом схемы замещения (рис. 7.3) и формулы (6.11) вероятность отказа системы с  $m$  резервными цепями можно рассчитать следующим образом:

$$Q_C(t) = Q_0(t) \prod_{i=1}^m Q_{P_i}(t) = \prod_{i=1}^{m+1} Q_i(t), \quad (7.1)$$

где  $Q_0(t)$  – вероятность отказа основной цепи,  $Q_{P_i}(t)$  – вероятность отказа  $i$ -й резервной цепи.

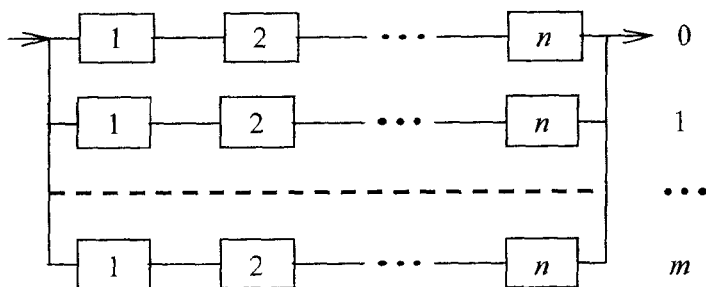


Рис. 7.3

Соответственно вероятность безотказной работы системы:

$$P_C(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m+1} Q_i(t). \quad (7.2)$$

В соответствии с формулой (6.5) имеем

$$Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - q_i(t)].$$

При одинаковых вероятностях отказов основной и резервной цепей ( $Q_i(t) = Q(t)$ ) формулы (7.1) и (7.2) принимают вид:

$$Q_C(t) = [Q(t)]^{m+1},$$

$$P_C(t) = 1 - [Q(t)]^{m+1}. \quad (7.3)$$

Среднее время безотказной работы системы при общем резервировании без учета восстановления

$$T_C = \lambda^{-1} \sum_{i=0}^m (i+1)^{-1}, \quad (7.4)$$

где  $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$  — интенсивность отказов любой из  $(m+1)$  цепей,

$\lambda_i$  — интенсивность отказов  $i$ -го элемента.

Для системы из двух параллельных цепей ( $m=1$ ) формула (7.4) принимает вид

$$T_C = 3/2\lambda. \quad (7.5)$$

Вероятность безотказной работы такой системы согласно выражению (6.13)

$$P_C(t) = 2 \exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t).$$

Таким образом, при отсутствии восстановления закон изменения вероятности безотказной работы системы отличается от экспоненциального и интенсивность отказов системы  $\lambda_C$  изменяется во времени от 0 (при  $t=0$ ) до  $\lambda$ , соответствующей интенсивности отказов одной параллельной цепи, согласно выражению

$$\lambda_C(t) = \frac{\lambda(m+1) \exp(-\lambda t) [1 - \exp(-\lambda t)]^m}{1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^{m+1}}.$$

Среднее время восстановления системы в общем случае определяется по формуле

$$T_{BC} = \left( \sum_{i=0}^m T_{Bi}^{-1} \right)^{-1}, \quad (7.6)$$

где  $T_{Bi}$  – среднее время восстановления  $i$ -й цепи.

Для частного случая  $m = 1$  (дублированная система) формула (7.6) принимает вид

$$T_{BC} = T_{B1} T_{B2} (T_{B1} + T_{B2})^{-1}.$$

Среднее время безотказной работы восстанавливаемой дублированной системы с одинаковыми элементами ( $T = T_1 = T_2$ ,  $T_B = T_{B1} = T_{B2}$ ) определяется выражением

$$T_C = \frac{T + 3T_B}{2T_B} T. \quad (7.7)$$

При  $T \gg T_B$ , что имеет место в большинстве практических случаев, получаем

$$T_C \approx \frac{T^2}{2T_B}.$$

Вероятность безотказной работы восстанавливаемой системы подчиняется экспоненциальному закону

$$P_C(t) = \exp(-\lambda_C t). \quad (7.8)$$

Интенсивность отказов системы постоянна во времени и связана со средним временем безотказной работы соотношением

$$\lambda_C = T_C^{-1}.$$

**Пример 7.1.** Рассчитать вероятность безотказной работы в течение 3 месяцев, интенсивность отказов, среднюю наработку на отказ одноцепной ВЛ длиной  $l = 35$  км вместе с понижающим трансформатором 110/10 кВ и коммутационной аппаратурой (рис. 7.4).

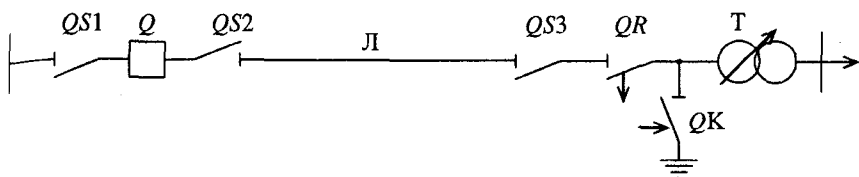


Рис. 7.4

**Решение.** Схема замещения по надежности рассматриваемой СЭС представляет собой последовательную структуру (рис. 7.5).



Рис. 7.5

Интенсивности отказов элементов взяты из табл. 4.2:

$$\lambda_1 = \lambda_3 = \lambda_5 = \lambda_{QS} = 0,005 \text{ год}^{-1}; \quad \lambda_2 = \lambda_Q = 0,02 \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_4 = \lambda_{Лl} = 0,08 \cdot 35 = 2,8 \text{ год}^{-1}; \quad \lambda_6 = \lambda_{QR} = 0,05 \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_7 = \lambda_{QK} = 0,05 \text{ год}^{-1}; \quad \lambda_8 = \lambda_T = 0,03 \text{ год}^{-1}.$$

Согласно формуле (6.8) определяем интенсивность отказов схемы питания

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^8 \lambda_i = 3 \cdot 0,005 + 0,02 + 2,8 + 2 \cdot 0,05 + 0,03 = 2,97 \text{ год}^{-1}.$$

Этот расчет показывает, что доминирующее влияние на выход схемы из строя оказывает повреждаемость воздушной линии.

Средняя наработка на отказ схемы питания

$$T_C = 1/\lambda_C = 1/2,97 = 0,34 \text{ года.}$$

Вероятность безотказной работы схемы в течение  $t = 0,25$  года

$$P_C(0,25) = \exp(-2,97 \cdot 0,25) = \exp(-0,7425) = 0,476.$$

**Пример 7.2.** Определить, насколько выше показатели надежности понизительной двухтрансформаторной подстанции 110/10 кВ при постоянной совместной работе обоих трансформаторов в течение 6 месяцев при отсутствии восстановления по сравнению с работой одного трансформатора. Отказами коммутационных аппаратов и преднамеренными отключениями трансформаторов пренебречь.

*Решение.* Исходные данные, взятые из табл. 4.2, следующие:  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,03 \text{ год}^{-1}$ . Вероятность безотказной работы в течение 6 месяцев одного трансформатора

$$P_{1(2)}(0,5) = \exp(-0,03 \cdot 0,5) = 0,9851.$$

Средняя наработка на отказ одного трансформатора

$$T_{1(2)} = 1/\lambda_{1(2)} = 1/0,03 = 33,3 \text{ года.}$$

Вероятность безотказной работы двухтрансформаторной подстанции, рассчитанная по формуле (6.13):

$$P_C(0,5) = P_1(0,5) + P_2(0,5) - P_1(0,5)P_2(0,5) = 2 \cdot 0,9851 - 0,9851^2 = 0,9998.$$

Средняя наработка на отказ двухтрансформаторной подстанции, рассчитанная по формуле (7.5):

$$T_C = \frac{3}{2\lambda_{1(2)}} = \frac{3}{2 \cdot 0,03} = 50 \text{ лет.}$$

Анализ результатов показывает, что надежность двухтрансформаторной подстанции намного превышает надежность однострансформаторной подстанции.

**Пример 7.3.** Рассмотрим секцию РУ 6 кВ, от которой питаются 18 отходящих линий (рис. 7.6). Интенсивность отказов выключателей, сопровождающихся короткими замыканиями, оценивается величиной  $\lambda_Q = 0,03 \text{ год}^{-1}$ , интенсивность отказов с короткими замыканиями для сборных шин на одно присоединение  $\lambda_{ш}^0 = 0,001 \text{ год}^{-1}$  (см. табл. 4.2). Определить интенсивность кратковременных погашений секции РУ, предполагая абсолютную надежность автоматического ввода резерва (АВР) и выключателя Q2, резервирующего питание секции.

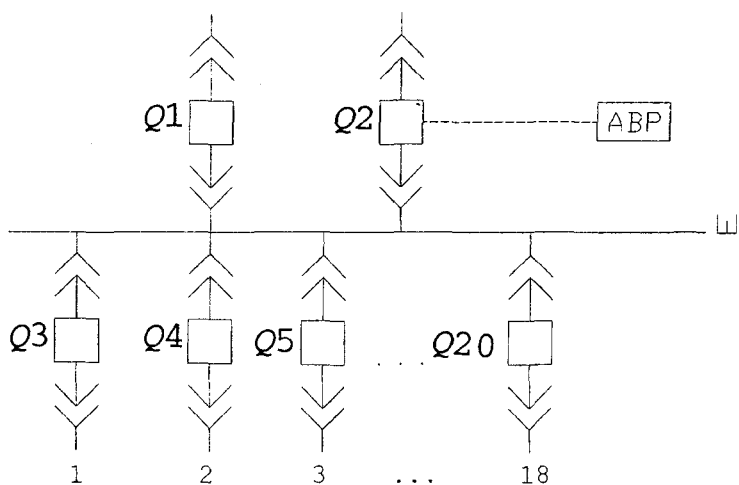


Рис. 7.6

**Решение.** Схема замещения по надежности секции РУ представляет собой последовательное соединение элементов (рис. 7.7), число которых равно общему числу выключателей, не считая Q2.

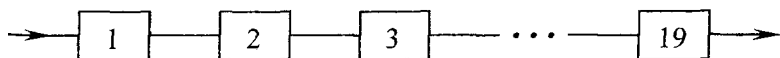


Рис. 7.7



Интенсивность кратковременных погашений секции РУ 6 кВ из-за коротких замыканий на выключателях и на шинах составит

$$\lambda_C = (18+1)(\lambda_{ш}^0 + \lambda_Q) = 19 \cdot (0,003 + 0,001) = 0,076 \text{ год}^{-1}.$$

### 7.3. Надежность систем при резервировании замещением

В случае ненагруженного (холодного) резервирования дублирующей резервный элемент может отказать только после его включения вместо вышедшего из строя основного элемента.

Примем следующие допущения:

– основной и резервный элементы равнонадежны, т.е.  $T = T_1 = T_2$  и  $T_B = T_{B1} = T_{B2}$ ;

– вероятность безотказной работы устройств автоматики и коммутационных аппаратов, контролирующих отказ основного элемента и обеспечивающих включение резервного элемента, равна единице.

Тогда вероятность безотказной работы восстанавливаемой системы определяется как

$$T_C = \frac{T + 2T_B}{T_B} T. \quad (7.9)$$

При  $T \gg T_B$  имеем

$$T_C = \frac{T^2}{T_B}.$$

Среднее время безотказной работы системы без восстановления

$$T_C = \lim_{T_B \rightarrow \infty} \frac{T + 2T_B}{T_B} T = 2T.$$

Вероятность безотказной работы системы с резервированием замещением подчиняется экспоненциальному закону, формула (7.8).

**Пример 7.4.** Определить среднее время и вероятность безотказной работы для момента времени  $t = 2$  года системы электроснабжения с двумя кабельными линиями 10 кВ длиной 3 км.

Сравнить показатели надежности одного кабеля с надежностью этой системы при различных способах резервирования. Предполагается отсутствие преднамеренных отключений.

*Решение.* Взятые из табл. 4.2 исходные данные для одного кабеля следующие:  $\lambda = 0,1 \cdot 3 = 0,3 \text{ год}^{-1}$ ,  $T_B = 25 \text{ ч} = 0,00285 \text{ года}$ . Тогда среднее время безотказной работы  $T = 1/\lambda = 1/0,3 = 3,33 \text{ года}$  и вероятность безотказной работы  $P_C(2) = \exp(-2/3,33) = 0,5488$ .

При двух кабелях в случае постоянного резервирования согласно (7.7) среднее время резервирования системы  $T_C = \frac{3,33 + 3 \cdot 0,00285}{2 \cdot 0,00285} \cdot 3,33 = 1947 \text{ лет}$ , вероятность безотказной работы  $P_C(2) = \exp(-2/1947) = 0,9991$ .

При резервировании замещением в соответствии с (7.9) имеем  $T_C = \frac{3,33 + 2 \cdot 0,00285}{0,00285} \cdot 3,33 = 3897 \text{ лет}$  и  $P_C(2) = \exp(-2/3897) = 0,9995$ .

Таким образом, результаты расчетов показывают:

- высокую эффективность резервирования кабельных линий;
- незначительное повышение надежности резервирования замещением по сравнению с постоянным резервированием; можно отдать предпочтение постоянному резервированию, поскольку при нем вследствие меньшей нагрузки каждого кабеля снижается его нагрев, что увеличивает долговечность работы.

#### **7.4. Надежность систем при постоянном раздельном резервировании**

Схема замещения при постоянном раздельном резервировании помещена на рис. 7.8.

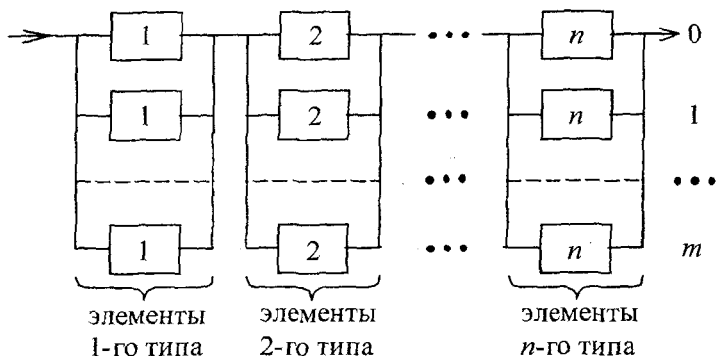


Рис. 7.8

Вероятность того, что произойдет отказ элементов  $i$ -го типа, равна произведению вероятностей отказов  $i$ -го элемента и всех элементов его резервирующих, т.е.

$$Q_i(t) = \prod_{i=1}^{m+1} q_i(t) = \prod_{i=1}^{m+1} [1 - p_i(t)].$$

Вероятность безотказной работы  $i$ -го и всех резервирующих его элементов

$$P_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m+1} [1 - p_i(t)].$$

Если резервные и резервируемые элементы равнонадежны ( $p_i(t) = p(t)$ ,  $q_i(t) = q(t)$ ), то

$$P_i(t) = 1 - [1 - p_i(t)]^{m+1}.$$

Поскольку функциональные группы элементов соединены последовательно, то вероятность безотказной работы в целом равна произведению вероятностей безотказной работы функциональных групп, т.е.

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - [1 - p_i(t)]^{m+1} \right\}.$$

Если все элементы равнонадежны, то

$$P_C(t) = \left\{ 1 - [1 - p_i(t)]^{m+1} \right\}^n. \quad (7.10)$$

**Пример 7.5.** Система состоит из 10 последовательно включенных элементов. Вероятность безотказной работы каждого элемента для одного и того же момента времени  $p_i = 0,9$ . Сколько необходимо резервных элементов при постоянном резервировании обоими способами (общего и отдельного) для того, чтобы вероятность безотказной работы системы составила  $P_C = 0,95$ .

*Решение.* На основании формулы (7.3) можно записать соотношение

$$\left[ 1 - p_i^n \right]^{m+1} = 1 - P_C.$$

Логарифмируя его, получаем

$$(m+1) \lg(1 - p_i^n) = \lg(1 - P_C).$$

Число резервных цепей (при  $n = 10$ )

$$m = \frac{\lg[1 - P_C]}{\lg[1 - p_i^n]} - 1 = \frac{\lg[1 - 0,95]}{\lg[1 - 0,9^{10}]} - 1 = 6.$$

Следовательно, для обеспечения требуемой надежности необходимо 6 резервных цепей по 10 элементов в каждой, т.е. всего 60 элементов.

Определим теперь необходимое число резервных элементов при отдельном резервировании, для чего представим формулу (7.10) в виде

$$1 - [1 - p_i]^{m+1} = \sqrt[n]{P_C}.$$

После логарифмирования получаем

$$m \frac{\lg[1 - \sqrt[n]{P_C}]}{\lg[1 - p_i]} - 1 = \frac{\lg[1 - \sqrt[10]{0,95}]}{\lg[1 - 0,9]} - 1 = 1,$$

т.е. каждый основной элемент необходимо продублировать, а всего резервных элементов будет 10.

Таким образом, при отдельном резервировании в данном случае можно для той же надежности использовать в 6 раз меньше резервных элементов.

### 7.5. Надежность систем со смешанным соединением элементов

В принципе оценка надежности систем со смешанным соединением элементов, т.е. с последовательно-параллельными или параллельно-последовательными связями, может осуществляться следующим образом. Если система состоит из  $n$  элементов, то, учитывая, что каждый элемент может находиться в двух состояниях (работоспособном или неработоспособном), система может пребывать в  $C = 2^n$  состояниях.

Все множество состояний системы разделяется на два подмножества: работоспособное и неработоспособное. Затем определяется вероятность пребывания системы в работоспособном состоянии, что и является конечной целью расчета.

**Пример 7.6.** Определить вероятность безотказной работы в течение 4 лет параллельно-последовательной системы, схема замещения которой по надежности представлена на рис. 7.9.

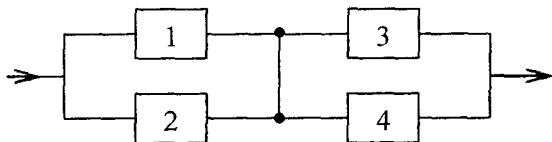


Рис. 7.9

Интенсивность отказов всех элементов одинакова:  $\lambda_1 = \dots = \lambda_4 = 0,01 \text{ год}^{-1}$ .

*Решение.* Множество всех состояний системы равно  $C = 2^4 = 16$ , из которых 9 включают как минимум 2 находящихся в работоспособном состоянии элемента и образуют работоспособное подмножество. Таким образом, вероятность безотказной работы системы описывается многочленом

$$P_C(t) = p_1(t)p_3(t)q_2(t)q_4(t) + p_1(t)p_4(t)q_2(t)q_3(t) + p_2(t)p_3(t)q_1(t)q_4(t) + p_2(t)p_4(t)q_1(t)q_3(t) + p_1(t)p_3(t)p_4(t)q_2(t) + p_1(t)p_2(t)p_4(t)q_3(t) + p_1(t)p_2(t)p_3(t)q_4(t) + p_2(t)p_3(t)p_4(t)q_1(t) + p_1(t)p_2(t)p_3(t)p_4(t).$$

Вероятности безотказной работы и отказов  $i$ -го элемента в течение 4 лет равны соответственно:

$$p_i(4) = \exp(-0,01 \cdot 4) = \exp(-0,04) = 0,9608;$$

$$q_i(4) = 1 - p_i(4) = 1 - 0,9608 = 0,0392.$$

Вероятность безотказной работы системы в целом

$$P_C(4) = 4 \cdot 0,9608^2 \cdot 0,0392^2 + 4 \cdot 0,9608^3 \cdot 0,0392 + 0,9608^4 = 0,997.$$

Проведенные аналогично примеру 7.6 выкладки для последовательно-параллельной системы из четырех элементов системы, приведенной на рис. 7.10, показывают, что вероятности безотказной работы этих смешанных систем одинаковы и для случая равнонадежных элементов, когда  $p(t) = p_1(t) = \dots = p_4(t)$  и  $q(t) = q_1(t) = \dots = q_4(t)$ , определяется выражением

$$P_C(t) = p^2(t)[p^2(t) + 4p(t)q(t) + 2q^2(t)].$$

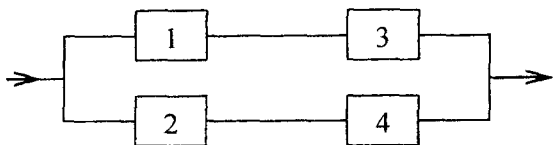


Рис. 7.10

Однако подобному подходу к расчету надежности смешанных систем при большом числе элементов присущи значительные трудности, заключающиеся в том, что выделение работоспособных и неработоспособных состояний произвести не просто. Поэтому в этом случае чаще используют *метод свертки*, состоящий в преобразовании исследуемых сложных систем со смешанным соединением элементов в более простые схемы, для которых имеются несложные аналитические выражения для расчета надежности.

Предполагая, что восстановление отказавших элементов не производится, покажем применение метода свертки на следующем примере. Исходная схема представлена на рис. 7.11.

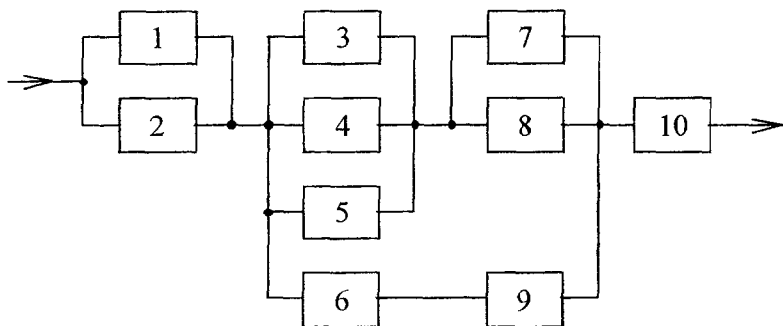


Рис. 7.11

Метод свертки состоит из нескольких этапов.

На *первом этапе* рассматриваются все параллельные соединения, которые заменяются эквивалентными элементами.

После первого этапа преобразований схема принимает следующий вид (рис. 7.12).

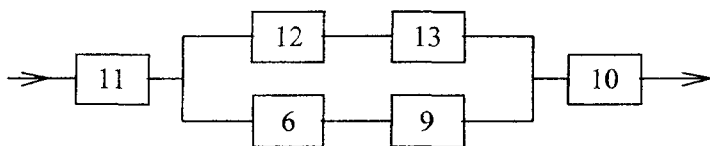


Рис. 7.12

Вероятности безотказной работы эквивалентных элементов в схеме на рис. 7.12 определяются на основании формул (6.4), (6.5), (6.10):

$$P_{12} = 1 - q_{12} = 1 - q_3 q_4 q_5; \quad P_{13} = 1 - q_{13} = 1 - q_7 q_8.$$

На *втором этапе* рассматриваются все последовательные соединения элементов, которые заменяются эквивалентными элементами. После второго этапа преобразований схема принимает вид (рис. 7.13).

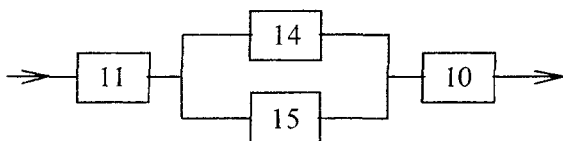


Рис. 7.13

Вероятности безотказной работы эквивалентных элементов в схеме (рис. 7.13):

$$P_{14} = P_{12}P_{13}; \quad P_{15} = P_6 P_9.$$

На *третьем этапе* вновь рассматриваются все параллельные соединения, которые заменяются эквивалентными элементами. Результат третьего этапа (рис. 7.14).

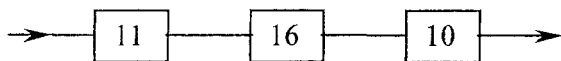


Рис. 7.14



Вероятность безотказной работы эквивалентного элемента в схеме (рис. 7.14):

$$p_{16} = 1 - q_{16} = 1 - q_{14}q_{15}.$$

На четвертом этапе определяется вероятность безотказной работы всей системы:

$$P_C = p_{11}p_{16}p_{10}.$$

Метод сверки является весьма эффективным методом определения показателей надежности неремонтируемых систем, т.е. *невосстанавливаемых* последовательно-параллельных схем. Число элементов мало влияет на сложность проведения расчетов, в основном происходит увеличение числа этапов расчета.

### 7.6. Приближенный метод преобразования треугольника в звезду и обратно

На практике нередко встречаются системы, в которых схемы соединения элементов в надежность смысле не могут быть сведены к последовательно-параллельным. Это системы, содержащие так называемые мостиковые схемы, т.е. системы, содержащие элементы типа треугольник и звезда. Такие схемы встречаются, например, в схемах электрических соединений подстанций и распределительных устройств.

Имеется ряд методов, позволяющих приближенно рассчитывать надежность таких систем. К ним относится метод преобразования треугольника в звезду и обратно. В этом случае в качестве показателей надежности используются вероятности отказов элементов. Выбор указанных характеристик объясняется тем, что метод преобразования треугольника в звезду и обратно является приближенным. Значение возникающей погрешности при оценке надежности системы зависит от вероятностей, характеризующих надежность элементов. Чем меньше эти вероятности, тем меньше погрешность оценки надежности системы. Так как обычно вероятности безотказной работы элементов близки к единице, то целесообразно использовать вероятности появления отказов.

Определим зависимости между вероятностями отказов элементов при преобразованиях исходя из предположения, что характеристики надежности цепей, соединяющих одноименные точки в различных схемах, должны быть равны между собой.

Вначале рассмотрим точки 1 и 2 (рис. 7.15 и 7.16). Вероятности отказов для цепей при условии, что точка 3 присоединена к точке 2, будут равны: для звезды  $q_1 + q_2q_3 - q_1q_2q_3$ , а для треугольника  $q_{12}q_{31}$ . Аналогично можно записать равенства и для двух других возможных вариантов соединения точек.

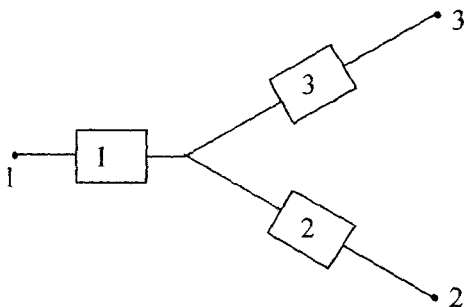


Рис. 7.15

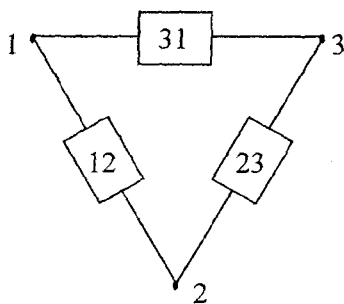


Рис. 7.16

Таким образом, можно составить следующую систему уравнений:

$$q_1 + q_2q_3 - q_1q_2q_3 = q_{12}q_{31};$$

$$q_2 + q_3q_1 - q_2q_3q_1 = q_{23}q_{12};$$

$$q_3 + q_1q_2 - q_3q_1q_2 = q_{31}q_{23}.$$

Считая, что вероятности отказов элементов малы, и пренебрегая произведениями  $q_iq_j$  и  $q_iq_jq_r$  — вероятностями более высокого порядка малости, чем  $q_i$ , получим следующие приближенные выражения:

$$q_1 \approx q_{12}q_{31}; \quad q_2 \approx q_{23}q_{12}; \quad q_3 \approx q_{31}q_{23}. \quad (7.11)$$

Перемножим соответственно левые и правые части двух первых равенств системы (7.11) и разделим на третье равенство. Тогда

$$\frac{q_1 q_2}{q_3} \approx \frac{q_{12} q_{31} q_{23} q_{12}}{q_{31} q_{23}}. \quad (7.12)$$

Из (7.12) после сокращения одинаковых сомножителей имеем

$$q_{12} \approx \sqrt{\frac{q_1 q_2}{q_3}}. \quad (7.13)$$

И аналогично получаем

$$q_{23} \approx \sqrt{\frac{q_2 q_3}{q_1}}; \quad q_{31} \approx \sqrt{\frac{q_3 q_1}{q_2}}. \quad (7.14)$$

Если предположить, что точка 3 в схеме звезды является *свободной*, то соответствующие вероятности появления отказов в схемах звезды и треугольника будут соответственно равны для звезды:  $q_1 + q_2 - q_1 q_2$ ;  $q_2 + q_3 - q_2 q_3$ ;  $q_3 + q_1 - q_3 q_1$ ; для треугольника:  $q_{12}(q_{23} + q_{31} - q_{23} q_{31})$ ;  $q_{23}(q_{31} + q_{12} - q_{31} q_{12})$ ;  $q_{31}(q_{12} + q_{23} - q_{12} q_{23})$ . Пренебрегая в этих выражениях величинами более высокого порядка малости, чем  $q_i$  (произведения  $q_i q_j$ ), получим следующие приближенные зависимости:

$$\begin{aligned} q_1 + q_2 &\approx q_{12} q_{23} + q_{12} q_{31}; \\ q_2 + q_3 &\approx q_{23} q_{31} + q_{23} q_{12}; \\ q_3 + q_1 &\approx q_{31} q_{12} + q_{31} q_{23}. \end{aligned} \quad (7.15)$$

Прибавив к левой и правой частям первого уравнения в системе (7.15) соответственно левую и правую части третьего уравнения и вычтя соответственно левую и правую части второго уравнения, получим выражение  $q_1 \approx q_{12} q_{31}$ , которое было получено ранее

(см. первое уравнение в системе (7.11)). Таким образом, приближенные формулы (7.11), (7.13), (7.14) могут быть использованы в процессе преобразования схемы треугольник в звезду и обратно.

### 7.7. Приближенный метод исключения элементов

Сущность приближенного метода расчета надежности мостиковых схем методом исключения элементов заключается в том, что в структурной схеме выбираются один или несколько элементов и затем производится расчет показателей надежности для двух крайних случаев:

1) предполагается, что выбранные элементы абсолютно надежны (вероятность безотказной работы элементов равна единице);

2) предполагается, что выбранные элементы абсолютно ненадежны (вероятность безотказной работы элементов равна нулю).

В первом случае две точки системы, к которым подключается элемент, соединяются *постоянной* связью, во втором – между этими точками отсутствует какая-либо связь. Для двух полученных структур определяются вероятности безотказной работы, соответственно равные  $P_{\max}$  и  $P_{\min}$ .

Затем определяется средневзвешенное значение вероятностей безотказной работы *исключаемых* элементов

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i,$$

где  $p_i$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го исключаемого элемента;  $n$  – число исключаемых элементов.

Окончательно вероятность безотказной работы системы определяется по формуле

$$P_C = P_{\min} + (P_{\max} - P_{\min})P_{\text{ср}}. \quad (7.16)$$

Очевидно, если  $P_{\text{ср}} = 1$  (абсолютно надежные исключаемые элементы), то  $P_C = P_{\max}$ . Если  $P_{\text{ср}} = 0$  (абсолютно ненадежные элементы), то  $P_C = P_{\min}$ .

Особенности метода исключения элементов:

- с увеличением числа исключаемых элементов точность расчетов понижается;
- с увеличением числа элементов в системе при фиксированном числе исключаемых элементов точность расчетов повышается;
- в качестве исключаемых элементов целесообразно выбирать элементы, имеющие высокую надежность.

**Пример 7.7.** Определить приближенно вероятность безотказной работы системы, представленной на рис. 7.17, двумя методами: преобразованием треугольника в звезду и исключением элементов.

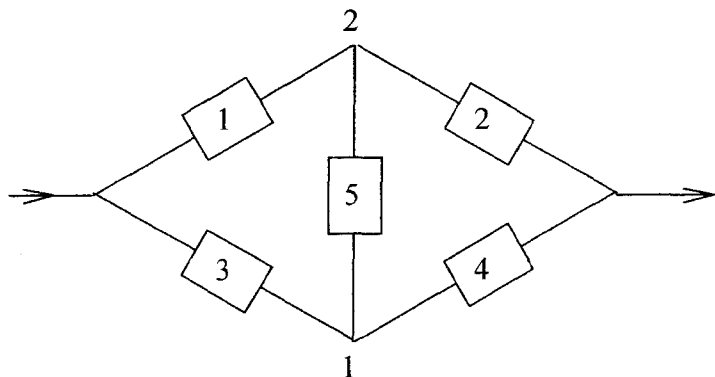


Рис. 7.17

Вероятности безотказной работы всех элементов одинаковы:

$$p_i = p = 0,9.$$

*Решение.* Преобразуем треугольник, образуемый элементами 1, 3, 5, в звезду с элементами 6, 7, 8 (см. рис. 7.17). Согласно (7.11) рассчитываем вероятности отказов элементов звезды (рис. 7.18)

$$q_6 = q_7 = q_8 \approx q^2 \approx (1 - p)^2 = (1 - 0,9)^2 = 0,01;$$

$$p_6 = p_7 = p_8 = 0,99.$$

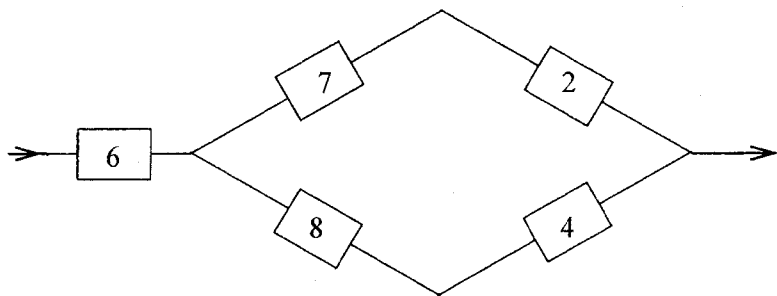


Рис. 7.18

Используя формулы для последовательно-параллельно соединенных элементов, определяем вероятность безотказной работы системы

$$\begin{aligned}
 P_C &= p_6 [1 - (1 - p_2 p_7)(1 - p_4 p_8)] = \\
 &= 0,99 [1 - (1 - 0,9 \cdot 0,99)(1 - 0,9 \cdot 0,99)] = 0,9782.
 \end{aligned}$$

Решим этот же пример методом исключения элементов. В качестве исключаемого выберем элемент 5. Рассмотрим две структуры. В первой из них в месте расположения элемента 5 будет короткое замыкание (рис. 7.19). Поэтому получим

$$P_{\max} = [1 - (1 - p)^2]^2 = [1 - (1 - 0,9)^2]^2 = 0,9801.$$

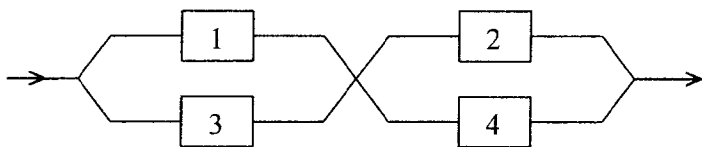


Рис. 7.19

Во второй структуре в месте нахождения элемента 5 будет разрыв цепи (рис. 7.20).

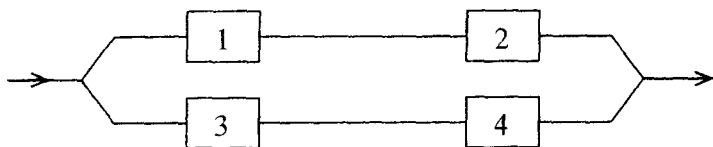


Рис. 7.20

Поэтому имеем

$$P_{\min} = 1 - (1 - p^2)^2 = 1 - (1 - 0,9^2)^2 = 0,9639.$$

С учетом  $p_{\text{ср}} = p = 0,9$  на основании (7.16) окончательно получаем

$$P_C = 0,9639 + (0,9801 - 0,9639) \cdot 0,9 = 0,9785.$$

Сравнение значений вероятностей безотказной работы, полученных рассмотренными приближенными методами, показывает, что они очень близки.

## 8. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

При анализе реальных СЭС следует учитывать особенности построения такого рода систем. Последовательное и параллельное соединение элементов в надежном смысле может отличаться от аналогичных электрических соединений. Например, ЛЭП, состоящая из двух цепей, подсоединенных под один выключатель (рис. 8.1), электрически представляет собой параллельное соединение.

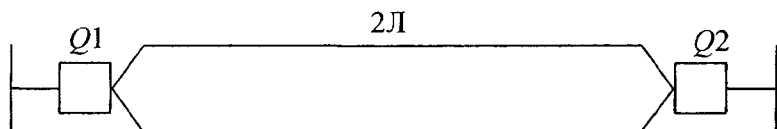


Рис. 8.1

С точки зрения надежности эти элементы (цепи) соединены последовательно, поскольку выход из строя любой из цепей приводит к выключению всей системы, состоящей из двух линий.

### 8.1. Учет преднамеренных отключений

Преднамеренные отключения СЭС влияют на надежность электроснабжения потребителей. С одной стороны, при преднамеренных отключениях выполняются планово-предупредительные ремонтные работы, например, направленные на повышение надежности СЭС, а с другой, – преднамеренные отключения понижают надежность электроснабжения потребителей, так как создают нерезервированные схемы.

Преднамеренные отключения создают поток событий, не являющихся случайными, поскольку они вызываются направленным действием обслуживающего персонала. При определении надежности за короткий период времени, например, при решении в сетях оперативных задач, связанных с изменением режимов, преднамеренные отключения считаются детерминированными событиями, и надежность рассчитывается для различных режимов работы СЭС, соответствующих преднамеренным отключениям элементов.



Если надежность анализируется за длительный промежуток времени, например, при проектировании СЭС, то заранее предусмотреть число и длительность преднамеренных отключений сложно. В этом случае последние рассматриваются как поток случайных событий и используются положения теории вероятностей и математической статистики. Анализ большого объема статистических данных показал, что преднамеренные отключения можно считать случайными событиями, если временной период решения задачи составляет не менее года. Такой случай рассматривается ниже.

## 8.2. Преднамеренные отключения при последовательном соединении элементов

Полагая преднамеренные отключения независимыми случайными событиями, характеризуем их показателями, аналогичными показателям, определяющим интенсивность отказов (6.8) и среднее время восстановления системы (6.9).

Интенсивность преднамеренных отключений последовательно соединенных  $n$  элементов:

$$v_c = \sum_{i=1}^n v_i = v_1 + v_2 + \dots + v_n, \quad (8.1)$$

где  $v_i$  – интенсивность преднамеренных отключений  $i$ -го элемента.

Среднее время обслуживания данной схемы после преднамеренного отключения, т.е. продолжительности планово-предупредительного ремонта:

$$T_{oc} = v_c^{-1} \sum_{i=1}^n v_i T_{oi}, \quad (8.2)$$

где  $T_{oi}$  – продолжительность планово-предупредительного ремонта  $i$ -го элемента.

Однако при ремонте электрооборудования обычно отключаются одновременно несколько взаимосвязанных элементов, например, ЛЭП

и понизительная подстанция, питающаяся по данной линии, трансформатор и шины распреустройства. Поэтому суммарная интенсивность преднамеренных отключений цепочки меньше суммы интенсивностей частот отдельных элементов.

Один из элементов цепочки, который чаще отключается, называется *базовым*, а относительная частота преднамеренных отключений остальных элементов по отношению к базовому – *коэффициентом совпадения*. Статистически он определяется как

$$g_i = \frac{m_i(t)}{M_i(t)},$$

где  $m_i(t)$  – число преднамеренных отключений  $i$ -го элемента, произведенных совместно с преднамеренным отключением базового элемента за период  $t$ ;  $M_i(t)$  – общее число преднамеренных отключений  $i$ -го элемента за тот же период времени.

Ориентировочные значения коэффициентов совпадения основных элементов электрической сети приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

№ элемента	Элемент	Базовые элементы			
		ВЛ(КЛ) 35, 110 кВ	ВЛ (КЛ) 6, 10 кВ	Тр-р 110, 35/10 кВ	Тр-р 6, 10/0,4 кВ
1	Воздушная линия (ВЛ) 6, 10 кВ	0,7	1	0,6	—
2	Кабельная линия (КЛ) 6, 10 кВ	0,6	1	0,5	—
3	Ячейка распреустройства (РУ) 6, 10 кВ	0,3	0,6	0,4	1
4	Ячейка РУ 35, 110 кВ	0,8	—	0,6	—
5	Ячейка выключателя 6, 10 кВ	0,8	0,8	0,7	—
6	Трансформатор 35, 110 / 10 кВ	0,6	—	1	—
7	Трансформатор 6, 10 / 0,4 кВ	0,3	0,6	0,4	1
8	Шины 35, 110 кВ	0,6	—	0,8	—
9	Шины 6, 10 кВ	0,75	—	0,7	0,8
10	Сборка НН ТП	—	0,4	—	0,4

С учетом коэффициента совпадения формул (8.1), (8.2) для определения показателей преднамеренных отключений последовательно включенных элементов принимают вид:

– для интенсивности преднамеренных отключений

$$v_C = v_B + \sum_{i=1, i \neq B}^n v_i (1 - g_i); \quad (8.3)$$

– для среднего времени восстановления после преднамеренного отключения

$$T_{OC} = v_C^{-1} \left[ v_B T_{OB} + v_{\max} (T_{O\max} - T_{OB}) + \sum_{i=1, i \neq B}^n v_i T_{O_i} (1 - g_i) \right], \quad (8.4)$$

где  $v_B, T_{OB}$  – интенсивность преднамеренных отключений и среднее время обслуживания базового элемента;  $v_{\max}, T_{O\max}$  – то же для элемента цепочки, у которого максимальное время обслуживания.

Формулами (8.3) и (8.4) пользуются, когда система не эквивалентирована. После эквивалентирования элементов преднамеренные отключения считаются независимыми событиями и применяются формулы (8.1) и (8.2).

**Пример 8.1.** Определить показатели надежности участка электросети (рис. 8.2). Длина ВЛ 110 кВ составляет  $l = 15$  км.

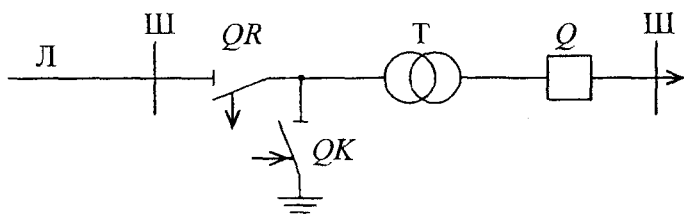


Рис. 8.2

**Решение.** Составляем схему замещения участка по надежности (рис. 8.3).

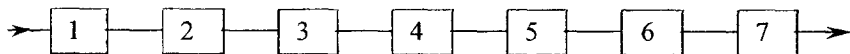


Рис. 8.3

Исходные данные о надежности элементов взяты из табл. 4.2, коэффициенты совпадения преднамеренных отключений элементов — из табл. 8.1. Все они сведены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Номер элемента	Условное обозначение	$\lambda$ , год <sup>-1</sup>	$T_B$ , ч	$\nu$ , год <sup>-1</sup>	$T_O$ , ч	$g$
1	Л 110	$0,08 \cdot 15 = 1,2$	8	$0,15 \cdot 15 = 2,25$	8	1
2	Ш 110	0,001	5	0,15	6	0,6
3	QK	0,05	4	0,3	5	0,8
4	QR	0,05	4	0,3	5	0,8
5	T 110	0,03	30	0,4	11	0,6
6	B 10	0,05	5	0,3	5	0,8
7	Ш 10	0,001	4	0,16	5	0,6

Определяем по формулам (6.8) и (6.9) интенсивность отказов и среднее время восстановления схемы

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^7 \lambda_i = 1,382 \text{ год}^{-1}; \quad T_{BC} = \lambda_C^{-1} \sum_{i=1}^7 \lambda_i T_{Bi} = 8,08 \text{ ч.}$$

Для рассматриваемого участка сети преднамеренные отключения — зависимые события. Поэтому интенсивность преднамеренных отключений рассчитываем по формуле (8.3) (за базовый принимаем элемент 1):

$$\nu_C = \nu_1 + \sum_{i=1}^6 \nu_i (1 - g_i) = 2,66 \text{ год}^{-1}.$$

Среднее время обслуживания, т.е. восстановления данного участка сети после преднамеренного отключения, определяем по формуле (8.4):

$$T_{OC} = v_C^{-1} \left[ v_1 T_{O1} + v_5 (T_{O5} - T_{O1}) + \sum_{i=2}^7 v_i T_{Oi} (1 - g_i) \right] = 11,2 \text{ ч.}$$

Если не учитывать взаимного влияния преднамеренных отключений элементов, то интенсивность преднамеренных отключений определяем по формуле (8.1):

$$v_C = \sum_{i=1}^7 v_i = 3,86 \text{ год}^{-1},$$

а среднее время обслуживания – по формуле (8.2):

$$T_{OC} = v_C^{-1} \sum_{i=1}^7 v_i T_{Oi} = 7,41 \text{ ч.}$$

Как видим, зависимость преднамеренных отключений отдельных элементов может привести к существенному уменьшению интенсивности преднамеренных отключений и увеличению среднего времени обслуживания системы в целом.

### 8.3. Преднамеренные отключения при параллельном соединении элементов

При параллельном соединении элементов в случае простоя одного из них остальные элементы не выводятся из работы и питание не нарушается.

В процессе функционирования СЭС возможен случай, когда один из элементов простаивает, а второй отказывает. При этом, если система состоит из двух элементов, она отказывает.

Интенсивность отказов системы в таком случае включает три слагаемых:

$$\lambda_C = \lambda^0 + \lambda' + \lambda'', \quad (8.5)$$

где  $\lambda^0$  – возможность отказа одного из элементов во время простоя другого элемента после отказа;  $\lambda'$  – возможность отказа первого элемента во время простоя после преднамеренного отключения второго элемента;  $\lambda''$  – возможность отказа второго элемента при простое после преднамеренного отключения первого элемента.

Чем чаще и продолжительнее преднамеренные отключения, тем больше  $\lambda'$  и  $\lambda''$  и тем ниже надежность системы.

Интенсивность отказов и среднее время восстановления системы, состоящей из двух параллельно соединенных элементов, рассчитывается по формулам:

$$\lambda_C = [\lambda_1 \lambda_2 (T_{B1} + T_{B2}) + \lambda_1 \nu_2 T_{O2} + \lambda_2 \nu_1 T_{O1}] \cdot 8760^{-1}; \quad (8.6)$$

$$T_{BC} = \lambda_C^{-1} (\lambda^0 T_B^0 + \lambda' T'_B + \lambda'' T''_B), \quad (8.7)$$

где  $T_B^0 = T_{B1} T_{B2} (T_{B1} + T_{B2})^{-1}$ ;

$$T'_B = T_{B1} T_{O2} (T_{B1} + T_{O2})^{-1}; \quad (8.8)$$

$$T''_B = T_{B2} T_{O1} (T_{B2} + T_{O1})^{-1}.$$

**Пример 8.2.** Определить показатели надежности схемы, представленной на рис. 8.4. Показатели надежности выключателей и шин РУ не принимаются во внимание. Длина ВЛ 10 кВ равна 10 км, КЛ 10 кВ – 3 км.

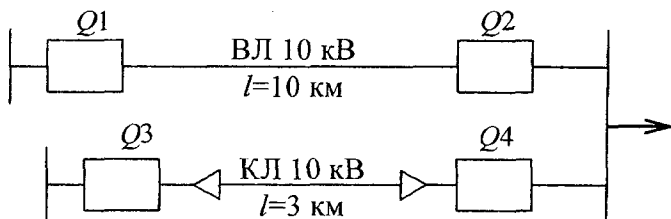


Рис. 8.4

*Решение.* Схема замещения (рис. 8.5) состоит из двух параллельно соединенных элементов 1 и 2. Исходные показатели надежности определены по данным табл. 4.2 с учетом длин ВЛ и КЛ:

$$\lambda_1 = 0,25 \cdot 10 = 2,5 \text{ год}^{-1}; T_{B1} = 6 \text{ ч}; \nu_1 = 0,25 \cdot 10 = 2,5 \text{ год}^{-1}; T_{O1} = 5,8 \text{ ч};$$

$$\lambda_2 = 0,1 \cdot 3 = 0,3 \text{ год}^{-1}; T_{B2} = 25 \text{ ч}; \nu_2 = 0,5 \cdot 3 = 1,5 \text{ год}^{-1}; T_{O2} = 3 \text{ ч}.$$

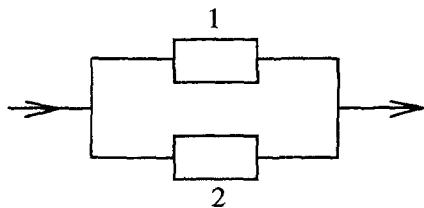


Рис. 8.5

Результаты расчетов по формулам (8.5), (8.6), (8.7), (8.8):

$$\lambda_C = \lambda^0 + \lambda' + \lambda'' = [2,5 \cdot 0,3(6 + 25) + 2,5 \cdot 1,5 \cdot 3 + 0,3 \cdot 2,5 \cdot 5,8] \cdot 8760^{-1} =$$

$$= 2,654 \cdot 10^{-3} + 1,284 \cdot 10^{-3} + 0,496 \cdot 10^{-3} = 4,434 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1};$$

$$T_B^0 = 6 \cdot 25(6 + 25)^{-1} = 4,84 \text{ ч}; T_B' = 6 \cdot 3(6 + 3)^{-1} = 2,0 \text{ ч};$$

$$T_B'' = 25 \cdot 5,8(25 + 5,8)^{-1} = 4,71 \text{ ч};$$

$$T_{BC} = 4,434^{-1} \cdot 10^3 (2,654 \cdot 10^{-3} \cdot 4,84 + 1,284 \cdot 10^{-3} \cdot 2,0 +$$

$$+ 0,496 \cdot 10^{-3} \cdot 4,71) = 4,0 \text{ ч}.$$

Рассмотренный пример свидетельствует о сильном влиянии преднамеренных отключений на результирующую надежность схемы. Интенсивность отказов без учета преднамеренных отключений составляет 60 % числа отключений системы.

#### 8.4. Влияние организации обслуживания на надежность схем

В автоматизированных схемах отказ одного элемента приводит к срабатыванию устройств релейной защиты и автоматики и локализации отказавшего элемента. При этом может отказать и само устройство защиты и автоматики, и отказ распространится на обширную область схемы. Время ликвидации последствий отказа зависит от организации работы дежурно-оперативного персонала. Если подстанция не имеет дежурного персонала, то операции выполняются централизованной оперативно-выездной бригадой (ОВБ), а время восстановления зависит от вида обслуживания и определяется статистическими данными эксплуатации. В табл. 8.3 приведены ориентировочные значения времени локализации отказов для объектов с различными видами обслуживания.

Таблица 8.3

Вид объекта	Время локализации отказа $T_{л}, ч$	
	на объекте с дежурным персоналом	действиями ОВБ
Упрощенная понизительная подстанция 35, 110 кВ:		
городская	0,2	1,0
в сельской местности	0,2	2,0
Узловая подстанция 35, 110 кВ с системами шин	0,3	—
Распределительный пункт 6, 10 кВ в городе	0,2	1,4
Трансформаторная подстанция 10/0,4 кВ:		
городская	—	1,4
в сельской местности	—	2,0

Восстановление электроснабжения в схемах с вводом резерва вручную рассмотрим на примере цепочки распределительной линии 10 кВ, выполненной кабелем (КЛ). Линейные ячейки 10 кВ в трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ (ТП) оборудованы выключате-



лями нагрузки. Цепочка разомкнута на линейной ячейке РУ 10 кВ ТП5 в сторону ТП4 (рис. 8.6).

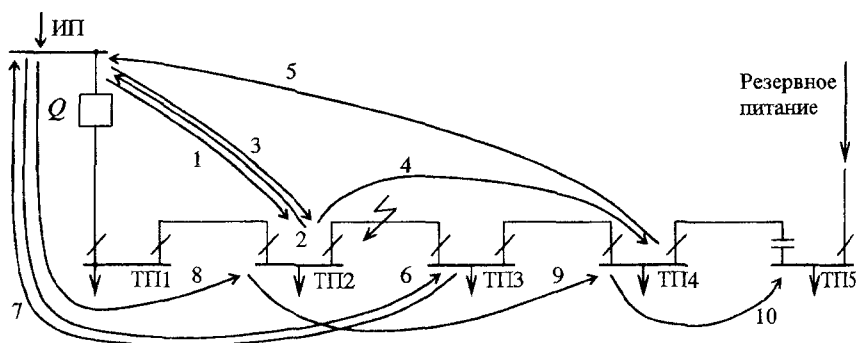


Рис. 8.6

Пусть разрыв произошел на участке КЛ между ТП2 и ТП3. При этом отключится линейный выключатель на источнике питания (ИП) и окажутся без питания ТП1, ТП2, ТП3, ТП4. Через некоторое время по каналам телесигнализации или по телефону диспетчеру поступит сообщение об исчезновении напряжения. Диспетчер определяет последовательность выполнения коммутационных операций по поиску поврежденного участка и последующему восстановлению электроснабжения. ОВБ, получив задание от диспетчера, выезжает к ИП, где осматривает линейные выключатели и определяет отключенную линию. Затем ОВБ начинает поиск поврежденного места. Последовательность действий может быть следующей: ОВБ едет к ТП2 и отключает ВН в сторону ТП1, возвращается на ИП и включает линейный выключатель (отказ имел место на КЛ 2-3). Выключатель отключается вручную и ОВБ перемещается в ТП2, включает ВН к ТП1 и следует в ТП4, отключает ВН к ТП3, следует на ИП и включает линейный выключатель. Выключатель отключается от действия релейной защиты. ОВБ следует в ТП3 и отключает ВН к ТП2, едет на ИП и включает линейный выключатель, который отключается под действием релейной защиты. Так выявляется, что поврежден участок КЛ 2-3. ОВБ едет в ТП2, отключает ВН к ТП3, затем – в ТП4, включая ВН к ТП3, и, наконец, в ТП5, включая ВН к ТП4, на котором в нормальном режиме держится точка размыкания.

Таким образом, ТП1 и ТП2 получают питание от основного ИП, а ТП3, ТП4, ТП5 – от резервного.

Время восстановления питания в схемах с ручным вводом резерва различно и зависит от многих факторов, что должно учитываться при расчетах надежности электроснабжения. Для этого в схеме замещения в качестве времени восстановления элемента принимается время оперативных переключений.

### 8.5. Влияние надежности коммутационной аппаратуры и устройств релейной защиты и автоматики на надежность схем

Для локализации отказавшего элемента и подачи в узел нагрузки питания от резервного источника необходимо, чтобы сработали устройства релейной защиты и автоматики (УРЗА), а также коммутационные аппараты (КА), на которые воздействуют эти устройства.

Рассмотрим операции отключения поврежденной линии и подачи резервного питания в расчетный узел нагрузки (рис. 8.7). Имеется распределительное устройство с двумя секциями шин, между которыми установлен секционный выключатель с устройством автоматического ввода резерва (АВР) двустороннего действия. В нормальном режиме каждая секция питается по своей линии, а секционный выключатель отключен.

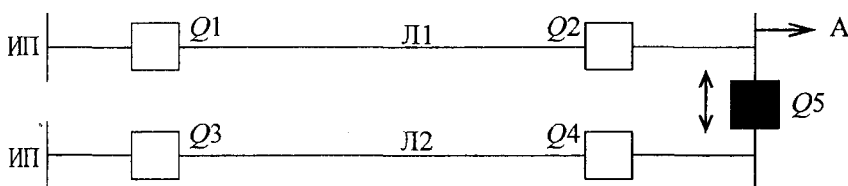


Рис. 8.7

При поврежденной линии Л1 происходит следующее: релейная защита на выключателе Q1 подает команду на его отключение; срабатывает Q1, отключающий Л1 от ИП; релейная защита на Q2 подает команду на отключение Q2; срабатывает Q2, отключающий Л1 от узла нагрузки А; от исчезновения напряжения на секции шин сраба-

тывает устройство АВР и подает команду на включение  $Q5$ ; срабатывает  $Q5$  и напряжение от Л2 через секцию шин и  $Q5$  подается на А.

Таким образом, для обеспечения питания узла нагрузки понадобилось выполнить шесть операций. В действительности количество операций значительно больше, поскольку каждый комплект УРЗА состоит из нескольких элементов (реле, контакторов и др.). При этом на каждой из операций работающая аппаратура может отказать. Поэтому для точной оценки надежности электроснабжения узла нагрузки нужно учитывать надежность УРЗА и КА.

С одной стороны, КА является элементом силовой электрической цепи и несет нагрузку (электрическую, механическую) в нормальном режиме. Поэтому КА, как и другие элементы электрической сети, может отказать в нормальном режиме. Такие отказы называют *статическими* (например, перекрытие опорной изоляции, перегрев контактов). С другой стороны, на КА воздействуют УРЗА для выполнения основных функций по включению (отключению). Возможен отказ в удовлетворении требованиям на срабатывание. С этой точки зрения КА можно рассматривать как элемент комплекта УРЗА. Такие отказы называются *отказами функционирования*.

Отказы функционирования УРЗА и КА бывают трех видов:

- отказы в срабатывании (невыполнение УРЗА и КА требований на срабатывание);
- неселективные срабатывания (срабатывание УРЗА и КА при требованиях на срабатывание, поступающем не на данное, а на другое срабатывание);
- ложные срабатывания (срабатывание УРЗА и КА при отсутствии требований на срабатывание).

Если рассматривать надежность коммутационных операций, производимых по командам от УРЗА, то элементы релейной защиты, автоматики, исполнительных органов коммутационного аппарата эквивалентруются системой последовательно соединенных элементов, каждый из которых может отказать. Отказ любого из элементов приводит к отказу КА, количественной характеристикой которого является вероятность несрабатывания  $q_{КА}$ , определяемая как отношение числа несрабатываний  $m_{УРЗА}(t)$  устройства релейной защиты и автоматики и числа несрабатываний  $m_{ИКА}(t)$  испол-

нительного органа коммутационного аппарата к общему числу требований  $M(t)$  на работу этих устройств за период наблюдений  $t$ :

$$q_{КА} = \frac{1}{M(t)} [m_{УРЗА}(t) + m_{ИКА}(t)].$$

Ориентировочные значения вероятности несрабатывания типовых схем релейной защиты и устройств автоматического ввода резерва приведены в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Наименование устройства	Вероятность несрабатывания	
	$q_{КА}$	
	$U = 6, 10 \text{ кВ}$	$U = 35, 110 \text{ кВ}$
Релейная защита линии (вместе с КА)	0,020	0,015
Релейная защита трансформатора (вместе с КА)	—	0,010
Автоматический ввод резерва	0,022	0,020

Интенсивность отказов в расчетной точке схемы электрических соединений, зависящая от надежности работы УРЗА и КА, составит

$$\lambda_{КА} = \alpha q_{КА},$$

где  $\alpha$  – интенсивность требований, поступающих на УРЗА и КА. Требованиями считаются устойчивые отказы, которые фиксируются как отказы в электроснабжении, так и неустойчивые отказы, которые ликвидируются при исчезновении напряжения. Неустойчивые отказы для воздушных ЛЭП составляют 50–70 % от всех отказов. Для других видов основного оборудования СЭС число неустойчивых отказов меньше и в расчетах надежности их можно не учитывать.

Для ВЛ ожидаемая интенсивность требований на срабатывание УРЗА и КА

$$\alpha_{Л} = k_{Н} \lambda_{Л}^0 I_{Л},$$

где  $k_H$  – коэффициент увеличения числа требований на срабатывание за счет учета неустойчивых отказов;  $\lambda_{Л}^0$  – удельная (из расчета на 1 км длины линии) интенсивность отказов ВЛ;  $l_{Л}$  – длина защищаемой ВЛ. Примерные величины:  $k_H = 1,6$  для ВЛ 35, 110 кВ и  $k_H = 1,5$  для ВЛ 6, 10 кВ.

При отказе в срабатывании УРЗА и КА управляющая команда поступает на срабатывание соответствующих устройств более высокого структурного уровня. Так, если откажет в отключении линейный выключатель  $Q1$  (рис. 8.8), то поступает заявка на отключение выключателя  $Q2$ , что приводит к полному обесточиванию шин распределительного устройства. Поскольку наложение отказов в срабатывании УРЗА и КА случается редко, при практических расчетах надежности схем электрических соединений его можно не учитывать.

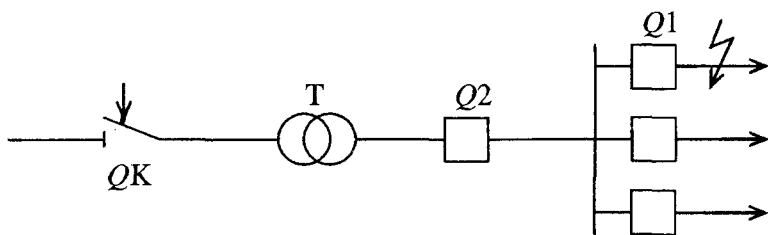


Рис. 8.8

Время восстановления при отказах в срабатывании УРЗА и КА – это время локализации отказа.

**Пример. 8.3.** Требуется определить показатели надежности в расчетной точке А схемы (см. рис. 8.7). Длина ВЛ1 составляет 25 км, ВЛ2 – 20 км. Показатели надежности элементов приведены в табл. 4.2. Надежность выключателей (интенсивность отказов в статическом состоянии) и шин РУ не учитывается. РУ 110 кВ обслуживается ОВБ и расположено в сельской местности.

**Решение.** Шины первой секции РУ 110 кВ будут обесточены при отказе ВЛ1 (ВЛ2) в период простоя ВЛ2 (ВЛ1) на время ремонта, а

также при отказе ВЛ1 (несрабатывании  $Q2$  или  $Q5$ ) на время устранения отказа в срабатывании.

Схема замещения представлена на рис. 8.9, где элементы 1 и 2 замещают ВЛ1 и ВЛ2, а элементы 3, 4, 5 отражают отказы в срабатывании  $Q1$ ,  $Q2$ ,  $Q5$ . Заштрихованная на рисунке поверхность элементов означает, что время восстановления для них определяется временем локализации отказа.

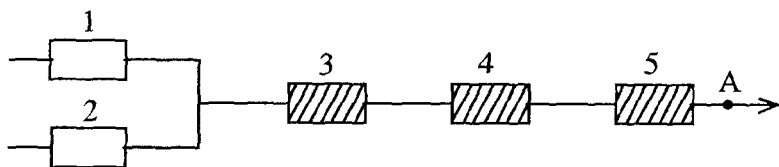


Рис. 8.9

Численные значения показателей надежности (с использованием данных табл. 4.2, 8.3, 8.4) равны:

$$\lambda_1 = \lambda_{Л1}^0 l_{Л1} = 0,08 \cdot 25 = 2,0 \text{ год}^{-1}; \quad T_{В1} = 8 \text{ ч};$$

$$\nu_1 = \nu_{Л1}^0 l_{Л1} = 0,15 \cdot 25 = 3,75 \text{ год}^{-1}; \quad T_{O1} = 8 \text{ ч};$$

$$\lambda_2 = 1,6 \text{ год}^{-1}; \quad T_{В2} = 8 \text{ ч}; \quad \nu_2 = 3,0 \text{ год}^{-1}; \quad T_{O2} = 8 \text{ ч};$$

$$\alpha_{Л1} = k_H \lambda_{Л1}^0 l_{Л1} = 1,6 \cdot 0,08 \cdot 25 = 3,2 \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_3 = \alpha_{Л1} q_A = 3,2 \cdot 0,015 = 0,048 \text{ год}^{-1}; \quad T_{В3} = T_{Л}^{ОВВ} = 2,0 \text{ ч};$$

$$\lambda_4 = 0,048 \text{ год}^{-1}; \quad T_{В4} = 2,0 \text{ ч}; \quad \lambda_5 = \alpha_{Л1} q_A = 0,064 \text{ год}^{-1}; \quad T_{В5} = 2,0 \text{ ч}.$$

По формулам (8.6) и (8.7) для параллельно соединенных элементов с учетом преднамеренных отключений определяем показатели надежности эквивалентного элемента (6):

$$\lambda_6 = \lambda^0 + \lambda' + \lambda'' = [\lambda_1 \lambda_2 (T_{B1} + T_{B2}) + \lambda_1 v_2 T_{O2} + \lambda_2 v_1 T_{O1}] \cdot 8760^{-1};$$

$$\lambda^0 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}; \quad \lambda' = 5,48 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}; \quad \lambda'' = 5,47 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1};$$

$$T^0 = T_{B1} T_{B2} (T_{B1} + T_{B2})^{-1} = 4 \text{ ч}; \quad T'_B = T_{B1} T_{O2} (T_{B1} + T_{O2})^{-1} = 4 \text{ ч};$$

$$T''_B = 4 \text{ ч.}$$

Показатели надежности структуры:

$$\lambda_{КА} = \lambda_6 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 = 0,177 \text{ год}^{-1}; \quad T_{ВКА} = 2,19 \text{ ч.}$$

Из рассмотренного примера видно, что надежность УРЗА и КА оказывает большое влияние на надежность схемы. Так, составляющая интенсивности отказов, обусловленная ненадежностью УРЗА и КА (элементы 3, 4, 5) составляет 90,5 %.

### **8.6. Расчет показателей надежности схем электроснабжения**

В схеме электрической цепи требуется определить показатели надежности электроснабжения в расчетной ее точке. Выполняется это следующим образом.

1. Технологическая схема электрических соединений представляется схемой замещения по надежности. При этом следует учитывать режим работы системы, действия УРЗА и КА при отказах, пропускную способность элементов в послеаварийных режимах. Необходимо ограничивать объем решаемой задачи. Если снизу схема ограничивается расчетной точкой – выходом из системы, то сверху выделяются входы – источники питания. Входы в систему выбираются таким образом, чтобы их надежность была абсолютной, т.е. значительно выше надежности данной схемы. При расчетах надежности СЭС общего назначения источниками питания являются распределительные устройства электростанций и узловых подстанций, имеющие не менее двух систем шин высшего напряжения и не менее двух трансформаторов.

Элементы схемы представляются в виде участков и узлов. На схеме замещения проставляют также направления движения электроэнергии по элементам от высшего напряжения к низшему, от источников питания к потребителю. По транзитным элементам, связывающим промежуточные узлы схемы, энергия может передаваться в обоих направлениях.

2. Определяются численные значения показателей надежности элементов (узлов и участков) схемы, часть из которых находится непосредственно по статистическим данным о повреждаемости оборудования, а часть рассчитывается.

3. Схема замещения поэтапно эквивалентуруется объединением последовательно и параллельно соединенных элементов. В результате схема преобразуется в двухполюсную неразделимую структуру (граф), входом в которую являются источники, а выходом – расчетная точка сети.

Показатели надежности участков, представляющих совокупность тесно связанного оборудования, определяются расчетами. Например, показатели надежности участка, имеющего линию и два выключателя на передающей и приемной подстанции (имеются в виду статические показатели надежности выключателей, а не показатели надежности их функционирования) рассчитываются по формулам для последовательно соединенных элементов (6.8) и (6.9):

$$\lambda_{\text{уч}} = 2\lambda_{\text{В}} + \lambda_{\text{Л}}^0 l_{\text{Л}}; \quad T_{\text{Вуч}} = \lambda_{\text{уч}}^{-1} (2\lambda_{\text{В}} T_{\text{ВВ}} + \lambda_{\text{Л}}^0 l_{\text{Л}} T_{\text{ВЛ}}),$$

где  $\lambda_{\text{В}}$  – интенсивность отказов выключателя;  $\lambda_{\text{Л}}^0$  – удельная интенсивность отказов линии;  $l_{\text{Л}}$  – длина линии;  $T_{\text{ВВ}}$  – среднее время восстановления выключателя;  $T_{\text{ВЛ}}$  – среднее время восстановления линии.

Исключением являются двухцепные линии и кабели, проложенные в одной траншее. Их отказы нельзя полагать независимыми событиями, поскольку поломка двухцепной опоры ВЛ приводит к одновременному отказу обеих цепей, а два проложенных в одной траншее кабеля обычно повреждаются строительными механизмами при выполнении земляных работ одновременно.



Для учета одновременности отказов двухцепные линии или кабели в одной траншее на рис. 8.10 принимаются как система со смешанным соединением элементов, где параллельно соединенные элементы 1, 2 – показатели надежности отдельных цепей (двух кабелей) и их отказы – независимые события, а общий элемент 3 характеризует одновременный отказ обеих цепей (линий), которые можно определить также по статистическим данным.

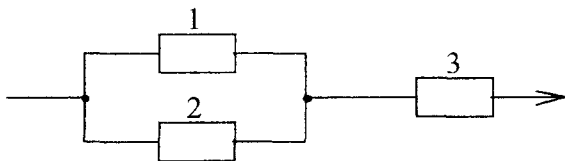


Рис. 8.10

Показатели надежности шин распределительных устройств (узлов) также определяются расчетами.

Рассмотрим надежность узла – секции шин распределительного устройства (рис. 8.11).

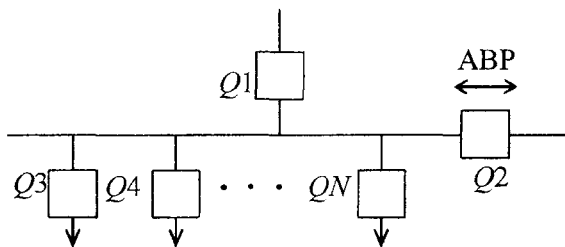


Рис. 8.11

Шины могут быть обесточены в следующих случаях:

1) при отказе самих шин на время ремонта; при этом интенсивность отказов шин принимается прямо пропорциональной количеству присоединений  $N_{\text{ПР}}$ :

$$\lambda_{\text{Ш}} = \lambda_{\text{Ш}}^0 N_{\text{ПР}},$$

где  $\lambda_{\text{Ш}}^0$  – интенсивность отказов одного присоединения;

2) при отказе присоединения (ячейки РУ) на время, необходимое для отсоединения этой ячейки и подачи питания на шины:

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_{Q_i},$$

где  $\lambda_{Q_i}$  – интенсивность отказов ячейки РУ (выключателя);  $N$  – число отходящих линий, включая трансформатор собственных нужд;

3) при отказе рабочего питания секции и несрабатывания УРЗ и КА на питающей линии или АВР и КА секционного выключателя на время, необходимое для подачи питания на секцию шин вручную:

$$\lambda_{P3A} = \lambda_{\text{раб}}(q_{P3} + q_{\text{ABP}});$$

4) при отказе в срабатывании УРЗ и КА отходящих линий на время отсоединения ячейки и подачи питания на шины:

$$\lambda_{\text{отх}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{Л}}} \lambda_{\text{Л}i} k_{\text{Н}i} q_{P3i},$$

где  $n_{\text{Л}}$  – число отходящих линий.

Схема замещения по надежности рассмотренного узла представлена на рис. 8.12.

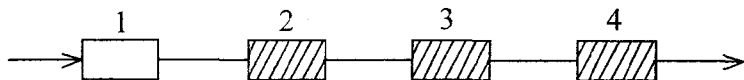


Рис. 8.12

## 8.7. Расчет показателей надежности электроустановок

Расчет показателей надежности схем электроустановок (ЭУ) относится прежде всего к понизительным подстанциям и распределительным пунктам. Электроустановки различаются схемой построения

ния, способом ввода резервного питания, применяемым оборудованием. Показатели надежности для подстанций, как правило, определяются на шинах РУ низшего напряжения.

Выход их строя любого из элементов нерезервированной электроустановки или установки с ручным резервированием приводит к исчезновению напряжения на шинах РУ: в случае нерезервированной ЭУ – на время ремонта отказавшего элемента, а для ЭУ, резервированных вручную, – на время подключения резервного питания. Таким образом, схема замещения этих ЭУ представляет собой систему последовательно соединенных элементов.

**Пример 8.4.** Определить показатели надежности на шинах 10 кВ понизительной подстанции 110/10 кВ (рис. 8.13). Подстанция с закрытым РУ 10 кВ обслуживается без дежурного персонала и имеет четыре отходящие линии 10 кВ, общая длина которых  $l_{\Sigma}$  составляет 50 км. Длина питающей ВЛ 110 кВ  $l_{110} = 25$  км. Показатели надежности элементов приведены в табл. 4.2 и 8.1.

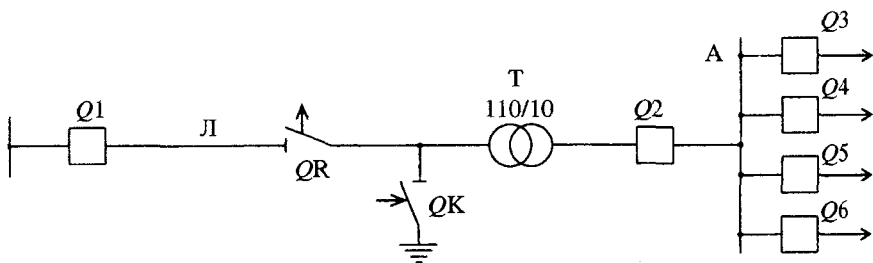


Рис. 8.13

*Решение.* Схема замещения приведена на рис 8.14.

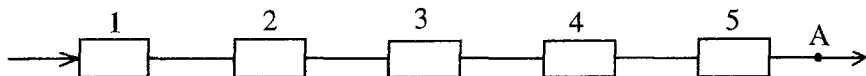


Рис. 8.14

Показатели надежности элемента 1 (ВЛ 110 кВ):

$$\lambda_1 = \lambda_{110} l_{110} = 0,08 \cdot 25 = 2,0 \text{ год}^{-1}; \quad T_{B1} = T_{B110} = 8 \text{ ч};$$

$$v_1 = 0,15 \cdot 25 = 3,75 \text{ год}^{-1}; \quad T_{O1} = T_{B110} = 8 \text{ ч}.$$

Показатели надежности элемента 2 (отделителя):

$$\lambda_2 = \lambda_{QR} = 0,05 \text{ год}^{-1}; \quad T_{B2} = T_{QR} = 4 \text{ ч};$$

$$v_2 = v_{QR} = 0,3 \text{ год}^{-1}; \quad T_{O2} = T_{OQR} = 5 \text{ ч}.$$

Показатели надежности элемента 3 (короткозамыкателя):

$$\lambda_2 = \lambda_{QK} = 0,05 \text{ год}^{-1}; \quad T_{B3} = T_{QK} = 4 \text{ ч};$$

$$v_3 = v_{QK} = 0,3 \text{ год}^{-1}; \quad T_{O3} = T_{OQK} = 5 \text{ ч}.$$

Показатели надежности элемента 4 (трансформатора 110/10 кВ с выключателем 10 кВ):

$$\lambda_4 = \lambda_T + \lambda_Q = 0,45 \text{ год}^{-1}; \quad T_{B4} = \lambda_4^{-1} (\lambda_T T_{BT} + \lambda_Q T_{BQ}) = 22,0 \text{ ч};$$

$$v_4 = v_T = 0,4 \text{ год}^{-1}; \quad T_{O4} = T_{OT} = 11 \text{ ч}.$$

Показатели надежности элемента 5 (секция шин ЗРУ 10 кВ):

– отказ шин секции  $\lambda_{Ш} = \lambda_{Ш10}^0 N_{ПР} = 0,006 \text{ год}^{-1}$ , где  $N_{ПР} = 6$  (четыре присоединения – отходящие линии, одно – выключатель трансформатора 110/10 кВ, одно – трансформатор собственных нужд 10/0,4 кВ);  $T_{BШ} = 4 \cdot 4 = 16 \text{ ч}$ ;

– отказ присоединения  $\lambda_{ПР} = 4\lambda_Q = 0,06 \text{ год}^{-1}$ ;  $T_{BПР} = 2 \text{ ч}$ ;  
 $T_{OПР} = 0$ ;

– отказ в срабатывании РЗ отходящих ВЛ 10 кВ:

$$\lambda_{\text{отх}} = \sum_{i=1}^4 \lambda_{\text{Л}i} k_{\text{Н}i} q_{\text{РЗ}i} = k_{\text{Н}} q_{\text{РЗ}} \lambda_{\text{Л}10\Sigma}^0 = 1,5 \cdot 0,02 \cdot 0,1 \cdot 50 = 0,15 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{\text{В отх}} = 2 \text{ ч}; \quad T_{\text{О отх}} = 0.$$

Итоговые показатели надежности элемента 5:

$$\lambda_5 = \lambda_{\text{Ш}} + \lambda_{\text{ГР}} + \lambda_{\text{отх}} = 0,216 \text{ год}^{-1}; \quad v_5 = v_{\text{Ш}} = 0,16 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{\text{В5}} = \lambda_5^{-1} (\lambda_{\text{Ш}} T_{\text{ВШ}} + \lambda_{\text{ГР}} T_{\text{ВГР}} + \lambda_{\text{отх}} T_{\text{В отх}}) = 2,4 \text{ ч}; \quad T_{\text{О5}} = T_{\text{ОШ}} = 5 \text{ ч}.$$

Окончательно показатели надежности на шинах 10 кВ подстанции следующие:

$$\lambda_{\text{А}} = \sum_{i=1}^5 \lambda_i = 2,361 \text{ год}^{-1}; \quad T_{\text{ВА}} = \lambda_{\text{А}}^{-1} \sum_{i=1}^5 \lambda_i T_{\text{В}i} = 7,56 \text{ ч}.$$

С учетом преднамеренных отключений согласно (8.3) и (8.4) получаем (за базовый принимаем элемент 1 – ВЛ 110 кВ)

$$v_{\text{А}} = 3,75 + 0,3(1 - 0,8) + 0,3(1 - 0,8) + 0,4(1 - 0,6) + 0,16(1 - 0,75) = 4,0675 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{\text{ОА}} = \frac{1}{4,0675} [3,75 \cdot 8 + 0,4(11 - 8) + 5 \cdot 0,3 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 \cdot 0,2 + 11 \cdot 0,4 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,16 \cdot 0,25] = 8,37 \text{ ч}.$$

При определении показателей надежности электроустановок с автоматическим вводом резерва следует учитывать вероятность выхода из строя резервного питания при простое рабочего питания. Поэтому схема замещения обычно представляет собой систему со смешанным (последовательно-параллельным) соединением элементов.

## 9. НАДЕЖНОСТЬ НЕРЕЗЕРВИРУЕМЫХ СЕТЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

### 9.1. Показатели надежности систем электроснабжения

При оценке надежности электроснабжения одного потребителя чаще всего рассматривается два состояния системы: работоспособное и неработоспособное. Вероятность нахождения СЭС большой группы потребителей полностью в неработоспособном состоянии очень мала. Современные СЭС представляют собой сложные, многократно резервируемые сети, получающие питание от нескольких источников, оснащенные большим количеством устройств защиты, автоматики, телемеханики. В то же время отказ в электроснабжении хотя бы одного потребителя приводит к невыполнению системой основной задачи – снабжения потребителей электроэнергией в нужном количестве и должного качества. В этом случае происходит снижение выходного эффекта системы. Количественно надежность СЭС можно оценить, определяя выходной эффект системы.

Выходной эффект абсолютно надежной СЭС выражается в количестве электроэнергии  $\mathcal{E}_{\text{потр}}$ , отпущенной в соответствии с требованиями потребителей. Реальный эффект  $\mathcal{E}_{\text{отп}}$ , представляющий собой количество отпущенной с учетом отказов электроэнергии, всегда меньше идеального выходного эффекта  $\mathcal{E}_{\text{потр}}$ . Разность между идеальным и реальным выходными эффектами является мерой оценки надежности СЭС. Таким образом, последняя представляет собой количество недоотпущенной потребителям электроэнергии в результате отказов в СЭС:

$$W = \mathcal{E}_{\text{потр}} - \mathcal{E}_{\text{отп}}.$$

Для сравнения СЭС, различных по количеству отпускаемой энергии, используется *коэффициент необеспеченности электроэнергией*

$$\rho = W / \mathcal{E}_{\text{потр}}.$$

Коэффициент обеспеченности электроэнергией определяется следующим образом:

$$\pi = \mathcal{E}_{\text{отп}} / \mathcal{E}_{\text{потр}} = 1 - W / \mathcal{E}_{\text{потр}} = 1 - \rho .$$

Ожидаемое количество электроэнергии, недоотпущенное потребителям за период времени (обычно за год), определяется как суммарный ожидаемый недоотпуск электроэнергии всем  $M$  потребителям, присоединенным к данной СЭС, т.е.

$$W = \sum_{i=1}^M W_i .$$

Ожидаемый недоотпуск  $i$ -му потребителю соответствует производству средней величины нагрузки  $\bar{P}_i$  на эквивалентную продолжительность простоя за рассматриваемый период времени

$$W_i = \bar{P}_i \Theta_{\mathcal{E}i} . \quad (9.1)$$

Эквивалентная продолжительность простоя  $i$ -го потребителя

$$\Theta_{\mathcal{E}i} = \lambda_i T_{\text{В}i} + \xi v_i T_{\text{О}i} , \quad (9.2)$$

где  $\lambda_i$ ,  $T_{\text{В}i}$ ,  $v_i$ ,  $T_{\text{О}i}$  – показатели надежности  $i$ -го потребителя, рассчитываемые в соответствии с гл. 6 и 8;  $\xi$  – коэффициент, отражающий меньшую тяжесть последствий от преднамеренных отключений по сравнению с внезапными отказами. В практических расчетах принимают  $\xi = 0,33$ .

Необходимое для расчета коэффициентов  $\rho$  и  $\pi$  количество отпущенной потребителям электроэнергии при отсутствии отказов в СЭС определяется как

$$\mathcal{E}_{\text{потр}} = \sum_{i=1}^M \mathcal{E}_{\text{потр}i} = \sum_{i=1}^M P_{Pi} T_{\text{Н}Si} ,$$

где  $P_{Pi}$  – расчетная нагрузка  $i$ -го потребителя;  $T_{H\sigma i}$  – число часов использования максимума.

Порядок расчета надежности СЭС следующий:

1) определяется надежность электроснабжения  $i$ -го потребителя в соответствии с изложенными в гл. 6 правилами;

2) устанавливаются величина ожидаемого недоотпуска электроэнергии  $i$ -му потребителю  $W_i$  и требуемое количество электроэнергии  $\mathcal{E}_{\text{потр}i}$ ;

3) определяются величины суммарного недоотпуска и требуемого количества электроэнергии для потребителей СЭС;

4) вычисляется коэффициент необеспеченности электроэнергией.

Рассмотрим надежность электрических сетей, не имеющих резервного питания, когда выход из строя источника питания влечет обесточение потребителей на время ремонта.

## 9.2. Воздушные линии без коммутационных аппаратов

Рассмотрим воздушную линию напряжением 10 кВ (рис. 9.1). Потребители П1 и П3 присоединены непосредственно к магистральной линии, а потребители П2, П4, П5 питаются от ответвлений, наглухо присоединенных к магистрали.

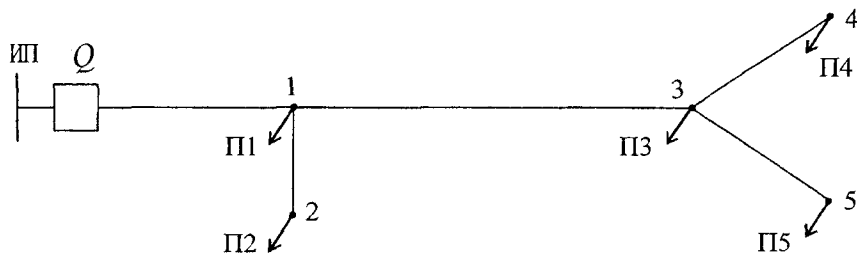


Рис. 9.1

Пусть произошло повреждение одного из участков линии. Для восстановления электроснабжения оперативной выездной бригаде (ОВБ) потребуется выехать к ИП, вручную опробовать включение



отключенной линии, установить место повреждения, устранить повреждение и включить линию в работу.

Среднее время восстановления электроснабжения составит

$$T_{BC} = T_{BO} + T_{ПМ} + T_B,$$

где  $T_{BO}$  – время от момента отказа до пробного включения линии;  $T_{ПМ}$  – время поиска места повреждения;  $T_B$  – время ремонта и включения линии в работу (восстановления без учета времени выезда ОВБ и поиска повреждения).

Величину  $T_{ПМ}$  можно определить по формуле

$$T_{ПМ} = 0,5l_{\Sigma}v_x^{-1}, \quad (9.3)$$

где  $l_{\Sigma}$  – длина поврежденной линии (вместе с ответвлениями), км;  $v_x$  – скорость передвижения по трассе линии с целью обнаружения места повреждения, км/ч.

Для всех потребителей данной линии время восстановления электроснабжения одинаково:  $T_{B1} = T_{B2} = T_{B3} = T_{B4} = T_{B5}$ . Интенсивность отказов также одинакова и прямо пропорциональна длине линии:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_{Л10}^0 \cdot l_{\Sigma}.$$

Схема замещения по надежности для любого  $i$ -го потребителя представлена на рис. 9.2.

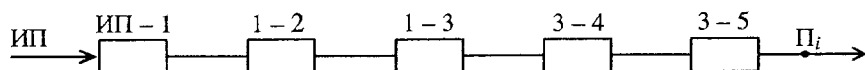


Рис. 9.2

Ожидаемый недоотпуск электроэнергии  $i$ -му потребителю составит

$$W_i = \bar{P}_i \Theta_{\Sigma},$$

поскольку  $\Theta_{\Sigma 1} = \Theta_{\Sigma 2} = \Theta_{\Sigma 3} = \Theta_{\Sigma 4} = \Theta_{\Sigma 5} = \Theta_{\Sigma}$ . Суммарный ожидаемый недоотпуск электроэнергии

$$W_{\Sigma} = \sum_{i=1}^5 W_i = \Theta_{\Sigma} \sum_{i=1}^5 \bar{P}_i. \quad (9.4)$$

**Пример 9.1.** Определить надежность электроснабжения потребителей, присоединенных к сети, представленной на рис. 9.1, и надежность схемы сети в целом. Расчетные нагрузки приведены в табл. 9.1. Длины участков линии, км:

$$l_{\text{ИП-1}} = 3,0; \quad l_{1-2} = 1,5; \quad l_{1-3} = 5,0; \quad l_{3-4} = 3,5; \quad l_{3-5} = 2,0.$$

Таблица 9.1

Показатели работы	Потребители				
	П1	П2	П3	П4	П5
Расчетная нагрузка $P_{Pi}$ , кВт	200	150	100	50	160
Число часов использования максимума $T_{Hoi}$ , ч	3000	3200	2800	3200	4000
Число часов работы $T^*$ , ч	8760	8760	8760	8760	8760

Показатели надежности линии:

$$\lambda_{\text{Л}}^0 = 0,25 \text{ год}^{-1}/\text{км}; \quad T_{\text{В}} = 6 \text{ ч}; \quad \nu_{\text{Л}}^0 = 0,25 \text{ год}^{-1}/\text{км}; \quad \xi = 0,33;$$

$$T_{\text{ОЛ}} = 5,8 \text{ ч}; \quad \nu_{\delta} = 2,5 \text{ км/ч}; \quad T_{\text{ВО}} = 1 \text{ ч}.$$

*Решение.* Находим средние нагрузки потребителей

$$\bar{P}_i = P_{Pi} \cdot T_{Hoi} / T^*; \quad \bar{P}_1 = 200 \cdot 3000 \cdot 8760^{-1} = 68,5 \text{ кВт};$$

$$\bar{P}_2 = 54,8 \text{ кВт}; \quad \bar{P}_3 = 32,0 \text{ кВт}; \quad \bar{P}_4 = 18,3 \text{ кВт}; \quad \bar{P}_5 = 73,1 \text{ кВт}.$$

Определяем показатели надежности электроснабжения

$$\lambda_C = \lambda_{Л}^0 \sum_{i=1}^5 l_i = \lambda_{Л}^0 l_{\Sigma} = 0,25(3,0 + 1,5 + 5,0 + 3,5 + 2,0) = 3,75 \text{ год}^{-1};$$

$$v_C = v_{Л}^0 l_{\Sigma} = 3,75 \text{ год}^{-1}; \quad T_{ПМ} = 0,5 l_{\Sigma} v_x^{-1} = 3,0 \text{ ч}; \quad T_{ОС} = T_{ОЛ} = 5,8 \text{ ч};$$

$$T_{ВС} = T_{ВО} + T_{ПМ} + T_{В} = 10,0 \text{ ч};$$

$$\Theta_{\ominus} = \lambda_C T_{ВС} + \xi \cdot v_C \cdot T_{ОС} = 44,7 \text{ ч/год};$$

$$W = \Theta_{\ominus} \sum_{i=1}^5 \bar{P}_i = 44,7 \cdot 246,7 = 11027,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

### 9.3. Воздушные линии с коммутационными аппаратами

Для повышения надежности линии оснащаются коммутационными аппаратами (КА), позволяющими секционировать линию на участки и тем самым сокращать недоотпуск электроэнергии потребителям.

Предположим, что на рассмотренной ВЛ 10 кВ (см. рис. 9.1) установлен линейный разъединитель в узел 1 в сторону узла 3. После приезда ОВБ на ИП и опробования линии определяют поврежденный участок линии (в данном случае до или за разъединителем), а затем находят место повреждения, устраняют повреждение и включают линию.

Здесь время восстановления электроснабжения зависит от места расположения потребителя и от поврежденного участка. Для потребителей, расположенных до разъединителя (П1 и П2), время восстановления при повреждении участка

$$T_{В, ИП-1}^{(1,2)} = T_{В, 1-2}^{(1,2)} = T_{ВО} + T_{ПУ} + T_{ПМ} + T_{В}, \quad (9.5)$$

где  $T_{ПУ}$  – среднее время поиска поврежденного участка;

$$T_{B,1-3}^{(1,2)} = T_{B,3-4}^{(1,2)} = T_{B,3-5}^{(1,2)} = T_{BO} + T_{ПУ}. \quad (9.6)$$

Для потребителей, расположенных за разъединителем (ПЗ, П4, П5), имеем

$$\begin{aligned} T_{B,ИП-1}^{(3,4,5)} = T_{B,1-2}^{(3,4,5)} = T_{B,1-3}^{(3,4,5)} = T_{B,3-4}^{(3,4,5)} = T_{B,3-5}^{(3,4,5)} = \\ = T_{BO} + T_{ПУ} + T_{ПМ} + T_B. \end{aligned} \quad (9.7)$$

Схема замещения для потребителей П1, П2 представлена на рис. 9.3, где заштриховка элементов 1-3, 3-4, 3-5 означает, что в качестве времени их восстановления принимается время оперативных переключений. Для потребителей ПЗ, П4, П5 схема замещения окажется прежней (см. рис. 9.2).

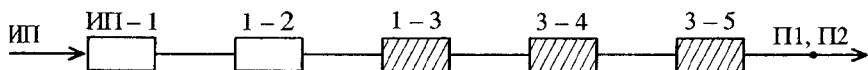


Рис. 9.3

Таким образом, при установке секционирующего КА сокращается время восстановления электроснабжения потребителей, подключенных до секционирующего КА при повреждении участков линии за ним.

КА позволяет преднамеренно отключать линии с минимальным (на время оперативных переключений) обесточиванием потребителей, находящихся до отключаемого участка.

#### 9.4. Определение времени поиска поврежденного участка

Время поиска поврежденного участка  $T_{ПУ}$  зависит от количества установленных на линии КА и мест их установки. Чем больше

КА установлено на линии, тем больше  $T_{ПУ}$  и меньше  $T_{ПМ}$ . Проследим процесс поиска поврежденного участка и места повреждения для случая, когда линейный разделитель установлен в узле 1 к узлу 3 (см. рис. 9.1). После неудавшегося пробного включения линейного выключателя на ИП оперативная выездная бригада направляется к разъединителю. Время переезда

$$t_{ИП-1} = l_{ИП-1} k_p v_a^{-1}, \quad (9.8)$$

где  $l_{ИП-1}$  – расстояние от ИП до узла 1 по трассе;  $v_a$  – скорость движения автомашины;  $k_p$  – коэффициент, учитывающий увеличение расстояния по сравнению с длиной линии.

Далее выполняется операция отключения разъединителя за время  $t_{ОП}$  и ОВБ возвращается на ИП за время  $t_{ИП-1}$ , чтобы включить линейный выключатель. Тогда

$$T_{ПУ} = 2(t_{ИП-1} + t_{ОП}).$$

Если линейный выключатель отключается (в случае повреждения участков ИП – 1 и 1 – 2), необходимо обойти эти участки. Для обнаружения места повреждения электромонтер в среднем обходит половину участков за время

$$T'_{ПМ} = 0,5(l_{ИП-1} + l_{1-2})v_x^{-1}.$$

Когда линейный разъединитель остается во включенном положении (при повреждении участков 1 – 3, 3 – 4 или 3 – 5), ОВБ едет к узлу 1 и оттуда организует обход участков. Тогда имеем

$$T''_{ПМ} = l_{ИП-1} k_p v_a^{-1} + 0,5(l_{1-3} + l_{3-4} + l_{3-5})v_x^{-1}.$$

При наличии на линии  $n_{QS}$  линейных разъединителей (по ходу питания) среднее время поиска поврежденного участка

$$T_{\text{ПУ}} = 2 \sum_{S=1}^{n_{\text{QS}}} (l_S k_P v_a^{-1} + t_{\text{ОП}}), \quad (9.9)$$

где  $l_S$  – расстояние по трассе от ИП до места установки  $S$ -го разъединителя.

**Пример 9.2.** Определить показатели надежности электроснабжения потребителей, присоединенных к ВЛ 10 кВ (рис. 9.4). На линии устанавливаются линейные разъединители. Показатели надежности рассчитать для двух случаев:

1. На линии установлен один разъединитель  $QS1$  в точке 1 в сторону точки 3.
2. На линии установлены четыре разъединителя  $QS1, QS2, QS3, QS4$ .

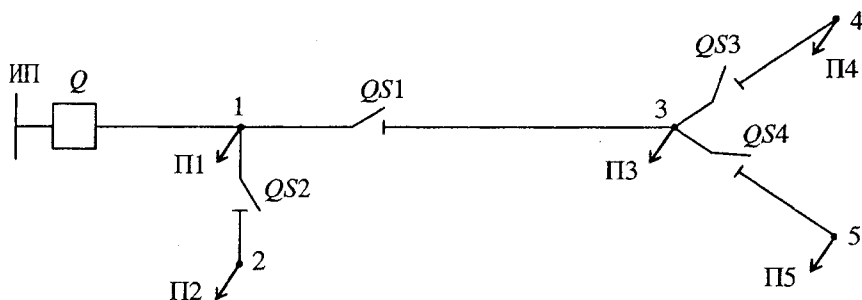


Рис. 9.4

Исходные данные приведены в примере 9.1. Кроме того, известны  $v_a = 20$  км/ч;  $t_{\text{ОП}} = 0,15$  ч;  $k_P = 1,3$ .

**Решение. Рассмотрим первый случай.** Время восстановления для потребителей П1, П2 при повреждении участков ИП–1 и 1–2, расположенных до  $QS1$ , согласно (9.5) будет

$$T_{\text{В,ИП-1-2}}^{(1,2)} = T_{\text{ВО}} + T_{\text{ПУ}} + T_{\text{ПМ}}^{(1,2)} + T_{\text{В}},$$

где  $T_{\text{ВО}} = 1$  ч;  $T_{\text{В}} = 6$  ч; а согласно (9.9) и (9.3)  
 $T_{\text{ПУ}} = 2(l_{\text{ИП-1}} k_P v_a^{-1} + t_{\text{ОП}}) = 0,7$  ч и  $T_{\text{ПМ}}^{(1,2)} = 0,5(l_{\text{ИП-1}} + l_{1-2}) v_x^{-1} = 0,9$  ч.

Следовательно,  $T_{В,ИП-1-2}^{(1,2)} = 1,0 + 0,7 + 0,9 + 6,0 = 8,6$  ч.

Время восстановления потребителей П1 и П2, расположенных за разъединителем QС1, согласно (9.5)

$$T_{В,ИП-1-2}^{(1,2)} = T_{ВО} + T_{ПУ} = 1,7 \text{ ч.}$$

Эквивалентная продолжительность отключения потребителей П1 и П2 определяем, используя формулу (9.2):

$$\begin{aligned} \Theta_{\mathcal{G}}^{(1,2)} &= \sum_{i=1}^5 \lambda_i T_{Вi} + \sum_{i=1}^5 \xi v_i T_{Оi} = \\ &= \lambda_{Л}^0 [(l_{ИП-1} + l_{1-2}) T_{В,ИП-1-2}^{(1,2)} + (l_{1-3} + l_{3-4} + l_{3-5}) T_{В,1-3-4-5}^{(1,2)}] + \\ &+ \xi v_{Л}^0 T_{ОЛ} (l_{ИП-1} + l_{1-2}) = 0,25[(3 + 1,5)8,6 + (5 + 3,5 + 2)1,7] + \\ &+ 0,33 \cdot 0,25 \cdot 5,8(3 + 1,5) = 16,3 \text{ ч/год.} \end{aligned}$$

По (9.1) находим ожидаемый недоотпуск энергии 1-му и 2-му потребителям:

$$W_1 = \bar{P}_1 \Theta_{\mathcal{G}}^{(1,2)} \approx 1117 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}, \quad W_2 = \bar{P}_2 \Theta_{\mathcal{G}}^{(1,2)} \approx 893 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Перейдем к рассмотрению показателей надежности потребителей П3, П4, П5, расположенных за QС1. Повреждения всех участков приводят к их обесточиванию на время ремонта. Величины  $T_{ВО}$ ,  $T_{ПУ}$ ,  $T_{В}$  здесь те же, что и для потребителей П1 и П2, а среднее время поиска места повреждения возрастает:

$$T_{ИМ}^{(3,4,5)} = 0,5(l_{1-3} + l_{3-4} + l_{3-5}) v_x^{-1} = 2,1 \text{ ч.}$$

При этом время восстановления для потребителей П3, П4, П5 составит

$$T_{В,1-3-4-5}^{(3,4,5)} = 1,0 + 0,7 + 2,1 + 6,0 = 9,8 \text{ ч.}$$

Эквивалентная продолжительность простоя ПЗ, П4, П5 будет

$$\Theta_{\mathcal{E}}^{(3,4,5)} = \lambda_{\text{Л}}^0 [(l_{\text{ИП-1}} + l_{1-2}) T_{В, \text{ИП-1-2}}^{(3,4,5)} + (l_{1-3} + l_{3-4} + l_{3-5}) T_{В, 1-3-4-5}^{(3,4,5)}] + \xi v_{\text{Л}}^0 T_{\text{ОЛ}} l_{\Sigma} = 42,6 \text{ ч/год.}$$

Ожидаемый недоотпуск энергии потребителям ПЗ, П4 и П5:

$$W_3 = \bar{P}_3 \Theta_{\mathcal{E}}^{(3,4,5)} \approx 1363 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}, \quad W_4 = \bar{P}_4 \Theta_{\mathcal{E}}^{(3,4,5)} \approx 780 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год},$$

$$W_5 = \bar{P}_5 \Theta_{\mathcal{E}}^{(3,4,5)} \approx 3114 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Суммарный недоотпуск энергии для случая, когда установлен один линейный разъединитель  $QS_1$ , составит

$$W = \sum_{i=1}^5 W_i = 7267 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

**Рассмотрим второй случай**, когда на линии установлены четыре разъединителя  $QS_1, QS_2, QS_3, QS_4$ . Порядок выполнения расчетов рассмотрим на примере повреждения участка 1 – 3. Схема замещения приведена на рис. 9.5.

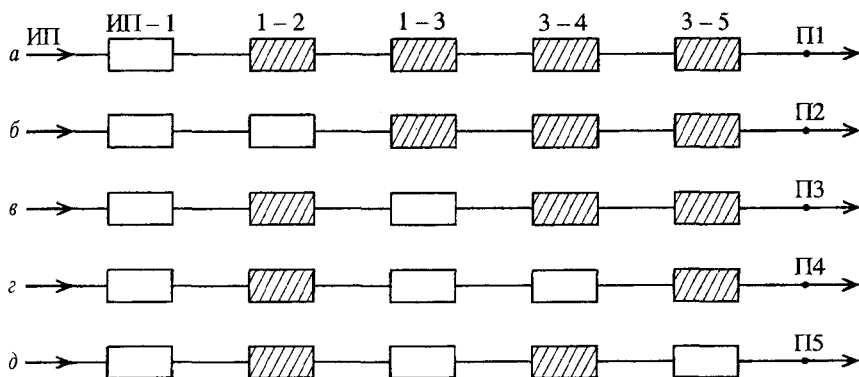


Рис. 9.5



Потребители П1 и П2 будут обесточены на время

$$T_{B,1-3}^{(1,2)} = T_{BO} + T_{ПУ},$$

где  $T_{BO} = 1$  час;

$$\begin{aligned} T_{ПУ} &= 2(l_{ИП-1}k_P v_a^{-1} + t_{ОП}) + 4(l_{ИП-1-3}k_P v_a^{-1} + t_{ОП}) = \\ &= 0,7 + 4(8,0 \cdot 1,3 \cdot 20^{-1} + 0,15) = 3,4 \text{ ч.} \end{aligned}$$

Следовательно,  $T_{B,1-3}^{(1,2)} = 1 + 3,4 = 4,4$  ч.

Потребители П3, П4 и П5 будут обесточены на время

$$T_{B,1-3}^{(3,4,5)} = T_{BO} + T_{ПУ} + T_{ПМ}^{(3,4,5)} + T_B,$$

где  $T_{ПМ}^{(3,4,5)} = l_{ИП-1}k_P v_a^{-1} + 0,5l_{ИП-1-3}k_P v_x^{-1} = 1,2$  ч.

Следовательно,  $T_{B,1-3}^{(3,4,5)} = 1 + 3,4 + 1,2 + 6,0 = 11,6$  ч.

Далее по формулам (9.2) и (9.4) определяются эквивалентные продолжительности простоя и суммарный недоотпуск электроэнергии потребителям.

Из сравнения примеров 9.1 и 9.2 можно увидеть, как влияет наличие КА на надежность электроснабжения потребителей. Недоотпуск электроэнергии в схеме с одним разъединителем меньше, чем в схеме без разъединителей.

## 10. НАДЕЖНОСТЬ РЕЗЕРВИРУЕМЫХ СЕТЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Резервирование является одним из наиболее распространенных способов повышения надежности в системах электроснабжения и выполняется на различных структурно-иерархических уровнях. В распределительных сетях общего назначения, питающих основную массу потребителей, резервирование обычно осуществляется вручную оперативно выездными бригадами.

### 10.1. Воздушные линии с глухим присоединением потребителей

Если линия не оснащена коммутационным аппаратом, то резервное питание подается только после отказа основного источника питания. Для более эффективного использования резервного питания линия секционируется на участки.

Рассмотрим надежность электроснабжения потребителей, питающихся от линии по схеме, показанной на рис. 10.1. В нормальном режиме работы разъединитель  $QS_6$ , соединяющий линию с резервным источником питания (РИП), отключен.

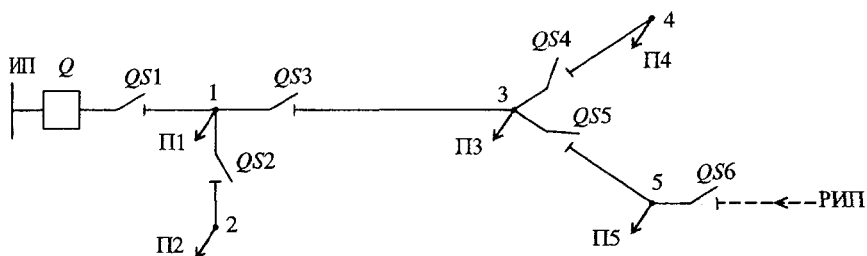


Рис. 10.1

При повреждении на магистрали (ИП–1–3–5) ОВБ находит поврежденный участок, отключает его, подает питание от основного и резервного источников, а затем приступает к поиску места повреждения. Если повреждено ответвление, то оно отключается, и питание потребителей происходит по нормальной схеме.

В рассматриваемом случае среднее время восстановления электроснабжения включает в себя дополнительную составляющую – среднее время включения резервного питания.

## 10.2. Линии с присоединением потребителей по петлевой схеме

Петлевые схемы функционируют в разомкнутом режиме. Для одного из потребителей один аппарат находится в отключенном состоянии (на рис. 10.2 – это аппарат потребителя П3 в направлении П4). При такой схеме отказ любого участка полуцепочки приводит к обесточиванию любого потребителя на время прибытия оперативной выездной бригады к источнику питания и поиска отключения поврежденного участка. Среднее время восстановления электроснабжения будет

$$T_B = T_{BO} + T_{ПУ},$$

где  $T_{BO}$  – среднее время от момента отказа до пробного включения линии;  $T_{ПУ}$  – среднее время поиска поврежденного участка. Время, затрачиваемое на ремонт поврежденного участка, здесь не учитывается, поскольку в схеме имеются два источника питания.

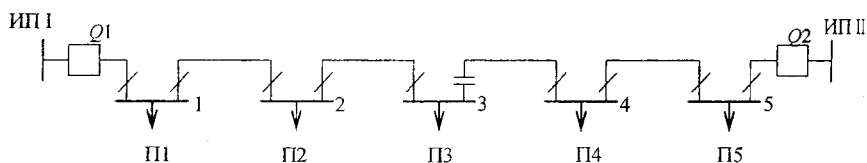


Рис. 10.2

Схема замещения по надежности для потребителей П1, П2, П3 помещены на рис. 10.3, а, а для потребителей П4, П5 – на рис. 10.3, б.

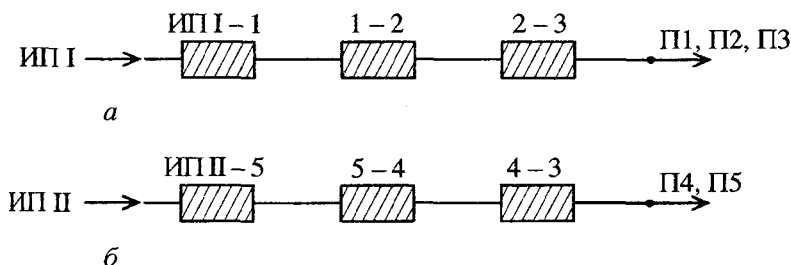


Рис. 10.3

Для электрических сетей городов и промышленных предприятий участки кабельных линий в среднем составляют 350–450 м, что значительно короче воздушных линий в сельской местности. Поэтому для времени поиска поврежденного участка длина его имеет значительно меньшее значение, чем в предыдущей схеме на рис. 10.1. Поэтому время поиска поврежденного участка для СЭС городов и промышленных предприятий задаются в усредненном виде в зависимости от числа ТП в полуцепочке

$$T_{\text{ПУ}} = T' + nT'',$$

где  $T'$  и  $T''$  – составляющие времени поиска поврежденного участка, определяемые в результате статистической обработки ретроспективных данных о повреждаемости сетей, а  $n$  – число элементов в полуцепочке.

**Пример 10.1.** Определить показатели надежности для потребителей на шинах 10 кВ ТП и для схемы в целом (рис. 10.2). Нагрузки потребителей приведены в табл. 9.1 (см. пример 9.1). Длины участков КЛ:

$$l_{\text{ИП I-1}} = 0,7 \text{ км}; \quad l_{1-2} = 0,25 \text{ км}; \quad l_{2-3} = 0,3 \text{ км}; \quad l_{3-4} = 0,35 \text{ км}; \\ l_{4-5} = 0,4 \text{ км}; \quad l_{5-\text{ИП II}} = 0,9 \text{ км}.$$

Составляющие времени восстановления:

$$T_{\text{ВО}} = 0,6 \text{ ч}; \quad T' = 0,4 \text{ ч}; \quad T'' = 0,2 \text{ ч}.$$

Показатели надежности шин 10 кВ в данном случае не учитываются.

Решение. Для полупеочки (П1, П2, П3) имеем

$$T_B^{(1,2,3)} = T_{BO} + T' + nT'' = 0,6 + 0,4 + 3 \cdot 0,2 = 1,6 \text{ ч.}$$

Для второй полупеочки (П4, П5) получаем

$$T_B^{(4,5)} = 0,6 + 0,4 + 2 \cdot 0,2 = 1,4 \text{ ч.}$$

Так как имеется резервирование, коэффициент  $\xi$ , характеризующий тяжесть последствий от преднамеренных отключений, принимается равным нулю. Тогда в соответствии с (9.2) эквивалентная продолжительность простоя потребителей П1, П2, П3 определится как

$$\begin{aligned} \Theta_{\Sigma 1} = \Theta_{\Sigma 2} = \Theta_{\Sigma 3} &= \lambda_{Л}^0 (l_{ИП-1} + l_{1-2} + l_{2-3}) T_B^{(1,2,3)} = \\ &= 0,25(0,7 + 0,25 + 0,3)1,6 = 0,5 \text{ ч,} \end{aligned}$$

а потребителей П4, П5 как

$$\begin{aligned} \Theta_{\Sigma 4} = \Theta_{\Sigma 5} &= \lambda_{Л}^0 (l_{3-4} + l_{4-5} + l_{5-ИПШ}) T_B^{(4,5)} = \\ &= 0,25(0,35 + 0,4 + 0,9)1,4 = 0,58 \text{ ч.} \end{aligned}$$

Средние нагрузки потребителей были определены в примере 9.1:

$$\begin{aligned} \bar{P}_1 = 68,5 \text{ кВт; } \bar{P}_2 = 58,4 \text{ кВт; } \bar{P}_3 = 32,0 \text{ кВт; } \bar{P}_4 = 18,3 \text{ кВт; } \\ \bar{P}_5 = 73,1 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Согласно (9.1) рассчитываем ожидаемые недоотпуски электроэнергии:

$$W_1 = 68,5 \cdot 0,5 = 34,25 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год; } W_2 = 54,8 \cdot 0,5 = 27,4 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год;}$$

$$W_3 = 32,0 \cdot 0,5 = 16,0 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год; } \bar{W}_4 = 18,3 \cdot 0,58 = 10,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год;}$$

$$W_5 = 73,1 \cdot 0,58 = 42,4 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год; } W = \sum_{i=1}^5 W_i = 130,65 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год.}$$

### 10.3. Многократно резервируемые линии

Схема линии для случаев, когда подается не одно, а несколько резервных питаний, представлена на рис. 10.4.

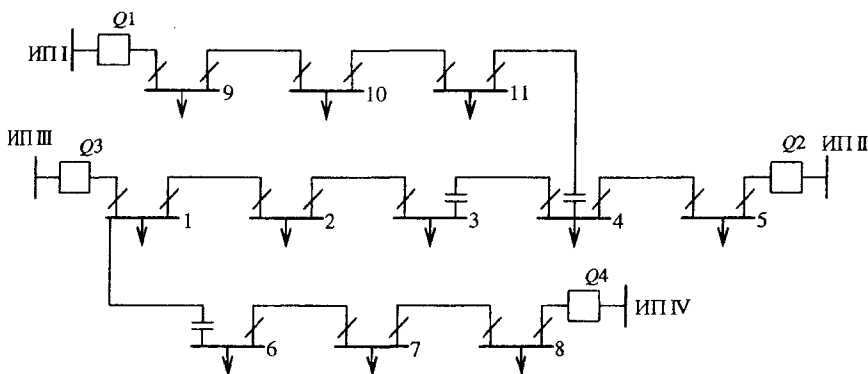


Рис. 10.4

Многократное резервирование выполняется для повышения надежности электроснабжения ответственных потребителей на тот случай, когда отказ резервной линии наступит во время простоя основной линии.

В процессе эксплуатации электрических сетей встречаются случаи, когда линии 6-10 кВ длительное время находятся на ремонте. При этом вероятность отказа резервной линии во время простоя основной резко возрастает.

Чтобы учесть возможность возникновения таких случаев, необходимо провести анализ всех вероятных режимов работы сети и для каждого из них определить ожидаемый недоотпуск электроэнергии. Результирующий недоотпуск  $i$ -му потребителю составит

$$W_i = \sum_{j=0}^s W_{ij} b_j,$$

где  $W_{ij}$  – ожидаемый недоотпуск электроэнергии  $i$ -му потребителю в  $j$ -ом режиме;  $s$  – число режимов;  $b_j$  – вероятность существования  $j$ -го режима сети.

В данном случае рассматриваются нормальный режим ( $j = 0$ ), когда все  $s$  линий находятся в работоспособном состоянии, и режимы, когда одна из линий неработоспособна, а остальные ( $s - 1$ ) работоспособны. Таких режимов столько, сколько линий в данной системе.

Точное значение недоотпуска энергии можно получить при анализе режимов, когда одновременно простаивают две и более линий. Однако вероятность такого совпадения пренебрежимо мала и эти режимы не оказывают большого влияния на точность расчетов.

Вероятность работы сети в  $j$ -ом режиме

$$b_j = a_j T_{HPj} T^{-1},$$

где  $a_j$  – частота переходов  $j$ -го участка линии в работоспособное состояние

$$a_j = \lambda_j + v_j = l_j (\lambda_{Л}^0 + v_{Л}^0);$$

$T_{HPj}$  – среднее время нахождения  $j$ -го участка линии в неработоспособном состоянии;  $T$  – продолжительность работы линии за год, ч/год.

Вероятность пребывания линии в работоспособном состоянии

$$b_0 = 1 - \sum_{j=1}^s b_j.$$

В практике сооружения городских сетей 6–10 кВ применяются двух- и многолучевые схемы, когда одна ТП может получать питание от четырех ИП. Эффект от повышения надежности при этом следует соизмерять с увеличением затрат на сооружение и эксплуатацию систем электроснабжения.

## 11. НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СЕТЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Автоматизированные электрические сети оснащаются устройствами автоматического секционирования и резервирования. Это позволяет с помощью относительно небольших затрат повысить надежность нерезервируемых сетей. В резервируемых сетях применение этой автоматики обеспечивает достаточный уровень надежности для потребителей самой высокой первой категории.

### 11.1. Нерезервируемые сети с глухим присоединением потребителей к линии

На рис. 11.1 приведен пример построения электрической сети 6–10 кВ сельскохозяйственного назначения. В качестве автоматических коммутационных аппаратов используются секционные выключатели и автоматические секционные отделители.

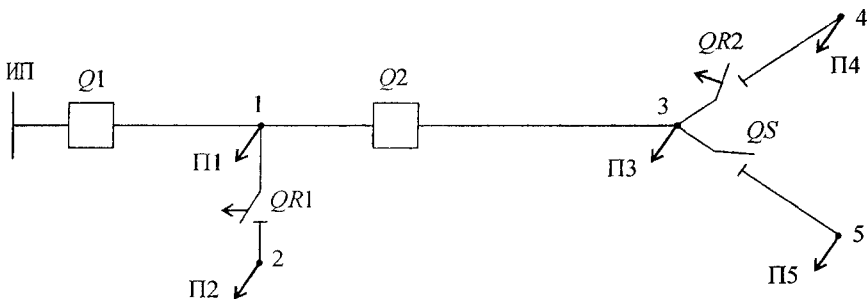


Рис. 11.1

При коротком замыкании на линии за секционным выключателем Q2 происходит автоматическое отключение Q2, обесточиваются участки линий, находящиеся за этим выключателем, а участки, находящиеся до Q2, продолжают получать питание.

Работа автоматических секционных отделителей QR1, QR2 заключается в следующем. При коротком замыкании на линии за QR происходит отключение Q2 или линейного выключателя Q1 на ИП. В бестоковую паузу срабатывает отделитель и отключает повреж-



денную часть линии. Затем повторно срабатывает  $Q1$  или  $Q2$  и восстанавливается питание потребителей, находящихся до места установки  $QR$ . Для выполнения этих операций  $Q1$  и  $Q2$  оборудуются устройством автоматического повторного включения (АПВ).

При использовании автоматических секционирующих устройств время восстановления электроснабжения и интенсивность преднамеренных отключений потребителей, находящихся до автоматического секционирующего отделителя, при повреждении участков линии за этим отделителем, принимаются равными нулю.

При наличии между автоматическими секционирующими отделителями линейных разъединителей время поиска поврежденного участка рассчитывается по формулам (9.5), (9.6), (9.7). При этом количество разъединителей в формулах определяется числом разъединителей, находящихся между автоматическими КА.

Недоотпуск электроэнергии при использовании средств автоматизации может быть существенно (в 1,5–2 и более раза) уменьшен по сравнению как с резервированной сетью, так и особенно по сравнению с нерезервированной сетью, оснащенной только разъединителями.

## 11.2. Резервируемые сети

Для повышения надежности электроснабжения потребителей электрические сети оснащаются специальными пунктами автоматического ввода резервного питания (ПАВР), либо АВР монтируются в распределительных устройствах понижающих подстанций.

Различают три вида автоматического резервирования.

1. *Полное сетевое резервирование.* В этом случае резервное питание подается потребителям при исчезновении напряжения на основном источнике питания. Такой вид резервирования применяется, когда надежность основного ИП относительно невысока, например, при установке одного трансформатора на подстанциях 35,110 кВ при питании подстанций по одной линии. Подобное резервирование позволяет обеспечить электроэнергией всех потребителей, присоединенных к данной линии.

2. *Частичное сетевое резервирование.* В этом случае на линии должен быть установлен секционный выключатель. Потребители, питающиеся от участков, расположенных до выключателя, при повреждении линии будут обесточены на время ремонта поврежденно-

го участка (магистральной). Потребители, находящиеся за секционным выключателем, обеспечиваются электроэнергией от резервного источника питания. Такое резервирование позволяет сократить затраты на сооружение резервной линии, т.к. расчетная нагрузка послеаварийного режима определяется только частью потребителей линии.

3. *Местное резервирование.* При таком резервировании вводная ячейка распределительного устройства потребителя (ТП) оборудуется автоматическим коммутационным аппаратом. В выводной ячейке устанавливается аппарат с устройством АПВ. При исчезновении напряжения от основного источника питания отключается коммутационный аппарат во вводной ячейке и питание подается от резервного источника питания. В данном случае обычно имеет место АВР одно-стороннего действия. Такой вид автоматического резервирования используется для питания ответственных потребителей.

### **11.3. Расчет надежности систем электроснабжения с учетом структурно-иерархических уровней**

При решении задач, связанных с учетом надежности электроснабжения, следует учитывать совокупность электрических сетей различных структурно-иерархических уровней.

Например, когда оценивается надежность электроснабжения различных электроприемников крупного завода, нужно рассматривать электрические сети напряжения 35, 110 кВ, подающие энергию от источников питания – узловых районных подстанций; питающие сети 6, 10 кВ, по которым энергия передается в основные узлы потребления; распределительные сети 6, 10 кВ; магистральные линии низкого напряжения, ответвления к потребителям, шинопроводы различного напряжения и др. Перечисленные сети различаются конструктивным исполнением, величиной передаваемой мощности, степенью автоматизации и т.д.

Подход к надежности СЭС, представляющих собой совокупность сетей различных уровней, описан в разделе 8. Однако при изучении СЭС, состоящих из большого количества элементов, резко возрастает объем производимых вычислений, поскольку для каждого потребителя нужно составить схему замещения и рассчитать показатели надежности. При большом количестве расчетных точек решение задачи затруднительно даже при использовании ЭВМ.

Поэтому практически приходится решать задачи оценки надежности отдельно для каждого структурно-иерархического уровня. Однако взаимосвязь расчетных узлов может привести к неправильной оценке надежности. Чтобы этого избежать, при выполнении расчетов надежности для каждого структурно-иерархического уровня и учета возможности зависимого питания расчетных точек применяют следующий прием. В узлах нагрузки высшего уровня определяют показатели надежности для различных способов присоединения потребителей:

- без резервирования или с резервированием от того же узла нагрузки;
- с резервированием от другого узла нагрузки, имеющего независимое питание;
- с резервированием от другого узла нагрузки, имеющего зависимое питание.

Рассмотрим случай ручного и автоматического ввода резерва. При этом считается, что осуществляется полное резервирование, т.е. при отказе электроснабжения в расчетной точке резервное питание подается любому потребителю, находящемуся за расчетной точкой, до шин рассматриваемой электроустановки.

При расчете показателей надежности на низшем уровне расчетные точки верхнего уровня в дальнейшем будем рассматривать как имеющие независимое питание. Тогда показатели надежности для  $i$ -го потребителя определяются по формулам для последовательно соединенных элементов:

$$\lambda_i = \sum_{r=1}^R \lambda_{r(i)}; \quad T_{Bi} = \lambda_i^{-1} \sum_{r=1}^R \lambda_{r(i)} T_{Br(i)},$$

где  $R$  – число рассматриваемых структурно-иерархических уровней;  
 $\lambda_{r(i)}$ ,  $T_{Br(i)}$  – показатели надежности в расчетной точке  $r$ -го уровня для  $i$ -го потребителя.

## 12. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫХ СХЕМ

### 12.1. Особенности надежности работы релейно-контактных элементов

Схемы, содержащие релейно-контактные элементы, являются составной частью коммутационных электрических аппаратов (выключателей, разъединителей, заземляющих ножей), устройств релейной защиты и автоматики.

Особенность надежности релейно-контактных элементов обусловлена тем, что они находятся в одном из трех состояний: работоспособном с вероятностью  $p_i$ , иметь отказ типа «обрыв» (контакт не замыкает цепь несмотря на поданную команду) с вероятностью  $q_{i0}$ , иметь отказ типа «замыкание» (контакт не размыкает цепь) с вероятностью  $q_{is}$ .

Для каждого элемента соблюдается условие

$$p_i + q_{i0} + q_{is} = 1.$$

Релейно-контактные схемы, также как и составляющие их элементы, могут иметь два вида отказа: «обрыв» и «замыкание». При этом определенный тип отказов схемы вызывается лишь одноименным типом отказов элементов. Для повышения надежности релейно-контактных схем применяется резервирование элементов. Показатели надежности релейно-контактных схем, составленных из  $n$  элементов, определяются по выражениям, основанным на биномиальном разложении Ньютона:

$$\prod_{i=1}^n (p_i + q_{i0} + q_{is}) = 1. \quad (12.1)$$

Для равнонадежных элементов ( $p = p_i$ ,  $q_0 = q_{i0}$ ,  $q_s = q_{is}$ ) формула (12.1) принимает вид

$$(p + q_0 + q_s)^n = 1.$$

В случае  $n = 2$  число комбинаций состояний элементов релейно-контактной схемы равно  $3^2 = 9$ :

$$p^2 + 2pq_0 + 2pq_s + q_0^2 + 2q_0q_s + q_s^2 = 1. \quad (12.2)$$

Если  $n = 3$ , то число комбинаций равно  $3^3 = 27$ :

$$p^3 + 3p^2q_0 + 3p^2q_s + 3pq_0^2 + 3pq_s^2 + 6pq_0q_s + q_0^3 + 3q_0^2q_s + 3q_s^2q_0 + q_s^3 = 1. \quad (12.3)$$

Из полученных выражений (12.2, 12.3) можно выделить комбинации состояний элементов, определяющие вероятности безотказной работы и отказов типов «обрыв», «замыкание» схем резервирования с двумя или тремя элементами. Аналогично поступают при большем числе элементов.

## 12.2. Расчет показателей надежности резервированных релейно-контактных схем

Приводимые ниже формулы справедливы для случая постоянно-го резервирования.

Вероятности отказов типа «обрыв»  $Q_0$  и «замыкание»  $Q_s$  схемы последовательного резервирования (рис. 12.1) с равнонадежными элементами определяются выражениями

$$Q_0 = 1 - (1 - q_0)^n, \quad Q_s = q_s^n. \quad (12.4)$$



Рис. 12.1

В соответствии с принципом двойственности вероятности отказов схемы параллельного резервирования (рис. 12.2) определяются следующим образом:

$$Q_0 = q_0^n, \quad Q = 1 - (1 - q_s)^n. \quad (12.5)$$

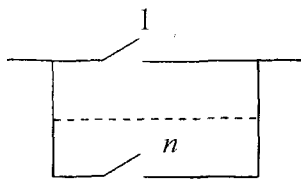


Рис. 12.2

Вероятность безотказной работы любой резервированной схемы

$$P = 1 - Q_0 - Q_s. \quad (12.6)$$

Анализ выражений (12.5, 12.6) показывает, что при одинаковых вероятностях отказов элементов ( $q_0 = q_{i0} = q_s = q_{is}$ ) надежность последовательной и параллельной схем при  $n = 2$  одна и та же, но происходит перераспределение вероятностей разнотипных отказов при переходе от одной схемы к другой.

При увеличении числа элементов схемы последовательного резервирования вероятность отказов типа «обрыв» возрастает, а вероятность отказов типа «замыкание» убывает. Для схемы параллельного резервирования имеют место обратные зависимости.

Для повышения надежности работы ответственных схем защиты и автоматики применяют кворумную схему «два из трех» с тремя промежуточными реле или одним реле с тремя парами контактных элементов (рис. 12.3). В первом случае резервируется реле полностью, во втором – только контактные элементы.

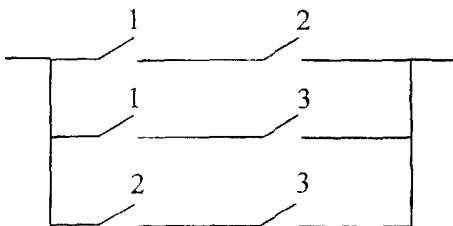


Рис. 12.3

Для правильной работы такой схемы достаточно правильного срабатывания двух из трех элементов. Вероятности отказов схемы определяются как

$$Q_0 = 3q_0^2 - 2q_0^3, \quad Q_s = 3q_s^2 - 2q_s^3. \quad (12.7)$$

При  $q_0 = q_s$  схема равнонаджна в отношении как замыкания, так и размыкания электрической цепи. Вероятность безотказной работы определяется согласно выражению (12.6).

Дополнительное повышение надежности обеспечивает кворумная схема «три из пяти» (рис. 12.4), для правильной работы которой достаточно срабатывания трех элементов из пяти.

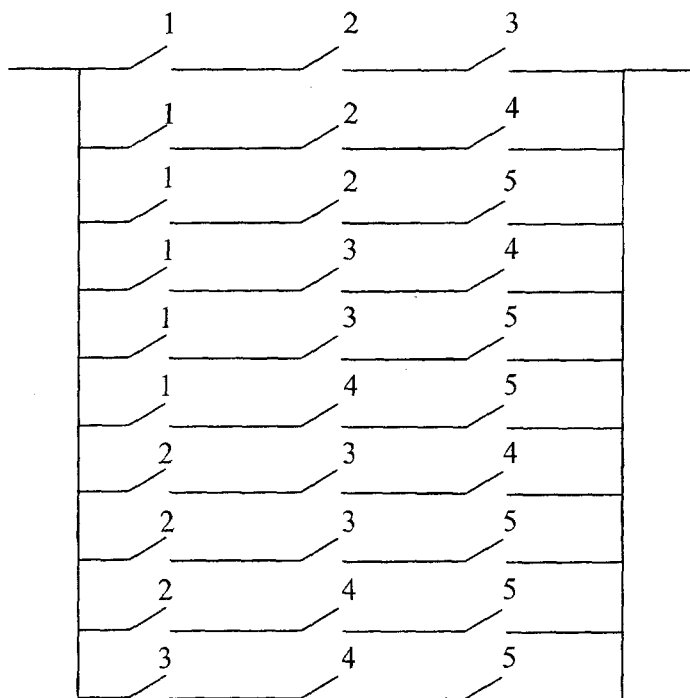


Рис. 12.4

Вероятности отказов для этой схемы определяются выражениями

$$Q_0 = 6q_0^5 - 15q_0^4 + 10q_0^3, \quad Q_s = 6q_s^5 - 15q_s^4 + 10q_s^3. \quad (12.8)$$

**Пример 12.1.** Рассчитать и сравнить вероятности безотказной работы, отказов типа «обрыв» и «замыкание» для дублированных схем, т.е. последовательно или параллельно соединенных двух элементов, и кворумных схем «два из трех» и «три из пяти». Вероятность безотказной работы одного релейно-контактного элемента:  $p = 0,8$ , вероятности отказов  $q_0 = q_s = 0,1$ .

*Решение.* Расчеты, проведенные по формулам (12.4) – (12.8), показали, что дублирование, как последовательное, так и параллельное, не повышает вероятность безотказной работы:  $p = 0,8$ ; вероятность отказов разных типов перераспределяется: для последовательного соединения  $Q_0 = 0,19$  и  $Q_s = 0,01$ , а для параллельного соединения  $Q_0 = 0,01$  и  $Q_s = 0,19$ . Для кворумной схемы «два из трех» получаем  $P = 0,944$  и  $Q_0 = Q_s = 0,028$ , а для кворумной схемы «три из пяти»  $P = 0,98288$  и  $Q_0 = Q_s = 0,00856$ .

Таким образом, кворумные схемы существенно повышают надежность; особенно они эффективны, когда требуется низкая вероятность отказов обоих типов.



## 13. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

### 13.1. Общие сведения о технической диагностике

Одной из наиболее важных характеристик технических систем, в частности систем электроснабжения, является восстанавливаемость (ремонтпригодность). Время, затрачиваемое на процесс контроля работоспособности системы и поиск неисправности, может составлять до 90 % от времени, требуемого на восстановление (ремонт) системы. Дальнейшее развитие и усовершенствование систем электроснабжения приводят к следующему противоречию. С одной стороны, требования надежности системы повышаются. Это вызывается, в частности, увеличением единичных мощностей электрооборудования и потенциально большим ущербом при выходе такого оборудования из строя. С другой стороны, укрупнение и усложнение систем, как правило, создает условия для снижения их надежности.

Поскольку конструктивные, схемные и технологические возможности повышения надежности систем ограничены, то естественным путем устранения этого противоречия является разработка методов и средств контроля работоспособности и поиск неисправностей оборудования, т.е. задача технической диагностики – раздела теории надежности, целью которого является обеспечение эксплуатационной надежности систем.

Технические средства и способы, используемые для диагностирования оборудования, весьма разнообразны. При этом следует учитывать, что условия непрерывной эксплуатации большинства элементов систем электроснабжения зачастую в отрыве от ремонтной базы при ограниченном времени на восстановление заставляют ориентироваться не только на обнаружение места возникновения неисправности, но и на определение характера его возможных последствий.

Основной задачей рациональной организации поиска неисправностей оборудования является сокращение времени и средств, затрачиваемых на поиск. Это достигается за счет использования оптимальных программ поиска неисправностей.

Техническую диагностику разделяют на *тестовую* и *функциональную*.

При тестовой диагностике система выводится из эксплуатации и на ее входы подаются воздействия, имитирующие рабочие сигналы. В промежуточных точках и на выходах системы контролируются реакции, ответные на поданные входные воздействия.

Достоинством тестовой диагностики является возможность проверить максимально широкий круг возможных неисправностей, недостаток обусловлен необходимостью вывода оборудования из эксплуатации на время испытаний (тестирования).

Функциональная диагностика производится в темпе технологического процесса без остановки оборудования, однако круг выявляемых неисправностей при такой диагностике ограничен.

### 13.2. Тестовая диагностика систем автоматического регулирования

Рассмотрим построение алгоритма тестовой диагностики на примере системы автоматического регулирования технологическим процессом при основном (последовательном) соединении элементов. Структурная схема объекта диагностирования приведена на рис. 13.1.

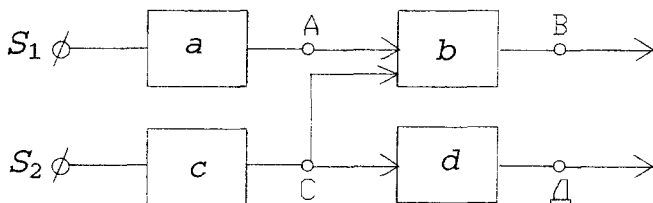


Рис. 13.1

Предполагается, что исправному состоянию элемента (узла, блока) соответствует наличие сигнала 1 (логическая единица) на его выходе, а неисправному состоянию – отсутствие сигнала, т.е. 0 (логический ноль). Предполагается также, что известны контролируемые параметры (элементы) и формы проявления отказов. Полагается, что отказ каждого контролируемого элемента влечет за собой потерю работоспособности всей системы.

При тестировании стремятся к получению минимального числа тестовых воздействий, при которых может быть обнаружена неисправность любого из элементов системы, т.е. к наименьшему числу проверок (тестов).

Соответствующие схемы эквивалентирования по надежности выглядят следующим образом (рис. 13.2).

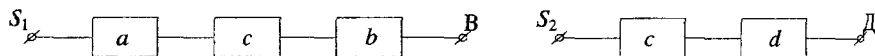


Рис. 13.2

Приняты обозначения:

$a, b, c, d$  – элементы объекта диагностирования;

$S_1$  и  $S_2$  – входы объекта;

$A, C$  – промежуточные точки объекта;

$B, D$  – выходы объекта.

Из схемы эквивалентирования (рис. 13.2) видно, что для нормальной работы элемента  $b$  необходимо присутствие сигналов на обоих его входах.

Возможные комбинации значений переменных образуют таблицу исправного и неисправных состояний объекта, обусловленных единичными отказами элементов (табл. 13.1).

Таблица 13.1

Тесты $T$	Состояния объекта $E$																			
	$a$	$b$	$c$	$d$	$a$	$b$	$c$	$d$	$a$	$b$	$c$	$d$	$a$	$b$	$c$	$d$	$a$	$b$	$c$	$d$
	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
$T_A$	1				0				1				1				1			
$T_B$	1				0				0				0				1			
$T_C$	1				1				1				0				1			
$T_D$	1				1				1				0				0			

Здесь  $T$  – множество всех возможных тестов;  $E$  – множество возможных состояний объекта.

Из табл. 13.1 следует, что пять возможных состояний объекта диагностирования оказываются полностью различимыми с помо-

щью четырех проверок. Отказавшие элементы определяются соответственно кодовыми числами 0011, 1011, 1000, 1110.

С ростом числа элементов увеличивается число состояний объекта диагностирования и, следовательно, сложность формирования оптимальной программы (минимального теста). Минимизация программы тестирования может осуществляться методами, известными в теории булевой алгебры.

Алгоритмы тестовой диагностики резервированных систем существенно усложняются. Связано это с тем, что допущение о статистической независимости отказов резервированных элементов, как показывает практика, достаточно часто нарушается. Это обстоятельство учитывается введением понятия *множественного отказа* – события, при котором несколько элементов системы выходят из строя по одной и той же причине. К числу таких причин относятся следующие:

- конструктивные недоработки оборудования, приводящие к отказам из-за взаимной зависимости между электрическими и механическими подсистемами;

- воздействие окружающей среды (пыль, грязь, температура, вибрация);

- экстремальные режимы нормальной эксплуатации;

- внешние катастрофические воздействия (наводнение, землетрясение, пожар, ураган, терроризм);

- общий изготовитель, когда резервируемое оборудование или его компоненты поставляются одним и тем же изготовителем и могут иметь общие конструктивные или производственные недостатки;

- общий внешний источник питания для основного и резервного оборудования.

Поиск отказавших элементов в системах при множественных отказах предполагает формирование таблиц неисправностей при двойных, тройных и т.д. отказах.

### **13.3. Функциональная диагностика измерительной информации**

Характерным примером этого способа диагностики является оперативный контроль достоверности результатов сигнализации коммутационных электрических аппаратов (дискретных переменных) и

измерений аналоговых переменных (токов, напряжений, мощностей, энергий). В приведенной на рис. 13.3 схеме сигнализации и измерений контролируются три переменные: сигнализация положения выключателя  $Q$ , показания амперметра и вольтметра.

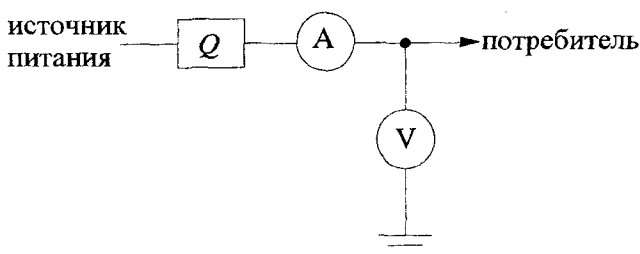


Рис. 13.3

Обнаружение недостоверных данных производится на основе логики высказываний и аппарата булевой алгебры.

Включенное и отключенное положение выключателя соответствует состоянию контролирующего его двухпозиционного датчика:

$Q = 0$ , если выключатель отключен;

$Q = 1$ , если выключатель включен.

Наличию тока (напряжения) соответствует логическая единица, отсутствие – логический нуль:

$I (И) = 0$ , если переменная отсутствует;

$I (И) = 1$ , если переменная присутствует.

Число возможных состояний бинарных результатов сигнализации и измерений

$$N = 2^{(n_{\text{д}} + n_{\text{А}})} = 2^{(1+2)} = 8,$$

где  $n_{\text{д}}$  – число дискретных переменных,

$n_{\text{А}}$  – число аналоговых переменных.

Все возможные состояния системы представлены в табл. 13.2.

Таблица 13.2

№ состояния	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Q</i>	0	1	1	1	1	0	0	0
<i>I</i>	0	1	0	1	0	1	0	1
<i>И</i>	0	1	1	0	0	0	1	1

Множество состояний *Д* разделяется на подмножество технологически непротиворечивых и подмножество противоречивых состояний. Первое из них образует таблицу истинности (№ 1, 2), второе – таблицу ошибок (№ 3–8). Полное совпадение результатов сигнализации и измерений с одним из истинных табличных состояний в результате их поэлементного сравнения означает отсутствие недостоверных данных. В противном случае формируется список подозреваемых в недостоверности переменных с последующей их локализацией. Последняя заключается в нахождении табличных состояний переменных, в минимальной степени отличающихся от измеренного состояния. Недостоверными принимаются значения переменных, различные в выделенных таким способом состояниях. Например, если в рассматриваемом конкретном случае имеем результаты сигнализации и измерений  $Q = 1, I = 1, И = 0$  (состояние № 4), то недостоверным является показание вольтметра (самого прибора или какого-либо другого элемента данного измерительного канала).

## 14. ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ДОСТОВЕРНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

### 14.1. Номенклатура показателей надежности промышленных изделий

Показатели надежности изделий промышленности, в том числе энергетического оборудования, должны указываться в ГОСТ, ТУ и ТЗ на каждый вид изделия в соответствии с:

- классом изделия;
- группой надежности;
- режимом эксплуатации;
- ограничением длительности использования.

*Классы изделий* подразделяют на:

– 1-й – невосстанавливаемые изделия общего назначения, являющиеся элементами сложных устройств (например, шарикоподшипник);

– 2-й – невосстанавливаемые изделия специального назначения (например, электроизмерительные приборы);

– 3-й – восстанавливаемые изделия.

*Группы надежности* подразделяются на:

– I группу, когда отказ изделия создает угрозу безопасности или приводит к значительному ущербу (например, релейная защита, турбогенератор);

– II группу, когда отказ изделия приводит к материальному ущербу одного порядка со стоимостью изделия (например, станок);

– III группу, когда отказ изделия приводит к материальному ущербу, связанному с временной частичной или полной утратой изделия (например, изделия бытовой техники).

*Режимы эксплуатации* подразделяются на:

– непрерывный;

– циклический, т.е. с определенной периодичностью;

– оперативный (с неопределенным моментом включения);

– общий (сочетание трех предыдущих режимов).

*Ограничение длительности использования* может быть:

– назначенное, когда изделие выводят из работы в заранее установленные сроки или при достижении оговоренной наработки;

– вынужденное, когда изделие выводят из работы вследствие отказа или при достижении какого-либо предельного состояния.

Например, определим номенклатуру показателей генераторного блока электростанции: класс-3, группа надежности – I, режим – непрерывный, ограничение длительности использования – вынужденное. По соответствующей таблице находится следующий перечень показателей надежности. Для этого объекта: средняя наработка на отказ, среднее время восстановления, ресурс до капитального ремонта, средние трудозатраты на аварийное восстановление, коэффициент технического использования.

## 14.2. Сбор и обработка информации

В результате сбора и обработки информации о надежности изделий промышленности решаются следующие задачи:

- определение причин отказов;
- выявление тех деталей, сборочных единиц и комплектующих, которые лимитируют надежность изделия;
- установление и корректировка нормируемых показателей надежности;
- оптимизация норм расхода запасных частей и системы планово-предупредительных ремонтов;
- выявление условий и режимов эксплуатации, влияющие на надежность;
- определение экономической эффективности повышения надежности.

Вопросами сбора и обработки информации должны заниматься головные организации и службы надежности (качества) на предприятиях-изготовителях и предприятиях-потребителях.

Информация о надежности изделий серийного производства должна собираться с начала их эксплуатации потребителем.

Формы документации – носителей информации о надежности изделий должны быть общими для всех отраслей и соответствовать действующей нормативно-технической документации. Все формы подразделяются на:

- первичные формы учета;
- формы-накопители;



– формы записи результатов количественного и качественного анализа.

Например, основные первичные формы учета: журнал учета наработок на отказ, журнал технического обслуживания и ремонта изделий. Все виды форм должны предусматривать возможность их обработки на ЭВМ.

Устанавливаются содержание, порядок заполнения и прохождения донесения об отказах изделия. В донесениях регистрируются в первую очередь отказы изделий, связанные с опасностью для жизни людей или приводящие к большим экологическим потерям, а также отказы других видов.

В донесении об отказе должны присутствовать следующие данные об изделии:

- наименование, марка или тип;
- заводской номер;
- предприятие-изготовитель;
- ремонтное предприятие, эксплуатирующее предприятие;
- дата выпуска;
- дата ремонта;
- дата отказа;
- адресные данные отказавших узлов и деталей;
- наработка на отказ;
- причина и условия выявления отказа;
- последствия отказа;
- условия эксплуатации и режимы работы;
- время восстановления работоспособности;
- фактическая трудоемкость восстановления;
- исполнители работ по восстановлению.

### **14.3. Испытания на надежность**

Статистические данные об отказах оборудования можно получить либо в результате наблюдений за оборудованием в ходе *нормальной* или *опытной (подконтрольной)* эксплуатации, либо в результате *стендовых испытаний*.

Наблюдения при нормальной эксплуатации – наиболее доступный источник получения экспериментальных данных о надежности, недостатки – запаздывание данных, ограничение возможности ак-

тивного эксперимента, влияние субъективных факторов на объем и содержание информации.

При опытной эксплуатации наблюдения за работоспособностью оборудования проводятся с участием представителей служб надежности, имеющих специальную подготовку и независимых от воздействия местных субъективных факторов. Однако ограничения по времени и числу сотрудников, а также по режиму использования оборудования не позволяют ставить широкие активные эксперименты.

Стендовые (тестовые) испытания являются централизованными и проводятся либо на заводах-изготовителях, либо в специальных испытательных центрах отрасли. Это – дорогостоящий вид испытаний, осуществляемый не в реальных, а в имитируемых условиях эксплуатации, отвлекающий значительное количество оборудования от использования по назначению.

Стендовые испытания позволяют производить активные эксперименты с выявлением слабых мест и проверкой экстремальных воздействий, а следовательно, ускорить появление данных о надежности.

По назначению испытания на надежность бывают *определятельными* и *контрольными*. С помощью определятельных испытаний выясняется фактический уровень показателей надежности для созданного типа изделий. С помощью контрольных испытаний устанавливается соответствие испытываемой партии изделий нормируемым требованиям. Контрольные испытания применяются для входного контроля комплектующих изделий и выходного контроля выпускаемой продукции.

По объему выборки различают испытания с *полной* и *неполной (усеченной)* выборкой. Испытания с полной выборкой проводятся до отказа всех испытываемых изделий. При неполной выборке испытания проводятся либо в течение заданного времени, либо до определенного числа отказов, либо до заданной наработки на отказ.

При планировании испытаний необходимо задать следующее:

- признание отказов изделий;
- показатель надежности, который является определяющим для данного изделия;
- условия испытаний (электрические параметры, климатические условия, механические нагрузки, последовательность и длительность режимов);

– способ контроля работоспособности (обычный – эксплуатационный или специальный испытательный, непрерывный или периодический);

– способ замены отказавших изделий;

– число испытываемых изделий;

– правило окончания испытаний.

При неизвестном законе надежности минимальное число  $N$  для проверки требуемой вероятности  $P(t)$  безотказной работы в течение некоторого времени  $t$  с доверительной вероятностью  $\beta$  задается из условия отсутствия отказа за время  $t$ :

$$N = \ln(1 - \beta) / \ln P(t).$$

Если при испытаниях  $N$  объектов за время  $t$  не будет отмечено ни одного отказа, результаты наблюдений считаются удовлетворительными. Если же произойдет хотя бы один отказ, то требуемое значение вероятности не подтверждается.

**Пример 14.1.** Определить объем испытаний дизель-генераторов аварийного электроснабжения клинической больницы. Заданная вероятность безотказной работы  $P(t) = 0,9$  в течение расчетного времени ликвидации аварии  $t = 240$  ч. Доверительную вероятность того, что  $P(t) \geq 0,9$ , примем  $\beta = 0,95$ . Тогда, считая, что закон распределения наработки на отказ для данного типа электрооборудования еще неизвестен, получаем

$$N = \ln(1 - 0,95) / \ln(0,9) = 28,43.$$

Это означает, что на испытания в течение 240 ч необходимо поставить 29 дизель-генераторов. Если за это время не произойдет ни одного отказа, то  $P(240) \geq 0,9$ . В противном случае  $P(240) < 0,9$ .

Для более точного определения показателей надежности и установления вида законов распределения случайных величин необходимо объединять статистические данные, собранные в различных энергосистемах и на промышленных предприятиях. В связи с этим решается задача проверки однородности исходного статистического материала. Проверка гипотезы о виде закона распределения произ-

водится с помощью критерия согласия, например, Колмогорова, хи-квадрат.

#### 14.4. Анализ надежности при помощи дисперсионного анализа

Для определения влияния одной или нескольких переменных на какую-либо случайную величину применяют дисперсионный анализ.

При этом оценивается вероятность действительного влияния этих переменных, которые называют *факторами*. Методами дисперсионного анализа можно, например, определить влияние уровня эксплуатации на показатели надежности электрооборудования или влияние квалификации обслуживающего персонала на количество и эффективность профилактических проверок устройств релейной защиты и автоматики. Это – примеры задач однофакторного анализа.

*Однофакторный дисперсионный анализ* является удобным средством объективной проверки поверхностных суждений и выводов, сделанных на основе средних оценок различных показателей по данным небольшого числа практических наблюдений.

Предположим, что какая-либо случайная величина  $x$  наблюдается в  $k$  различных группах опытов с числом наблюдений в  $i$ -й группе, равным  $n_i$ , и все значения  $x_{ij}$  в каждом из опытов зафиксированы ( $j$  – номер опыта).

Среднее значение величины  $x$  в каждой  $i$ -й группе опытов

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (\text{наблюдения}),$$

$$\bar{x} = \frac{1}{\sum_{j=1}^k n_j} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (\text{группы}).$$

Полное рассеяние случайной величины  $x$

$$Q = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x})^2.$$

Рассеяние между группами, или рассеяние по фактору:

$$Q_1 = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2. \quad (14.1)$$

Остаточное рассеяние

$$Q_2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2. \quad (14.2)$$

При этом соблюдается условие

$$Q = Q_1 + Q_2.$$

Необходимо проверить, есть ли различия в условиях опыта. Иными словами, можно ли объяснить различие в результатах наблюдения по группам влиянием какого-то определенного фактора, а не просто случайностью.

В качестве основной, или нулевой, выдвигают гипотезу об отсутствии такого влияния. Противоположная гипотеза — влияние существует.

Для проверки гипотез используют тот факт, что случайная величина  $\sigma_1^2 = Q/(k-1)$  распределение хи-квадрат с  $k_1 = k-1$  степенями свободы, а величина  $\sigma_2^2 = Q_2/(n-k)$  — распределение хи-квадрат с  $k_2 = n-k$  степенями свободы.

Отношение  $F = \sigma_1^2 / \sigma_2^2$  имеет  $F$  — распределение, 95%-я квантиль которого табулирована в функции  $k_1$  и  $k_2$ . Полученное из опыта значение сравнивается со значением  $F_{0,95}(k_1; k_2)$  при соответствующей

щих степенях свободы  $k_1$  и  $k_2$ . Если  $F \leq F_{0,95}$ , принимается основная гипотеза, если же  $F > F_{0,95}$ , противоположная.

Если одновременно рассматривать влияние ряда факторов, например, климатические условия, технический уровень производства, режим эксплуатации, то задача становится многофакторной.

Многофакторное исследование с инженерной точки зрения целесообразно осуществлять с помощью регрессионного анализа. Он позволяет численно оценить степень влияния каждого фактора на исследуемый выходной параметр.

**Пример 14.2.** Три мастера ( $i = 1, 2, 3$ ) производили проверку однотипных устройств релейной защиты. Каждый из них проверил различное число устройств и выявил различное число дефектов при каждой проверке (табл. 14.1).

Таблица 14.1

Результаты работы мастеров

Проверка $j$	Мастер $i$			Всего
	1	2	3	
1	11	6	8	25
2	7	1	7	15
3	8	2	9	19
4	4	–	4	8
5	5	–	–	5
Всего $i$ -м мастером выявлено дефектов	35	9	28	72
выполнено проверок	5	3	4	12
Среднее число дефек- тов, выявленных при одной проверке	7	3	7	6

**Решение.** Анализирую работу мастеров, начальник электролаборатории выдвинул предположение о различной квалификации мастеров. На первый взгляд качество работы 2-го мастера ниже чем двух других.

Приведем расчеты рассеяния по формулам (14.1), (14.2):

$Q_1 = 36$ ,  $Q_2 = 38$ , при  $k_1 = k - 1 = 3 - 1 = 2$  и  $k_2 = n - k = 12 - 3 = 9$  значение  $F = 36 \cdot 9 / (2 \cdot 58) = 2,8$ . Фрагмент таблицы квантилей приведен в табл. 14.2.

Таблица 14.2

Квантили  $F_{0,95}$

$k_2$	$k_1$				
	1	2	3	4	5
7	5,0	4,7	4,3	4,1	4,0
8	5,3	4,4	4,1	3,8	3,7
9	5,1	4,2	3,9	3,6	3,5
10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3

Отсюда следует, что  $F_{0,95}(2; 9) = 4,2$ , но поскольку  $2,8 < 4,2$  и, следовательно, принимается нулевая гипотеза, то нет оснований обвинять 2-го мастера в низкой квалификации.

### 14.5. Контроль качества и надежности

При массовом производстве отсутствует возможность тщательной проверки каждого изделия. При мелкосерийном производстве (например, высоковольтных электрических аппаратов) такая проверка может быть экономически нецелесообразной, особенно если многие свойства изделия обеспечиваются при монтаже установки после длительной транспортировки и хранения. В этом случае производится *выборочный* статистический контроль качества и надежности, когда о генеральных (присущих всей партии изделий) характеристиках судят на основании характеристик, определяемых по малой выборке из партии.

Идея статистического контроля была впервые высказана М.В. Остроградским в 1846 г. В настоящее время статистические методы контроля качества продукции широко распространены во многих отраслях промышленности, особенно в связи с внедрением автома-

тизированных систем управления предприятиями и технологическими процессами.

Статистический контроль качества и надежности может проводиться либо в процессе производства (так называемый *текущий предупредительный контроль*), либо по окончании производства (так называемый *приемочный контроль*). Приемочный контроль может осуществляться у изготовителя (*выходной контроль*) и у потребителя изделий (*входной контроль*).

Текущий предупредительный контроль является предметом забот производителей электроэнергетического оборудования.

Приемочный контроль представляет интерес для эксплуатационников. Существуют три наиболее распространенных метода приемочного контроля:

- метод однократной выборки;
- метод двукратной выборки;
- метод последовательных испытаний.

Метод однократной выборки можно рекомендовать для испытания опытных образцов, когда объем испытаний обычно задается заранее.

Метод двукратной выборки рекомендуется в тех случаях, когда контроль серийной продукции по последовательному плану оказывается неудобным технически или в связи с ограничениями организационного порядка.

Метод последовательных испытаний обеспечивает значительно меньший средний объем испытаний, чем метод однократной выборки, и поэтому он предпочтительнее при испытаниях серийной продукции.

При методе однократной выборки из контролируемой партии отбирается случайным образом определенное число изделий (выборка). По характеристикам надежности или качества этой выборки принимается решение о том, принять ли данную партию изделий, забраковать ли ее (т.е. направить на сплошной контроль или на переделку).

При методе двукратной выборки из контролируемой партии изделий также случайным образом отбирается определенное их число. По характеристикам надежности или качества этой выборки принимается одно из трех решений:



- принять партию;
- забраковать партию;
- произвести еще одну выборку определенного объема из рассматриваемой партии.

По характеристикам первой и второй выборок принимается одно из двух решений: принять или забраковать партию.

При методе последовательных испытаний объем испытаний заранее не задается. Из контролируемой партии последовательно, но случайным образом берутся изделия (по одному или по несколько) и определяются их характеристики надежности и качества. По этим характеристикам принимается одно из трех решений:

- принять партию;
- забраковать партию;
- продолжить испытания.

Испытания заканчиваются, когда принимается первое или второе изделие.

Из-за случайности выборки возможны ошибки при оценке всей партии по выборочным характеристикам. Различают ошибки первого и второго ряда. Ошибки первого ряда заключаются в том, что испытываемая *годная* партия изделий оценивается по результатам выборки как *негодная*.

Вероятность  $\alpha$  браковки годной продукции называют *риском поставщика*.

Ошибка второго ряда заключается в том, что испытываемая *негодная* партия оценивается по результатам выборки как *годная*. Вероятность  $\beta$  пропуска брака при приеме продукции называется *риском потребителя*.

Очевидно, что рациональная организация статистического контроля должна обеспечивать достаточно малые значения вероятностей  $\alpha$  и  $\beta$  (0,05–0,10). Для уверенного различения годной и негодной продукции устанавливаются три категории: хорошая продукция, допустимая продукция, брак.

Если оценка выборки, содержащей  $n$  изделий, производится по некоторому параметру  $x_n$  (например, по числу отказавших изделий) и имеется некоторый генеральный параметр  $T_{cp}$  (например, средняя наработка на отказ), то партия изделий относится к первой катего-

рии при условии  $T_{cp} \geq T_0$  и к третьей категории при условии  $T_{cp} \leq T_1$ , где  $T_0$  и  $T_1$  – установленные границы значений параметра.

При методе однократной выборки устанавливаются два контрольных норматива: объем выборки  $n$  и оценочный норматив  $c$ . Партия изделий принимается при условии  $x_n \leq c$  и бракуется при условии  $x_n > c$ . В этом случае вероятность ошибок первого и второго ряда записывается следующим образом:

$$\alpha = p(x_n > c | T_{cp} = T_0), \quad \beta = p(x_n \leq c | T_{cp} = T_1).$$

Если заданы  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $T_0$ ,  $T_1$ , то можно однозначно определить контрольные нормативы.

При методе двукратной выборки устанавливается пять контрольных нормативов: объемы выборок  $n_1$ ,  $n_2$  и оценочные нормативы  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ .

Вначале делается выборка объема  $n_1$  и определяется выборочный параметр  $x_{n1}$ . Если  $x_{n1} \leq c_1$ , то партия изделий принимается и повторная выборка не производится. Если  $x_{n1} > c_2$ , то партия изделий бракуется и повторная выборка не производится. Если  $c < x_{n1} < c_2$ , то производится повторная выборка объемом  $n_2$ , по которой определяется выборочный параметр  $x_{n2}$ . Далее составляется некая оценочная функция  $f(x_{n1}, x_{n2})$  и ее значение сравнивается с оценочным нормативом  $c_3$ . Если  $f(x_{n1}, x_{n2}) \leq c_3$ , то партия изделий принимается. В противном случае партия бракуется.

Перейдем к методу последовательных испытаний. Обозначим плотность распределения вероятностей случайной величины  $x_n$  при  $T_{cp} = T_0$  как  $f(x_n, T_0)$ , а при  $T_{cp} = T_1$  как  $f(x_n, T_1)$  и введем отношение

$$\gamma_n = \frac{f(x_n, T_1)}{f(x_n, T_0)},$$

называемое *отношением правдоподобия*.

Если при  $T_{cp} = T_0$  после опыта получено значение  $x'_n$ , то вероятность попадания опытного значения  $x_n$  в интервал  $(x'_n, x'_n + \Delta x_n)$

равна  $f(x'_n, T_0) \Delta x_n$ . Очевидно, что эта вероятность, как правило, больше чем  $f(x'_n, T_1) \Delta x_n$ , т.к. опытное значение  $x_n$  соответствует случаю  $T_{\text{ср}} = T_0$ , а не  $T_{\text{ср}} = T_1$ . Поэтому, как правило, при  $T_{\text{ср}} = T_0$  будет соблюдаться  $\gamma_n < 1$ . Аналогично при  $T_{\text{ср}} = T_1$  имеет место  $\gamma_n > 1$ .

На этом основании А. Вальд создал методику последовательного анализа, согласно которой число  $n$  испытуемых объектов последовательно увеличивается на каждом шаге испытаний.

На каждом шаге испытаний определяется  $\gamma_n$ . Если  $\gamma_n \leq \beta / (1 - \alpha)$ , то испытания прекращаются и партия изделий принимается.

Если же выполняется неравенство  $\gamma_n \geq (1 - \beta) / \alpha$ , то испытания прекращаются и партия изделий бракуется.

При выполнении условий  $\beta / (1 - \alpha) < \gamma_n < (1 - \beta) / \alpha$  испытания продолжают с увеличенным числом объектов до тех пор, пока не будет выполняться какое-либо из первых двух неравенств.

В действующих стандартах описывается решение задачи планирования испытаний. Например, для электроэнергетического оборудования (генераторов, трансформаторов) на напряжения 220 кВ и выше, которые выпускаются малыми сериями, контрольные испытания осуществляются методом однократной выборки.

Могут встречаться и случаи с ограниченным объемом выборки из-за отсутствия мест на испытательном стенде, и случаи с ограниченной продолжительностью испытаний, задаваемой сроками выпуска продукции.

## 15. КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Каждый студент должен выполнить контрольное задание, содержание которого приводится ниже, в соответствии со своим вариантом (шифром).

### Задача № 1

Сравнить вероятности безотказной работы (исправного состояния) систем ГРЭС (рис. 15.1) и ТЭЦ (рис. 15.2), представляющих собой соединение котлоагрегатов (К), паровых турбин (Т), электрических генераторов (Г) и повышающих трансформаторов (ТР). Вероятности повреждения отдельных элементов систем приведены в табл. 15.1.

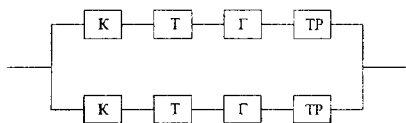


Рис. 15.1

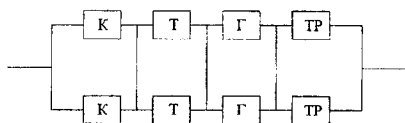


Рис. 15.2

Таблица 15.1

Вероятности отказов (повреждений)  
оборудования электростанций

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$q_K$	0,018	0,019	0,020	0,021	0,022	0,021	0,020	0,019	0,017	0,016
$q_T$	0,011	0,010	0,012	0,013	0,014	0,013	0,012	0,011	0,010	0,012
$q_G$	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002
$q_{TR}$	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001

Для определения вероятностей исправного состояния обеих электростанций следует использовать формулы для расчета вероятностей безотказной работы, приведенные в разделе 6 настоящего пособия.

## Задача № 2

Потребители электроэнергии, питающиеся по радиальной схеме (рис. 15.3), отключаются при повреждениях соответствующих отходящих от источника питания (ИП) радиальных линий.

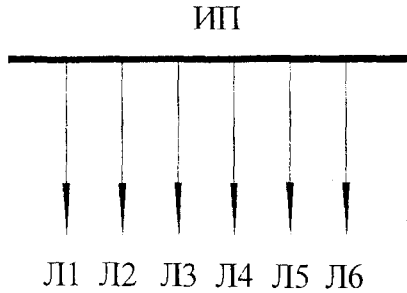


Рис. 15.3

Недоотпуски электроэнергии потребителям  $\Delta W_i$ , питающимся по разным линиям, и затраты времени  $T_i$  на процесс поиска повреждения и его устранения, приведены в табл. 15.2.

Таблица 15.2

Недоотпуски электроэнергии и затраты времени на поиск  
и устранение повреждения

Номер линии	Недоотпуск электроэнергии $\Delta W_i$ , кВт·ч									
	Время поиска $T_i$ , ч									
	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	480 0,85	490 0,87	500 0,8	470 0,9	510 0,91	460 0,94	515 0,83	450 0,81	520 0,82	530 0,84
2	520 0,96	530 0,95	540 0,94	510 0,8	460 0,85	450 0,87	470 0,91	480 0,92	490 0,95	550 0,96
3	380 0,79	350 0,78	340 0,77	390 0,76	405 0,75	410 0,74	490 0,73	500 0,72	450 0,71	320 0,7
4	410 0,6	420 0,61	430 0,65	440 0,64	350 0,62	520 0,63	320 0,66	380 0,69	330 0,68	435 0,67
5	590 0,91	600 0,81	610 0,71	620 0,61	630 0,62	580 0,82	570 0,73	640 0,84	650 0,95	660 0,74
6	320 0,89	535 0,92	485 0,85	340 0,97	530 0,98	615 0,97	620 0,88	320 0,87	570 0,93	360 0,92

Длины линий приведены в табл. 15.3.

Таблица 15.3

Длины радиальных линий

Последняя цифра цифра	Длина линии $L_i$ , км					
	Номер линии					
	1	2	3	4	5	6
0	0,5	0,3	0,4	0,15	0,3	0,35
1	0,6	0,2	0,5	0,1	0,4	0,2
2	0,4	0,2	0,5	0,25	0,2	0,45
3	0,45	0,5	0,65	0,2	0,1	0,1
4	0,3	0,45	0,25	0,35	0,25	0,4
5	0,55	0,25	0,2	0,4	0,35	0,25
6	0,2	0,4	0,5	0,3	0,45	0,15
7	0,25	0,35	0,4	0,45	0,25	0,3
8	0,15	0,3	0,35	0,2	0,4	0,6
9	0,1	0,2	0,5	0,7	0,3	0,2

Требуется определить математические ожидания недоотпуска электроэнергии потребителям и затрат времени на поиск и устранение неисправностей, а также их дисперсии и среднеквадратичные отклонения по следующим формулам:

$$M(x) = \sum_{i=1}^n p_i x_i,$$

где  $p_i$  – частота соответствующего значения  $x_i$ , рассчитываемая по формуле

$$p_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i},$$

где  $r_i$  – коэффициент, характеризующий удельный вес  $i$ -го значения рассматриваемой переменной.

При большом количестве опытов частота события может быть рассмотрена как вероятность этого события.

Дисперсия и среднее квадратичное отклонение характеризуют степень рассеяния случайной величины около своего математического ожидания

$$D(x) = M(x^2) - [M(x)]^2 ;$$

$$\sigma(x) = \sqrt{D(x)} .$$

При решении задачи исходить из предположения, что отказы всех питающих радиальных линий составляют полную группу несовместимых событий.

### Задача № 3

Потребитель получает питание по схеме, представленной на рис. 15.4.

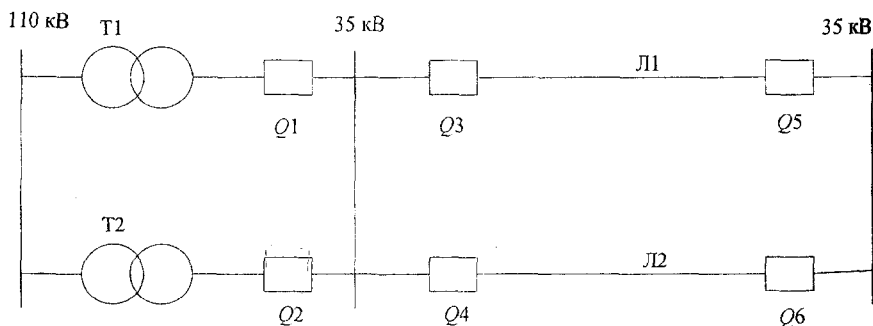


Рис. 15.4

Определить вероятность безотказной работы системы электро-снабжения в течение 8 месяцев для четырех вариантов работы: параллельной работы обоих трансформаторов и обеих линий, работы одного трансформатора на две параллельные линии, параллельной работы обоих трансформаторов на одну линию, работы одного

трансформатора на одну линию. Длина одной линии приведена в табл. 15.4.

Таблица 15.4

Длина линии электропередачи

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длина, км	32	38	44	51	46	41	35	39	45	43

При решении задачи использовать численные значения интенсивности отказов или среднее время безотказной работы элементов схемы, приведенные в разделе 4 настоящего учебного пособия. При этом надежность сборных шин не учитывать. Расчеты произвести на основе формул для расчета надежности последовательного и параллельного соединения элементов.

*Задача № 4*

Рассчитать вероятность безотказной работы в течение 4 месяцев схемы, состоящей из равнонадежных элементов. Варианты схем и интенсивность отказов элементов приведены в табл. 15.5.

При определении надежности использовать известные формулы для расчета надежности последовательно и параллельно соединенных элементов.



Интенсивность отказа элементов для различных схем

Предпоследняя цифра шифра	Схема	Интенсивность отказа $\lambda_1$ , год <sup>-1</sup>
0		0,01
1		0,08
2		0,02
3		0,07
4		0,03
5		0,05
6		0,04
7		0,015
8		0,065
9		0,045

### Задача № 5

Энергомашиностроительный завод выпускает электродвигатели, каждый из которых с вероятностью  $q$  имеет дефект. В цехе работают три контролера. Каждый из электродвигателей осматривается одним контролером с одинаковой вероятностью первым, вторым или третьим. Вероятность обнаружения дефекта, если он имеется, каждым контролером равна  $p_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Если электродвигатель не был забракован в цехе, он поступает в отдел технического контроля (ОТК) завода, где дефект обнаруживается одним контролером с вероятностью  $p_0$ .

Требуется определить вероятности следующих событий:

А – электродвигатель забракован в цехе;

В – электродвигатель забракован в ОТК завода;

С – электродвигатель забракован на заводе в целом;

Д – электродвигатель попал к потребителю с необнаруженным дефектом.

Исходные данные приведены в табл. 15.6.

Таблица 15.6

Предпоследняя цифра шифра	Исходные вероятности				
	$q$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_0$
0	0,05	0,8	0,9	0,9	0,9
1	0,04	0,6	0,9	0,9	0,9
2	0,07	0,7	0,8	0,9	0,8
3	0,08	0,8	0,9	0,9	0,8
4	0,04	0,9	0,9	0,8	0,9
5	0,07	0,8	0,7	0,9	0,9
6	0,09	0,8	0,9	0,8	0,9
7	0,05	0,9	0,9	0,7	0,8
8	0,03	0,8	0,8	0,9	0,9
9	0,05	0,9	0,8	0,9	0,8

При решении задачи воспользоваться основными теоремами теории вероятностей (сложения, умножения вероятностей, формулу полной вероятности), изложенными в настоящем пособии.

### Задача № 6

При эксплуатации сложных систем автоматического регулирования в системах электроснабжения выбор из строя одного или нескольких регуляторов не всегда приводит к полной остановке технологического процесса, но повышает вероятность этой остановки. Пусть действие системы регулирования определяется тремя регуляторами. Известны вероятности отказа системы в целом при исправной работе всех трех регуляторов  $Q_{1,2,3}$  при исправной работе только первого и второго регуляторов  $Q_{1,2}$ , первого и третьего регуляторов  $Q_{1,3}$ , второго и третьего регуляторов  $Q_{2,3}$ , при исправной работе только первого регулятора  $Q_1$ , второго регулятора  $Q_2$  и третьего регулятора  $Q_3$  и при отказе всех трех регуляторов  $Q_0$ . Заданы такие вероятности безотказной работы первого регулятора  $P_1^*$ , второго регулятора  $P_2^*$  и третьего регулятора  $P_3^*$ . Регуляторы могут выходить из строя независимо один от другого.

Требуется определить вероятность безотказной работы системы регулирования с учетом вероятностей повреждений регуляторов и их влияния на технологический процесс.

Исходные данные приведены в табл. 15.7.

Таблица 15.7

Последняя цифра шифра	Исходные вероятности										
	$Q_{1,2,3}$	$Q_{1,2}$	$Q_{1,3}$	$Q_{2,3}$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_0$	$P_1^*$	$P_2^*$	$P_3^*$
0	0,01	0,10	0,14	0,21	0,45	0,51	0,48	0,68	0,95	0,96	0,94
1	0,02	0,09	0,13	0,20	0,42	0,54	0,50	0,74	0,96	0,97	0,95
2	0,01	0,11	0,15	0,19	0,44	0,56	0,52	0,71	0,97	0,94	0,96
3	0,02	0,12	0,16	0,22	0,40	0,57	0,54	0,67	0,94	0,95	0,97
4	0,01	0,11	0,15	0,21	0,38	0,52	0,49	0,65	0,96	0,97	0,94
5	0,02	0,10	0,14	0,20	0,46	0,49	0,52	0,72	0,95	0,96	0,94
6	0,01	0,09	0,13	0,19	0,42	0,55	0,53	0,68	0,98	0,95	0,96
7	0,02	0,08	0,14	0,22	0,44	0,56	0,51	0,72	0,97	0,96	0,98
8	0,01	0,09	0,15	0,21	0,40	0,54	0,49	0,74	0,96	0,97	0,94
9	0,02	0,12	0,16	0,21	0,39	0,52	0,48	0,69	0,95	0,98	0,96

При решении задачи руководствоваться теоремами сложения и умножения вероятностей и объединяющей их формулой полной вероятности.

### Задача № 7

Имеется полная группа несовместимых событий (гипотез)  $H_1$  и  $H_2$ , т.е.  $p(H_1) + p(H_2) = 1$ . Производится с определенной периодичностью серия опытов (экспериментов), в результате которых обнаруживается или не обнаруживается появление события  $A$ , связанного с гипотезами  $H_1$  и  $H_2$ . Известны вероятности гипотез  $H_1$ ,  $H_2$  и условные вероятности  $p(A|H_1)$ ,  $p(A|H_2)$  события  $A$ , характеризуют его появление при разных гипотезах.

Требуется произвести мониторинг гипотез  $H_1$  и  $H_2$ , т.е. определить изменения во времени их вероятностей после каждого последовательно проведенного опыта.

Исходные вероятности приведены в табл. 15.8.

Таблица 15.8

Последняя цифра шифра	Исходные вероятности			
	$p(H_1)$	$p(H_2)$	$p(A H_1)$	$p(A H_2)$
0	0,7	0,3	0,9	0,8
1	0,6	0,4	0,8	0,9
2	0,4	0,6	0,7	0,6
3	0,3	0,7	0,8	0,7
4	0,2	0,8	0,6	0,5
5	0,6	0,4	0,8	0,7
6	0,7	0,3	0,8	0,9
7	0,8	0,2	0,4	0,5
8	0,7	0,3	0,8	0,5
9	0,6	0,4	0,6	0,7

В табл. 15.9 представлена информация о появлении события  $A$  или его неоявления  $\bar{A}$  в проведенных опытах.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
Результат опыта	A	A	$\bar{A}$	A	$\bar{A}$	$\bar{A}$	$\bar{A}$	$\bar{A}$

Для решения задачи использовать теорему гипотез (формулу Байеса). Результаты расчета представить в табличной и графической форме.

### Задача № 8

От магистрали в цеху промышленного предприятия (рис. 15.5) получают электроэнергию три группы 1, 2, 3 электродвигателей с потребляемой мощностью  $3 \times 0,3S$ ;  $2 \times 0,2S$ ;  $3 \times 0,1S$ .

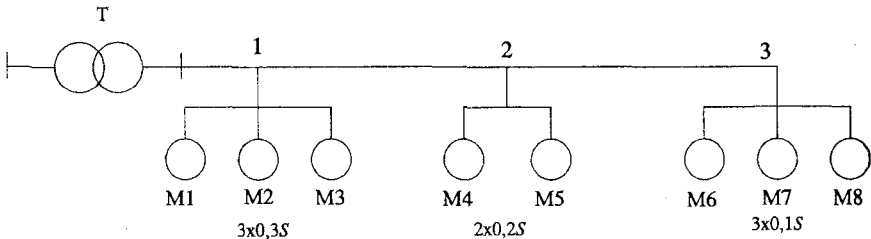


Рис. 15.5

Вероятность включения в работу каждого двигателя соответствующей группы  $p_1, p_2, p_3$ . События включения в работу и отключения каждого двигателя каждой группы – независимые.

Требуется определить вероятность нагрузки головного участка магистрали для четырех вариантов работы схемы:  $S_1 = 0$  кВ·А;  $S_2 = 0,4 S$  кВ·А;  $S_3 = 0,7 S$  кВ·А;  $S_4 = 1,6 S$  кВ·А.

Исходные данные приведены в табл. 15.10.

Таблица 15.10

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_1$	0,8	0,82	0,84	0,85	0,87	0,89	0,9	0,5	0,6	0,57
$p_2$	0,6	0,75	0,68	0,7	0,55	0,65	0,54	0,78	0,72	0,62
$p_3$	0,9	0,5	0,45	0,6	0,7	0,53	0,61	0,92	0,83	0,93

Для решения задачи использовать рассмотренные в настоящем пособии теоремы сложения, умножения и формулу (схему) Бернулли.

### Задача № 9

Определить объем испытаний на надежность дизель-генераторов аварийного электроснабжения клинической больницы, т.е. число поставленных на испытания дизель-генераторов. Заданная вероятность безотказной работы  $p(t_p) = 0,9$  в течение расчетного времени ликвидации аварии  $t_p$ . Принимаем доверительную вероятность того, что  $p(t_p) \geq 0,9$ , равной  $\beta$  (табл. 15.11). Закон распределения наработки на отказ для данного типа оборудования заранее неизвестен.

Таблица 15.11

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Доверительная вероятность	0,80	0,82	0,84	0,86	0,88	0,90	0,91	0,92	0,94	0,95

Определить также точечные оценки вероятности безотказной работы  $p(t_p)$  при одном, двух, четырех, семи, десяти отказавших дизель-генераторах и представить эту зависимость в графической форме.

Необходимые для решения задачи формулы приведены в настоящем пособии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анищенко, В.А. Надежность систем электроснабжения. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 160 с.
2. Глазунов, Л.Г., Грабовецкий, В.П., Щербаков, О.В. Основы теории надежности автоматических систем управления. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
3. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2001. – 479 с.
4. Гук, Ю.Б. Надежность в электроэнергетике. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
5. Надежность систем электроснабжения / В.В. Зорин, В.В. Тисленко, Ф. Клеппель, Г. Адлер. – Киев: Вища школа, 1984. – 192 с.
6. Диллон, Б., Сингх, Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
7. Китушин, В.Г. Надежность энергетических систем. – М.: Высшая школа, 1984. – 256 с.
8. Фокин, Ю.А. Вероятностно-статистические методы в расчетах надежности систем электроснабжения. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
9. Эндрени, Дис. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 336 с.

Учебное издание

АНИЩЕНКО Вадим Андреевич  
КОЛОСОВА Ирина Владимировна

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Пособие

для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение»  
специализации 1-43 01 03 01 «Электроснабжение  
промышленных предприятий»

Редактор Л.Н. Шалаева  
Компьютерная верстка Н.А. Школьниковой

---

Подписано в печать 12.03.2007.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 8,8. Уч.-изд. л. 6,9. Тираж 200. Заказ 771.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Независимости, 65.