

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Неразрушающий контроль и техническая диагностика»

В. Н. ГАЛУШКО, С. Г. ДОДОЛЕВ

НАДЕЖНОСТЬ
ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебно-методическое пособие

Гомель 2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Неразрушающий контроль и техническая диагностика»

В. Н. ГАЛУШКО, С. Г. ДОДОЛЕВ

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Одобрено методической комиссией механического факультета
в качестве учебно-методического пособия*

Гомель 2014

УДК [621.31](075.8)
ББК 31.2
Г16

Р е ц е н з е н т – зав. кафедрой «Электрический подвижной состав» канд.
техн. наук, доцент *В. С. Могила* (УО «БелГУТ»).

Галушко, В. Н.

Г16 Надежность электроустановок и энергетических систем : учеб.-метод. пособие / В. Н. Галушко, С. Г. Додолев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 154 с.
ISBN 978-985-554-312-2

Изложены основные сведения по теории надежности систем электроснабжения. Рассмотрены вопросы практического применения теории надежности при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения и основные показатели надёжности работы электрооборудования систем электроснабжения.

Предназначено для студентов механического факультета, обучающихся по специальностям: «Тяговый состав железнодорожного транспорта», «Техническая эксплуатация погрузочно-разгрузочных, путевых, дорожно-строительных машин и оборудования», «Городской электрический транспорт».

УДК [621.31](075.8)
ББК 31.2

ISBN 978-985-554-312-2

© Галушко В. Н., Додолев С. Г. 2014
© Оформление. УО «БелГУТ», 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	9
1.1 Основные понятия теории надежности в энергетике.....	9
1.2 Надежность и ее составляющие.....	10
1.3 Основные требования, предъявляемые к системам электроснабжения.....	12
1.4 Основные проблемы в электроснабжении промышленных предприятий.....	16
1.5 Причины и характер повреждений основных элементов систем электроснабжения.....	22
1.6 Минимально допустимое время перерывов электроснабжения.....	27
2 ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В РАСЧЕТАХ НАДЕЖНОСТИ.....	29
2.1 Основные сведения из теории вероятностей.....	29
2.1.1 Необходимые сведения из теории случайных событий.....	29
2.1.2 Случайные величины и законы их распределения.....	33
2.1.3 Предельные теоремы теории вероятностей.....	46
2.1.4 Потоки отказов и восстановлений.....	49
2.1.5 Количественная оценка показателей надёжности.....	54
2.2 Статистические методы оценки, анализа и контроля надежности.....	57
2.2.1 Сбор информации об отказе элементов технических систем.....	57
2.2.2 Состав информации.....	58
2.2.3 Порядок обработки информации.....	59
2.2.4 Проверка гипотез.....	63
2.2.5 Точность оценки. Доверительный интервал.....	70
2.2.6 Регрессионные модели системы двух случайных величин.....	71
2.2.7 Элементы дисперсионного анализа.....	80
2.2.8 Контроль показателей качества и надёжности.....	85
3 МОДЕЛИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ.....	86
3.1 Классификация отказов.....	86
3.2 Аналитические методы анализа надежности.....	89
3.2.1 Последовательное и параллельное соединения элементов систем электроснабжения.....	89
3.2.2 Виды резервирования элементов систем электроснабжения.....	94
3.2.3 Приближенный метод исключения элементов.....	105
3.2.4 Расчёт надёжности систем электроснабжения логико-вероятностным методом.....	107
3.2.5 Особенности расчета надежности схем электроснабжения.....	109
3.3 Применение методов имитационного моделирования.....	125
4 ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	131

4.1 Влияние качества электроэнергии на надежность систем электроснабжения	131
4.2 Повышение надежности работы электрооборудования, релейной защиты и автоматики.....	134
4.3 Практические рекомендации по повышению надежности систем электроснабжения.....	139
4.4 Обеспечение запасными частями электроустановок.....	145
4.4.1 Виды комплектов запасных частей.....	145
4.4.2 Расчет комплектов запасных частей.....	146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	154

СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АВР – автоматический ввод резервного питания
АПВ – автоматическое повторное включение
АРВ – автоматическое регулирование возбуждения
АРЧМ – автоматическое регулирование частоты и мощности
АЧР – автоматическая частотная разгрузка
ВЛ – воздушная линия
ВН – высокое напряжение
ЗЧ – запасные части
КА – коммутационные аппараты
КЗ – короткое замыкание
КЛ – кабельная линия
КПД – коэффициент полезного действия
МНК – метод наименьших квадратов
НН – низкое напряжение
ПКЭ – показатели качества электроэнергии
ПУЭ – правила устройства электроустановок
ППР – планово-предупредительный ремонт
РЗ – релейная защита
РУ – распределительное устройство
САОН – система автоматического отключения нагрузки
СВ – случайная величина
СД – синхронный двигатель
СС – случайное событие
ТН – трансформатор напряжения
ТП – трансформаторная подстанция
ТТ – трансформатор тока
УРЗА – устройства релейной защиты и автоматики
ЭЭС – электроэнергетическая система
ЭУ – электроустановка

ВВЕДЕНИЕ

Исторически наука о надежности развивалась по двум основным направлениям: математическому и физическому. *Математическое направление* связано с развитием математических методов оценки надежности, разработкой методов статистической обработки информации о надежности, обоснованием структур систем, обеспечивающих высокий уровень надежности. Теоретической базой этого направления являются: теория вероятностей, математическая статистика, теория случайных процессов, теория массового обслуживания, математическое моделирование и другие разделы математики. *Физическое направление* связано с изучением природы отказов, разработкой методов расчета на прочность, износостойкость, теплостойкость и др. Теоретической базой этого направления являются естественные науки, изучающие различные аспекты разрушения, старения и изменения свойств материалов: теории упругости, пластичности и ползучести, теория усталостной прочности, механика разрушения, трибология, трибофатика, физико-химическая механика материалов и др.

Проблема надежности электрических станций, подстанций, линий электропередачи, электрических сетей и систем – одна из первоочередных проблем энергетики. В отдельных энергетических системах число аварий в течение года достигает нескольких десятков, а годовой недоотпуск электроэнергии в результате аварий – нескольких миллиардов киловатт-часов. Возможные последствия от ненадежности становятся такими существенными, что требуется постоянное совершенствование методов прогнозирования развития, проектирования, строительства, монтажа и эксплуатации электроэнергетических систем, позволяющих полнее учитывать надежность и наиболее экономно расходовать выделяемые на её обеспечение средства.

Надежность системы электроснабжения можно определить как способность этой системы и ее отдельных элементов обеспечивать бесперебойное питание электроэнергией промышленное предприятие, не приводящее к срыву производства и авариям в электрической и технологической частях.

Надежность характеризуется повреждаемостью оборудования, ожидаемой продолжительностью бесперебойной работы, длительностью перерыва питания электроэнергией, а также ущербом от перерыва питания и другими факторами.

Повреждаемость системы электроснабжения складывается из повреждаемости электрооборудования, из-за нарушения правильной эксплуатации, некачественной ревизии и профилактики, ошибочных действий персонала, неблагоприятных условий окружающей среды и др.

Большое значение для обеспечения бесперебойного питания и успешной ликвидации аварии имеет правильная эксплуатация электрохозяйства промышленных предприятий. Одной из главных проблем в системах электроснабжения является обеспечение оптимальной надежности этих систем, при которой приведенные ежегодные затраты, включая ущерб от перерывов электропитания, будут минимальны.

Концентрация и централизация промышленности, производства и распределения электроэнергии привели к созданию крупных электроэнергетических систем, обладающих сложной структурой и множеством показателей разного функционального назначения. Основная задача электроэнергетических систем – снабжение потребителей электроэнергией в нужном количестве и при надлежащем её качестве. Ряд случайных, непредвиденных причин может либо прекратить подачу энергии, либо недопустимо снизить ее качество у части или даже у всех потребителей электроэнергетической системы.

Известны различные технические средства, с помощью которых повышается надежность, т.е. ликвидируется или предотвращается развитие аварийных ситуаций:

- релейная защита от коротких замыканий;
- автоматическое повторное включение (АПВ);
- автоматический ввод резерва (АВР);
- автоматическое регулирование возбуждения (АРВ);
- автоматическая частотная разгрузка (АЧР);
- автоматическое регулирование частоты и мощности (АРЧМ);
- автоматическая синхронизация генераторов;
- система автоматического отключения нагрузки (САОН) и т.д.

Наряду с перечисленными техническими средствами повышения надежности большое значение приобретают и такие дорогостоящие мероприятия, как резервирование генерирующей мощности, и систем передачи и распределения электроэнергии, увеличение пропускной способности ЛЭП, трансформаторов, подстанций.

Значительное увеличение объема потребления электроэнергии тесно связано с качественными изменениями в характере потребителей. Это увеличивает зависимость нормального функционирования отдельных потребителей и даже районов от надёжности электроснабжения. Она становится настолько сильной, что нарушение электроснабжения приводит к значительному экономическому ущербу, в ряде случаев приближающемуся к масштабам, соизмеримым с национальным бедствием (известные аварии 1965 и 1977 гг. в Нью-Йорке, авария 1978 г. во Франции, на Чернобыльской АЭС в 1986 г.).

Предметом теории надежности является изучение закономерностей изменения показателей качества объектов во времени и разработка методов, позволяющих с минимальной затратой времени и ресурсов обеспечить необходимую продолжительность и эффективность их работы.

Наука о надежности занимается следующими основными задачами, имеющими конкретные технические приложения:

- изучением причин, вызывающих отказы элементов оборудования и систем;

- определением закономерностей, которым они подчиняются;

- разработкой способов измерения надежности и методов расчета;

- испытаниями на надежность;

- поиском средств повышения надежности.

Пособие содержит наиболее ценные методические материалы учебных пособий и лекционных курсов по дисциплине «Надежность систем электроснабжения», составленных авторами, которые представлены в списке литературы. Оно предназначено для учебно-методической поддержки лекционного курса «Основы теории надежности систем электроснабжения» для студентов механического факультета БелГУТа. Наличие теоретических сведений и примеров делает данное пособие достаточным для формирования у студентов необходимых знаний, умений и навыков по дисциплинам «Надежность подвижного состава», «Техническая диагностика», подготовки к практическим и лабораторным занятиям, самостоятельной управляемой работы, успешной сдачи зачета и экзамена по дисциплине. Применение данных знаний направлено на понимание процессов проектирования и эксплуатации оборудования сетей электроснабжения.

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1 Основные понятия теории надежности в энергетике

Общие понятия. *Объект* – предмет определенного целевого назначения, рассматриваемый с точки зрения анализа надежности. В пособии описываются объекты электроэнергетики и технологические установки, использующие электроэнергию.

Элемент – объект, надежность которого изучается независимо от надежности составляющих его частей.

Система – совокупность совместно функционирующих элементов, объединенных для выполнения единой задачи.

Энергетическая система – совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, объединенных общностью режима в непрерывном процессе производства, преобразования и распределения электрической энергии и тепла при общем управлении этим режимом.

Система электроснабжения (СЭС) – объединенная общим производственным процессом совокупность элементов электрической системы: электрические сети, источники питания этих сетей, электроприемники и соответствующие аппараты управления и резервирования.

Электрическая сеть – совокупность воздушных и кабельных линий электропередачи и электрических подстанций, функционирующих на одной территории.

Электроустановка – установка, в которой производится, передается, распределяется или потребляется электрическая энергия.

Электроприемник – устройство, предназначенное для приема и использования электрической энергии.

Потребитель – один или группа приемников электрической энергии предприятия или организации.

Схема замещения (по надежности) – условное представление схемы электрических соединений, состоящей из элементов с надежностными характеристиками.

Резервирование – метод повышения надежности объекта введением избыточности.

Состояния. *Исправное состояние* – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

Неисправное состояние – состояние объекта, при котором он соответствует не всем установленным требованиям.

Работоспособное состояние – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции.

Неработоспособное состояние – состояние объекта, при котором он не способен выполнять заданные функции.

Рабочее состояние – состояние объекта, при котором он выполняет заданные функции.

Нерабочее состояние – состояние объекта, при котором он не выполняет заданные функции.

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

События и процессы. *Повреждение* – нарушение исправности объекта или его составных частей в результате влияния внешних воздействий, превышающих установленные нормативно-технической документацией уровни.

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

Отключение – перевод объекта из рабочего в нерабочее состояние.

Преднамеренное отключение – отключение, намеченное и выполненное обслуживающим персоналом.

Восстановление – событие, заключающееся в переводе объекта из неработоспособного состояния в работоспособное.

Включение – перевод объекта из нерабочего состояния в рабочее.

Износ – процесс постепенного изменения физико-химических свойств объекта, вызываемый действием зависящих от режима работы объекта факторов.

Обслуживание – совокупность мер, предпринимаемых для сохранения или восстановления исправности объекта.

Ремонт – совокупность мер, предпринимаемых для восстановления работоспособности объекта.

Основные термины и определения, применяемые для анализа и синтеза надежности в электроэнергетике, приведены в нормативных документах и рекомендациях:

– ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

– ГОСТ 21.027-75. Системы энергетические. Термины и определения.

– ГОСТ 19.431-84. Энергетика и электрификация народного хозяйства. Основные понятия. Термины и определения.

– Надежность систем энергетики. Терминология: Сборник рекомендуемых терминов. – М. : Наука, 1980. – Вып. 95. – 42 с.

1.2 Надежность и ее составляющие

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, тех-

нического обслуживания, хранения и транспортирования. Надежность – комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, другие свойства или их сочетания (рисунк 1.1) [17].

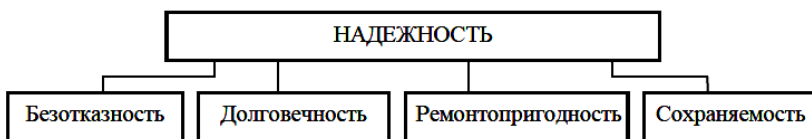


Рисунок 1.1 – Составляющие надежности по ГОСТ 27.002-89

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Наработка – продолжительность или объем работы объекта. Нарработка определяется видом объекта и особенностями его применения, например, наработка двигателя измеряется в мото-часах, автомобиля – в километрах пробега, станка-автомата – количеством обработанных деталей, реле – количеством циклов срабатывания и т. п. Нарработка может определяться до отказа, между отказами, до наступления предельного состояния или до некоторого фиксированного момента времени.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Основное отличие понятий “безотказность” и “долговечность” состоит в том, что понятие “безотказность” предполагает работу объекта, абстрагированную от вмешательства извне для поддержания его работоспособности. Понятие “долговечность” предполагает рассмотрение работоспособности объекта за весь период его эксплуатации и учитывает проведение мероприятий по поддержанию и восстановлению работоспособности, утрачиваемой в процессе эксплуатации.

Показатели долговечности могут выражаться через ресурс или срок службы. Нарработка объекта от начала эксплуатации (или ее возобновления после ремонта) до перехода в предельное состояние называется *ресурсом* (техническим ресурсом). Ресурс невозстанавливаемого объекта определяется через его наработку до отказа, а восстанавливаемого объекта – равен его суммарной наработке до ресурсного отказа (периоды функционирования чередуются с периодами восстановления работоспособности).

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации объекта от начала его применения (возобновления эксплуатации после ремонта) до наступления предельного состояния.

Остаточный ресурс (остаточный срок службы) – суммарная наработка (календарная продолжительность эксплуатации) объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, а также поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Ремонтопригодность объекта характеризуется оперативной продолжительностью (трудоемкостью) операций обнаружения отказа, поиска и устранения причин и последствий отказа. При этом полная продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта, кроме оперативной продолжительности (времени, затрачиваемого непосредственно на операции по восстановлению работоспособности объекта), включает в себя время, затрачиваемое на организационные мероприятия (поиск ремонтной документации, доставка запасных частей и т. п.), продолжительность которых не связана с уровнем ремонтпригодности объекта.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Это свойство особенно важно для объектов, эксплуатируемых сезонно или которые применяют по назначению в аварийных или особых условиях (противопожарная техника, средства аварийной сигнализации и т. п.).

1.3 Основные требования, предъявляемые к системам электроснабжения

Современная система электроснабжения промышленного предприятия должна удовлетворять следующим **основным требованиям** [14, 15]: экономичности; надежности; безопасности; удобству эксплуатации; обеспечению надлежащего качества электроэнергии (уровней напряжения, стабильности частоты и т.п.); необходимой гибкости, обеспечивающей возможность расширения при развитии предприятия.

Важные **дополнительные требования** к системам электроснабжения предъявляют: электроприемники с резкопеременной циклически повторяющейся ударной нагрузкой; электроприемники непрерывного производства, требующие бесперебойности питания при всех режимах системы электроснабжения.

При реконструкции и проектировании системы электроснабжения учитывают многочисленные **факторы**:

- потребляемая мощность;
- категория надежности питания отдельных электроприемников;
- графики и характер нагрузок крупных потребителей;
- размещение электрических нагрузок на генплане предприятия;

- число и мощность подстанций и других пунктов электропотребления;
- напряжение потребителей и ограничения токов КЗ;
- число, расположение, мощность, напряжение и другие параметры источников питания;
- требования энергетической системы;
- требования аварийного и послеаварийного режимов;
- степень загрязненности среды;
- условия выполнения простой и надежной релейной защиты, автоматики и телемеханики и др.

Определяющими факторами, тесно связанными между собой, являются характеристика источников питания, а также мощность и категоричность потребителей электроэнергии. При построении рациональной системы электроснабжения учитывают общую энергетику рассматриваемого района, перспективный план его электрификации. При этом главные понижающие подстанции (ГПП) на крупных предприятиях могут в некоторых случаях выполнять функции районных подстанций. Целесообразно с точки зрения экономики строить единую энергетическую сеть района, включая тяговые сети.

При реконструкции действующих и проектировании новых систем электроснабжения различных промышленных предприятий района стремятся к максимальной унификации схемных и конструкторских решений электрической части, электрооборудования и транспортирования электроэнергии. Подсобные устройства, такие как трансформаторно-масляное хозяйство, электроремонтное хозяйство, диспетчерская связь и другие, а также крупное резервное электрооборудование выполняют общими для всех этих предприятий.

Как показал опыт эксплуатации, при реконструкции действующих и проектировании новых систем электроснабжения целесообразно проводить принцип "децентрализации" трансформирования и коммутации электроэнергии, благодаря чему источники высокого напряжения максимально приближаются к электроустановкам потребителей; сводятся к минимуму сетевые звенья и ступени промежуточной трансформации и коммутации; уменьшаются потери электроэнергии; повышается в целом надежность электроснабжения.

Практика эксплуатации, а также опыт, накопленный при реконструкции и проектировании систем электроснабжения, позволили на основе обобщения этих данных выработать критерии в виде нормативных требований обеспечения надежности электроснабжения электроприемников, которые сформулированы в **Правилах устройства электроустановок (ПУЭ)**.

Согласно ПУЭ, все электроприемники подразделяют на три категории с выделением в I категории особой группы электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы для жизни людей, взрывов, пожаров и повреждения дорогостоящего основного оборудования.

К *I категории* относятся электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, значительный материальный ущерб, повреждение дорогостоящего основного оборудования, массовый брак продукции, расстройство сложного технологического процесса, нарушение особо важных элементов коммунального хозяйства; к *II* – электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности городских и сельских жителей; к *III* – все остальные, не попадающие под определение I и II категорий.

Для электроприемников I категории перерыв электроснабжения может быть допущен лишь на время автоматического ввода резерва (АВР), т.е. на доли секунды; для особых непрерывных производств предусматривается технологическое резервирование или специальные устройства безаварийного останова технологического процесса, действующие при нарушении электроснабжения. Для электроприемников II категории допустимы перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания действиями дежурного персонала или выездной оперативной бригады (десять минут, единицы часов).

Для электроприемников III категории допустимы перерывы до 1 суток. Частота перерывов в явном виде ни для одной категории приемников не нормируется. Реальные узлы нагрузки систем электроснабжения содержат от единиц до десятков тысяч электроприемников, поэтому имеет место множество решений по обеспечению норм ПУЭ.

Выбор схем питания и распределения электроэнергии, напряжения и конфигурации питающих и распределительных сетей до и выше 1 кВ, числа, мощности, месторасположения и типа подстанций решается комплексно с выполнением в необходимых случаях технико-экономического сравнения вариантов по приведенным затратам. При этом учитывается очень важное условие, а именно: обязательная координация уровней надежности составных звеньев системы электроснабжения таким образом, чтобы надежность повышалась при переходе от потребителей электроэнергии к источникам питания по мере увеличения мощности соответствующих звеньев системы.

Однако надежное питание электроприемников I и основных нагрузок II категории обеспечивают независимо от их места в системе электроснабжения и мощности.

Выбор рациональной системы электроснабжения промышленного предприятия определяет режим нейтрали сети, которая может быть изолирована от земли, соединена с землей через активные или реактивные сопротивления, глухо заземлена. В первом случае ($U_{ном} = 6; 10; 20; 35$ кВ) при нарушении изоляции одной фазы в какой-либо точке сети может возникнуть однофазное замыкание на землю. Напряжение этой фазы относительно земли

становится равным нулю, а напряжение остальных фаз относительно земли повысится до междуфазного напряжения. Ток замыкания на землю $I_{3,3}$ по сравнению с нагрузочным током сети или ее отдельных линий относительно мал. Замыкание на землю при указанных выше напряжениях практически не влияет на режим работы приемников и считается не аварийным, а лишь аномальным режимом. В этих случаях питание потребителей не прерывается. Из всех видов нарушения изоляции однофазные замыкания на землю в системах с изолированной нейтралью составляют обычно 75–85 %; сам факт замыкания существенно влияет на обеспечение требуемой надежности питания потребителей.

В сетях с изолированной нейтралью необходимо обращать внимание на следующее:

1) повышение напряжения двух фаз относительно земли при замыкании на землю третьей фазы приводит к необходимости рассчитывать изоляцию всех фаз относительно земли не на фазное, а на междуфазное (линейное) напряжение ($U_{л} = 1,732 U_{ф}$);

2) возможность образования в месте замыкания на землю перемежающейся дуги обуславливает возникновение коммутационных перенапряжений с амплитудой (4...6) $U_{ном}$, которые могут привести к пробое изоляции в других местах и других фазах сети, а также к нарушению работы некоторых приемников;

3) тепловое действие дуги в месте замыкания на землю на изоляцию других фаз сети может привести к переходу замыкания на землю в двух- или трехфазное КЗ.

Время, за которое требуется отыскать и отключить возникающее в сети замыкание на землю, обычно принимают равным 2 ч. Ток $I_{3,3}$ не должен превышать 30 А для сетей 6 кВ и 20 А для сетей 10 кВ. Если $I_{3,3}$ превышает допустимые значения, то нейтраль источника питания сети соединяют с землей через заземляющий реактор, благодаря которому ток $I_{3,3}$, имеющий емкостной характер, компенсируется индуктивным током; дуга становится неустойчивой и быстро гаснет. Для ограничения тока $I_{3,3}$ может применяться заземление нейтрали через активное сопротивление.

При глухом заземлении нейтрали ($U_{ном} > 110$ кВ) замыкание одной фазы на землю является однофазным КЗ и должно приводить к срабатыванию соответствующей защиты. Чтобы частые отключения линий из-за замыканий на землю не нарушали надежности питания потребителей, на таких линиях применяется однофазное или трехфазное автоматическое повторное включение (АПВ).

В целом система электроснабжения выполняется таким образом, чтобы в условиях послеаварийного режима, после соответствующих переключений и пересоединений она была способна обеспечить питание нагрузки пред-

приятия (с частичным ограничением) с учетом использования всех дополнительных источников и возможностей резервирования (перемычек, связей на вторичном напряжении, аварийных источников и т.п.). При этом возможны кратковременные перерывы питания электроприемников II категории на время переключений и пересоединений и перерывы питания электроприемников III категории на время до 1 сут.

Для наиболее экономичного резервирования систем электроснабжения учитывают перегрузочную способность электрооборудования, резервирования технологической части, возможность проведения плановых ремонтов и ревизий электрооборудования в период планово-предупредительных ремонтов технологического оборудования. Кроме того, при аварии предусматривается автоматическая или ручная разгрузка от неответственных потребителей с выделением питания нагрузок III категории для возможности их отключения по аварийному, заранее имеющемуся на предприятии, графику.

Многолетние обследования электрохозяйства промышленных предприятий показали, что имеет место недогрузка электрооборудования не только при достижении полной проектной мощности, но даже при ее превышении. Естественный последующий рост нагрузок не может служить основанием для завышения параметров электрооборудования и сечения питающих и распределительных сетей при реконструкции и проектировании систем электроснабжения. При росте нагрузок не используют резервы, предусмотренные для обеспечения бесперебойного электропитания, так как это может привести к снижению надежности электроснабжения всех потребителей предприятия.

Особое значение для повышения надежности и экономичности системы электроснабжения имеет обеспечение необходимого качества электроэнергии в связи с ростом резкопеременных нагрузок электропривода, электротермии, электросварки, оказывающих вредное влияние на качество электроэнергии.

При технико-экономических сравнениях возможных вариантов электроснабжения руководствуются директивными документами, в которых даются принципиальные указания для выбора экономически целесообразных технических решений в области энергетики.

1.4 Основные проблемы в электроснабжении промышленных предприятий

Одной из самых главных проблем в промышленной энергетике является **энергосбережение и экономия** материальных, а также трудовых ресурсов. Сюда можно отнести, например выпуск менее материалоемких, но более надежных и долговечных изделий, более полное использование вторичных сырьевых и энергетических ресурсов, повышение КПД энергоустановок, уменьшение потерь энергии и т.д.

Важным резервом экономии электроэнергии в промышленности является в настоящее время применение энергосберегающих технологий (совершенствование существующих и разработка новых).

Экономия электроэнергии означает прежде всего уменьшение потерь электроэнергии во всех звеньях системы электроснабжения и в самих электроприемниках. *Основными путями снижения потерь электроэнергии в промышленности [14, 15] являются:*

1) рациональное построение системы электроснабжения при ее реконструкции и проектировании, включающее в себя применение рациональных напряжений, числа и мощности силовых трансформаторов, общего числа трансформаций, места размещения подстанций, схемы электроснабжения, компенсации реактивной мощности и др.;

2) снижение потерь электроэнергии в действующих системах электроснабжения, включающее в себя управление режимами электропотребления, регулирование напряжения, ограничение холостого хода электроприемников, модернизацию существующего и применение нового, более экономичного и надежного технологического и электрического оборудования, применение экономически целесообразного режима работы силовых трансформаторов, замену асинхронных двигателей (АД) на синхронные (СД), где это возможно, автоматическое управление освещением в течение суток, повышение качества электроэнергии, применение частотно-регулируемого электропривода и др.;

3) нормирование электропотребления (предполагает наличие на предприятиях надежных систем учета и контроля расхода электроэнергии), разработка научно обоснованных норм удельных расходов электроэнергии на единицу продукции;

4) организационно-технические мероприятия, которые разрабатываются конкретно на каждом предприятии с учетом его специфики.

В системах электроснабжения промышленных предприятий и установок энерго- и ресурсосбережение достигается за счет уменьшения потерь электроэнергии при ее передаче и преобразовании, а также за счет применения менее материалоемких и более надежных конструкций всех элементов этой системы. Это учитывается, в частности, при выборе вариантов системы электроснабжения при ее реконструкции и проектировании (например, при выборе номинальных напряжений сетей).

Одним из действенных путей уменьшения потерь электроэнергии является компенсация реактивной мощности потребителей с помощью местных источников реактивной мощности. Причем весьма важное значение имеет правильный выбор типа, мощности, местоположения и способа автоматизации источников реактивной мощности. Компенсация реактивной мощности означает снижение реактивной мощности, циркулирующей между источником тока и приемником, и, следовательно, снижение реактивного тока в генераторах и сетях. Снизить потребление реактивной мощности, т.е. уменьшить потери активной мощности, можно двумя способами: без применения и с применением компенсирующих устройств.

К *первому способу* (без применения компенсирующих устройств) относятся: упорядочение технологического процесса, ведущее к улучшению энергетического режима работы оборудования, к повышению коэффициента мощности $\cos \varphi$, замена малозагруженных двигателей двигателями меньшей мощности, переключение статорных обмоток АД напряжением до 1 кВ с треугольника на звезду, если их нагрузка составляет менее 40 %, повышение качества ремонта двигателей с сохранением их номинальных данных, правильный выбор электродвигателей по мощности и по типу и др.

Ко *второму способу* (с применением компенсирующих устройств) относится использование батарей конденсаторов и СД. Синхронные двигатели широко могут применяться для привода насосов, вентиляторов, компрессоров и т.д. Такие СД выпускаются с номинальным опережающим $\cos \varphi$, большим или равным 0,9, и могут работать в режиме перевозбуждения, т.е. генерации реактивной мощности. Характер и значение реактивной мощности СД определяются током возбуждения в обмотке его ротора. В режиме перевозбуждения СД представляет собой активную и емкостную нагрузку, т.е. СД работает не только как двигатель, но и как источник реактивной мощности.

При эксплуатации систем электроснабжения большое значение имеет также выравнивание нагрузок во времени с использованием для этого целенаправленного управления электрооборудованием (выравнивание графиков нагрузки, снижение и смещение пиковых мощностей и т.п.).

К проблеме энерго- и ресурсосбережения относится также повышение надежности электроснабжения, так как внезапное прекращение питания может привести к большим убыткам в производстве. Однако повышение надежности обычно связано с увеличением стоимости системы электроснабжения. Поэтому, как правило, определяют оптимальные показатели надежности, выбирают оптимальную по надежности структуру системы электроснабжения.

Другой проблемой, ставшей особенно актуальной в связи с широким применением вентиляных преобразователей, подключенных к системам электроснабжения, является обеспечение требуемого качества электроэнергии. Низкое качество электроэнергии приводит прежде всего к увеличению потерь электроэнергии как в электроприемниках, так и в сети. Так, при снижении напряжения от $U_{ном}$ потери возрастают до 5 % и более; дополнительные потери электроэнергии имеют место также и несимметричной нагрузке и при несинусоидальном напряжении. Снижение качества электроэнергии сокращает срок службы электрооборудования главным образом за счет его перегрева и преждевременного старения изоляции. Например, при несимметрии напряжения, равной 4 %, срок службы полностью нагруженного АД сокращается в 2 раза; при несимметрии, равной 10 %, располагаемая мощность АД уменьшается на 20–50 % в зависимости от исполнения двигателей.

Значительную экономию электроэнергии можно получить от внедрения автоматизированных систем управления на базе компьютерной техники. Переход на новую элементную базу вспомогательных цепей систем электроснабжения, а именно внедрение микропроцессорных систем защиты, автоматики и телемеханики открывает возможность значительного уменьшения мощности и материалоемкости трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН), а также перехода на принципиально новые, более совершенные измерительные преобразователи. Широкое внедрение управляющих микропроцессорных систем обеспечивает значительный экономический эффект за счет повышения гибкости и надежности систем электроснабжения.

Актуальной и весьма важной задачей является обеспечение электро-, пожаро- и взрывобезопасности установок электроснабжения, совершенствование и разработка новых устройств защиты и сигнализации.

Системы электроснабжения промышленных предприятий имеют следующие особенности:

- непрерывность и неразрывное единство производства, передачи и потребления электроэнергии; практическая невозможность ее складирования;

- многоцелевое использование электроэнергии при наличии категорий потребителей с различными требованиями к надежности и качеству электроэнергии;

- малая вероятность полного отказа систем, а также их непланового ремонта вследствие большого количества потребителей и значительного развития характеристик взаимозаменяемых элементов;

- непрерывное развитие систем электроснабжения во времени и пространстве.

В последнее время количественные оценки систем электроснабжения используются не только на этапе проектирования и реконструкции, но и при эксплуатации для управления уровнем надежности. При этом необходимо иметь информацию о фактическом состоянии элементов, ремонтных группах, режимах работы оборудования.

Надежность системы основывается на случайных явлениях, а чтобы они могли выступать как необходимые, система должна быть избыточной. Под избыточностью понимают дополнительные средства и возможности сверх минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций. Избыточность системы, с одной стороны, является необходимым условием надежности и должна быть свойственна техническим системам. С другой стороны, избыточные системы, приобретая высокую надежность, могут приобрести ряд свойств, снижающих их эффективность. В частности, для избыточных систем характерны большие экономические затраты на сооружение и эксплуатацию.

На практике избыточность систем электроснабжения выступает в форме резервирования, совершенствования конструкций и материалов, из которых

изготовлены элементы, повышения их долговечности, прочности, совершенствования технического обслуживания, контроля и управления.

Задачи надёжности электроснабжения. С проблемой надёжности в электроэнергетике связаны следующие практические задачи:

- статистическая оценка и анализ надёжности действующего оборудования и установок;
- прогнозирование надёжности оборудования и установок;
- нормирование уровня надёжности;
- испытания на надёжность;
- расчет и анализ надёжности;
- оптимизация технических решений по обеспечению надёжности при проектировании, создании и эксплуатации электротехнического оборудования, установок, систем;
- экономическая оценка надёжности.

Теория надёжности вводит в практику инженерного исследования количественные оценки, которые позволяют: устанавливать требования и нормативы надёжности оборудования для установок и систем; сравнивать различные виды оборудования, установок и систем по их надёжности; рассчитывать надёжность установок по надёжности их элементов; оптимизировать величину необходимого резерва и структуру технических объектов; выявлять наименее надёжные элементы оборудования, установок и систем; оценивать сроки службы оборудования и установок.

Информационное обеспечение надёжности ЭУ. Данные о надёжности ЭУ, полученные в результате расчетов при его проектировании, относятся к предсказуемым показателям. Будут ли они совпадать с действительными, можно установить либо в результате эксплуатации ЭУ, либо при специальных испытаниях. Очевидно, что предпочтение следует отдать эксплуатации, т.к. здесь ЭУ будет работать в реальных условиях. Таким образом, первая цель, которую преследуют при оценивании надёжности по данным эксплуатации, – определение соответствия между требованиями к надёжности, предъявленными заказчиком, и действительной надёжностью. Чаще оценка является составной частью программы повышения надёжности.

Как бы ни была высока надёжность ЭУ, потребитель заинтересован в том, чтобы она было *абсолютно надёжной*, хотя это и невозможно. Изготовители стремятся максимально повысить надёжность. Могут быть два способа повышения надёжности: на местах эксплуатации путем доработок при серийном выпуске оборудования и на производстве при выпуске последующих партий на основе эксплуатационных данных первой партии путем внесения изменений в конструкцию. Но и в том, и в другом случае изготовитель должен знать слабые, ненадёжные места ЭУ, которые определяются в результате анализа причин отказов при работе.

Оценивание надёжности по результатам эксплуатации возможно при своевременном поступлении достоверной информации об отказах и соответствующей обработке ее специальной службой надёжности. Между экс-

платационниками и изготовителями необходима связь, которая должна осуществляться через эту службу (рисунок 1.2).

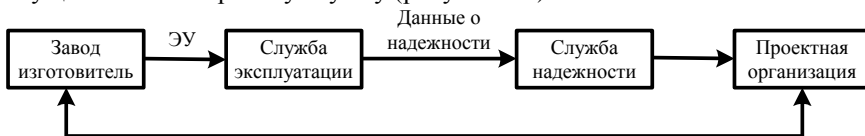


Рисунок 1.2 – Схема связей изготовителей и эксплуатационников

Все данные заносят в документацию системы первичного учета отказов: журнал учета работы электрооборудования, карточку учета отказов, итоговый документ о наработке и отказах ЭУ. Информация о работе элементов ЭУ, которую необходимо получить от эксплуатационников, должна соответствовать требованиям достоверности и полноты.

Достоверность информации достигается объективностью представленного материала и подготовленностью обслуживающего персонала. Под объективностью понимается своевременное заполнение карточек об отказах и журналов учета работы с точным указанием их причин, ошибок обслуживающего персонала либо конструктивных недоделок. Необъективность материала – результат либо халатности, либо некомпетентности обслуживающего персонала, либо просто субъективности оценки.

Полнота информации зависит от точного описания отказов и их причин, т.е. качества подготовки персонала и ясности инструкции по эксплуатации элементов ЭУ. Для решения тех или иных задач по программам повышения надежности требуется определенный объем сведений, в том числе данные о времени обнаружения отказа, внешнего поведения отказа, времени, затрачиваемом на отыскание и устранение причины отказа, о типе и характеристиках отказавшего элемента ЭУ, месте его в схеме и о времени наработки элемента до отказа. Результаты сравнительного количественного анализа отказов удобно представлять в виде диаграмм Парето (рисунок 1.3), характеризующих относительную долю в процентах каждого из видов отказов и кумулятивный (накопленный) процент отказов.

На основании анализа надежности оборудования по данным эксплуатации разрабатывается перечень мероприятий, необходимых для исключения выявленных причин отказов.

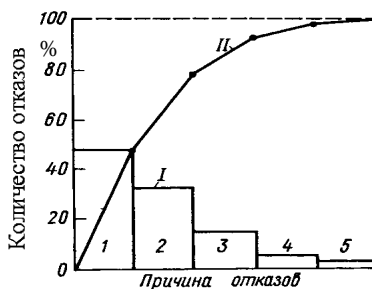


Рисунок 1.3 – Диаграмма Парето:
I – гистограмма распределения отказов;
II – кумулятивный процент отказов

1.5 Причины и характер повреждений основных элементов систем электроснабжения

Факторы, влияющие на надежность элементов ЭУ. Электроустановки, используемые для преобразования, передачи и распределения электроэнергии, подвергаются воздействию большого количества факторов, которые можно подразделить на четыре группы: воздействия окружающей среды, эксплуатационные, случайные, ошибки проектирования и монтажа (рисунк 1.4).

К факторам окружающей среды, где функционируют элементы ЭУ, относятся интенсивность грозовой и ветровой деятельности, гололедные отложения, обложные дожди, мокрый снег, густой туман, изморозь, роса, солнечная радиация и другие. Большинство из факторов окружающей среды приводятся в климатических справочниках [21].

Применительно к передаточным устройствам – воздушные линии всех классов напряжений – наиболее характерными факторами, способствующими их отказам, являются морозящий дождь, мокрый снег, густой туман, изморозь и роса, а у силовых трансформаторов, установленных на электроустановках открытого типа, к факторам окружающей среды относятся солнечная радиация, атмосферное давление, температура окружающей среды (фактор, тесно связанный с категорией размещения и климатическими условиями).

Особенностью эксплуатации элементов ЭУ открытого исполнения всех классов напряжений является изменение всех факторов, например, изменение температуры от -30 до $+40$ °С.

К эксплуатационным факторам относятся перегрузки элементов ЭУ, токи коротких замыканий (сверхтоки), различные виды перенапряжений (дуговые, коммутационные, резонансные и др.). Согласно правилам технической эксплуатации, воздушные линии 10–35 кВ с изолированной нейтралью допускается эксплуатировать при наличии однофазного замыкания на землю, а длительность их устранения не нормируется. При таких условиях эксплуатации дуговые замыкания в разветвленных распределительных сетях являются основной причиной повреждения ослабленной изоляции. Для силовых трансформаторов наиболее чувствительными из эксплуатационных факторов являются их перегрузка, механические усилия на обмотках при сквозных токах коротких замыканий. Значительное место в эксплуатационных факторах занимают квалификация персонала и сопутствующие им воздействия (ошибки персонала, некачественный ремонт и обслуживание и т.п.).

К группе факторов, косвенно влияющих на надежность работы ЭУ, относятся *ошибки проектирования и монтажа*: несоблюдение руководящих материалов при проектировании, неучет требований надежности, неучет

величины емкостных токов в сетях 10–35 кВ и их компенсации при развитии сетей, некачественное изготовление, дефекты монтажа и др.

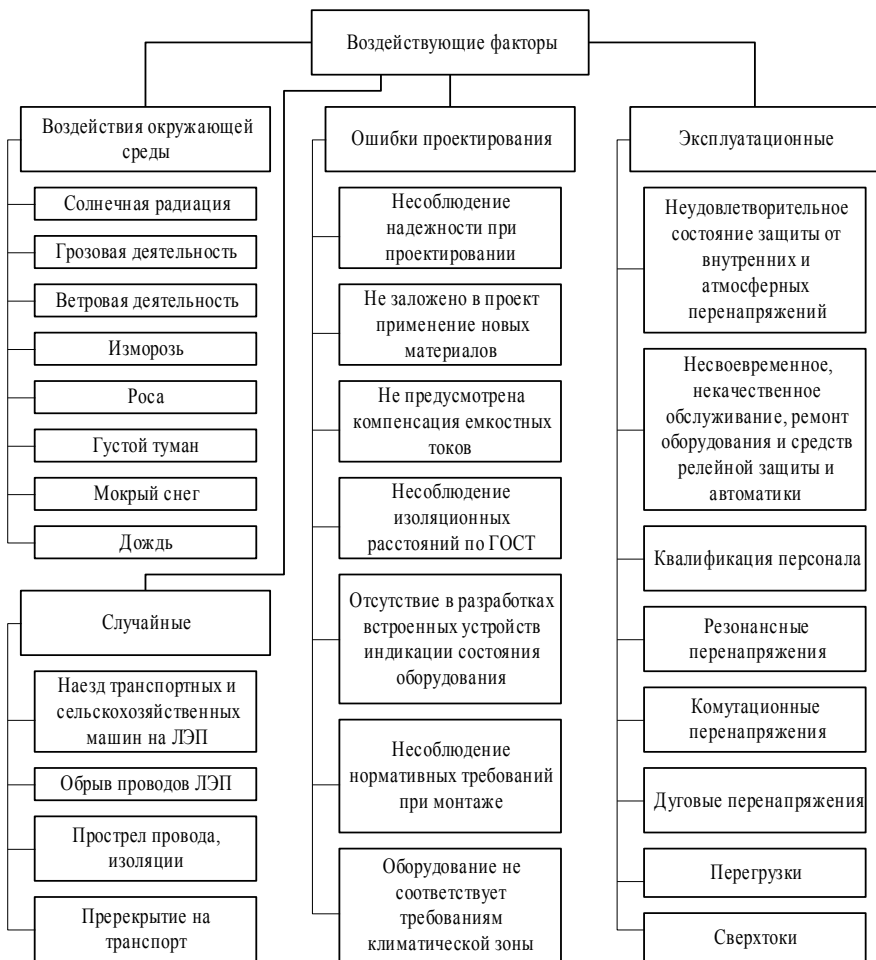


Рисунок 1.4 – Факторы, влияющие на надежность работы электроустановок

Небольшую группу влияющих на показатели надежности электроустановок в эксплуатации составляют *случайные* факторы: наезд транспорта и сельскохозяйственных машин на опоры, перекрытие на движущийся транспорт под проводами ВЛ, обрыв провода и т.п. Целью исследования взаимодействия ЭУ с воздействующими факторами является разработка технических, организационных и экономических мероприятий, направленных на повышение надежности элементов ЭУ. Применительно к взаимодействию

ЭУ с факторами окружающей среды региона необходимо выяснить характер и причины взаимного влияния, количественную и качественную оценки, рассмотреть поток отказов из-за воздействующих факторов с учетом пространства и времени.

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).

Линии электропередачи (ЛЭП) являются самым ненадежным элементом СЭС 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 % [14–16].

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 [16].

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 отказов в работе силовых трансформаторов связаны с дефектами конструкции и изготовления, процессами износа и старения изоляции вследствие перегрузок, недостаточного охлаждения, а также из-за воздействия внешних перенапряжений и токов короткого замыкания.

Наиболее распространенные *повреждения* силовых трансформаторов:

- нарушение изоляции обмоток трансформатора;
- повреждение переключателей (в основном регулируемых под нагрузкой), обусловленное конструктивными и технологическими дефектами;
- выход из строя вводов в основном при воздействии внешних перенапряжений в сети (перекрытие внешней или внутренней изоляции, механические повреждения, некачественные контактные соединения);
- поломка устройств, регулирующих напряжение (особенно автоматических под нагрузкой);
- протекание масла (для масляных трансформаторов).

Ремонт трансформаторов больших габаритов производится на месте. Он требует, как правило, выемки ядра 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) [16].

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 [16].

Коммутационные электрические аппараты. Отказы коммутационных аппаратов (автоматических выключателей, разъединителей, короткозамыкателей, отделителей) происходят при отключении коротких замыканий, выполнении ими различных операций, а также в стационарном состоянии. Основная же 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.

Продолжительность восстановления коммутационных аппаратов возрастает с увеличением номинального напряжения электрооборудования и, как правило, соизмерима с продолжительностью восстановления воздушных линий (единицы, десятки часов) [14–16].

Статистические исследования показали, что масляные выключатели в значительном числе случаев (от 17 до 35 %) отказывают при отключении токов КЗ и в большинстве случаев их отказ сопровождается КЗ в ячейке (от 66 до 100 %), а следовательно, на шинах распределительного устройства.

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 [16].

Отказы большей части *элементов систем электроснабжения*: воздушных и кабельных линий, генераторов, трансформаторов, сборных шин, выключателей и разъединителей (в статическом состоянии) – сопровождаются обычно КЗ (одно-, двух- и трехфазными).

Для указанного выше оборудования причинами повреждений могут быть ошибочные действия оперативного персонала, а также неправильное действие релейной защиты и автоматики (ложное срабатывание, неселективное срабатывание, несрабатывание), приводящие к КЗ.

1.6 Минимально допустимое время перерывов электроснабжения

При оценке надежности следует учитывать, что не всякий перерыв электроснабжения может причинить ущерб производству. Возможны перерывы длительностью меньше минимально допустимых $t_{о, доп}$, которые не отражаются на производстве. Некоторые данные о продолжительности перерывов электроснабжения, не вызывающих значительного ущерба для отдельных производств, приведены в таблице 1.1. При длительности перерывов электроснабжения, превышающей указанные в таблице 1, имеет место так называемый "технологический" перерыв, длительность которого не зависит от длительности перерыва подачи электроэнергии.

Таблица 1.1 – Минимально допустимое время перерывов электроснабжения

Вид производства	Электропотребители	$t_{0, \text{доп}}$
Прокат	Непрерывные станы	1 с
	Реверсивные станы	5–10 мин
Обогащение	Дробилки	1 с
	Дешламаторы	10 мин
	Дисковые фильтры	1 мин
	Сгустители	15 мин
	Конвейеры дробильной и обогатительной фабрик	1 мин
Энергетические цеха	Водонасосные станции	1–1,5 с
	Кислородные станции	1–1,5 с
	Компрессорные станции	1–1,5 с
Станкостроительный завод	Листопрокатный цех	0,5 ч
	Травильные ванны	1 ч
	Калибровочный цех	0,5 ч
	Режущий инструмент	1 с
	Литейное отделение	10 мин
	Цементные печи	0,5 ч
	Отпускные печи	0,5 ч
	Соляные ванны	0,5 ч
	Малярный, кузнечно-заготовительный цех	0,5 ч
Автомобильный завод	Печи сопротивления литейного цеха	5 мин
	Газовые печи литейного цеха	1 ч
	Шахтные печи, вытяжные вентиляторы цианистых ванн	0,1 с
Электромашиностроение	Ванны для цинкования	1 ч
Химкомбинат	Мешалки чанов	15 мин
	Чаны для смешивания компонентов, их надевания и перекачивания	5 мин
Ситценабивная фабрика	Электропечи для закалки молотовалов	20 мин
	Гальванические ванны	5 мин
Химия и нефтехимия	Каталитический крекинг	3–5 с
	Каталитический риформинг	3 с
	Риформинг	20 с
	Газофракционирующая установка	20 с
	Установка азетропной перегонки	2 мин
	Установка деасфальтизации	1–3 с
	Атмосферно-вакуумная трубчатка	2–3 с
Цех депарафинизации и парафиновый	1–2 мин	

2 ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В РАСЧЕТАХ НАДЕЖНОСТИ

Математический аппарат теории надежности основан на таких разделах современной математики, как теория вероятностей и математическая статистика, теория случайных процессов, теория массового обслуживания, математическая логика, теория графов, теория оптимизации, теория экспертных оценок, теория больших систем.

2.1 Основные сведения из теории вероятностей

2.1.1 Необходимые сведения из теории случайных событий

Для количественной оценки различных показателей надежности используют понятия случайного события, случайной величины и случайного процесса.

Элементарным исходом ω называется любой мысленно возможный неразложимый результат вероятностного эксперимента E .

Множество всех мыслимых взаимоисключающих результатов вероятностного эксперимента E образуют пространство элементарных событий Ω .

Случайным называется такое событие, о котором нельзя заведомо точно сказать: произойдет оно или нет. Например: отказ ВЛ при грозе; совпадение пиков сварочной нагрузки; отказ выключателя при отключении короткого замыкания; восстановление какого-либо элемента электрической сети за определенный промежуток времени; отказ действия релейной защиты при перегрузке и т.д. Такие события обладают какой-то степенью возможности: одни – большей, другие – меньшей. Чтобы качественно сравнить между собой события по *степени их возможности*, нужно с каждым событием связать определенное число, которое тем больше, чем более возможно событие (его вероятность).

Вероятностью случайного события (СС) A называется функция $P(A)$, характеризующая меру объективной (не зависящей от воли исследователя) возможности наступления этого события и удовлетворяющая для каждого СС трём аксиомам (Колмогорова):

- 1) вероятность удовлетворяет неравенству $0 \leq P(A)$;
- 2) вероятность появления достоверного события равна 1, т.е. $P(\Omega) = 1$;
- 3) вероятность суммы счётного множества попарно несовместных событий $A_i, i = 1, \infty$ равна сумме вероятностей этих событий. Т.е. $P(\cup A_i) = \sum P(A_i)$.

По классическому способу вычисления вероятности вероятность СС A [$P(A)$] равна отношению числа элементарных исходов m , благоприятных событию A , к общему количеству элементарных исходов n пространства Ω ,

т.е. $P(A) = m / n$, а учитывая, что A и Ω – множества (элементарных исходов), можно записать: $P(A) = |A| / |\Omega|$.

Ограничения классического способа вычисления вероятности: все элементарные исходы вероятностного эксперимента E должны быть равновероятными, т. е. $P(\omega_i) = P(\omega_j)$, $\forall i, j$; количество элементарных исходов (размерность пространства Ω) ограничено или счётно и чтобы $(|A| / |\Omega| \neq 0 / 0 \neq \infty / \infty)$.

Пример. В распределительном пункте (РП) установлено пять автоматических выключателей. Нормальная работа потребителей обеспечивается при их исправном состоянии. При монтаже РП выключатели выбирались из партии объемом в 100 штук, в которой было 95 исправных выключателей и 5 неисправных. Найти вероятность исправной работы РП.

Решение. Обозначим событие A – исправная работа РП, оно осуществляется, если все выключатели выбраны из числа исправных. Так как все элементарные исходы равновероятны, то воспользуемся классическим способом вычисления вероятности $P(A) = |A| / |\Omega|$.

Общее число элементарных событий определим по формуле комбинаторики $|\Omega|$:

$$|\Omega| = C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!} = C_{100}^5.$$

Число элементарных событий, благоприятствующих событию A , $|A| = C_{95}^5$. Следовательно, $P(A) = |A| / |\Omega| = 0,7696$.

При одновременном изучении двух или нескольких событий различают события совместные и несовместные. Несовместными называются события, произведение которых является пустым множеством, т.е. невозможным событием. На практике это означает, что несовместные события вместе произойти не могут. События называются совместными, если они могут произойти одновременно. Пример совместного события – одновременный отказ двух и более элементов в один и тот же момент времени в относительно простой последовательной схеме.

Несколько событий образуют *полную группу событий*, если в результате опыта обязательно должно произойти хотя бы одно из них. На основании введенных понятий формулируются следующие основные теоремы теории вероятностей, которые применяются при решении задач надежности электроснабжения.

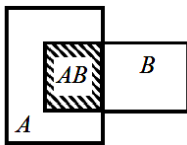


Рисунок 2.1 – Иллюстрация совместности двух событий (диаграмма Венна)

Теорема сложения вероятностей. Пусть A и B – произвольные случайные события, принадлежащие Ω , тогда вероятность суммы этих событий равна сумме вероятностей этих событий без вероятности их совместного появления (рисунок 2.1), т.е.

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B).$$

Вероятность суммы n несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A_i),$$

где $A = \sum_{i=1}^n A_i$.

Вероятность суммы любого числа событий

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_i P(A_i) - \sum_{i,j} P(A_i A_j A_k) - \dots (-1)^{n-1} \sum P(A_i A_j \dots A_n).$$

Событие B называется зависимым от события A , если появление (или не появление) события A изменяет вероятность появления события B . Если происхождение A не изменяет вероятности появления B , событие B называется независимым от события A .

Теорема умножения вероятностей. Вероятность произведения двух событий равна произведению вероятности одного из этих событий на условную вероятность другого, в предположении, что первое уже произошло: $P(A \cap B) = P(A)P(B|A) = P(B \cap A) = P(B)P(A|B)$. При этом не важно, какое из событий считать первым, а какое вторым.

В общем виде

$$P(A_1 A_2 \dots A_n) = P(A_1) \cdot P(A_2/A_1) \cdot P(A_3/A_1 A_2) \cdot \dots \cdot P(A_n/A_1 A_2 \dots A_{n-1}).$$

Пример 1. Вероятность повреждения оставшегося в работе одного из трансформаторов зависит от величины нагрузки (рисунок 2.2).

Пример 2. Вероятность выхода из строя электрического прибора равна p . Для повышения надёжности в прибор поставлены m дублирующих ветвей. Определить, во сколько раз (k) увеличится надёжность прибора, если под надёжностью понимать вероятность безотказной работы.

Решение. Вероятность того, что откажут все параллельные ветви (событие A):

$$P(A) = \prod_{i=1}^m p_i = p^m.$$

Вероятность того, что не откажет хотя бы одна из параллельных ветвей (событие B): $P(B) = 1 - P(A) = 1 - p^m$.

Надёжность одной ветви $r = 1 - p$.

Искомое увеличение надёжности прибора

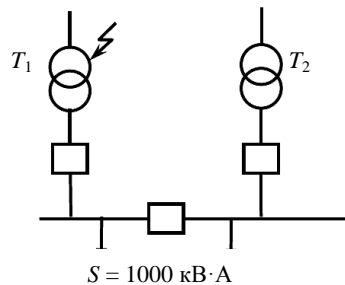


Рисунок 2.2 – Иллюстрация к примеру 1

$$k = \frac{P(B)}{r} = \frac{1-p^m}{1-p}$$

Дополнение. При относительно малых вероятностях повреждений, которые характерны для элементов ЭЭС, например при $p = 0,01$,

$$k_2 = \frac{1-(0,01)^2}{1-0,01} = 1,01, \quad k_3 = \frac{1-(0,01)^3}{1-0,01} = 1,0101.$$

Пример 3. Две цепи электроснабжения работают параллельно на общую нагрузку (рисунок 2.3). Вероятность аварийного простоя одной цепи $q_1 = 0,5 \cdot 10^{-3}$, второй – $q_2 = 0,7 \cdot 10^{-3}$. Принимая аварийные состояния цепей независимыми, определить вероятность аварийного простоя двухцепной электропередачи для двух случаев: а) отказ электропередачи происходит при отказе одной из цепей (любой); б) отказ электропередачи происходит при отказе только обеих цепей.

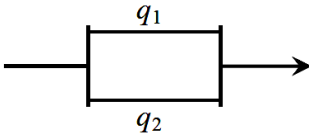


Рисунок 2.3 – Схема питания

Решение. а) На основании теоремы сложения вероятностей (логическая схема «или»)

$$q = q_1 + q_2 = 0,5 \cdot 10^{-3} + 0,7 \cdot 10^{-3} = 1,2 \cdot 10^{-3}.$$

б) На основании теоремы умножения вероятностей (логическая схема «и»)

$$q = q_1 \cdot q_2 = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7 \cdot 10^{-3} = 0,35 \cdot 10^{-6}.$$

Дополнение. Вероятность безаварийной работы

$$P = p_1 + p_2 - p_1 \cdot p_2 = 0,9995 + 0,9993 - 0,9995 \cdot 0,9993 = 0,99999965.$$

Пример 4. Питание потребителя осуществляется по одной цепи, состоящей из кабельной линии, трансформатора, выключателя (рисунок 2.4). Вероятность безотказной работы за время t для этих элементов: $p_{кл} = 0,97$, $p_T = 0,98$, $p_B = 0,99$. Отказ любого элемента приводит к перерыву питания, причем отказы взаимно независимы. Найти вероятность безотказной работы передачи.

Решение. Обозначим: $A_{кл}$ – безотказная работа кабельной линии, A_T – безотказная работа трансформатора, A_B – безотказная работа выключателя, A – безотказная работа всей системы, B – отказ в работе системы. По теореме умножения для независимых событий

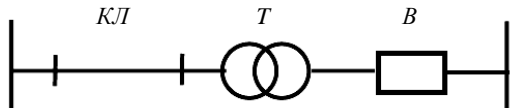


Рисунок 2.4 – Схема питания

$$P(A) = P(A_{кл}) P(A_T) P(A_B) = 0,97 \cdot 0,98 \cdot 0,99 = 0,9411.$$

Дополнение. Вероятность отказа системы

$$P(B) = (1 - p_{кл}) + (1 - p_T) + (1 - p_B) - (1 - p_{кл})(1 - p_T) - (1 - p_{кл})(1 - p_B) - (1 - p_B)(1 - p_T) + (1 - p_{кл})(1 - p_T)(1 - p_B).$$

Формула полной вероятности. Пусть требуется определить вероятность некоторого СС A , которое может произойти или не произойти вместе с некоторой из гипотез H_1, H_2, \dots, H_n . Тогда вероятность указанного события

можно вычислить по формуле $P(A) = \sum_{i=1}^n P(H_i) \cdot P(A|H_i)$, т.е. как сумму произведений вероятности каждой гипотезы на условную вероятность СС A при этой гипотезе.

Пример. Силовые трансформаторы изготавливаются тремя заводами, причем вероятность того, что трансформатор выпущен на первом заводе равна 0,6, на втором – 0,3, на третьем – 0,1.

Вероятности того, что при определённых условиях работы трансформатор сохранит работоспособность в течение 25 лет, для первого, второго и третьего заводов соответственно равны: 0,99; 0,98; 0,97. Чему равна вероятность того, что поступивший для монтажа трансформатор сохранит работоспособность в течение 25 лет?

Решение. Обозначим событие A – поступивший для монтажа трансформатор сохранит работоспособность в течение 25 лет. Этот трансформатор может оказаться с первого завода (событие H_1), со второго (H_2), с третьего (H_3). Интересующее нас событие A имеет вероятность

$$P(A) = \sum_{i=1}^3 P(H_i) \cdot P(A|H_i) = 0,6 \cdot 0,99 + 0,3 \cdot 0,98 + 0,1 \cdot 0,97 = 0,985.$$

Теорема гипотез (формула Байеса). Произведён опыт, в результате которого наблюдалось событие A , которое может произойти или не произойти вместе с одной из гипотез H_1, H_2, \dots, H_n . Причём известны априорные (т.е. до опытные) вероятности этих гипотез – $P(H_1), P(H_2), \dots, P(H_n)$. Пусть известно, что событие A произошло. Требуется определить вероятности событий H_1, H_2, \dots, H_n после опыта. На основании теоремы умножения и формулы полной вероятности имеем:

$$P(H_i|A) = (P(H_i) P(A|H_i)) / (\sum [P(H_i) P(A|H_i)]).$$

2.1.2 Случайные величины и законы их распределения

Если случайные события характеризуют результат вероятностного эксперимента качественно (событие может произойти или нет), то случайные величины – количественно. Например, безотказная работа некоторого устройства в течение гарантийного срока – случайное событие, а время наработки устройства на отказ – случайная величина.

Случайной величиной называется функция $\xi = \xi(\omega)$, которая каждому элементарному исходу ω пространства элементарных событий Ω вероятностного эксперимента E ставит в соответствие некоторое действительное число x .

В зависимости от размерности пространства элементарных исходов Ω вероятностного эксперимента случайные величины могут быть дискретными и непрерывными.

Непрерывной называется случайная величина ξ , которая в результате эксперимента может принимать все значения из некоторого промежутка или всей числовой оси. Множество значений непрерывной случайной величины,

соответствующее пространству Ω , несчетно. Примерами непрерывных случайных величин являются: время безотказной работы элементов, устройств, агрегатов, систем; время вынужденного простоя оборудования из-за отказов; уровень того или иного технического параметра и т.д.

Дискретной называется случайная величина ξ , которая в результате эксперимента может принимать только определенные изолированные друг от друга значения. Множество значений дискретной случайной величины конечно или счетно. Примерами дискретных случайных величин являются: число неисправных элементов, устройств, агрегатов из общего числа находящихся в эксплуатации; число дефектных изделий в какой-либо партии продукции; количество повреждений элементов какого-либо оборудования в единицу времени и т.д.

Случайная величина будет полностью определена с вероятностной точки зрения, если мы укажем, с какой вероятностью наступает каждое из случайных событий $\{\xi = x_i\}$. Этим мы установим так называемый закон распределения случайной величины ξ .

Законом распределения случайной величины ξ называется правило, которое каждому возможному значению x величины ξ ставит в соответствие вероятность появления данного значения. Закон распределения полностью характеризует случайную величину ξ с вероятностной точки зрения, т.е. определяет множество значений, которое может принимать величина, и то, с какими вероятностями величина ξ принимает значения x_1, x_2, \dots .

Закон распределения случайной величины ξ может быть задан таблично, графически и аналитически. Непосредственное перечисление значений возможно только для дискретных случайных величин, множество которых конечно или счётно.

Рядом распределения называется таблица, в которой непосредственно указаны возможные значения случайной величины ξ (x_1, x_2, \dots, x_n) и соответствующие им вероятности (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Ряд распределения дискретных случайных величин

x_i	x_1	x_2	...	x_n	...
$P(\xi = x_i)$	p_1	p_2	...	p_n	...

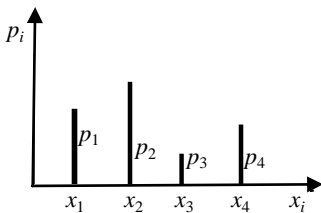


Рисунок 2.5 – Графический способ задания закона распределения

Для наглядности закон распределения дискретных величин можно представить графически. По оси абсцисс откладываются возможные значения случайной величины, а по оси ординат – вероятности данных значений (рисунок 2.5).

Табличный и графические способы задания законов распределения применимы только к дискретным случайным величинам.

нам. Универсальным способом задания закона распределения является функция распределения.

Функцией распределения случайной величины ξ называется функция $F(x)$ действительного аргумента x , которая каждому значению аргумента x ставит в соответствие вероятность того, что величина ξ примет значение меньше x , т.е. вычисляет вероятность события $\{\xi < x\}$.

Таким образом,

$$F(x) = P(\xi < x).$$

Функция плотности распределения непрерывной случайной величины – первая производная от функции распределения:

$$f(x) = F'(x), \quad F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx.$$

Вероятностный смысл функции $f(x)$ заключается в том, что она указывает как часто возможные значения непрерывной случайной величины ξ группируются в окрестности точки x .

Случайные величины в вероятностном смысле полностью характеризуются законами распределения. Однако на практике знание закона распределения случайной величины часто оказывается излишним. Иногда бывает достаточным знать лишь отдельные числовые параметры, характеризующие существенные черты закона распределения исследуемой случайной величины или некоторые её характерные значения.

Характеристики, выражающие в сжатой форме наиболее существенные особенности распределения случайной величины, называются *числовыми характеристиками* случайной величины. Все числовые характеристики случайных величин разделяют на характеристики положения, рассеяния, характеристики асимметрии и эксцесса (таблица 2.2) [18].

Таблица 2.2 – Числовые характеристики случайных величин

Числовые характеристики случайных величин			
положения	рассеяния	асимметрии	эксцесса
Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
Мода	Дисперсия		
Медиана			

Математическим ожиданием случайной величины ξ называется число $M[\xi]$, характеризующее среднее значение случайной величины с учётом вероятностей её значений.

Математическое ожидание дискретной случайной величины ξ вычисляется по формуле $M[\xi] = \sum_{i=1}^n x_i P(\xi = x_i)$, а непрерывной случайной величины – по

формуле $M[\xi] = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x)dx.$

Мода – наиболее вероятное значение случайной величины ξ , обозначаемое $Mod[\xi]$.

Медианой называется значение случайной величины ξ , обозначаемое $Med[\xi]$, для которого равновероятно случайная величина ξ примет большее или меньшее значение, т.е. $P(\xi < Med[\xi]) = P(\xi > Med[\xi]) = 0,5$. Поэтому медиану называют средневероятным значением случайной величины.

Дисперсией случайной величины ξ называется число $D[\xi]$, характеризующее меру рассеяния значений случайной величины вокруг ее математического ожидания. Дисперсию дискретной случайной величины удобно определять по формуле

$$D[\xi] = \sum_{i=1}^n x_i^2 P(\xi = x_i) - M^2[\xi];$$

для непрерывной случайной величины

$$D[\xi] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f(x) dx - M^2[\xi].$$

Среднеквадратическим отклонением случайной величины ξ называется число $\sigma[\xi]$, равное положительному значению квадратного корня из дисперсии, т.е. $\sigma[\xi] = +\sqrt{D[\xi]}$. Таким образом, среднеквадратическое отклонение случайной величины имеет размерность, равную размерности самой случайной величины. Среднеквадратическое отклонение $\sigma[\xi]$, как и дисперсия $D[\xi]$, характеризует степень разброса значений случайной величины ξ вокруг ее математического ожидания $M[\xi]$.

Коэффициент вариации – число, характеризующее, насколько хорошо математическое ожидание представляет ряд её возможных значений. Вычисляется по формуле $V[\xi] = \sigma[\xi] / M[\xi]$.

Коэффициентом асимметрии (скошенности) распределения называется число, вычисляемое по формуле

$$\beta_1[\xi] = \frac{M[(\xi - M[\xi])^3]}{\sigma^3}.$$

Коэффициентом эксцесса случайной величины ξ называется число $\beta_2[\xi]$, характеризующее островершинность распределения случайной величины ξ по сравнению с нормальным распределением и определяемое по формуле

$$\beta_2[\xi] = \frac{M[(\xi - M[\xi])^4]}{\sigma^4} - 3.$$

Пример. Энергосистема ограничивает промышленное предприятие в потреблении электрической мощности. При этом в течение года возможны дефициты в 3; 5 и 10 МВт с вероятностями соответственно 0,001; 0,0005 и 0,0002. Определить математическое ожидание недоотпуска электроэнергии промышленному предприятию за год.

Решение. Математическое ожидание недоотпуска мощности промышленному предприятию за год

$$M[P] = \sum_{i=1}^3 p_i P(\xi = p_i) = 0,001 \cdot 3 + 0,0005 \cdot 5 + 0,0002 \cdot 10 = 0,0075.$$

В году 8760 часов. Тогда математическое ожидание недоотпуска электроэнергии промышленному предприятию за год

$$M[W] = 8760 \cdot M[P] = 8760 \cdot 0,0075 = 65,7 \text{ МВт.}$$

Некоторые распределения случайных величин. Биномиальное распределение. Говорят, что случайная величина ξ имеет биномиальный закон распределения, т. е. $\xi \sim Bi(n, p)$, если данная величина дискретна и определяет число успехов k в схеме n испытаний Бернулли. Очевидно, что случайная величина ξ , имеющая биномиальное распределение, принимает только целые значения на отрезке $[0, n]$ с вероятностями, определяемыми формулой Бернулли: $P_k = P\{\xi = k\} = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}$.

Биномиальное распределение характеризуется двумя параметрами: числом проводимых экспериментов n и вероятностью успеха p в каждом испытании. Примерами СВ, имеющей биномиальное распределение, является число бракованных коммутационных аппаратов в партии из 100 штук, количество элементов различных систем управления асинхронных электродвигателей.

Основные числовые характеристики случайных величин, распределенных по биномиальному закону, определяются следующими выражениями:

$$M[\xi] = np ; \quad D[\xi] = np(1-p).$$

Пример. На электростанции работает четыре однотипных генератора. Вероятность аварийного повреждения каждого из них $p = 0,03$. Составить ряд распределения вероятного числа повреждённых генераторов.

Решение. Число повреждённых генераторов является дискретной случайной величиной. Пользуясь формулой Бернулли для биномиального распределения $P_k = P\{\xi = k\} = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}$, приведем результаты расчетов в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Ряд распределения дискретных случайных величин

Число повреждённых генераторов	0	1	2	3	4
Вероятность $P(\xi = x_i)$	0,9606	0,1164	0,0053	0,00011	0,00000081

Геометрическое распределение. На практике геометрическое распределение возникает при следующих условиях: пусть производится серия независимых опытов, в каждом из которых может произойти событие A с одной и той же вероятностью p . Опыты продолжаются до первого появления события A . Тогда случайная величина X , определяющая число неудач, предшествующих успеху, распределена по геометрическому закону.

Возможные значения этой случайной величины: $0, 1, 2, \dots, n, \dots$, а вероятность каждого из этих значений определяется по формуле

$$P(X = m) = q^m p,$$

где $0 \leq p \leq 1$; $q = 1 - p$; $m = 0, 1, 2, \dots, n, \dots$.

Для случайной величины, распределенной по геометрическому закону,

$$M[X] = \frac{1}{1-p}, \quad D[X] = \frac{1-p}{p^2}, \quad \sigma[X] = \sqrt{\frac{1-p}{p^2}}, \quad \text{mod}[X] = 0.$$

Пример. Вероятность изготовления нестандартного изделия при некотором технологическом процессе равна 0,06. Контролер из отдела технического контроля берет из партии изделие и сразу проверяет его качество. Если оно оказывается нестандартным, то дальнейшие испытания прекращаются, а партия задерживается. Если же изделие оказывается стандартным, то контролер проверяет следующее изделие и т. д. Записать закон распределения случайной величины X – числа стандартных изделий, проверенных до выявления брака.

Решение. Условие задачи соответствует проведению независимых испытаний, в каждом из которых с вероятностью $p = 0,06$ может осуществиться событие $A = \{\text{обнаружено нестандартное изделие}\}$. В этом случае *неудача* – обнаружение стандартного изделия, *успех* – обнаружение нестандартного изделия. Случайная величина X – число стандартных изделий, проверенных до выявления брака, распределена по геометрическому закону. Возможные значения этой случайной величины: $0, 1, 2, 3, \dots, m, \dots$. По условию $p = 0,06$, $q = 1 - 0,06 = 0,94$.

Вероятности значений определяются по формулам:

$P(X = 0) = q^0 p = 0,94^0 \cdot 0,06 = 0,06$ (то есть нестандартное изделие будет обнаружено сразу же при проверке первого изделия, при этом число стандартных изделий, проверенных до появления брака, будет равно 0);

$P(X = 1) = q^1 p = 0,94 \cdot 0,06 = 0,0564$ (то есть нестандартное изделие будет обнаружено при проверке второго изделия, при этом число стандартных изделий, проверенных до появления брака, будет равно 1) и т. д.

Закон распределения случайной величины X можно записать в виде

$$P(X = m) = 0,94^m \cdot 0,06.$$

Распределение Пуассона. Если в схеме Бернулли число испытаний бесконечно велико ($n \rightarrow \infty$), а вероятность успеха в каждом испытании стремится к нулю ($p \rightarrow 0$) таким образом, что $np = \lambda = \text{const}$, то вероятность появления в схеме n испытаний Бернулли ровно k успехов определяется предельной теоремой Пуассона

$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ p \rightarrow 0}} P_n(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$. В данном случае говорят, что случайная величина ξ , определяющая число успехов k в схеме n испытаний Бернулли, имеет Пуассоновский закон распределения, т.е. $\xi \sim \text{П}(\lambda)$.

Таким образом, закон распределения Пуассона является предельным случаем биномиального закона распределения при $n \rightarrow \infty$, $p \rightarrow 0$, $np = \lambda = \text{const}$.

Очевидно, что распределение Пуассона характеризуется единственным параметром $\lambda = np$; а случайная величина ξ , имеющая Пуассоновское распределение, принимает только целые значения на полуинтервале $[0, \infty)$ с вероятностями, определяемыми предельной теоремой Пуассона:

$$P_k = P\{\xi = k\} = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}.$$

Примерами случайных величин, имеющих Пуассоновское распределение, являются число сигналов, поступающих на диспетчерский пульт управления в течение часа, количество обрывов проводов высоковольтных воздушных линий электропередач за год и др. [20].

Основные числовые характеристики случайных величин, которые имеют Пуассоновский закон распределения, определяются следующими выражениями: $M[\xi] = \lambda$; $D[\xi] = \lambda$.

Пример 1. Выпущена партия резисторов 1000 штук. Вероятность того, что резистор имеет брак, $p = 0,003$. Найти вероятность того, что в партии ровно пять бракованных резисторов.

Решение. Вероятность числа бракованных резисторов рассчитывается по формуле Пуассона с параметром $\lambda = np = 1000 \cdot 0,003 = 3$. Значит,

$$P(5) = \frac{3^5}{5!} e^{-3} = 0,1008.$$

Пример 2. Определить вероятность того, что за 1000 ч работы произойдет два отказа в сложном изделии, если известно, что интенсивность отказов $a = 3 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$.

Решение. Находим параметр Пуассоновского распределения и определяем вероятность двух отказов в сложном изделии по формуле Пуассона:

$$\lambda = a p = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 3; \quad P(2) = \frac{3^2}{2!} e^{-3} = 0,224.$$

Экспоненциальное распределение. Говорят, что СВ имеет показательное распределение, если она непрерывна и имеет функцию плотности распределения (рисунок 2.6)

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq 0, \\ \lambda e^{-\lambda x}, & \text{если } x > 0. \end{cases}$$

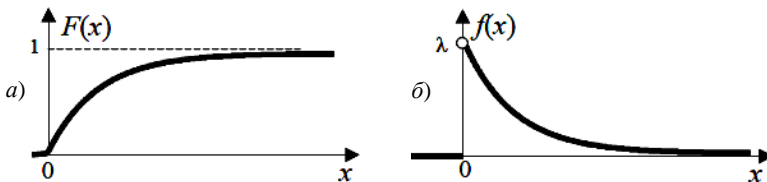


Рисунок 2.6 – Показательный закон распределения
 а – функция распределения $F(x)$ случайной величины ξ ;
 б – функция плотности распределения $f(x)$ случайной величины ξ

Основные числовые характеристики случайной величины ξ , имеющей показательный закон распределения, определяются следующими выражениями:

$$M[\xi] = \sigma[\xi] = 1 / \lambda; \quad D[\xi] = 1 / \lambda^2.$$

Считается, что время наработки различных технических устройств на отказ имеет показательное распределение (наиболее вероятно, что устройство откажет сразу после включения, менее вероятно, что оно проработает долго). Функция надежности $R(t)$ используется в качестве модели вероятности безотказной работы за то же время:

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

где λ – интенсивность отказов.

Плотность вероятности отказов $f(t) = F'(t) = \lambda e^{-\lambda t}$. Среднее время до возникновения отказа или среднее время безотказной работы является математическим ожиданием экспоненциального распределения, т.е. величиной, обратной интенсивности отказов.

Таким образом, зная среднее время безотказной работы $T_{\text{ср}}$ или постоянную интенсивность отказов λ , можно в случае экспоненциального распределения найти вероятность безотказной работы для интервала времени от момента включения элемента, устройства или агрегата до любого заданного момента t .

Равенство среднеквадратического отклонения среднему времени работы – характерный признак экспоненциального распределения.

Пример 1. Время безотказной работы силового трансформатора при перегрузке распределено по экспоненциальному закону $f(t) = 0,02e^{-0,02t}$, где t – время, ч. Найти вероятность того, что трансформатор в перегрузочном режиме проработает безотказно в течение 100 ч.

Решение. В качестве модели вероятности безотказной работы силового трансформатора воспользуемся формулой экспоненциального закона распределения. Значит, $R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,02 \cdot 100} = 0,14$.

Среднее время безотказной работы $T_{\text{ср}} = 1/\lambda = 1/0,02 = 50$ ч.

Пример 2. Определить для трансформатора с высшим напряжением 10 кВ следующие показатели надежности: вероятности безотказной работы, появления отказа и частоту отказов для момента времени $t = 6$ месяцев; среднюю наработку на отказ. Интенсивность отказов трансформатора $\lambda = 0,035$ год⁻¹.

Решение. Численные показатели надежности:

$$P(0,5) = e^{-0,035 \cdot 0,5} = 0,9827; \quad R(t) = 1 - 0,9827 = 0,0173; \quad T = 1 / 0,035 = 28,6 \text{ лет.}$$

Гамма-распределение. В теории надёжности оно применяется для описания характера изменения параметров надёжности в первый период эксплуатации и в период износа. Если отказ устройства или системы возникает тогда, когда происходит не менее k отказов его элементов, а отказы элементов подчинены экспоненциальному закону с параметром λ_0 , плотность вероятности отказа определяется как

$$f(t) = \frac{\lambda_0^k t^{k-1}}{\Gamma(k)} e^{-\lambda_0 t},$$

где λ_0 – исходная интенсивность отказов элементов устройства, отказ которого вызывается отказом k элементов $\Gamma(k) = \int_0^{\infty} x^{k-1} e^{-x} dx$.

Этому распределению подчиняется время работы резервированных устройств, отказ которых вызывается отказом k их элементов.

При $k = 1$ гамма-распределение совпадает с экспоненциальным распределением. При увеличении k гамма-распределение приближается к симметричному распределению, что и показывает рисунок 2.7.

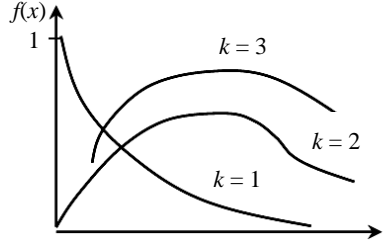


Рисунок 2.7 – Изменение формы функции плотности вероятности

Распределение Вейбулла. В теории надежности распределение Вейбулла применяется в следующей форме:

$$f(t) = \frac{a}{t_0} t^{a-1} e^{-\frac{t}{t_0}^a},$$

где t_0 – приведённое значение среднего времени безотказной работы; $a > 0$ – параметр формы распределения.

Вероятность отсутствия отказов за время t $P(t) = \lambda e^{-\lambda t^a}$.

Интенсивность отказов $\lambda(t) = a \lambda_0 e^{-a-1}$.

Распределение Вейбулла имеет большое значение в теории надёжности. Считается, что время безотказной работы устройств в периоде приработки, когда интенсивность отказов устройства со временем уменьшается (отказы устройства на данном этапе вызваны конструкторскими ошибками, недостаточным качеством монтажа и комплектующих системы), имеет распределение Вейбулла с параметром $\alpha < 1$ (рисунок 2.8), соответствующее убывающей функции плотности вероятности.

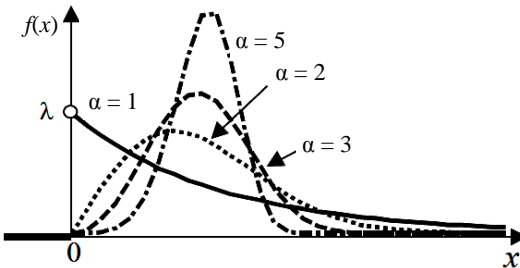


Рисунок 2.8 – Изменение формы функции плотности вероятности распределения Вейбулла в зависимости от a

В периоде нормальной эксплуатации, когда интенсивность отказов устройства постоянна, время наработки устройства на отказ совпадает с показательным распределением (распределение Вейбулла с параметром $\alpha = 1$). На этапе старения, когда интенсивность

отказов устройств возрастает из-за выработки ресурса некоторых компонентов, время наработки устройства на отказ имеет распределение Вейбулла с параметром $\alpha > 1$ [20].

Равномерный закон распределения. Непрерывная случайная величина, которая принимает значения, только принадлежащие отрезку $[a, b]$ с постоянной плотностью распределения, называется распределенной по равномерному закону.

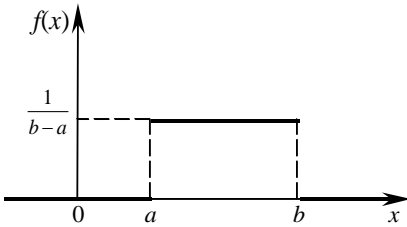


Рисунок 2.9 – График функции $f(x)$ равномерного распределения

Функция плотности распределения вероятностей (рисунок 2.9) определяется соотношением

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < a; \\ \frac{1}{b-a} & \text{при } a \leq x \leq b; \\ 0 & \text{при } x > b. \end{cases}$$

Математическое ожидание случайной величины X , распределенной по равномерному закону на участке $[a, b]$, как следует из механической интерпретации (центр массы), равно абсциссе середины участка: $M[X] = (a + b) / 2$. Дисперсию случайной величины X также можно найти, исходя из механической интерпретации (момент инерции распределения относительно центра массы): $D[X] = (b - a)^2 / 12$.

Примером случайной величины, которая имеет равномерный закон распределения, является время ожидания регулярных событий, например, время ожидания поезда, ошибки округления величин с помощью прибора.

Пример. Поезда метрополитена идут с интервалом в 4 минуты. Пассажир приходит на платформу поезда в произвольный момент времени. Найти вероятность того, что он будет ожидать прихода поезда не более одной минуты. Найти среднее время ожидания поезда пассажиром, вычислить дисперсию и среднее квадратическое отклонение времени ожидания поезда пассажиром.

Решение. Рассмотрим случайную величину X – время ожидания пассажиром поезда. Все возможные значения данной случайной величины принадлежат отрезку $[0; 4]$, и, согласно условию, все эти значения равновозможны. Следовательно, случайная величина распределена по равномерному закону с параметрами $a = 0$ и $b = 4$. Функция плотности распределения вероятностей данной случайной величины:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \in (-\infty; 0) \text{ и } x \in (4; \infty); \\ 0,25 & \text{при } x \in [0; 4]. \end{cases}$$

Найдем вероятность того, что пассажир будет ожидать поезд не более минуты:

$$P(0 \leq X \leq 1) = \int_0^1 f(x) dx = \int_0^1 0,25 dx = 0,25.$$

Среднее время ожидания прихода поезда пассажиром

$$M[X] = (a + b) / 2 = (0 + 4) / 2 = 2 \text{ [мин]}.$$

$$\text{Дисперсия } D[X] = \frac{(b-a)^2}{12} = \frac{(4-0)^2}{12} = 1,333 \text{ [мин}^2\text{]}.$$

$$\text{Среднее квадратическое отклонение } \sigma[X] = \frac{b-a}{2\sqrt{3}} = \frac{4-0}{2\sqrt{3}} = 1,155 \text{ [мин]}.$$

Нормальное (гауссовское) распределение. Случайная величина X называется распределенной по нормальному закону, если ее плотность распределения вероятностей задается формулой

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}},$$

где m – математическое ожидание;

σ – среднее квадратическое отклонение.

Кривая функции плотности вероятности нормального распределения имеет колоколообразную форму, симметричную относительно прямой $x = m$, и при $x \rightarrow -\infty$ и $x \rightarrow \infty$ эта кривая асимптотически приближается к оси абсцисс. Общий вид графика функции плотности распределения вероятностей $f(x)$ для произвольных значений m и σ изображен на рисунке 2.10.

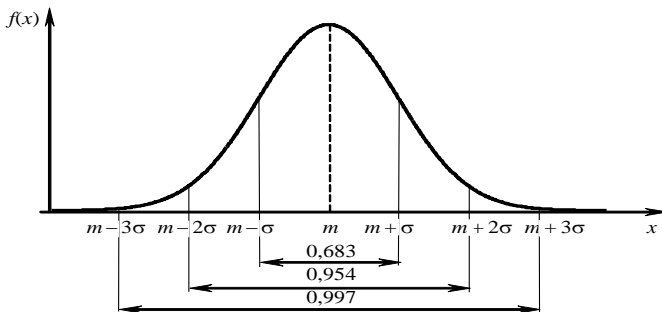


Рисунок 2.10 – График функции плотности распределения вероятностей нормального распределения

Главная особенность этого закона состоит в том, что он является *пределным*; к нему при определенных условиях приближаются другие законы распределения; в теории надёжности применяется для оценки постепенных отказов. Результаты измерения длины, времени, ошибки измерения и многие другие случайные величины имеют нормальное или близкое к нормальному распределение.

С помощью функции Лапласа (табулированная функция) вероятность попадания нормально распределенной случайной величины X на участок от α до β выражается формулой

$$P(\alpha < X < \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - m}{\sigma}\right).$$

Например, пусть производятся измерения некоторой физической величины. Любое измерение дает лишь приближенное значение измеряемой величины, так как на результат испытания оказывают влияние очень многие, не зависящие друг от друга случайные факторы: температурные колебания в помещении, воздействия окружающей среды, неточность измерительной шкалы, смена контрольного персонала и т. д.

В зависимости от источников появления ошибок различают систематические и случайные ошибки.

К *систематическим ошибкам* относятся, например, односторонние отклонения, вызванные, скажем, изменением настройки измерительного прибора или сменой контрольного персонала. Эти ошибки можно устранить путем систематического изучения причины их возникновения.

Случайные ошибки вызваны влиянием множества различных неконтролируемых причин: температурных колебаний, влажности, вибраций в окружающей среде и т. п. Каждый из этих факторов порождает ничтожную «частную ошибку». Но поскольку число этих факторов очень велико, совокупное их действие порождает уже заметную «суммарную ошибку». Полностью исключить воздействие этих факторов невозможно, так как нельзя заранее предусмотреть степень их влияния на результат конкретного измерения. Подобные случайные ошибки вызывают при измерениях отклонения в обе стороны от истинного значения.

Рассматривая общую ошибку как сумму очень большого числа взаимно независимых частных ошибок, мы вправе заключить, что суммарная ошибка имеет распределение, близкое к нормальному. Опыт подтверждает справедливость такого заключения.

Пример. Случайная величина X распределена по нормальному закону с параметрами $M[X] = m$, $\sigma[X] = \sigma$. Найти вероятность того, что случайная величина X будет принимать значения, удаленные от математического ожидания не более чем на σ .

Решение. Для вычисления искомых вероятностей воспользуемся формулой на основе функции Лапласа:

$$\begin{aligned} P(m - \sigma < X < m + \sigma) &= \Phi\left(\frac{m + \sigma - m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{m - \sigma - m}{\sigma}\right) = \Phi(1) - \Phi(-1) = \\ &= 0,34134 - (-0,34134) = 0,68268. \end{aligned}$$

Распределение χ^2 . Случайная величина χ^2 определяется единственным параметром ν , имеет функцию плотности распределения (рисунок 2.11)

$$f(\chi^2) = \begin{cases} 0, & \text{если } \chi^2 < 0, \\ \frac{1}{2^{\frac{\nu}{2}} \Gamma(\nu/2)} (\chi^2)^{\frac{\nu}{2}-1} \cdot e^{-\frac{\chi^2}{2}}, & \text{если } \chi^2 \geq 0, \end{cases}$$

где $\Gamma(\nu/2)$ – гамма функция (интеграл Эйлера второго рода).

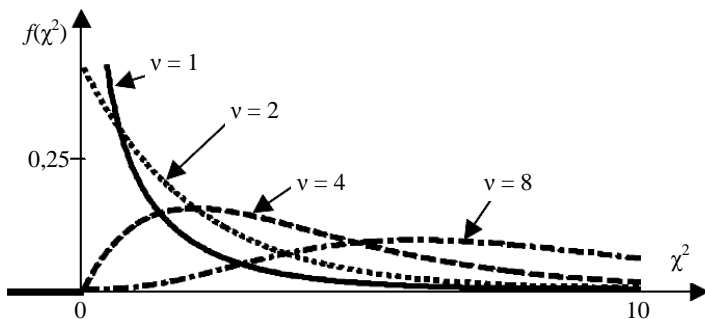


Рисунок 2.11 – Функция плотности распределения χ^2 для различных значений параметра ν

Распределение χ^2 применяется при решении задач, связанных с оценкой параметров надежности, определяемых при испытаниях или эксплуатации оборудования.

Наиболее употребительные законы применительно к электроэнергетике, согласно [21], приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Выражения для оценивания вероятности безотказной работы

Закон распределения отказов элементов	Выражение для вероятности Безотказной работы	Область применения
Экспоненциальный	$P(t) = e^{-\lambda_0 t}$	При наличии <i>внезапных</i> отказов в процессе эксплуатации
Усеченно-нормальный	$P(t) = \frac{\Phi\left(\frac{T_0 - t}{\sigma}\right)}{T / \sigma}$	При наличии постепенных отказов для случаев хранения и длительного использования без восстановления
Гамма	$P(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$	Для описания процессов приработки
Рэлея	$P(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	Для описания процессов старения (износа)

Примечание – T_0 – средняя наработка на отказ.

Изменение интенсивности отказов элементов систем электроснабжения во времени. Типичная функция интенсивности отказов во времени (в течение срока службы объекта) имеет U-образный характер (рисунок 2.12). В начальный период I преобладают приработочные отказы. После него наступает наиболее продолжительный период нормальной эксплуатации II, в котором на объект воздействуют случайные факторы. Последние вызывают внезапные отказы, интенсивность которых в период нормальной эксплуатации практически не зависит от времени.

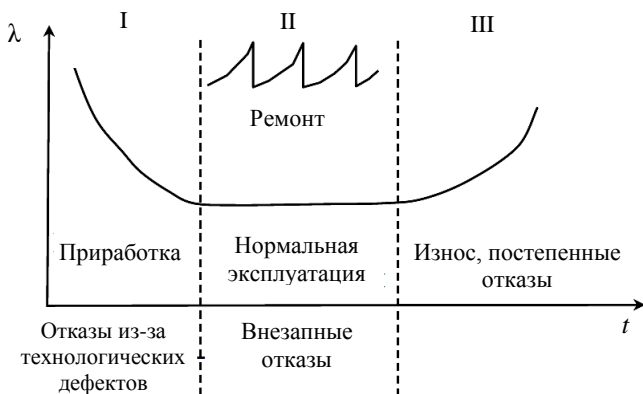


Рисунок 2.12 – Кривая жизни изделия

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 [17, 20].

Средняя наработка на отказ (среднее время безотказной работы) T представляет собой математическое ожидание наработки объекта до первого отказа.

2.1.3 Предельные теоремы теории вероятностей

Предельные теоремы теории вероятностей условно разделяют на две группы: закон больших чисел и центральная предельная теорема.

Закон больших чисел во всех его формах утверждает факт сходимости по вероятности тех или иных случайных величин к определенным постоянным. Говорят, что величина (или функция) $\xi(n)$ *сходится по вероятности* к величине α , если при сколь угодно малом ε вероятность выполнения неравенства $|\xi(n) - \alpha| < \varepsilon$ с увеличением n неограниченно приближается к единице. Другими словами, с увеличением n величина $\xi(n)$ вероятнее приближается к значению α , чем отдалается от него.

Наиболее распространенными формами закона больших чисел являются теорема Бернулли, а также теорема и неравенство Чебышева.

Теорема Бернулли. При неограниченном увеличении числа опытов n относительная частота наступления случайного события A сходится по вероятности к вероятности события A , т.е.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ \left| \frac{n_A}{n} - P(A) \right| < \varepsilon \right\} > 1 - \delta,$$

где n – число повторных испытаний;

n_A – число испытаний, в которых событие A наступило;

$P(A)$ – вероятность события A ;

ε и δ – произвольные сколь угодно малые положительные числа.

Теорема Чебышева является обобщением теоремы Бернулли для случайных величин. Она определяет свойство устойчивости среднего арифметического последовательности значений случайной величины.

Теорема Чебышева: при неограниченном увеличении числа независимых опытов среднее арифметическое наблюдаемых значений случайной величины ξ сходится по вероятности к ее математическому ожиданию, т.е.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ |\bar{x} - M[\xi]| < \varepsilon \right\} > 1 - \delta,$$

где $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ – среднее арифметическое наблюдаемых значений величины ξ ;

$M[\xi]$ – математическое ожидание случайной величины ξ ;

ε и δ – произвольные сколь угодно малые положительные числа.

Неравенство Чебышева. Для произвольной случайной величины ξ с математическим ожиданием $M[\xi]$ и дисперсией $D[\xi]$ справедливо неравенство

$$P\left(\xi - M[\xi] \geq \alpha\right) \leq \frac{D[\xi]}{\alpha^2},$$

где α – произвольное положительное число.

Неравенство Чебышева ограничивает вероятность значительных отклонений случайной величины ξ от своего математического ожидания.

Пример. Пусть случайная величина ξ , характеризующая ошибку округления результата измерения напряжения цифровым вольтметром, имеет равномерный закон распределения на интервале $(-2 \text{ мВ}; 2 \text{ мВ})$, т.е. $\xi \sim R(-2, 2)$. Определить наибольшее значение вероятности, с которой ошибка округления вольтметра отклонится от нуля более чем на $1,75 \text{ мВ}$.

Решение. Согласно формулам для математического ожидания и дисперсии равномерного закона распределения случайной величины ξ , $M[\xi] = (-2 + 2) / 2 = 0 \text{ мВ}$; $D[\xi] = (2 - (-2))^2 / 12 = 1,333 \text{ мВ}^2$. В соответствии с неравенством Чебышева полу-

чим $P(|\xi - 0| \geq 1,75) \leq \frac{1,333}{1,75^2} = 0,4354$, т.е. вероятность того, что ошибка округления ξ превысит (по абсолютной величине) 1,75 мВ не превышает 0,4354.

В действительности эта вероятность определяется выражением

$$P(|\xi| > 1,75) = P(\{-2 < \xi < -1,75\} \cup \{1,75 < \xi < 2\}) = 1 - P(-1,75 < \xi < 1,75).$$

Используя формулу расчета вероятности равномерного распределения, получим

$$1 - P(-1,75 < \xi < 1,75) = 1 - \frac{1,75 - (-2)}{2 - (-2)} + \frac{-1,75 - (-2)}{2 - (-2)} = 1 - \frac{3,75}{4} + \frac{0,25}{4} = 0,125.$$

Следовательно, $P(|\xi| > 1,75) = 0,125$.

Центральная предельная теорема (теорема Ляпунова). Пусть ξ_i , $i = 1, \infty$ – последовательность независимых случайных величин, для каждой из которых существует математическое ожидание $M[\xi_i]$, дисперсия $D[\xi_i]$ и третий центральный абсолютный момент $M[|\xi_i - M[\xi_i]|^3]$. Пусть также вы-

полняется условие Ляпунова $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n M|\xi_i - M[\xi_i]|^3}{\left(\sum_{i=1}^n D[\xi_i]\right)^{3/2}} = 0$, из которого, в частно-

сти, вытекает, что дисперсия каждой из величин ξ_i составляет малую долю суммарной дисперсии, $\sum_{i=1}^n D[\xi_i]$. Тогда при бесконечном увеличении числа n

распределение суммы величин $\eta = \sum_{i=1}^n \xi_i$ неограниченно приближается к нормальному закону распределения с математическим ожиданием $M[\eta] = \sum_{i=1}^n M[\xi_i]$ и дисперсией $D[\eta] = \sum_{i=1}^n D[\xi_i]$.

Все формы центральной предельной теоремы посвящены установлению условий, при которых возникает нормальный закон или другие законы распределения случайных величин.

На основании центральной предельной теоремы можно утверждать, что во всех случаях, когда случайная величина образуется в результате суммирования большого числа независимых или слабо зависимых случайных величин, дисперсия каждой из которых мала по сравнению с дисперсией суммы, распределение этой величины оказывается практически нормальным. Поскольку перечисленные выше условия выполняются достаточно часто, то нормальный закон распределения случайных величин достаточно распространен [18].

Замечание 1. Многими нормативными документами устанавливается, что ошибки физических измерений, которые связаны с погрешностями измерительных приборов, ошибками округлений, в соответствии с центральной предельной теоремой, имеют нормальный закон распределения.

Замечание 2. В теории вероятностей доказывается теорема о том, что закон распределения случайной величины $\eta = \min\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$ при $n \rightarrow \infty$ неограниченно приближается к показательному закону распределения, даже если случайные величины $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ имеют произвольные законы распределения, но принимают лишь положительные значения, т.е. если $\xi = \min\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$, где $\xi_i > 0 \forall i = 1, \dots, n$, то $\lim_{n \rightarrow \infty} \xi = \min\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\} \sim E(\lambda)$.

На основании данной теоремы можно утверждать, что время наработки на отказ систем, содержащих большое количество элементов, отказ каждого из которых приводит к отказу системы в целом, имеет показательный закон распределения, даже если законы распределения времени наработки элементов на отказ отличаются от показательного распределения.

2.1.4 Потоки отказов и восстановлений

Отказ и восстановление – это два противоположных случайных события. На практике, в эксплуатации и при испытаниях, эти события регистрируются во времени. Отрезки времени между этими событиями являются случайными величинами, которые также характеризуют вероятность отказа.

Под **потоком событий** понимается последовательность событий, происходящих одно за другим, в какие-то моменты времени t . События, образующие поток, могут быть и различными. Мы будем рассматривать потоки ординарных событий, различающихся только моментами их появления. Графически *поток отказов и восстановлений* можно представить в виде бесконечно коротких импульсов при «мгновенном» восстановлении (рисунок 2.13, а) либо при конечном времени восстановления (рисунок 2.13, б).

На рисунке 2.13 обозначено: t_{oi} – промежуток времени непрерывной работы между отказами; t_{vi} – промежуток времени, затрачиваемого на восстановление; $t_{\Sigma} = t_o + t_v$ – время между отказами. Число отказов для каждого фиксированного значения $t > 0 - N_o(t)$; число восстановлений для каждого фиксированного $t > 0 - N_v(t)$; $t_{oi}, t_{vi}, t_{\Sigma}, N_o, N_v$ – случайные величины.

Эмпирическая *вероятность отказа* за любой отрезок времени t_o :

$$P(A_{t_o}) = \frac{\sum(t_{oi} < t_o)}{\sum t_{oi}}$$

Аналогично определяется эмпирическая *вероятность восстановлений* за промежуток времени t_v :

$$P(A_{t_v}) = \frac{\sum(t_{vi} < t_v)}{\sum t_{vi}}$$

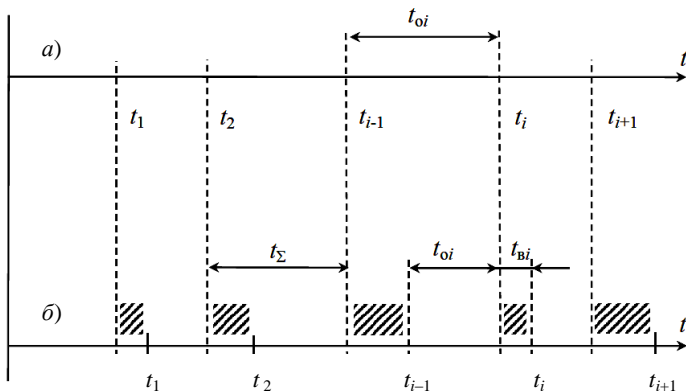


Рисунок 2.13 – Поток отказов и восстановлений при нулевом (а) и конечном (б) времени восстановления

Ряд таких эмпирических оценок даёт представление о функциях распределения случайных величин T_0 и T_B , характеризующих вероятности случайных событий отказа и восстановления. Характеристики функций распределения T_0 , T_B и $(T_0 + T_B)$ полностью описывают надёжность восстанавливаемых изделий с вероятностной точки зрения. Для получения этих характеристик на практике требуется большой объём наблюдений. Поэтому во многих случаях ограничиваются экспериментальными числовыми характеристиками, которые достаточно полно характеризуют надёжность для практических целей.

Фундаментальное значение в теории надёжности имеет *функция восстановления* $H(t)$, которая равна математическому ожиданию числа восстановлений за интервал времени $[0, t]$:

$$H(t) = M [N_B(t)] = \sum_{k=1}^{\infty} k P_k [0, t] = \sum_{k=1}^{\infty} k P_k \{N_B(t) = k\},$$

где $P_k [0, t] = P_k \{N_B(t) = k\}$ – вероятность появления в промежутке $[0, t]$ k восстановлений.

Для процессов с «мгновенным» временем восстановления функция восстановления обозначается $\Omega(t)$ и называется *функцией отказов*. Она представляет собой математическое ожидание числа отказов на интервале $[0, t]$:

$$\Omega(t) = M [N_B(t) = N_0(t)] = \sum_{k=1}^{\infty} k P_k \{N_B(t) = k\}.$$

Важной характеристикой потока является *мгновенный параметр потока* $\omega(t)$, определяемый пределом:

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Omega(t + \Delta t) - \Omega(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Omega(t, t + \Delta t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} k P_k(t, t + \Delta t)}{\Delta t},$$

где $P_k(t, t + \Delta t)$ – вероятность появления на промежутке $(t, t + \Delta t)$ k событий;
 $\Omega(t, t + \Delta t)$ – среднее число событий на промежутке $(t, t + \Delta t)$.

Параметром потока отказов $\omega(t)$ называется среднее число отказов восстанавливаемого объекта в малом единичном интервале работы $\Delta t \rightarrow 0$ около момента t .

Понятие «*мгновенная интенсивность потока*» вводится для невосстанавливаемых объектов, которые могут иметь только одно нарушение работоспособного состояния. Классическим примером такого объекта является электрическая лампочка. *Интенсивность потока отказов* – условная плотность $\lambda(t)$ распределения наработки невосстанавливаемого объекта до отказа в малом единичном интервале около момента t при условии, что до этого момента отказ не возник:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} k P_k(t, t + \Delta t)}{\Delta t}.$$

Восстанавливаемые объекты, какими являются ЭЭС и составляющие их элементы, за время эксплуатации могут иметь много отказов, после которых происходит восстановление их работоспособности. Поэтому для них понятие интенсивности $\lambda(t)$ теряет смысл, так как само условие «отказа до момента t не было» не выполняется – отказы были и были после них восстановления работоспособности, и объекты продолжали работать.

Использование понятия интенсивности отказов для восстанавливаемых объектов возможно, и его часто используют, но при условии, что объект в определенные периоды эксплуатации рассматривается как невосстанавливаемый (например, в период до первого отказа) или после восстановления работоспособности до следующего отказа.

Потоки событий обладают целым рядом свойств. Наиболее простым является *свойство ординарности* потока, когда вероятность совмещения двух или более событий в один и тот же момент времени настолько мала, что практически такое совмещение является невозможным, т.е.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=2}^{\infty} k P_k(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \approx 0.$$

Поток событий является стационарным, если его вероятностный режим не изменяется во времени, т.е. если вероятность появления k отказов на отрезке времени $(t, t + \tau)$ зависит только от τ . Для стационарного потока интенсивность потока ω и параметр потока λ не зависят от времени t : $\omega(t) = \text{const}$; $\lambda(t) = \text{const}$. Если поток событий к тому же и *ординарный*, то и $\omega = \lambda = \text{const}$.

Поток событий называется потоком без последействия, если для любых непрерывающихся интервалов времени число событий, появляющихся в один из них, не зависит от числа событий, появляющихся в другие

интервалы. Ординарные потоки без последствия называются *пуассоновскими потоками*. Такое определение связано с применением для вычисления вероятности наступления k событий за время t формулы Пуассона

$$P_k(t) = \frac{a^k}{k!} e^{-a}.$$

Пуассоновские потоки могут быть как стационарными, так и нестационарными. Если оборудование или установка состоят из большого числа элементов, каждый из которых может отказать лишь с малой вероятностью и эти отказы взаимно независимы, то суммарный поток отказов может считаться близким к простейшему, т. е. обладающему одновременно всеми тремя свойствами – стационарности, без последствия и ординарности.

Нестационарность потока отказов у отдельных типов электроэнергетического оборудования вызывается наличием периода приработки, когда выявляются скрытые дефекты изготовления и монтажа, и наличием старения изоляции, износа и разрегулировки механических частей. Высоковольтное оборудование имеет, кроме того, сезонную нестационарность, связанную с воздействием гроз или гололёда [20].

Для нестационарного пуассоновского потока $a = \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt$.

Для стационарного потока $a = \lambda t$.

Закон Пуассона записывается в виде

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} = \frac{(\omega t)^k}{k!} e^{-\omega t}.$$

Вероятность отсутствия событий за время t ($k = 0$) $R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\omega t}$.

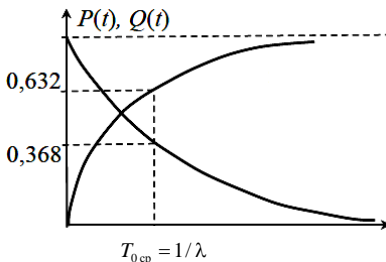


Рисунок 2.14 – Вероятность отказа и безотказной работы при экспоненциальном законе распределения наработки до отказа

Формула $R(t)$ показывает вероятность безотказной работы в случае рассмотрения потока отказов. Вероятность отказа определяется как $Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\omega t} = 1 - R(t)$, т. е. закон распределения времени безотказной работы $T_{0cp} = 1/\lambda$. Функции $Q(t)$ и $P(t)$ (или $R(t)$) имеют вид, представленный на рисунке 2.14.

Закон $Q(t)$ имеет свойство, заключающееся в том, что вероятность безотказной работы не зависит от времени предшествующей работы, а зависит только от рассматриваемого интервала времени. Это значит, что

будущее поведение элемента или объекта не зависит от прошлого, если он в настоящий момент работоспособен. Это свойство является характеристическим, т. е. для объекта с таким свойством закон распределения времени безотказной работы – экспоненциальный, а поток отказов – простейший.

В теории надёжности поток восстановлений характеризуется по аналогии с потоком отказов следующими характеристиками:

- 1) вероятностью восстановления за время t

$$V(t) = P(T_B < t);$$

- 2) вероятностью невозможности восстановления за время t

$$G(t) = 1 - V(t) = P(T_B \geq t);$$

- 3) средним временем восстановления

$$T_{B\text{cp}} = \int_0^{\infty} t V(t) dt;$$

- 4) интенсивностью восстановления $\mu = 1/T_{B\text{cp}}$.

Электроэнергетические установки относятся к восстанавливаемым техническим системам. После отказа установки или её оборудования следует восстановление. Под восстановлением понимается обнаружение повреждения или неисправности и их устранение. Случайная величина времени восстановления складывается из двух составляющих:

$$T_B = T_{\text{во}} + T_{\text{вр}},$$

где $T_{\text{во}}$ – время на обнаружение неисправности;

$T_{\text{вр}}$ – время на устранение неисправности или ремонт.

Закон распределения времени восстановления $V(t)$ для различного оборудования может быть описан экспонентной, гамма-функцией или функцией распределения Вейбулла.

Экспоненциальный закон распределения времени восстановления справедлив при следующих условиях:

- 1) когда восстановление связано с рядом попыток, каждая из которых приводит к необходимому результату с какой-то вероятностью;
- 2) когда плотность распределения времени восстановления убывает с возрастанием аргумента.

Обнаружение неисправности в электротехнической установке осуществляется рядом последовательных проверок и удовлетворяет первому условию. Второму условию соответствует требование быстрого восстановления основной массы отказов. Значительные задержки в восстановлении в энергосистемах наблюдаются относительно редко, что подтверждается аварийной статистикой [20].

2.1.5 Количественная оценка показателей надёжности

Показатели надёжности могут выражаться количественно в единицах наработки, в календарной продолжительности эксплуатации, в вероятностях или в виде отдельных коэффициентов (безразмерных или относительных).

В качестве показателей надёжности чаще всего используются:

1 Вероятность безотказной работы $R(t)$.

2 Вероятность отказа $Q(t) = 1 - R(t)$.

3 Средняя наработка до отказа T_{cp} – среднее значение продолжительности работы неремонтируемого устройства до первого отказа:

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{t_i}{N_0},$$

где t_i – продолжительность работы (наработка) до отказа i -го устройства;
 N_0 – число наблюдаемых устройств.

Пример 1. Наблюдения за эксплуатацией 5 электродвигателей выявили, что первый проработал до отказа 600 ч, второй – 800 и далее соответственно 900, 1400, 700 ч.

Определить наработку двигателей до внезапного отказа.

Решение. По формуле $T_{cp} = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{t_i}{N_0}$ выполним подстановку чисел

$$T_{cp} = \frac{600 + 800 + 900 + 1400 + 700}{5} = 880 \text{ ч.}$$

4 Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – среднее число отказов в единицу времени:

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

где $n(\Delta t)$ – число устройств, отказавших в период времени Δt ;

N – число наблюдаемых устройств;

Δt – период наблюдения.

Вероятность безотказной работы $R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$.

Пример 1. При эксплуатации 10 трансформаторов в течение 20 лет произошло три отказа, причём каждый раз отказывал новый трансформатор. Определить интенсивность отказов трансформатора за период наблюдения.

Решение. Применив формулу для интенсивности отказов, получим

$$\lambda(t) = \frac{3}{10 \cdot 20} = 0,015 \text{ отказа/год.}$$

Пример 2. Изменение числа отказов ВЛ из-за производственной деятельности сторонних организаций по месяцам года представлено в таблице 2.5,

Таблица 2.5 – Изменение числа отказов ВЛ по месяцам года

Месяц	я	ф	м	а	м	и	и	а	с	о	н	д
n	8	8	10	10	7	6	5	4	6	7	7	8

Определить среднемесячную интенсивность отказов.

Решение.

$$N = \sum_1^{12} n_i = 75 = \Omega; \quad \lambda(t) = \frac{\Omega}{12} = \frac{86}{12} = 7,167 \text{ отказов/месяц.}$$

5 Средняя наработка на отказ $T_{0\text{cp}}$ – среднее значение наработки ремонтируемого устройства между отказами, определяемое как среднее арифметическое:

$$T_{0\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i,$$

где t_i – наработка до первого, второго, n -го отказа;

n – число отказов от начала эксплуатации до окончания наблюдения.

Нарработка на отказ, или среднее время безотказной работы, есть математическое ожидание $T_{0\text{cp}}$,

$$T_{0\text{cp}} = \int_0^{\infty} t R(t) dt.$$

Пример. Трансформатор отказал, проработав около года. После устранения причины отказа он проработал еще четыре года и опять вышел из строя. Определить среднюю наработку трансформатора на отказ.

Решение. По формуле $T_{0\text{cp}} = \sum_{i=1}^n t_i / n$, вычислим среднюю наработку трансформатора на отказ $T_{0\text{cp}} = (1+4)/2 = 2,5$ года.

6 Параметр потока отказов $\omega(t)$ – среднее количество отказов ремонтируемого устройства в единицу времени, взятое для рассматриваемого момента времени:

$$\omega(t) = \frac{\sum_{i=1}^N m_i(t+\Delta t) - \sum_{i=1}^N m_i(t)}{N(t) \Delta t},$$

где $m_i(t + \Delta t)$ – число отказов i -го устройства по состоянию на рассматриваемые моменты времени $(t + \Delta t)$ и t соответственно;

$N(t)$ – число устройств;

Δt – рассматриваемый период работы, причём $\Delta t \ll t$.

Пример. Электротехническое устройство состоит из трех элементов. В течение первого года эксплуатации в первом элементе произошло три отказа, во втором – два, в третьем – один.

Определить параметр потока отказов.

Решение. Используя формулу для параметра потока отказов определим следующие составляющие: $\sum_{i=1}^N m_i(t + \Delta t) = 3 + 2 + 1 = 6$, $\sum_{i=1}^N m_i(t) = 0 + 0 + 0 = 0$. Значит,

$$\omega(t) = (6 - 0) / 3 = 1 \text{ год}^{-1}.$$

7 Ресурс – наработка оборудования до предельного состояния, оговоренного в технической документации. Предельное состояние изделия определяется невозможностью его дальнейшей эксплуатации по техническим или экономическим соображениям. Различают: технический ресурс, средний ресурс, ресурс до первого ремонта, межремонтный ресурс, назначенный ресурс.

Среднее значение ресурса рассчитывают по данным эксплуатации или испытаний с использованием уже известного выражения для наработки

$$T_p = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^i T_{pi}.$$

8 Срок службы T_c – календарная продолжительность эксплуатации оборудования до предельного состояния, например, срок службы до первого капитального ремонта; срок службы до списания; межремонтный период.

9 Среднее время восстановления T_b – среднее время вынужденного или регламентированного простоя, вызванного обнаружением и устранением одного отказа:

$$T_b = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n},$$

где i – порядковый номер отказа;

t_i – среднее время обнаружения и устранения i -го отказа.

10 Коэффициент готовности K_r – вероятность того, что оборудование будет работоспособно в произвольно выбранный момент времени в промежутках между выполнениями планового технического обслуживания. При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы $T_{o,cp}$ и времени восстановления $T_{b,cp}$ коэффициент готовности

$$K_r = \frac{T_{o,cp}}{T_{o,cp} + T_{b,cp}}.$$

11 Коэффициент технического использования $K_{ти}$ – это отношение наработки оборудования в единицах времени за некоторый период эксплуатации к сумме этой наработки и времени всех простоев, вызванных, техническим обслуживанием и ремонтами за тот же период эксплуатации:

$$K_{ти} = \frac{\sum T_o}{\sum T_b + \sum T_o}.$$

В энергетике вместо коэффициентов готовности и технического использования применяют коэффициенты аварийного $Q_{ав}$ и планового $Q_{пл}$ простоя, хотя они и не входят в терминологию по надёжности систем энергетики [16]:

$$Q_{ав} = 1 - K_r; \quad Q_{пл} = Q - Q_{ав}; \quad Q = 1 - K_{ти}.$$

2.2 Статистические методы оценки, анализа и контроля надежности

2.2.1 Сбор информации об отказе элементов технических систем

В общем комплексе мероприятий по обеспечению надёжности любого изделия **сбор статистической информации** об отказах и оценка показателей надёжности в условиях эксплуатации являются последним, заключительным этапом. При этом появляется возможность оценить реальные значения показателей надёжности и, следовательно, оценить эффективность мероприятий по обеспечению надёжности на всех этапах: проектирование, производство, испытания, монтаж, эксплуатация. Качество получаемых оценок зависит от того, насколько тщательно организован сбор информации, насколько обеспечены полнота и достоверность информации о наработке и отказах изделия и насколько адекватны и корректны методы её обработки.

Посредством сбора и обработки информации о надёжности изделий промышленности и объектов энергетики решаются следующие задачи:

- определение (контроль) количественных показателей надёжности;
- выявление причин отказов, условий и режимов эксплуатации, влияющих на надёжность;
- определение деталей, сборочных единиц или комплектующих, которые определяют надёжность изделия;
- накопление данных для прогнозирования надёжности вновь создаваемых и находящихся в эксплуатации элементов, изделий и систем;
- установление и корректировка нормируемых показателей надёжности;
- оптимизация норм расхода запасных частей и системы технического обслуживания и ремонта;
- определение экономической эффективности повышения надёжности.

Вопросами сбора и обработки информации о надёжности изделий должны заниматься головные организации и службы надёжности (качества) на предприятиях-изготовителях и предприятиях-потребителях.

Сбор информации может быть организован в форме постоянных наблюдений (сплошных или выборочных) или периодами определенной длительности. Целесообразность использования того или иного источника информации или варианта наблюдения определяется конкретными целями анализа и требованиями к полноте и достоверности получаемой информации с учётом ограничений технического и экономического характера. Например, длительные постоянные наблюдения в подконтрольной эксплуатации позволяют обеспечить высокое качество информации и получить исходные данные для решения всего комплекса перечисленных задач. Однако организация таких наблюдений является трудоёмким и дорогостоящим мероприятием. Поэтому часто информация о надёжности изделий серийного производства собирается с начала их эксплуатации потребителем. Для оценки надёжности изделий, имеющих большой срок службы и выпускае-

мых малыми сериями или уникальных, допускается начать сбор информации с очередного капитального ремонта или профилактического осмотра.

При организации сбора информации о надёжности, как правило, разрабатываются: техническое задание; программа наблюдений; инструкция по проведению работ на предприятиях, охватываемых системой сбора информации; методики анализа и обработки информации.

Попытки увеличить объём информации за счёт расширения парка наблюдаемых изделий или объектов сопряжены с опасностью уменьшения достоверности информации. Достоверность первичной информации обеспечивается полнотой и непрерывностью записей, глубиной и объективностью анализа причин отказов. Важно иметь в виду, что недостоверные первичные данные невозможно улучшить никакой, даже самой тщательной статистической обработкой.

2.2.2 Состав информации

Возможности объективного анализа и обработки статистической информации о надёжности существенно зависят от полноты сведений о каждом отказе (повреждении).

В каждом конкретном случае **состав фиксируемой информации определяется теми задачами, которые предстоит решить**. В общем случае для решения задач необходимо при каждом нарушении работоспособности (функционирования) фиксировать:

- общую наработку и наработку от предыдущего отказа;
- внешние признаки и степень влияния отказа на работоспособность объекта или системы;
- условия среды в момент отказа;
- причину отказа (предполагаемую причину);
- «адресную» информацию;
- данные об оперативности переключения резерва;
- способ и время устранения отказа.

В зависимости от целей анализа объём и характер фиксируемой информации может изменяться. Если оценке подлежат только показатели ремонтпригодности оборудования – свойства, заключающегося в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, устранению их последствий путём проведения технического обслуживания и ремонта, то можно ограничиться только информацией о способах и времени восстановления. Если кроме них оценке подлежат и показатели долговечности, то дополнительно фиксируют характер отказа (например, ресурсный отказ).

Естественно, что работы по сбору информации о надёжности невозможны без четко установленных критериев (признаков) отказов и предельных состояний применительно к каждому типу оборудования (сборочной единицы узла, детали, объекта, системы). Для повышения достоверности ин-

формации (выявления ошибок и искажений в записях) рекомендуется избыточность (дублирование) информации в документах первичного учёта [20].

Формы документов – носители информации о надёжности изделий должны быть по возможности универсальными и соответствовать действующей нормативно-технической документации.

Все формы подразделяются: на первичные формы учёта; формы-накопители; формы записи результатов количественного и качественного анализа. Например: паспорт оборудования; журнал учёта наработок, повреждений и отказов; журнал технического обслуживания и ремонтов; разовые документы по эксплуатации элементов, изделий, агрегатов, систем.

Все виды форм должны предусматривать возможность их обработки программными средствами. Существующими стандартами устанавливается форма донесения об отказе, которая содержит:

1 Адресную информацию: наименование, марку, тип, номер изделия, сведения о предприятии-изготовителе и ремонтном предприятии, дате выпуска, дате ремонта, дате отказа, данные отказавших узлов и деталей.

2 Техничко-экономические данные: сведения о наработке, внешних проявлениях и характере отказа, условиях его выявления, технико-экономических последствиях, условиях эксплуатации и режимах работы, длительности восстановления работоспособности, физической трудоёмкости восстановления, исполнителях работ по восстановлению.

Информация об отказах в проведении ремонтно-восстановительных и плановых ремонтов электроэнергетического оборудования служит также для изучения причин отказов, разработки мероприятий, направленных на повышение качества проектирования, изготовления, монтажа, ремонта и эксплуатации.

Для получения наиболее представительных оценок необходимо объединять данные целого ряда различных объектов. Допустимость такого объединения основывается на проверке гипотезы однородности статистического материала. Для оценок доверительных интервалов и проверки гипотез широко используется распределение χ^2 .

С помощью математической статистики определяется также необходимый объём испытаний для оценки надёжности с заданной точностью и проверяется влияние на надёжность различных факторов (*дисперсионный анализ*) и взаимное влияние случайных параметров друг на друга (*корреляционный анализ*). Наконец, математическая статистика позволяет планировать испытания и исследования так, чтобы получить максимальную информацию при минимальных затратах (*теория экстремальных экспериментов*) [16].

2.2.3 Порядок обработки информации

Собранная в результате наблюдений информация представляет собой совокупность ситуаций, очень разнородных по характеру, причинам воз-

никновения, влиянию на работоспособность оборудования и систем. Поэтому обработка результатов наблюдений в качестве первого обязательного этапа должна включать качественный **анализ информации** (уточнение или отсеивание сомнительных данных, классификация, объединение данных по однотипному оборудованию и т.п.).

В зависимости от целей анализа классификация информации может быть проведена по разным признакам: степени влияния отказа на работоспособность объекта или системы, месту, причинам, отношению к оцениваемым показателям надёжности и т.д. Например, *по степени влияния на работоспособность* могут быть выделены существенные и несущественные отказы, полные и частичные отказы, повреждения, сбои и т.д. Классификация отказов *по причинам* определяется тем, к какому этапу жизненного цикла изделия, объекта или системы относится ошибка или недоработка, ставшая причиной отказа (конструктивная, технологическая, производственная, эксплуатационная). При классификации могут быть выделены отказы, учитываемые и не учитываемые при оценке того или иного показателя надёжности. Если в задачу наблюдений входит оценка показателей надёжности, то результаты наблюдений, «очищенные» предварительной «инженерной» обработкой, подлежат дальнейшей статистической обработке. Статистическая обработка сводится к оценке точечных и интервальных значений показателей надёжности или оценке параметров функции распределения случайных величин, определяющих показатели надёжности, т.е. традиционной задаче математической статистики.

Для этапа статистической обработки несущественно, какое из свойств исследуется – безотказность, долговечность, ремонтпригодность; какими единицами измеряется наработка изделий – количеством часов, циклов работы, мерами объёма (жидкости, газа) и т.п. Наиболее важными для этапа статистической обработки являются такие факторы, как тип оцениваемого показателя надёжности, объём априорных сведений о наблюдаемой случайной величине и характер статистического материала (класс точности используемых приборов, погрешность измерений и т. д.).

Приступая к статистической обработке информации о надёжности, рекомендуется уделить особое внимание *однородности выборки*. С точки зрения методов математической статистики, независимо от того, какое из свойств, определяющих надёжность, исследуется, всё многообразие показателей сводится к показателям двух типов – наработки и вероятности.

При определении *показателя типа наработки* непосредственно наблюдаемыми величинами являются случайные интервалы:

- наработки между отказами;
- наработки до предельного состояния;
- время восстановления;
- время хранения и т.п.

При определении *показателей типа вероятности* непосредственно наблюдаемыми величинами являются случайные числа событий:

- число отказов;
- число восстановлений;
- число предельных состояний и т.д. в общем количестве наблюдений фиксированного объёма.

С точки зрения объёма априорных сведений, *задачи статистической обработки* сводятся к двум вариантам:

1 Вид функции распределения наблюдаемой случайной величины известен априори. В этом случае задача статистической обработки – получение оценок показателей надёжности с учётом вида функции распределения и характера имеющегося статистического материала.

2 Вид функции распределения наблюдаемой случайной величины неизвестен или известен лишь предположительно. В этом случае принимается некоторая гипотеза о виде функции распределения и оцениваются ее параметры. Затем проводится проверка, не противоречат ли данные наблюдений принятой гипотезе. При положительных результатах этой проверки приступают к заключительному этапу обработки.

В такой постановке процесс статистической обработки более трудоёмок и состоит из следующих *этапов*: построение вариационного ряда; построение гистограммы; принятие гипотезы о виде закона распределения; оценка точечных значений параметров для принятия функции распределения; проверка непротиворечивости результатов наблюдений принятой гипотезе; оценка интервальных значений параметров функций распределения и показателей надёжности (при положительных результатах предыдущего этапа).

В случае отрицательного результата процедуры проверки гипотезы процесс статистической обработки повторяется, начиная с этапа принятия гипотезы; при другом предположении о виде функции распределения в некоторых случаях приходится возвращаться к этапу дальнейшего накопления данных.

Одной из особенностей информации в энергетике является то, что результаты наблюдений представляют собой, как правило, выборки, многократно усеченные, т.е. содержат кроме наработок до отказа и безотказные наработки (от начала наблюдений или от последнего восстановления до прекращения наблюдения).

Характер статистического материала определяется в основном порядком: начала и прекращения наблюдений; ремонта (замены) отказавшего элемента; контроля функционирования объекта или системы в условиях эксплуатации. В зависимости от назначения объекта и конкретных условий его эксплуатации перечисленные факторы могут реализовываться в различных вариантах. В частности, контроль функционирования может быть непрерывным, периодическим либо только перед началом и по окончании выполнения некоторого фиксированного задания (объёма работы).

Предусматриваются либо восстановление (замена) отказавших изделий непосредственно после отказов, либо эксплуатация без восстановления отказавших элементов до прекращения наблюдений. Может быть организовано одновременное начало наблюдений для всей совокупности объектов, начало и прекращение наблюдений для отдельных элементов (экземпляров) в разное время. Наблюдения могут быть организованы до отказа всех элементов, части элементов либо до истечения фиксированного времени (наработки). Однако в результате наблюдений (испытаний) получаются лишь *три типа реализаций*:

- 1) полные – наработки до отказа (между отказами или до предельного состояния), или отрезки времени от начала до окончания восстановления;
- 2) неполные – безотказные наработки как результат прекращения наблюдений до наступления отказа (цензурирование);
- 3) условные – наработки на момент контроля, при котором обнаружен отказ (получаются в условиях, когда нет непрерывного контроля функцио-

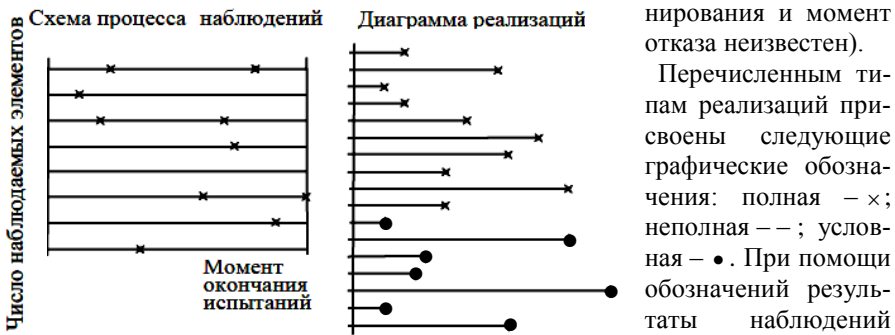


Рисунок 2.15 – Графическая иллюстрация результатов наблюдений

щим набором реализаций – диаграммой реализаций (рисунок 2.15).

Диаграмма реализаций наглядно и однозначно отражает специфику полученного статистического материала и позволяет выбрать адекватные его характеру правила обработки, т.е. правила получения точечных и интервальных оценок параметров функций распределения и показателей надежности.

Вопросы организации наблюдений, инженерной и статистической обработки информации при оценках показателей надежности являются универсальными. Они одинаково применимы к объектам разных отраслей промышленности, в том числе и энергетики, составным частям и элементам оборудования, приборам и комплектующим изделиям. Основными специфическими особенностями являются: чёткое определение объекта исследования; формулировка критериев отказов (критического, существенного, не-

существенного, полного, частичного и т.п.). При определении объекта исследования и формулировке критериев отказа иногда требуется учитывать влияние человека-оператора [20].

2.2.4 Проверка гипотез

Проверка однородности статистического материала. Для более точного определения показателей надёжности и установления видов законов распределения наработки на отказ и других случайных величин необходимо объединять статистические данные, собранные на различных объектах промышленных предприятий и энергосистем. В связи с этим возникает задача проверки однородности статистического материала.

Помимо выборки x_1, x_2, \dots, x_n имеются также взаимно независимые величины x'_1, x'_2, \dots, x'_m , распределённые одинаково и непрерывно, но принадлежащие другой выборке. Объединим эти совокупности, расположив их в порядке возрастания значений $x_1'', x_2'', \dots, x_{n+m}$. Обозначим функцию эмпирического распределения как $G_m(x)$, соответствующую выборке x'_1, x'_2, \dots, x'_m .

Основная гипотеза H_0 , подлежащая проверке, заключается в предположении того, что обе выборки извлечены из одной и той же совокупности, а значения функции распределения величин x и x' одинаковы.

Для проверки нулевой гипотезы используется критерий Вилкоксона, основанный на числе инверсий, под которыми понимается следующее: если какому-либо значению x предшествует некоторый x' , то говорят, что эта пара дает инверсию.

Гипотеза H_0 отвергается, если сумма инверсий u превосходит выбранную в соответствии с уровнем значимости границу, определяемую из расчёта, что при объёмах $n > 10$ и $m > 10$ выборочное число инверсий распределено нормально с центром

$$M(u) = 0,5mn$$

и дисперсией

$$D(u) = (1/12)mn(m + n + 1).$$

Пример. Собраны статистические сведения о повреждаемости воздушных ЛЭП в двух энергосистемах (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Исходные данные двух энергосистем

Обозначение данных энергосистем	Месяц											
	я	ф	м	а	м	и	и	а	с	о	н	д
x	0,8	1,9	3	3,5	3,8	2,5	1,7	0,9	1	2,3	3,3	3,4
x'	1,4	2,1	3,1	3,6	2,7	1,8	1,1	0,2	1,6	2,8	4	4,7

Требуется определить, можно ли считать, что между данными о повреждаемости ЛЭП в разных энергосистемах нет систематических расхождений и что они имеют одинаковые систематические погрешности, т. е. нужно проверить нулевую гипотезу H_0 .

Решение. Располагаем данные в общую последовательность в порядке возрастания повреждаемости (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – **Обобщенный вариационный ряд**

x'	x	x	x	x'	x'	x'	x	x'	x	x'	x'
0,2	0,8	0,9	1	1,1	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2,1	2,3
x	x'	x'	x	x'	x	x	x	x'	x	x'	x'
2,5	2,7	2,8	3	3,1	3,3	3,4	3,5	3,6	3,8	4	4,7

Число инверсий для x

$$u = 1 + 1 + 1 + 4 + 5 + 6 + 6 + 8 + 9 + 9 + 9 + 10 = 69.$$

Находим математическое ожидание и дисперсию:

$$M(u) = 0,5 \cdot 12 \cdot 12 = 72; \quad D(u) = (1/12) \cdot 12 \cdot 12 (12 + 12 + 1) = 300;$$

$$\sigma = \sqrt{D(u)} = 17,3.$$

Задавшись уровнем значимости 5 % и учитывая, что обе энергосистемы являются равноправными, строим критическую область больших по абсолютной величине отклонений, используя значение $t_{0,05} = 1,96$.

Критическая область для гипотезы H_0

$$u \leq 72 - 1,96 \cdot 17,3 \approx 38; \quad u \geq 72 + 1,96 \cdot 17,3 \approx 106$$

Полученное значение инверсии $u = 69$ не лежит в критической области, поэтому гипотеза H_0 не опровергается и нет оснований считать энергосистемы существенно различающимися по аварийности ЛЭП.

Проверка гипотез о законе распределения случайной величины. При проведении статистического исследования экспериментальных данных часто возникает задача подбора закона распределения изучаемой случайной величины X . Например, рассмотрим работу счетчика импульсов микропроцессорной системы управления ЭЭС. Если случайная величина, характеризующая число зарегистрированных импульсов, будет распределена по закону Пуассона, то счетчик находится в рабочем состоянии. Если же случайная величина будет распределяться по иному закону распределения, то счетчик считается неисправным.

Гипотеза о виде закона распределения изучаемой случайной величины обычно выдвигается на основании графического изображения статистического закона распределения, сведений о механизме формирования значений, а также на основании значений оценок числовых характеристик.

Статистическая гипотеза называется параметрической, если в ней сформулированы предположения относительно значений параметров функции распределения известного вида. Если в формулировке гипотезы не встречаются предположения о значениях параметров функции распределения, то такая гипотеза называется непараметрической. Нулевой (H_0) называют выдвинутую гипотезу. Альтернативной (H_a) называется гипотеза, конкурирующая с нулевой гипотезой в том смысле, что если отвергается нулевая гипотеза, то принимается альтернативная.

Суждения относительно истинности (ложности) статистических гипотез формулируются на основании выборки объема n с помощью статистических критериев. Статистическим критерием называется вспомогательная случайная величина K , с помощью которой принимается решение о принятии либо отклонении нулевой гипотезы. При проверке статистических гипотез по выборочным данным всегда существует возможность принятия ложного решения. Это объясняется тем, что объем выборки конечен, и поэтому нельзя точно определить ни вид функции распределения, ни значения параметров. Ошибкой первого рода называется ошибка отклонения верной нулевой гипотезы H_0 , уровнем значимости α статистического критерия – вероятность совершения ошибки первого рода, ошибкой второго рода – ошибка принятия ложной нулевой гипотезы H_0 .

Будем рассматривать только один вид статистических критериев – статистические критерии значимости. Это значит, что будет заранее фиксироваться вероятность совершения ошибки первого рода, и тогда нет необходимости в нахождении ошибки второго рода β . Например, если при отклонении нулевой гипотезы H_0 на уровне значимости $\alpha = 0,05$ мы совершаем ошибку первого рода (считаем правильную нулевую гипотезу H_0 ложной), то в среднем ошибаемся в 5 из 100 случаев применения данного статистического критерия значимости.

Критерий хи-квадрат Пирсона. Если изучается непрерывная случайная величина, то вид гистограммы относительных частот обычно значительно облегчает задачу выдвижения гипотезы H_0 . Например, по виду гистограммы, изображённой на рисунке 2.16, *а*, логично выдвинуть гипотезу о равномерном законе распределения исследуемой случайной величины. Вид гистограмм, приведённых на рисунках 2.16, *б* и 2.16, *в*, напоминает соответственно кривые экспоненциального и нормального законов распределения. Большое внимание при выдвижении гипотез уделяется и вычисленным значениям числовых характеристик.

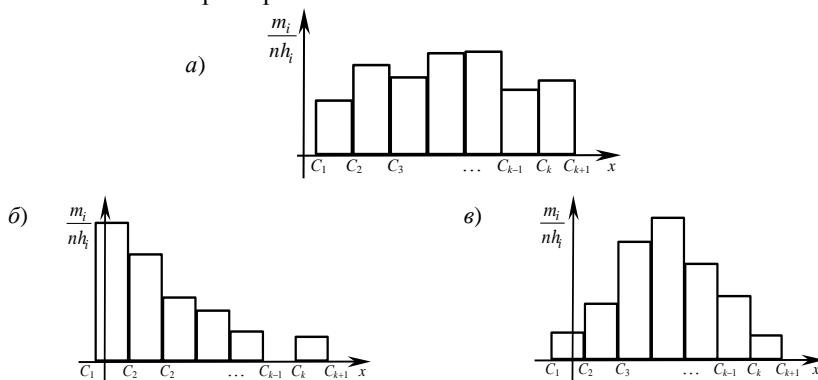


Рисунок 2.16 – Примеры гистограмм относительных частот

Проверка гипотезы о предполагаемом распределении производится с помощью непараметрических критериев значимости. Одной из групп таких критериев значимости являются критерии согласия, с помощью которых проверяются нулевые гипотезы о виде функции распределения случайной величины. Одним из наиболее широко используемых на практике критериев согласия является критерий χ^2 Пирсона. Он может использоваться для проверки гипотез о виде закона распределения как дискретных, так и непрерывных случайных величин [19].

Применение критерия χ^2 основано на сопоставлении эмпирических m_i и теоретических np_i (вычисленных в предположении справедливости проверяемой гипотезы) частот попадания значений исследуемой случайной величины в рассматриваемые частичные разряды. В качестве меры расхождения эмпирического и теоретического распределений используется статистика

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i},$$

которая при $n \rightarrow \infty$ независимо от вида предполагаемого распределения стремится к распределению χ^2 с $\nu = k - r - 1$ степенями свободы (здесь k – число разрядов разбиения, r – число параметров теоретического распределения, оцениваемых по выборке).

Легко заметить, что при незначительных отклонениях значений m_i от np_i значение критерия χ^2 будет близким к нулю. И наоборот, большое значение критерия χ^2 свидетельствует о существенном отклонении значений m_i и np_i .

Необходимыми условиями применения критерия χ^2 являются достаточно большой объем выборки ($n \geq 30$) и отсутствие в теоретическом распределении разрядов с небольшим ($np_i < 5$) числом наблюдений. Для обеспечения последнего условия интервалы, для которых $np_i < 5$, необходимо объединить с соседними. На хвостах распределения допускается значение $np_i \geq 1$.

Алгоритм применения критерия χ^2 для проверки гипотезы о виде закона распределения исследуемой случайной величины:

- 1 Строится статистический закон распределения случайной величины.
- 2 Выбирается уровень значимости α .
- 3 Формулируется гипотеза о виде закона распределения исследуемой случайной величины.
- 4 Вычисляются теоретические вероятности p_i попадания значений случайной величины X в рассматриваемые разряды разбиения:
 $p_i = P(C_i \leq X < C_{i+1}) = F(C_{i+1}) - F(C_i)$, ($i = 1, 2, \dots, k$), где $F(x)$ – гипотетическая функция распределения случайной величины X .

- 5 Определяются значения теоретических частот np_i ($i = 1, 2, \dots, k$). При

необходимости для обеспечения условия $np_i \geq 5$ объединяются несколько соседних разрядов разбиения.

6 Вычисляется выборочное значение критерия χ^2 .

7 По таблице критических точек распределения χ^2 определяется критическое значение $\chi_{\alpha, \nu}^2$, соответствующее заданному уровню значимости α и числу степеней свободы $\nu = k - r - 1$.

Если расчётное значение критерия попадает в критическую область, т. е. $\hat{\chi}^2 > \chi_{\alpha, \nu}^2$, то проверяемая гипотеза отвергается (при этом вероятность отклонения верной нулевой гипотезы равна α).

В случаях, когда наблюдаемое значение $\hat{\chi}^2$ не превышает критического $\hat{\chi}^2 \leq \chi_{\alpha, \nu}^2$, считают, что выдвинутая гипотеза не противоречит опытным данным. Подчеркнем, что полученный результат свидетельствует лишь о приемлемом согласовании проверяемой гипотезы с имеющимися выборочными данными и в общем случае не является доказательством истинности этой гипотезы.

Пример. На основании приведенных опытных данных подобрать закон распределения непрерывной случайной величины X , характеризующей продолжительность работы 50 ламп накаливания (в тысячах часов):

6,421; 5,034; 0,599; 10,687; 26,294; 7,852; 14,040; 8,933; 4,062; 1,573;
 5,455; 2,810; 15,658; 3,692; 1,825; 17,760; 8,030; 3,218; 2,872; 8,247;
 0,417; 1,995; 0,611; 12,059; 0,665; 21,434; 22,102; 10,709; 2,283; 5,649;
 6,773; 30,034; 3,702; 12,834; 2,723; 5,255; 12,595; 3,533; 34,540; 9,238;
 1,673; 24,919; 15,511; 7,154; 1,816; 8,401; 22,239; 2,902; 3,083; 7,176.

Уровень значимости α принять равным 0,05.

Решение. Используя результаты первичной обработки выборочных данных [вид полученной гистограммы (рисунок 2.17) и значения оценок числовых характеристик $\hat{M}[X] = 8,98$, $\hat{\sigma}[X] = 8,34$], а также учитывая сведения о физическом смысле полученных значений, выдвигаем гипотезу о том, что случайная величина X распределена по экспоненциальному закону.

Вычислим оценку параметра экспоненциального закона распределения:

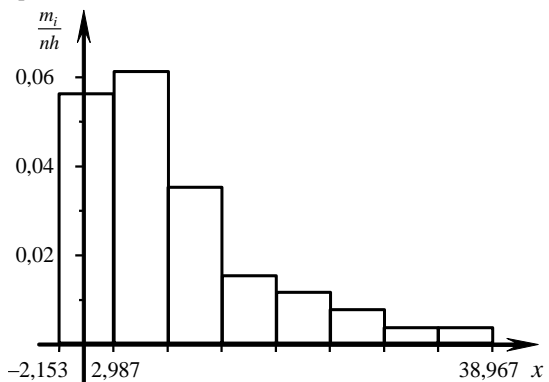


Рисунок 2.17 – Гистограмма относительных частот

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{M[X]} = \frac{1}{8,98} \approx 0,1113.$$

При вычислении вероятностей $p_i = P(C_i \leq X < C_{i+1})$ изменим границы первого и последнего интервалов разбиения (таблица .28).

Таблица 2.8 – Результаты расчета теоретических вероятностей

C_i	$Z_i = e^{-0,1113C_i}$	$P_i = Z_i - Z_{i+1}$
0	1	0,2828
2,987	0,7172	0,3124
8,127	0,4047	0,1763
13,267	0,2284	0,0995
18,407	0,1289	0,0562
23,547	0,0727	0,0317
28,687	0,0410	0,0179
33,827	0,0232	0,0232
∞	0	—
$\sum_i P_i = 1$		

Определим значения теоретических частот и занесём их в таблицу 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты расчета значений теоретических частот

$[C_i; C_{i+1})$	[0; 2,987)	[2,987; 8,127)	[8,127; 13,267)	[13,267; 18,407)	[18,407; 23,547)	[23,547; 28,687)	[28,687; 33,827)	[33,827; ∞)
m_i	14	16	9	4	3	2	1	1
p_i	0,2828	0,3124	0,1763	0,0995	0,0562	0,0317	0,0179	0,0232
np_i	14,140	15,620	8,815	4,975	2,810	1,585	0,895	1,160

Поскольку значения np_i , соответствующие четырем последним интервалам разбиения, не превышают пяти единиц, объединим эти интервалы в один. Вычислим значение критерия χ^2 :

$$\chi^2 = \frac{(14 - 14,140)^2}{14,140} + \frac{(16 - 15,620)^2}{15,620} + \frac{(9 - 8,815)^2}{8,815} + \frac{(4 - 4,975)^2}{4,975} + \frac{(7 - 6,450)^2}{6,450} = 0,252.$$

Критическое значение критерия, соответствующее значениям $\alpha = 0,05$ и $\nu = k - r - 1 = 5 - 1 - 1 = 3$:

$$\chi_{\alpha, \nu}^2 = \chi_{0,05; 3}^2 = 7,82.$$

Поскольку $\chi^2 < \chi_{\alpha, \nu}^2$, можно сделать вывод о том, что проверяемая гипотеза об экспоненциальном законе распределения изучаемой случайной величины X не противоречит экспериментальным данным и нет основания для отклонения нулевой гипотезы.

Критерий «согласия» А. Н. Колмогорова. Он применяется для проверки гипотез $H_0: F_\xi(x) = F^*(x)$ о виде функции распределения только непрерывных случайных величин, когда параметры гипотетической функции распределения $F^*(x)$ точно известны [18].

В отличие от критерия χ^2 Пирсона, где сравниваются гипотетические и эмпирические частоты (np_i и m_i) попадания значений величины в интервалы статистического ряда распределения, критерий «согласия» λ Колмогорова сравнивает гипотетические и эмпирические функции распределения $F^*(x)$ и $\hat{F}(x)$ (рисунок 2.18).

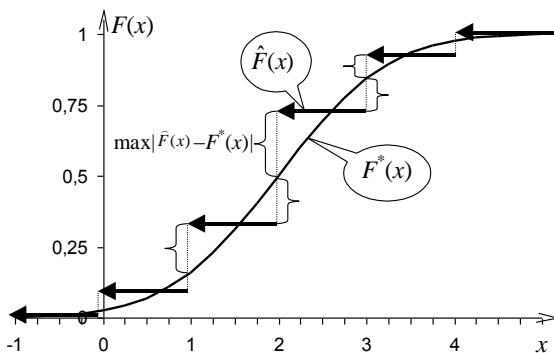


Рисунок 2.18 – Определение максимального отклонения гипотетической и эмпирической функций распределения величины ξ

Для проверки гипотезы используется статистический критерий значимости λ , равный максимальному отклонению эмпирической и гипотетической функций распределения, т.е.

$$\lambda = \max_x |\hat{F}(x) - F^*(x)| \sqrt{n},$$

где $\hat{F}(x)$, $F^*(x)$ – значения эмпирической и гипотетической функций распределения, соответственно;

n – объем выборки.

В случае идеального согласования гипотезы с выборочными данными критерий λ примет значение, равное нулю. В противном случае критерий λ принимает большие положительные значения.

Если наблюдаемое значение $\hat{\lambda}$ меньше критического $\lambda_{\text{крит}}$, определяемого для заданного уровня значимости α и объема выборки n [18, 20], то гипотеза H_0 согласуется с результатами опытов и оснований для ее отклонения нет. В противном случае (когда $\hat{\lambda} > \lambda_{\text{крит}}$) гипотеза H_0 отклоняется, и с вероятностью ошибки α можно утверждать, что верна гипотеза $H_a: F_\xi(x) \neq F^*(x)$.

Несмотря на вышеупомянутые ограничения, критерий λ Колмогорова, по сравнению с критерием χ^2 Пирсона, обладает рядом преимуществ. Во-первых, критерий Колмогорова построен на индивидуальных (а не сгруппированных) значениях случайной величины, поэтому результаты анализа не зависят от способа группировки данных. При этом из исследования исключается субъективный фактор. Во-вторых, критерий λ можно применять для проверки гипотезы о виде распределения случайной величины на основе меньшего объема выборки (от 20–30 элементов).

Пример. Проверим соответствие гипотезы об экспоненциальном распределении данных о поврежденных ЛЭП 220 кВ. Исходные данные: t_i – время безотказной работы, m_i – количество наблюдений и необходимые расчёты сведены в таблицу 2.10.

Таблица 2.10 – Исходные данные и расчеты для проверки гипотезы об экспоненциальном распределении

i	t_i	m_i	$q_i = m_i/n$	$\sum q_i$	$\frac{t_i}{T_{cp}}$	$F = 1 - e^{-\frac{t_i}{T_{cp}}}$	$D(t) = \sum q_i - F $
1	0,091	1	0,143	0,143	0,265	0,233	0,09
2	0,143	1	0,143	0,286	0,385	0,320	0,034
3	0,167	1	0,143	0,429	0,435	0,353	0,076
4	0,2	2	0,286	0,715	0,495	0,390	0,325
5	0,25	1	0,143	0,858	0,575	0,437	0,421
6	1	1	0,143	1	0,965	0,619	0,381
7	1,1	1	0,143	1	0,97	0,621	0,379

Максимальному отклонению $D_n = 0,421$ при $n = 7$ соответствует $\lambda_n = 0,421 \cdot 7^{0,5} = 1,11$.

По таблице значений $P(\lambda)$ критерия Колмогорова при $\lambda_n = 1,11$ $P(0,75) = 0,175$ (с аппроксимацией). Эта вероятность достаточно велика, поэтому гипотеза о экспоненциальном законе распределении имеющихся выборочных данных отвергается.

2.2.5 Точность оценки. Доверительный интервал

Интервальной называют оценку, которая определяется двумя числами – концами интервала. Пусть для параметра a случайной величины получена оценка a^* . Необходимо оценить возможную при этом ошибку; δ – точность оценки.

Надежностью (доверительной вероятностью) называют вероятность, с которой выполняется неравенство $|a - a^*| < \delta$:

$$P(|a - a^*| < \delta) = \beta.$$

Тогда $P(a^* - \delta < a < a^* + \delta) = \beta$.

Ширина доверительного интервала характеризует точность выборочной оценки, а доверительная вероятность β – достоверность оценки. Чем меньше

β , тем шире доверительный интервал. В энергетике β принимается обычно в пределах 0,8–0,99 [20].

Пример. За год эксплуатации зарегистрировано $m = 21$ случайных отказов воздушных выключателей $U = 330$ кВ при отключении ими коротких замыканий. Число эксплуатируемых выключателей в этом году составляло $N = 1750$ шт. Оценить средний параметр потока отказов и его доверительные границы с доверительной вероятностью $\beta = 0,95$.

Решение. Примем гипотезу об экспоненциальном распределении для наработки на отказ, используя следующие выражения:

$$\chi_{\beta; 2m}^2 = \chi_{0,95; 42}^2 = 58,124; \quad \chi_{1-\beta; 2m}^2 = \chi_{0,05; 42}^2 = 28,144;$$
$$\lambda_n = \frac{\chi_{\beta; 2m}^2}{2N} = \frac{58,124}{2 \cdot 1750} = 1,66 \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}; \quad \lambda_n = \frac{\chi_{1-\beta; 2m}^2}{2N} = \frac{28,144}{2 \cdot 1750} = 0,8 \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}.$$

2.2.6 Регрессионные модели системы двух случайных величин

Часто в практике инженерных и научных исследований результат испытания характеризуется набором случайных величин, т. е. многомерной случайной величиной. Например, влияние погодных условий характеризуется температурой, давлением, влажностью, направлением и скоростью ветра.

Многомерные случайные величины характеризуются многомерными законами распределения. Наряду с числовыми характеристиками, применимыми для одномерных СВ (математическим ожиданием, дисперсией и др.), многомерные случайные величины определяются дополнительными числовыми характеристиками, описывающими зависимость между ее компонентами.

В дальнейшем ограничимся рассмотрением двумерной СВ (X, Y), компоненты X и Y которой фактически являются одномерными СВ.

Зависимость между случайными величинами, при которой каждому значению x случайной величины X однозначно ставится в соответствие единственное значение y СВ Y , называется *функциональной*. Например, зная напряжение U на участке электрической цепи сопротивлением R , можно однозначно определить величину тока ($I = U/R$); зная скорость движения поезда v , можно однозначно определить время T его движения по перегону.

Однако часто на практике одному значению СВ X может соответствовать не одно, а множество значений СВ Y , характеризующихся для каждого $X = x$ условным распределением с плотностью вероятностей $f(y|X=x)$. Такая зависимость называется *статистической*. Примером статистической зависимости является зависимость величины потребления электроэнергии на перегоне электровозом (Y) от массы поезда (X), т.к. одному значению массы состава могут соответствовать различные значения потребления электроэнергии (кроме массы состава на электропотребление влияют скорость движения, профиль и состояние пути, состояние подвижного состава, направление и скорость ветра и прочие факторы).

Таким образом, при фиксированном значении x_i влияющей величины X значения зависимой величины Y по-прежнему являются случайными и определяются условным законом распределения (при условии, что $X = x_i$). Изменение условного закона распределения СВ Y при изменении значения X может проявляться как при изменении вида распределения (рисунок 2.19, а), так и при изменении его числовых характеристик (рисунок 2.19, б), например, математического ожидания.

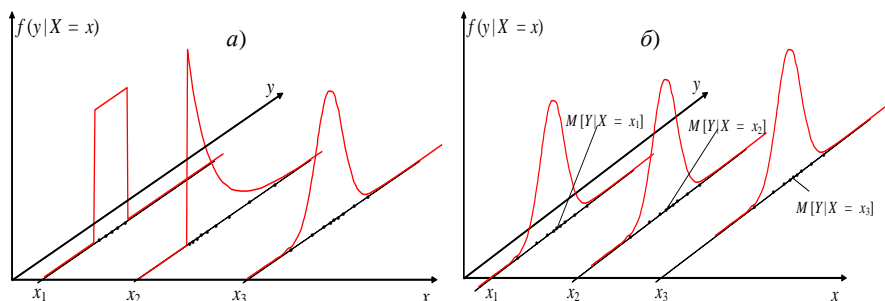


Рисунок 2.19 – Примеры статистической зависимости: с изменением вида закона распределения (а), с изменением только лишь математического ожидания (б)

Если условный закон распределения [например, $f(y|X=x)$] одной из величин не изменяется при изменении значения другой случайной величины X , то такие величины называются *независимыми*. Например, температура воздуха Y завтра в полдень не зависит от напряжения на вольтметре X . Независимыми являются случайные величины, не связанные причинно-следственными связями.

Исследование зависимостей между случайными величинами является наиболее часто используемым приложением математической статистики и применяется главным образом для предсказания значения одной СВ по значению другой. Чаще всего ограничиваются изучением *регрессионной* зависимости, которая каждому значению одной СВ ставит в соответствие условное математическое ожидание другой СВ $M[Y|X=x]$. Предметом *регрессионного* анализа является нахождение вида уравнения регрессионной зависимости между случайными величинами. Предметом же *корреляционного* анализа является оценка тесноты связи между СВ, а также оценка качества описания зависимости выбранным уравнением регрессии [19].

Регрессионный анализ. Пусть дана выборка значений двумерной СВ $(X, Y) = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)\}$, где n – объем двумерной выборки. Первым шагом в построении эмпирического уравнения регрессии между СВ является графическое отображение значений двумерной СВ в виде точек $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ на плоскости X - Y , называемое *диаграммой рассеяния* (корреляционным полем) (рисунок 2.20).

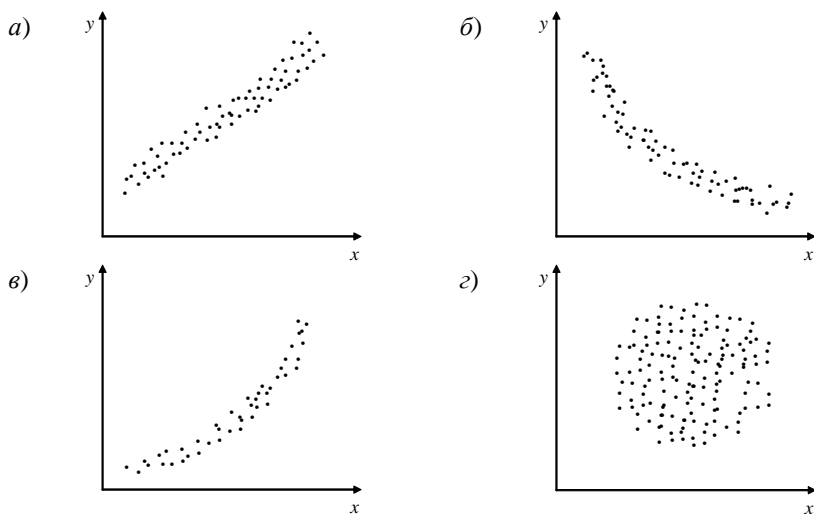


Рисунок 2.20 – Диаграмма рассеяния, соответствующая линейной (а), экспоненциальной (б), параболической (в) регрессионной зависимости и отсутствию регрессионной зависимости (г)

Визуальный анализ диаграммы рассеяния и предметная постановка задачи (физический смысл рассматриваемых величин) позволяет сделать предположение о виде уравнения регрессии. Если предполагается, что зависимость между СВ X и Y линейна (рисунок 2.20, а), то теоретическая модель регрессионной зависимости между СВ задается уравнением

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i, \quad i = \overline{1, n},$$

где y_i – i -е выборочное значение СВ Y ;

β_0, β_1 – параметры линейной регрессии, требующий определения;

x_i – i -е выборочное значение СВ X ;

e_i – ошибка, вызванная отклонением i -го наблюдения СВ Y от условного среднего $M[Y|X=x_i]$. Ошибки e_i обуславливаются упрощением вида зависимости Y от X (без учёта всех влияющих факторов), а также возможной ошибкой в выборе формы регрессии (в действительности она может описываться другим уравнением).

Метод наименьших квадратов. Для оценивания параметров уравнения регрессии β_0, β_1, \dots наиболее часто применяется метод наименьших квадратов (МНК). Идею МНК продемонстрируем на примере определения параметров линейной регрессионной зависимости.

Для случая линейной регрессии оценки параметров $\hat{\beta}_0$ и $\hat{\beta}_1$ получаются минимизацией по $\hat{\beta}_0$ и $\hat{\beta}_1$ суммы квадратов отклонений e_i выборочных зна-

чений СВ Y от значений, предсказываемых уравнением регрессии Y на X . Полученные значения $\hat{\beta}_0$ и $\hat{\beta}_1$ называются оценками параметров регрессии и вычисляются по формулам

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad \hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x}; \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i.$$

В результате оценка уравнения линейной регрессии (эмпирическое уравнение линейной регрессии, прямая, полученная МНК) будет иметь вид

$$\bar{y}(x) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x.$$

Метод наименьших квадратов применим для оценивания параметров уравнений регрессии произвольного вида (гиперболической, параболической, экспоненциальной, логарифмической и т. д.).

Пошаговый регрессионный анализ. В случае, если по виду диаграммы рассеяния сложно выдвинуть предположение о виде регрессионной зависимости, рекомендуется использовать пошаговый регрессионный анализ. Для этого уравнение регрессии выбирают как можно более сложным, содержащим большое количество слагаемых. Например,

$$\bar{y}(x) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 / x + \hat{\beta}_2 x + \hat{\beta}_3 x^2 + \hat{\beta}_4 x^3 + \hat{\beta}_5 e^x.$$

Стандартная пошаговая процедура позволяет в записанном уравнении регрессии выбрать те слагаемые, совокупность которых достаточно качественно предсказывает среднее значение зависимой СВ, и отбросить те слагаемые, которые существенно не улучшают предсказание СВ Y .

Особенно полезен пошаговый регрессионный анализ в случае множественной регрессии, когда СВ Y зависит от нескольких независимых случайных величин X_1, X_2, X_3 и т. д. При этом пошаговая процедура позволяет из множества влияющих (независимых) СВ исключить несущественные и тем самым упростить уравнение регрессии (данную процедуру можно реализовать в программах статистической обработки данных, например, Statistica или Statgraphics [1, 2]).

Корреляционный анализ. Помимо предположения о форме уравнения регрессионной зависимости между случайными величинами и нахождения параметров уравнения исследователю необходимо оценить, насколько удачно выбранная регрессионная модель объясняет существующую зависимость между исследуемыми СВ.

Коэффициент корреляции. Основной числовой характеристикой, определяющей тесноту линейной связи между двумя случайными величинами, является коэффициент корреляции

$$r = \frac{M[XY] - M[X]M[Y]}{\sigma[X]\sigma[Y]},$$

где $M[XY]$ – математическое ожидание произведения СВ X и Y .

Коэффициент корреляции является безразмерной величиной и может принимать значения из интервала $-1 \leq r \leq 1$. Для линейно независимых случайных величин X и Y коэффициент корреляции равен нулю. Чем теснее линейная зависимость между двумя СВ, тем больше коэффициент корреляции отличается от нуля. Экстремальные значения -1 или 1 коэффициента корреляции соответствуют линейной функциональной зависимости между двумя СВ (отрицательной и положительной соответственно). Положительная зависимость указывает на увеличение значения одной величины при увеличении значения другой величины. Например, стаж и производительность труда рабочих; время подготовки к экзамену и полученная оценка. Для отрицательной зависимости характерно уменьшение значения одной из величин при увеличении значения другой величины.

Таким образом, можно говорить, что коэффициент корреляции характеризует тесноту линейной регрессионной зависимости между двумя СВ, т. е. близость ее к линейной функциональной зависимости. По заданной двумерной выборке оценку коэффициента корреляции \hat{r} можно найти по формуле

$$\hat{r} = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}.$$

Коэффициент детерминации. Для характеристики качества описания зависимости между двумя СВ произвольным уравнением регрессии используется коэффициент детерминации \hat{R}^2 . Чем лучше линия регрессии аппроксимирует точки на диаграмме рассеяния, тем больше значение \hat{R}^2 и тем надежнее уравнение регрессии может быть применено для практических расчетов.

Оценка коэффициента детерминации может принимать значения в интервале от нуля до единицы ($0 \leq \hat{R}^2 \leq 1$) и определяется выражением

$$\hat{R}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}(x_i) - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

где n – объем выборки;

$\bar{y}(x_i)$ – значение СВ Y , предсказываемое уравнением регрессии;

$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ – безусловное среднее СВ Y ;

y_i – i -е выборочное значение СВ Y .

Отметим, что коэффициент детерминации не является мерой какой-либо зависимости априорно (как это справедливо для коэффициента корреляции, который всегда характеризует степень линейной зависимости между двумя СВ), он лишь оценивает степень приближения выбранного уравнения регрессионной зависимости к действительной зависимости между двумя СВ. Близость коэффициента детерминации к нулю указывает на то, что выбранное уравнение регрессии (модель зависимости) незначимо объясняет существующую зависимость между СВ. Равенство же коэффициента детерминации единице указывает на то, что выбранное уравнение регрессии полностью (однозначно) определяет зависимость между СВ. Если значение коэффициента детерминации больше 0,7, то считают, что выбранное уравнение регрессии хорошо описывает зависимость, существующую между случайными величинами. Если же коэффициент детерминации меньше 0,3, то уравнение регрессии незначительно описывает зависимость между случайными величинами, если таковая существует.

Проверка значимости оценок коэффициентов корреляции и детерминации. Оценки коэффициентов корреляции и детерминации сами являются случайными величинами, так как для различных выборок из одной и той же генеральной совокупности могут принимать различные значения. При малых объемах выборок эти различия будут особенно существенными. Поэтому при нахождении оценок коэффициентов корреляции и детерминации используется проверка значимости этих оценок, которая позволяет сделать вывод о существенности описания действительной зависимости выбранным уравнением регрессии.

Проверка значимости \hat{r} . Чтобы сделать статистический вывод о значимости оценки коэффициента корреляции (при проверке линейной регрессионной зависимости) выдвигается нулевая гипотеза об отсутствии линейной зависимости между исследуемыми СВ (т. е. $H_0: r = 0$; $H_a: r \neq 0$). Если гипотеза H_0 отклоняется, то считается, что уравнение регрессии Y на X действительно имеет линейный вид.

Для проверки гипотезы H_0 вычисляется t -статистика:

$$\hat{t} = \hat{r} \sqrt{\frac{n-2}{1-\hat{r}^2}}.$$

При условии справедливости гипотезы H_0 рассчитанная t -статистика имеет распределение Стьюдента с $n-2$ степенями свободы. Значение \hat{t} сравнивается с критическим значением $t_{\alpha, \nu}$ при $\nu = n-2$ степенях свободы. Если расчетное значение \hat{t} по абсолютной величине превосходит табличное для заданного уровня значимости α , то нулевая гипотеза H_0 о линейной независимости двух СВ отклоняется, и с вероятностью ошибки α можно утверждать, что существует линейная зависимость.

Проверка значимости \hat{R}^2 . При выполнении процедуры проверки значимости оценки коэффициента детерминации выдвигается нулевая гипотеза о том, что предложенное уравнение регрессии никак не отражает реальную зависимость между СВ, т. е. при $H_0 \hat{R}^2 = 0$. Альтернативная гипотеза заключается в том, что выбранная модель зависимости (уравнение регрессии) $\bar{y}(x_i)$ в достаточной степени объясняет действительную зависимость между случайными величинами, т. е. при $H_a \hat{R}^2 > 0$.

Для проверки значимости оценки коэффициента детерминации используется статистика

$$\hat{F} = \hat{R}^2 \frac{n-m}{(m-1)(1-\hat{R}^2)},$$

имеющая \hat{F} -распределение Фишера с $v_1 = m - 1$ и $v_2 = n - m$ степенями свободы. Здесь m – число неизвестных параметров предполагаемого уравнения регрессии ($\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{m-1}$). Значение статистики, вычисленное по формуле, сравнивается с критическим значением $F_{v_1, v_2, \alpha}$, найденным по таблицам квантилей распределения Фишера при заданном уровне значимости и соответствующем числе степеней свободы. Если $\hat{F} > F_{v_1, v_2, \alpha}$, то нулевая гипотеза отклоняется, вычисленный коэффициент детерминации значимо отличается от нуля, и с вероятностью ошибки α можно утверждать, что между исследуемыми величинами существует зависимость предложенного вида, и полученное уравнение регрессии может использоваться в дальнейших исследованиях.

Пример. По результатам десяти совместных измерений скорости движения электровоза X , км/ч, и соответствующего потребления электроэнергии Y , МВт·ч/100 км, представленных в таблице 2.11, следует исследовать зависимость между данными величинами с целью прогнозирования величины потребления электроэнергии электровоза при заданной скорости движения.

Таблица 2.11 – Исходные данные

X	40,23	19,63	29,01	89,14	74,96	57,89	34,33	21,01	16,69	9,24
Y	50,66	67,82	60,95	65,53	46,84	52,91	43,71	70,52	67,02	89,96

Решение. На величину потребления электроэнергии электровозом Y , помимо скорости движения X , влияние оказывает масса состава, профиль и качество железнодорожного полотна, качество подвижного состава, направление и скорость ветра и другие факторы. Поэтому зависимость между величиной потребления электроэнергии электровозом Y и скоростью движения X является статистической: на одной скорости движения при различных дополнительных условиях потребление электроэнергии электровозом может принимать различные значения. Диаграмма рассеяния исследуемых величин представлена на рисунке 2.22.

Характер расположения точек на диаграмме рассеяния позволяет сделать предположение о параболической регрессионной зависимости

$$\bar{y}(x) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x + \hat{\beta}_2 x^2.$$

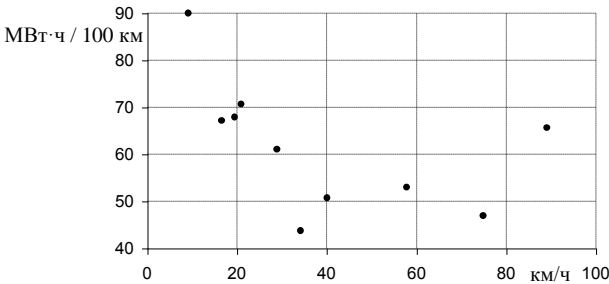


Рисунок 2.21 – Диаграмма рассеяния случайных величин X и Y

Оценки параметров β_0 , β_1 и β_2 найдем методом наименьших квадратов:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i - \hat{\beta}_0 n - \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i - \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0; \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i - \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_i - \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 - \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 = 0; \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 - \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 - \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 - \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 = 0. \end{cases}$$

Для вычисления значений сумм составим расчетную таблицу 2.12.

Таблица 2.12 – Результаты промежуточных вычислений

N	x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$	x_i^3	x_i^4	$x_i^2 y_i$
1	40,23	50,66	1618,45	2038,05	65110,36	2619389,79	81990,82
2	19,63	67,82	385,34	1331,31	7564,16	148484,53	26133,55
3	29,01	60,95	841,58	1768,16	24414,24	708257,06	51294,31
4	89,14	65,53	7945,94	5841,34	708301,06	63137956,13	520697,42
5	74,96	46,84	5619,00	3511,13	421200,36	31573178,98	263194,03
6	57,89	52,91	3351,25	3062,96	194003,98	11230890,64	177314,75
7	34,33	43,71	1178,55	1500,56	40459,58	1388977,51	51514,37
8	21,01	70,52	441,42	1481,63	9274,24	194851,70	31128,95
9	16,69	67,02	278,56	1118,56	4649,10	77593,50	18668,83
10	9,24	89,96	85,38	831,23	788,89	7289,33	7680,57
Σ	392,13	615,92	21745,5	22484,9	1475766	1111086869,2	1229617,6

После подстановки значений система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} 615,92 - 10\hat{\beta}_0 - 392,13\hat{\beta}_1 - 21745,47\hat{\beta}_2 = 0; \\ 22484,93 - 392,13\hat{\beta}_0 - 21745,47\hat{\beta}_1 - 1475765,97\hat{\beta}_2 = 0; \\ 1229617,6 - 21745,5\hat{\beta}_0 - 1475765,97\hat{\beta}_1 - 1111086869,2\hat{\beta}_2 = 0. \end{cases}$$

Решив систему уравнений известными методами или с помощью MATHCAD, получим следующее решение: $\hat{\beta}_0 = 103$; $\hat{\beta}_1 = -2,096$; $\hat{\beta}_2 = 0,01875$, а уравнение регрессии примет вид

$$\bar{y}(x) = 103 - 2,096x + 0,01875x^2.$$

На рисунке 2.22 представлена диаграмма рассеяния случайных величин X и Y с нанесённой линией регрессии.

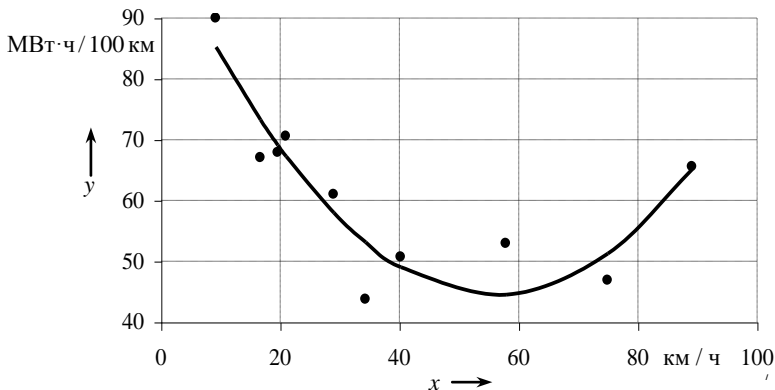


Рисунок 2.22 – Диаграмма рассеяния случайных величин X и Y с нанесённой линией регрессии

Оценим качество описания зависимости между потреблением электроэнергии электровозом (Y) и скоростью его движения (X) полученным уравнением регрессии с помощью коэффициента детерминации:

$$\hat{R}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}(x_i) - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 0,8447.$$

Расчётное значение коэффициента детерминации $\hat{R}^2 = 0,844708$ указывает на удовлетворительность описания зависимости между величиной скорости (X) и потреблением электроэнергии (Y), выбранным уравнением регрессии. Проверим, однако, значимость оценки коэффициента детерминации с помощью статистики Фишера:

$$\hat{F} = 0,8447 \cdot \frac{10 - 3}{(3 - 1)(1 - 0,8447)} = 19,04.$$

Вывод. Критическое значение статистики Фишера для степеней свободы $v_1 = 3 - 1 = 2$ и $v_2 = 10 - 3 = 7$ и уровня значимости $\alpha = 0,05$ составляет $F_{0,05;2;7} = 4,737$. Поскольку расчётное значение статистики Фишера больше критического ($\hat{F} = 19,03818 > 4,737 = F_{0,05;2;7}$), то вычисленный коэффициент детерминации значимо отличается от нуля, и выбранное уравнение регрессионной зависимости может быть использовано в практических целях.

2.2.7 Элементы дисперсионного анализа

На современном этапе развития теории вероятностей, основными причинами случайности (непредсказуемости) явлений считаются невозможность учета всех факторов, влияющих на рассматриваемое явление, и ограниченная точность физических измерений.

При прогнозировании случайных явлений исследователи стараются учитывать как можно большее количество влияющих факторов. Например, при определении температуры окружающей среды на следующий день учитывается температура за прошедшую неделю, влажность, давление, расположение атмосферных фронтов, скорость и направление ветра, температура в прилегающих областях, фаза луны, солнечная активность и другие факторы. Однако учесть все факторы (например, солнечную активность) бывает сложно или невозможно. Поэтому ограничиваются лишь значимо влияющими факторами. Вопрос о значимости влияния (в частности, случайную величину) тех или иных факторов может быть решен методами *дисперсионного анализа*.

Основной целью дисперсионного анализа является проверка свойств распределения некоторой случайной величины, основанное на выборочных данных. Происхождение названия “дисперсионный анализ” связано с тем, что при исследовании статистической значимости различия между средними двух (или нескольких) групп на самом деле сравниваются (т. е. анализируются) их выборочные дисперсии.

Сущностью дисперсионного анализа является расчленение общей дисперсии на части, одна из которых обусловлена случайной ошибкой (то есть внутригрупповой изменчивостью), а вторая связана с различием средних значений. Последняя компонента дисперсии затем используется для анализа статистической значимости различия между средними значениями. Если это различие значимо, нулевая гипотеза отвергается и принимается альтернативная гипотеза о существовании различия.

Переменные, значения которых определяются с помощью измерений в ходе эксперимента (например, количество отказавших транзисторов), называются *зависимыми* переменными. Переменные, которыми можно управлять при проведении эксперимента (например, значение напряжения, тока, частоты, температуры) называются *факторами* или *независимыми* переменными (дисперсионный анализ удобно выполнять в программах статистической обработки данных, например, Statistica или Statgraphics [1, 2]).

В зависимости от количества учитываемых факторов дисперсионный анализ может быть одно- или многофакторным. Предметом *однофакторного дисперсионного анализа* является проверка того, зависит ли математическое ожидание случайной величины ξ от некоторого фактора. Например, влияет ли форма импульсов электромагнитных помех на помехоустойчивость компьютера системы управления.

Многофакторный дисперсионный анализ позволяет проверить, оказывают ли влияние на математическое ожидание случайной величины ξ определенные факторы (которые можно варьировать в ходе эксперимента), а также выбрать наиболее важные факторы и оценить степень их влияния. Например, какие из факторов (частота импульсов помех, их длительность, амплитуда, форма, каналы проникновения и пр.) значительно ухудшают качество работы электронного оборудования, и, следовательно, какие меры должны быть предприняты для увеличения помехозащищенности и помехоустойчивости оборудования в первую очередь.

Однофакторный дисперсионный анализ. Идея однофакторного дисперсионного анализа заключается в разложении общей дисперсии (разброса) случайной величины ξ на два независимых слагаемых – факторную дисперсию (разброс, порождаемый воздействием исследуемого фактора A) и остаточную дисперсию, обусловленную другими неучтенными воздействиями, т.е. $D[\xi] = D_{\text{факт}} + D_{\text{ост}}$. Чем сильнее фактор A влияет на значение величины ξ в массе всех влияющих факторов, тем больше факторная дисперсия $D_{\text{факт}}$ по отношению к остаточной дисперсии $D_{\text{ост}}$. В результате сравнения факторной и остаточной дисперсий по критерию Фишера $F = D_{\text{факт}} / D_{\text{ост}}$ приходят к выводу о значимости влияния фактора A .

С целью изучения влияния фактора A на случайную величину ξ результаты эксперимента разбиваются в зависимости от вариации фактора A на k групп по n_i измерений в каждой. Результаты измерений обозначаются через x_{ij} , где i – номер уровня фактора A ($i = \overline{1, k}$), j – номер результата измерения на данном уровне ($j = \overline{1, n_i}$).

На основе имеющейся статистической информации требуется проверить нулевую гипотезу H_0 : $M[\xi|A_1] = M[\xi|A_2] = \dots = M[\xi|A_k]$ о равенстве условных математических ожиданий величины ξ при различных значениях уровня фактора A против альтернативной гипотезы H_a о том, что не все условные математические ожидания совпадают (а следовательно, их различия вызваны различием уровней влияющего фактора A).

Проверка нулевой гипотезы основывается на вычислении статистического критерия значимости

$$F = \frac{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k ((x_i - \bar{x})^2 n_i)}{\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - x_i)^2},$$

который, при условии справедливости гипотезы H_0 , имеет распределение Фишера с $\nu_1 = k - 1$ и $\nu_2 = n - k$ степенями свободы.

Если значение критерия значимости F окажется больше критического F_{α, ν_1, ν_2} , определяемого квантилем распределения Фишера с ν_1 и ν_2 степеня-

ми свободы уровня α [17], то с вероятностью ошибки, меньшей α , можно утверждать, что гипотеза $H_0: M[\xi|A_1] = M[\xi|A_2] = \dots = M[\xi|A_k]$, неверна (не все условные математические ожидания равны между собой). Следовательно, с вероятностью ошибки, меньшей α , можно утверждать, что значения исследуемого фактора A влияют на значения случайной величины ξ .

Замечание. Дисперсионный анализ основан на нескольких допущениях [18]:

- 1) результаты измерений x_{ij} внутри i -й группы имеют нормальный закон распределения;
- 2) внутригрупповые дисперсии результатов измерений x_{ij} при различных уровнях фактора A одинаковы, т.е. $D_1 = D_2 = \dots = D_k$.

Примечание – Приведенные условия выполняются в случае, когда количество неучтенных факторов велико, а их совместное действие на величину ξ компенсируется (в соответствии с центральной предельной теоремой) и не зависит от значений уровней фактора A . Выполнение второго условия можно проверить с помощью статистического критерия значимости Бартлетта [5].

Пример. Методом однофакторного дисперсионного анализа проверить влияние помехозащитных мероприятий на качество работы микроконтроллера (МК). Испытания проходили 24 микроконтроллера, из них 10 – незащищенных, 7 – с экранированным корпусом и 7 – с заземленным корпусом. Количество сбоев каждого из МК (в процессе испытания) представлено в таблице 2.13 и на рисунке 2.23.

Таблица 2.13 – Результаты испытаний микроконтроллеров

Помехозащитные меры	Номер образца										Число образцов в группе
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Количество сбоев образца в процессе испытания										
1 Без защиты	11	9	18	11	17	12	14	16	15	9	10
2 Экранирование	9	11	15	8	9	6	10				7
3 Заземление	11	5	8	9	7	4	10				7

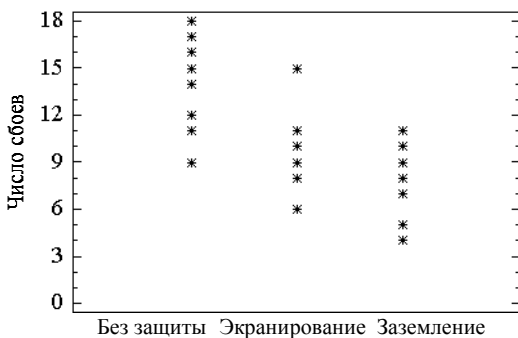


Рисунок 2.23 – Результаты испытаний микроконтроллеров

Рассмотрим случайную величину ξ – количество сбоев МК в процессе испытания. Для проверки влияния помехозащитных мероприятий на качество работы МК выдвинем нулевую гипотезу о том, что математические ожидания числа сбоев МК при проведении различных помехозащитных мероприятий не отличаются, т. е. при H_0

$$M[\xi | \text{без мероприятий}] = M[\xi | \text{экранирование}] = M[\xi | \text{заземление}].$$

Альтернативная гипотеза состоит в том, что помехозащитные мероприятия изменяют математическое ожидание числа сбоев, т.е. влияют на качество работы МК.

Для проверки нулевой гипотезы вычислим значение статистического критерия значимости \hat{F} . Здесь n – число испытываемых МК ($n = 24$), k – число групп МК ($k = 3$), n_1 – число МК в 1-й группе (помехонезащищенных, $n_1 = 10$), n_2 – число МК во 2-й группе (использующих экранирование, $n_2 = 7$), n_3 – число МК в 3-й группе (использующих заземление, $n_3 = 7$); x_{ij} – число сбоев j -го образца из i -й группы МК, x_i – выборочное среднее число сбоев МК i -й группы.

$$x_1 = (11+9+18+\dots+15+9)/10 = 13,2; \quad x_2 = (9+11+15+\dots+6+10)/7 = 9,714;$$

$$x_3 = (11+5+8+\dots+4+10)/7 = 7,714;$$

$$\hat{F} = \frac{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k ((x_i - \bar{x})^2 n_i)}{\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - x_i)^2} = \frac{\frac{1}{3-1} ((13,2-10,583)^2 \cdot 10 + (9,714-10,583)^2 \cdot 7 + (7,714-10,583)^2 \cdot 7)}{\frac{1}{24-3} ((11-13,2)^2 + \dots + (9-13,2)^2 + (9-9,714)^2 + \dots + (10-7,714)^2)} = \frac{65,688}{8,6884} = 7,56.$$

Найдем критическое значение критерия значимости, как квантиль распределения Фишера уровня $\alpha = 0,05$ с $v_1 = k - 1 = 3 - 1 = 2$ и $v_2 = n - k = 24 - 3 = 21$ степенями свободы. Поскольку расчетное значение критерия значимости \hat{F} больше критического ($\hat{F} = 7,56 > F_{0,05;2;21} = 3,467$), то с вероятностью, меньшей $\alpha = 0,05$, можно утверждать, что проводимые помехозащитные мероприятия существенно влияют на качество работы МК в условиях внешних электромагнитных помех.

В то же время перечисленные помехозащитные меры могут оказаться несущественными для защиты МК от воздействия помех, поступающих по цепям питания, для чего необходимы дополнительные исследования.

Подобным образом может быть проверена значимость влияния технологий производства и обслуживания на надежность электронных устройств уровня зарплаты и стажа на производительность труда и пр.

Многофакторный дисперсионный анализ. Многофакторный дисперсионный комплекс – это совокупность исходных наблюдений, позволяющих статистически оценить действие и взаимодействие нескольких изучаемых факторов на изменчивость результативного признака. Эффект взаимодействия составляет ту часть общего варьирования, которая вызвана различным действием одного фактора при разных градациях другого. Специфическое действие сочетаний в эксперименте выявляется тогда, когда при одной градации первого фактора второй действует слабо или угнетающе, а при другой градации он проявляется сильно и стимулирует развитие результативного признака. Например, исследуется вероятность отказа вакуумного выключателя от количества срабатываний, температуры, различной мощности

привода, параметров настройки расцепителей минимального напряжения и максимального тока косвенного действия и других влияющих факторов.

Дисперсионный анализ данных многофакторного комплекса проводится в два этапа. Первый этап – разложение общей вариации результативного признака на варьирование вариантов и остаточное: $C_Y = C_V + C_Z$. На втором этапе сумма квадратов отклонения для вариантов разлагается на компоненты, соответствующие источникам варьирования: главные эффекты изучаемых факторов и их взаимодействия. В двухфакторном опыте $C_V = C_A + C_B + C_{AB}$, в трехфакторном – $C_V = C_A + C_B + C_C + C_{AB} + C_{AC} + C_{BC} + C_{ABC}$.

Дисперсионный анализ двухфакторного анализа по изучению градаций фактора A (число вариантов l_A) и градаций фактора B (число вариантов l_B), проведенного в n опытах, осуществляется в следующие этапы:

1 Определяются суммы и средние по вариантам и по опыту.

2 Вычисляются общая сумма квадратов отклонений, сумма квадратов для вариантов и остатка:

$$N = l_A l_B n; C = (\sum X)^2 / N; C_Y = \sum X^2 - C; C_V = \sum (V^2 / n) - C; C_Z = C_Y - C_V.$$

3 Для вычисления сумм квадратов по факторам A , B и взаимодействию AB составляется вспомогательная таблица, в которую записываются суммы по вариантам. Суммируя цифры, находятся суммы A , суммы B и вычисляются суммы квадратов отклонений для главных эффектов и взаимодейст-

вия: $C_A = \sum \frac{A^2}{l_B n} - C; C_B = \sum \frac{B^2}{l_A n} - C; C_{AB} = C_V - C_A - C_B.$

Если взять отношения частных дисперсий к общей, получим равенства

$$\frac{C_V}{C_Y} + \frac{C_Z}{C_Y} = \frac{C_Y}{C_Y} = 1; \quad \frac{C_A}{C_Y} + \frac{C_B}{C_Y} + \frac{C_{AB}}{C_Y} + \frac{C_Z}{C_Y} = \frac{C_Y}{C_Y} = 1.$$

Каждое из этих отношений будет показывать долю участия отдельной частной дисперсии в образовании общей дисперсии. А так как каждая частная дисперсия соответствует одному из частных влияний, то отношение частной дисперсии к общей измеряет долю данного влияния в общем суммарном статистическом влиянии всех факторов, определяющих развитие данного результативного признака.

Поэтому доля (выраженная в относительных единицах или в процентах) каждой частной дисперсии в общей их сумме может быть принята за показатель силы влияния, того влияния, которое характеризуется данной частной дисперсией – или одной из факториальных, или случайной.

Таким образом, сила влияния фактора (факторов) в дисперсионном анализе измеряется отношением дисперсий частных к общей: $\eta_i^2 = C_i / C_Y$.

Отношение одной из факториальных дисперсий (C_V , C_A , C_B , C_{AB}) или случайной дисперсии (C_Z) к общей (C_Y) можно назвать основным показателем силы влияния факторов – организованных и неорганизованных.

2.2.8 Контроль показателей качества и надёжности

При массовом производстве электротехнических изделий (различного рода реле, контакторов, низковольтных выключателей, предохранителей, сигнальных и осветительных ламп и т.п.) нет возможности для тщательной проверки каждого. При мелкосерийном производстве (например, высоковольтной аппаратуры) такая проверка может быть экономически нецелесообразной. В этих случаях проводится выборочный **статистический контроль** качества и надёжности, когда о генеральной совокупности судят по выборочной. Статистический контроль может проводиться либо в процессе производства (текущий, предупредительный контроль), либо по окончании цикла производства (приёмочный контроль).

Приёмочный контроль осуществляется у изготовителя (*выходной* контроль) и у потребителя изделий (*входной* контроль). Если качество контролируемых изделий характеризуется совокупностью результатов измерений, составляющих функцию от некоторого аргумента (возможно, векторного), то такой контроль называют контролем по функциональному признаку [20].

Есть **три наиболее распространённых метода контроля**: однократной выборки, двукратной выборки, последовательных испытаний.

При методе однократной выборки из контролируемой партии изделий отбирается случайным образом выборка фиксированного объёма n . Все изделия из выборки проверяют. Если d – число обнаруженных в выборке дефектных изделий – не более приёмочного числа c , то принимают решение D_j – принять партию; если $d > c$, то принимают решение D_i – забраковать партию (направить на сплошной контроль или переделку).

При методе двукратной выборки из контролируемой партии изделий также случайным образом вначале берут случайную выборку объёма n_1 . По характеристикам качества и надёжности этой выборки принимается одно из трёх решений (нижний индекс соответствует номеру выборки):

- 1) принять партию (решение D_j), если число $d_1 \leq c_1$;
- 2) забраковать партию (решение D_i), если $d_1 \geq r_1$;
- 3) произвести ещё одну выборку объёма n_2 , если $c_1 > r_1$.

Пусть d_2 – число дефектных изделий, обнаруженных во второй выборке, тогда, если $d_1 + d_2 \leq c_2$, то партию принимают с решением D_j .

Если $d_1 + d_2 \geq r_2$, то партию бракуют.

При методе последовательных испытаний объём испытаний заранее не задаётся. Из контролируемой партии последовательно, но случайным образом берутся изделия (по одному или по несколько) и определяются их характеристики качества и надёжности. По этим характеристикам принимается одно из трёх решений: 1) принять партию; 2) забраковать партию; 3) продолжить испытания. Испытания заканчиваются, когда принимается первое или второе решение.

3 МОДЕЛИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ

3.1 Классификация отказов

Событие, заключающееся в **нарушении работоспособности оборудования**, называется отказом.

Процессы, снижающие работоспособность объекта, по признаку скорости протекания можно разделить на три группы [10, 11]:

1) быстропротекающие, имеющие периодичность изменения, составляющую малую долю продолжительности рабочего цикла объекта. К ним можно отнести:

- вибрации деталей и узлов;
- колебания уровня рабочих нагрузок и другие процессы, искажающие рабочий цикл объекта;

2) средней скорости, имеющие периодичность, сравнимую с длительностью рабочего цикла объекта. Они приводят к монотонному изменению выходных параметров объекта. Например:

– необратимый процесс изнашивания режущего инструмента (интенсивность изнашивания инструмента значительно превосходит интенсивность изнашивания деталей подвижных сопряжений);

– обратимые процессы тепловых деформаций, обусловленные как диссипацией энергии рабочих процессов, так и суточными колебаниями температуры окружающей среды.

Обратимые процессы (в отличие от необратимых) временно изменяют выходные параметры объекта без тенденции прогрессивного ухудшения. Следует отметить, что в ряде случаев обратимый процесс может инициировать необратимый процесс, приводящий к накоплению повреждений, например, тепловая деформация изоляции может привести к межвитковому замыканию, т. е. отказу;

3) медленные, с периодичностью, сравнимой с длительностью межремонтного периода. К ним можно отнести:

- процессы изнашивания деталей подвижных сопряжений;
- процессы старения материалов изоляции;
- процессы коррозии;
- загрязнение трущихся поверхностей деталей.

Обычными методами борьбы с последствиями медленных процессов являются периодические ремонты и технические обслуживания.

Виды повреждений объектов и их составных частей и соответствующие им отказы можно разбить на две группы:

– допустимые, возникающие при нормальных условиях эксплуатации (износ режущего инструмента, поломки деталей предохранительных устройств и т. п.). Полностью устранить этот вид повреждений невозможно, но можно замедлить их проявление;

– недопустимые, возникающие из-за дефектов или случайных неконтролируемых внешних причин, непосредственно не связанных с техническим состоянием объекта (аварии, стихийные бедствия и т. п.).

Под дефектом понимается каждое отдельное несоответствие объекта установленным требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, снижающее его уровень надежности. Следует отметить, что объект, имеющий дефект, может находиться в работоспособном состоянии. Дефект рассматривается как возможная причина возникновения отказа, но наличие дефекта не означает, что отказ произошел.

По стадии происхождения дефекты можно разделить на три группы:

1) дефекты (ошибки) проектирования, например:

- недостаточная защищенность микросхем при повышении напряжения;
- неправильный выбор материалов;
- неправильное определение предполагаемого уровня эксплуатационных нагрузок и т. п.;

2) дефекты изготовления (производственные):

- электронных приборов (тепловые пробой из-за импульсных перегрузок по обратному напряжению);
- механической обработки (заусенцы и т. п.);
- сборки (повреждения поверхностей, задиры, перекосы и т. п.);

3) дефекты эксплуатации:

- нарушение условий применения;
- неправильное техническое обслуживание и ремонт;
- наличие перегрузок;
- применение некачественных эксплуатационных материалов.

Как уже указывалось, отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Можно дать классификацию отказов по ряду критериев (таблица 2.14) [9, 10, 12].

Таблица 2.14 – Классификация отказов

Признак классификации	Вид отказа
Характер изменения параметра до отказа	Внезапный Постепенный
Степень потери полезных свойств	Полный Частичный
Восстанавливаемость полезных свойств	Необратимый Обратимый
Связь с другими отказами	Зависимый Независимый
Причины возникновения	Конструкционный Технологический Эксплуатационный

Возможность дальнейшего функционирования объекта после возникновения отказа. По этому признаку различают отказы:

– *функционирования*, при которых объект перестает выполнять свои функции (в результате поломок, теплового пробоя и т. п.);

– *параметрические*, характеризующиеся отклонением хотя бы одного рабочего параметра объекта за пределы допуска. При этом у технологических систем в результате параметрического отказа сохраняется функционирование, но происходит выход одного или нескольких показателей качества за пределы, допускаемые в документации.

Возможность последующего использования объекта после возникновения отказа. По этому признаку отказы бывают:

– *полные* – отказы, после которых использование объекта по назначению невозможно (для восстанавливаемых объектов использование невозможно до восстановления);

– *частичные* – отказы, после возникновения которых объект может быть использован по назначению, но с меньшей эффективностью или когда вне допустимых пределов находятся значения не всех, а одного или нескольких выходных параметров объекта.

Связь между отказами объекта. По этому признаку различают отказы:

– *независимые* – отказы, не обусловленные другими отказами или повреждениями объекта;

– *зависимые* – отказы, обусловленные другими отказами или повреждениями объекта.

Наличие внешних проявлений отказа. По этому признаку бывают отказы:

– *явные*, обнаруживаемые визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения по назначению;

– *скрытые*, не обнаруживаемые визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемые при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики.

Большинство параметрических отказов относятся к категории скрытых.

В зависимости от причины возникновения различают отказы:

– *конструктивные*, из-за несовершенства конструкции или нарушения установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования;

– *производственные*, происходящие из-за несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления или ремонта;

– *эксплуатационные*, связанные с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации;

– *деградационные*, обусловленные естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

Время возникновения отказа. В этом случае выделяют отказы:

- *при испытаниях*;
- *приработочные* (см. рисунок 2.12);
- *периода нормальной эксплуатации* (см. рисунок 2.12);
- *периода старения* (см. рисунок 2.12).

Возможность устранения отказа. По этому признаку отказы бывают:

- *устранимые*;
- *неустранимые*.

В литературе наиболее изученными являются следующие **модели отказов**.

1 Модель мгновенных повреждений (внезапные отказы). Если предположить, что отказ элемента происходит при превышении нагрузкой (или иным входным воздействием) допустимого уровня, то вследствие случайного характера изменения нагрузки момент отказа также является случайным и не зависит от того, сколько времени элемент уже находился в эксплуатации [13].

2 Модель накапливающихся изменений (постепенные отказы). Постепенное старение и (или) износ элементов приводит к изменению значений их рабочих параметров. Выход показателей качества функционирования системы за допустимый предел влечет за собой отказ изделия [9, 10].

3 Модель релаксации. Эта схема наблюдается в тех случаях, когда старение и (или) износ могут явиться косвенной причиной отказа. Например, отказ резервных электронных элементов приводит иногда к перегрузке основных элементов и к отказу системы.

4 Модель действия нескольких независимых причин. Три перечисленных выше способа часто реализуются в сочетании друг с другом.

5 Модель действия нескольких зависимых причин.

3.2 Аналитические методы анализа надежности

3.2.1 Последовательное и параллельное соединения элементов систем электроснабжения

Одна из основных задач теории надежности – определение показателей надежности систем по известным значениям показателей надежности ее элементов. Для решения данной задачи, прежде всего, нужно формально описать условия работоспособности системы в зависимости от условий работоспособности ее элементов. Это можно сделать несколькими способами:

- словесным описанием;
- графически (например, с помощью структурной схемы надежности, дерева отказов или графа состояний);
- аналитически (с помощью, например, функций алгебры логики);
- имитационным моделированием объекта исследования.

Словесное описание условий работоспособности системы является наиболее распространенным и простым, однако достаточно громоздким и не-

достаточно четким. Словесное описание обычно сопровождается другими способами задания условий работоспособности систем. Аналитическое описание условий работоспособности является наиболее полным, четким и однозначным [9].

Последовательное соединение. Простейшей системой, с точки зрения теории надёжности, является комплект элементов, при котором отказ одного элемента вызывает отказ всей системы, но не изменяет надёжность других элементов. Такую структуру в теории надёжности называют системой с последовательным соединением элементов.

Вероятность безотказной работы такой системы определяется как вероятность безотказной работы всех элементов в течение времени t :

$$P(t) = P\left(\prod_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n P_i(t),$$

где n – число элементов последовательно соединенной системы;

A_i – событие безотказной работы;

$P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента.

Выразим $P_i(t)$ через интенсивность отказов λ :

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x) dx} = e^{-\sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(x) dx}, \text{ отсюда } \lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t).$$

Структурой из последовательно соединённых элементов можно моделировать надёжность электрических цепей с последовательным соединением аппаратов, проводов, кабелей, воздушных линий, а также схем, содержащих обмотки и контакты реле, резисторы, тиристоры, катушки индуктивности, электронные приборы.

Пример. Рассмотрим блочные схемы питания однотрансформаторных подстанций 110 кВ (рисунок 3.1). Отказ системы электроснабжения таких подстанций вызывается отказом любого из элементов системы. Частоты отказов этих элементов приведены в таблице 3.1.

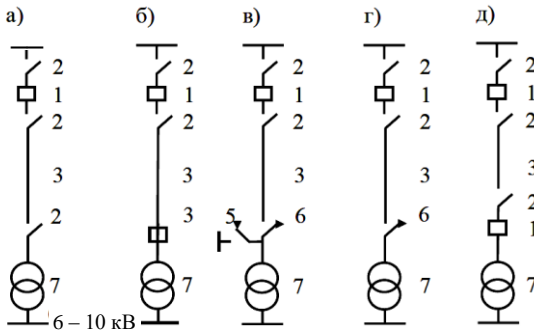


Рисунок 3.1 – Схема питания однотрансформаторных подстанций

Таблица 3.1 – Частоты отказов элементов однострансформаторных подстанций

N	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda, \text{год}^{-1}$	0,02	0,01	1	0,02	0,01	0,01	0,01

В соответствии с формулой модели последовательного соединения вычислим частоту погашения подстанций при всех вариантах схемы электроснабжения:

а) $\lambda_C = \lambda_1 + 3\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_7 = 1,06 \text{ год}^{-1}$;

б) $\lambda_C = \lambda_1 + 3\lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_7 = 1,08 \text{ год}^{-1}$;

в) $\lambda_C = \lambda_1 + 3\lambda_2 + \lambda_5 + \lambda_7 = 1,08 \text{ год}^{-1}$;

г) $\lambda_C = \lambda_1 + 3\lambda_2 + \lambda_6 + \lambda_7 = 1,07 \text{ год}^{-1}$;

д) $\lambda_C = \lambda_1 + 3\lambda_2 + \lambda_7 + \lambda_7 = 1,08 \text{ год}^{-1}$.

Эти результаты показывают, что наибольшей надёжностью обладает схема а), также отметим доминирующее влияние повреждаемости воздушной линии λ_3 .

Структурой из последовательно соединённых элементов можно также моделировать надёжность схем с параллельным соединением элементов (конденсаторных батарей, если они не имеют индивидуальных предохранителей; схем с разъединителями и выключателями, отходящими от сборных шин).

Пример. Рассмотрим схему секции РУ – 6 кВ, от которой питается 21 отходящая линия. Частота отказов с короткими замыканиями для выключателей оценивается величиной $\lambda_{\text{в}} = 0,003 \text{ год}^{-1}$, а частота отказов с коротким замыканием для сборных шин $\lambda_{\text{ш}} = 0,03 \text{ год}^{-1}$.

Решение. Частота кратковременных погашений секции из-за коротких замыканий на шинах и выключателях составляет

$$\lambda_c = 22 \lambda_{\text{в}} + \lambda_{\text{ш}} = 22 \cdot 0,003 + 0,03 = 0,096 \text{ год}^{-1}.$$

Таким образом, частота погашений секции 6 кВ определяется числом присоединений и надёжностью выключателей.

Параллельное соединение. Параллельное соединение линий и других цепей, а также параллельная работа нескольких агрегатов (генераторов, насосов, компрессоров и т.д.) моделируется структурой с параллельным соединением элементов.

Параллельное соединение в смысле надёжности имеет система из n элементов или единиц оборудования, если для нормальной работы необходимы r работоспособных элементов и $n - r$ элементов являются резервными. Отказ системы наступает при условии выхода из строя m элементов, т.е. пока число резервных элементов превышает число отказавших, система не отказывает. Отказ $(n - r + 1)$ элементов вызывает отказ всей системы, если эти отказы произошли одновременно или состояния отказов совпали во времени. В случае невозстанавливаемых элементов вероятность отказа системы определяется как вероятность совпадения отказов $(n - r + 1)$ или m элементов в течение расчётного времени.

Если отказы одного элемента не зависят от отказов других, то формула вероятности отказа системы при условии равной надёжности элементов

$$Q(t) = \sum_{k=m}^n C_n^k p^{n-k} q^k,$$

где $C_n^k = \frac{n!}{(n-k)!k!}$ – количество комбинаций для отказа всей системы.

$$\text{Тогда вероятность безотказной работы } P(t) = \sum_{k=r}^n C_n^k p^k q^{n-k}.$$

Условие взаимонезависимости отказов элементов выполняется в том случае, если при изменении числа находящихся в работе элементов не наблюдается их значительной перегрузки [20].

Вероятность безотказной работы системы с резервированием определяется надёжностью не только самих элементов, но и автоматических выключателей, которые при постоянном резервировании должны отключать отказавший элемент, а при резервировании замещением ещё и включать резервный. Если при отказе отключающей аппаратуры выводится из строя вся система, то вероятность безотказной работы системы с постоянным резервированием

$$P_c = P_k P_{oc},$$

где P_k – вероятность безотказной работы с кратностью резервирования k ;

P_{oc} – вероятность отсутствия отказа срабатывания при отключении отказавшего элемента.

При резервировании замещением вероятность отказа системы S определяется по формуле полной вероятности:

$$Q_c(t) = Q(S|A_1 A_2)P(A_1)P(A_2) + Q(S|\overline{A_1} A_2)Q(A_1)P(A_2) + \\ + Q(S|A_1 \overline{A_2})P(A_1)Q(A_2) + Q(S|\overline{A_1} \overline{A_2})Q(A_1)Q(A_2),$$

где A_1 – отключение поврежденного элемента;

A_2 – включение резервного элемента;

$Q(S|A_1 A_2)$ – условная вероятность отказа системы при отсутствии отказов аппаратуры управления;

$Q(S|\overline{A_1} A_2)$ – то же при отказе в отключении повреждённого элемента;

$Q(S|A_1 \overline{A_2})$ – то же при отказе во включении резервного элемента;

$Q(S|\overline{A_1} \overline{A_2})$ – то же при совпадении этих отказов;

$P(A_1)$ – вероятность отсутствия отказа (безотказность) отключения;

$P(A_2)$ – безотказность включения;

$Q(A_1)$ – вероятность отказа отключения;

$Q(A_2)$ – вероятность отказа включения.

Пример 1. Потребители питаются от двух независимых источников. Один источник включён постоянно, второй включается действием АВР (рисунок 3.2). Вероятность безотказной работы источников в течение расчётного периода времени $P(A_1) = 0,9$. Вероятность застать резервный источник в работоспособном состоянии $P(A_2) = 0,99$. Вероятность отказа в отключении $Q(A_1) = 0,05$, во включении – $Q(A_2) = 0,01$. Определить вероятность безотказной работы СЭС в течение расчётного времени с учетом возможности использования резервного источника, считая, что вероятностью отказа резервного источника за время восстановления рабочего можно пренебречь.

Решение. Безотказность в отключении $P(A_1) = 1 - Q(A_1) = 0,95$; безотказность включения $P(A_2) = 1 - Q(A_2) = 0,99$; условные вероятности

$$Q(S|\bar{A}_1 A_2) = Q(S|A_1 \bar{A}_2) = Q(S|\bar{A}_1 \bar{A}_2) = 1.$$

Вероятность отказа системы при отсутствии отказов аппаратуры определяется как произведение вероятности отказа рабочего источника и вероятности аварийного простоя резервного:

$$Q(S|A_1 A_2) = (1 - 0,9)(1 - 0,99) = 0,001.$$

Вероятность отказа системы находим по формуле полной вероятности:

$$Q_C = 0,001 \cdot 0,99 \cdot 0,95 + 1 \cdot 0,05 \cdot 0,099 + 1 \cdot 0,95 \cdot 0,01 + 1 \cdot 0,05 \cdot 0,01 = 0,06044.$$

Искомая вероятность безотказной работы $P_C = 1 - Q_C = 0,93956$.

Пример 2. Потребители могут быть подключены к двум различным секциям (рисунок 3.3). Вероятность отказа источников и их аварийного простоя, а также вероятности отказов аппаратуры остаются, как и в предыдущем примере. Секционный выключатель осуществляет АВР секции, оставшейся без питания, за счёт соседней секции и её источника. Определить вероятность бесперебойного электроснабжения любого из потребителей этой системы.

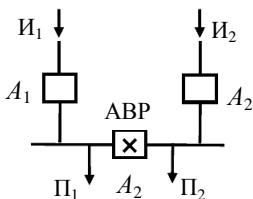


Рисунок 3.3 – Схема питания

Решение. В соответствии с условиями работы схемы вероятность отказа в отключении $Q(A_1) = 2 \cdot 0,05 = 0,1$, безотказность отключения $P(A_1) = 1 - Q(A_1) = 0,95$, вероятность отказа включения $Q(A_2) = 0,01$, безотказность включения $P(A_2) = 1 - Q(A_2) = 0,99$.

Каждый потребитель может оказаться присоединенным к одной из секций с вероятностью 0,5, поэтому

$$Q(S|\bar{A}_1 A_2) = Q(S|A_1 \bar{A}_2) = Q(S|\bar{A}_1 \bar{A}_2) = 0,5.$$

При отсутствии отказов аппаратуры отказ системы происходит при наложении отказа одного из источников на аварийный простой другого, т.е.

$$Q(S|A_1A_2) = 2(1-0,9)(1-0,99) = 0,002.$$

Вероятность отказа всей системы

$$Q_C = 0,002 \cdot 0,9 \cdot 0,99 + 0,5 \cdot 0,1 \cdot 0,99 + 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,01 + 0,5 \cdot 0,1 \cdot 0,01 = 0,05628.$$

Вероятность безотказной работы $P_C = 1 - Q_C = 0,94372$.

Применение схемы с постоянным резервированием и АВР на секционном выключателе повышает бесперебойность электроснабжения потребителей. Кроме того, секционирование уменьшает вероятность полного погашения всех потребителей. При отсутствии секционирования отказ любого выключателя приводит к полному погашению секции и вместе с ней всех потребителей, а при наличии секционирования – к погашению только половины.

3.2.2 Виды резервирования элементов систем электроснабжения

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 [16, 20].

Резервирование осуществляется путем введения избыточности. В зависимости от природы последней резервирование бывает структурным (аппаратным), информационным, временным.

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 примером является многократная передача одного и того же сообщения по каналу связи. Другим примером являются коды, применяемые в управляющих программах для обнаружения и исправления ошибок, возникающих в результате сбоев и отказов аппаратуры.

Временное резервирование предусматривает использование избыточного времени. Возобновление прерванного в результате отказа функционирова-

ния 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 рисунках 3.4, где n – число последовательных элементов в цепи, m – число резервных цепей (при общем резервировании) или резервных элементов для каждого основного (при раздельном резервировании).

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 вместе 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

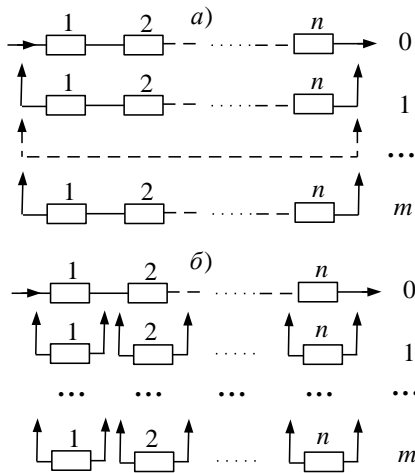


Рисунок 3.4 – Схемы общего (а) и раздельного (б) структурного резервирования

ются элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший элемент.

В таблице 3.2 приведены расчетные значения показателей надежности основных элементов СЭС [16]. Данные этой таблицы носят ориентировочный характер. В дальнейшем при решении примеров будут использоваться в основном эти значения показателей надежности.

Таблица 3.2 – Расчетные значения показателей надежности элементов СЭС

Элемент	Условное обозначение	Интенсивность отказов, год ⁻¹	Среднее время восстановления, ч	Интенсивность преднамеренных отключений, год ⁻¹	Среднее время обслуживания, ч
Воздушная линия 35, 110 кВ одноцепная, на 1 км длины	Л	0,08	8	0,15	8
То же, двухцепная	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
То же, 6, 10 кВ	Т	0,035	8	0,3	8
Ячейка выключателя 35, 110 кВ	Q	0,02	7	0,3	6
То же, 6, 10 кВ внутренней установки	Q	0,015	6	0,2	6
” 6, 10 кВ КРУН	Q	0,05	5	0,3	5
Ячейка отделителя (ОД)	QR	0,05	4	0,3	5
Ячейка разъединителя 35, 110 кВ	QS	0,005	4	0,25	4
То же, 6, 10 кВ	QS	0,002	3	0,2	3,5
” 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 одно присоединение	Ш	0,001	5	0,15	6
” РУ 6, 10 кВ, на одно присоединение	Ш	0,001	4	0,16	5
Сборка НН-0,4 кВ ТП	С	0,007	4	0,2	5

Оба вида резервирования (постоянное и замещением) имеют свои преимущества и недостатки. Достоинством постоянного резервирования является простота, т.к. в этом случае не требуются контролируемые 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 (скользящее резервирование).

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.

В случае *ненагруженного (холодного) резерва* резервные элементы начинают расходовать свой ресурс с момента их включения в работу вместо основных. Этим видом резерва могут служить отключенные агрегаты.

Надежность систем при общем резервировании.

Пример 1. Рассчитать вероятность безотказной работы в течение трех месяцев, интенсивность отказов, среднюю наработку на отказ одноцепной ВЛ длиной $l = 35$ км вместе с понижающим трансформатором 110/10 кВ и коммутационной аппаратурой (рисунок 3.5).

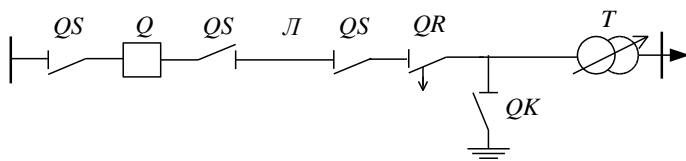


Рисунок 3.5 – Схема одноцепной ВЛ с понижающим трансформатором и коммутационной аппаратурой

Решение. Схема замещения по надежности рассматриваемой СЭС представляет собой последовательную структуру (рисунок 3.6).

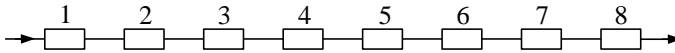


Рисунок 3.6 – Схема замещения по надежности одноцепной ВЛ

Интенсивности отказов элементов взяты из таблицы 3.2:

$$\begin{aligned}\lambda_1 = \lambda_3 = \lambda_5 = \lambda_{QS} &= 0,005 \text{ год}^{-1}; & \lambda_2 = \lambda_Q &= 0,02 \text{ год}^{-1}; \\ \lambda_4 = \lambda_{Л} \cdot l &= 0,08 \cdot 35 = 2,8 \text{ год}^{-1}; & \lambda_6 = \lambda_{QR} &= 0,05 \text{ год}^{-1}; \\ \lambda_7 = \lambda_{QK} &= 0,05 \text{ год}^{-1}; & \lambda_8 = \lambda_T &= 0,03 \text{ год}^{-1}.\end{aligned}$$

Определяем интенсивность отказов схемы питания:

$$\lambda_c = \sum_1^8 \lambda_i = 3 \cdot 0,005 + 0,02 + 2,8 + 2 \cdot 0,05 + 0,03 = 2,97 \text{ год}^{-1}.$$

Расчет указывает, 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 2. Определить, насколько выше показатели надежности понижающей трансформаторной подстанции 110/10 кВ при постоянной совместной работе обоих трансформаторов в течение 6 месяцев по сравнению с однотрансформаторной подстанцией. Отказами коммутационных аппаратов и преднамеренными отключениями пренебрегаем.

Решение. Исходные данные из таблицы 3.2: $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,03 \text{ год}^{-1}$; $T_{в1} = T_{в2} = 30 \text{ ч}$. 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

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

Средняя наработка на отказ двухтрансформаторной подстанции

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

Интенсивность отказов двухтрансформаторной подстанции

$$\lambda_c = 1 / T_c = 1 / 50 = 0,02 \text{ год}^{-1}.$$

Среднее время восстановления двухтрансформаторной подстанции

$$T_{вс} = 11 \cdot 11 \cdot (11 + 11)^{-1} = 5,5 \text{ ч}.$$

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

Пример 3. Рассмотрим секцию РУ 6 кВ, от которой питаются 18 отходящих линий (рисунок 3.7). Интенсивность отказов выключателей, сопровождающихся ко-

ротками замыканиями, оценивается величиной $\lambda_Q = 0,003 \text{ год}^{-1}$, интенсивность отказов с короткими замыканиями для сборных шин $\lambda_{ш} = 0,001 \text{ год}^{-1}$ (см. таблицу 3.2).

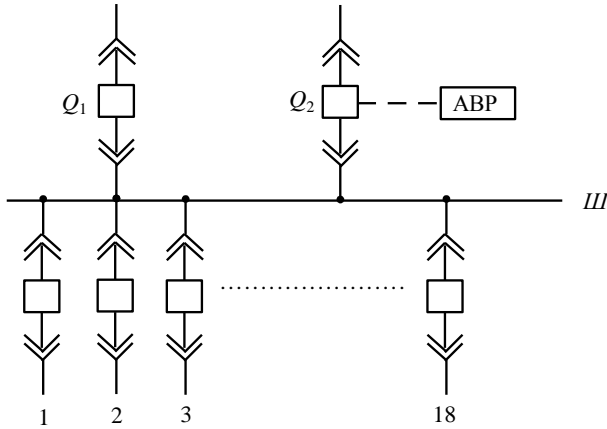


Рисунок 3.7 – Схема секции РУ с отходящими линиями

Определить интенсивность кратковременных погашений секции РУ, предполагая абсолютную надежность автоматического ввода резерва (АВР) и выключателя Q_2 , резервирующего питание секции.

Решение. Схема замещения по надежности секции РУ представляет собой последовательное соединение элементов (рисунок 3.8), число которых равно общему числу выключателей, не считая Q_2 .

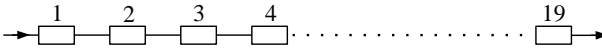


Рисунок 3.8 – Схема замещения по надежности секции РУ

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

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

Надежность систем при постоянном раздельном резервировании.

Пример 1. 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 (общим и раздельным) для того, чтобы вероятность безотказной работы системы $P_c = 0,95$.

Решение. На основании формулы для вероятности безотказной работы составим соотношение для n последовательно включенных элементов, имеющих m постоянных общих (резервируется система в целом) резервных элементов:

$$[1 - p_i^n]^{m+1} = 1 - P_c.$$

Логарифмируя данное уравнение, 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 раздельном резервировании (резервируются отдельные элементы), для чего используем формулу для вероятности безотказной работы в виде [4]

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

После логарифмирования получаем

$$m = \frac{\lg[1 - \sqrt[m+1]{P_c}]}{\lg[1 - p_i]} - 1 = \frac{\lg[1 - \sqrt[10]{0,95}]}{\lg[1 - 0,9]} - 1 = 1.$$

Таким образом, каждый основной элемент необходимо продублировать, а всего резервных элементов будет 10. Значит, при раздельном резервировании в данном случае можно для той же надежности использовать *в 6 раз меньше резервных элементов*.

Пример 2. Электроэнергетическая система постоянного тока включает три источника электрической энергии: преобразователь переменного тока в постоянный, автономный маломощный генератор постоянного тока и аккумуляторную батарею. В нормальных условиях питание берется от преобразователя. При отказе преобразователя подключается автономный генератор совместно с буферной батареей. Электроэнергетическая система не обеспечивает электроэнергией потребителей, если отказали все три источника или отказали преобразователь и автономный генератор. Необходимо найти вероятность безотказной работы электроэнергетической системы, если известны: $\lambda_1 = 0,25 \cdot 10^{-3}$ 1/ч – суммарная интенсивность отказов преобразователя; $\lambda_2 = 0,8 \cdot 10^{-3}$ 1/ч – интенсивность отказов автономного генератора при совместной параллельной работе с аккумуляторной батареей; λ_2' – интенсивность отказов генератора при отказе аккумуляторной батареи; $\lambda_3 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ 1/ч – интенсивность отказов аккумуляторной батареи при параллельной работе с генератором; необходимое время работы электроэнергетической системы $t = 100$ ч. Допускается перерыв в работе на время переключения автономного генератора и аккумуляторной батареи при отказе преобразователя. До включения в работу генератор и аккумуляторная батарея имеют следующие параметры $\lambda_2 = \lambda_3 = 0$.

Решение. Составим все благоприятные гипотезы и определим вероятности их появления. Благоприятные ситуации следующие:

А – преобразователь работоспособен в течение времени t ;

Б – преобразователь отказал в момент времени τ , а в оставшееся время $(t - \tau)$ автономный генератор и аккумуляторная батарея работоспособны;

В – преобразователь отказал в момент времени τ , в момент $\xi > \tau$ отказала аккумуляторная батарея, а в течение времени $(t - \tau)$ генератор работоспособен.

Вероятность появления ситуации А

$$P_A(t) = \exp(-\lambda_1 t).$$

Вероятность появления ситуации Б

$$P_B(t) = \int_0^t a_1(\tau) \cdot p_{2,3}(t - \tau) d\tau,$$

где $a_1(\tau) = \lambda_1 \exp(-\lambda_1(\tau))$ – частота отказов преобразователя в момент τ ;

$p_{2,3}(t - \tau)$ – вероятность того, что за время $(t - \tau)$ не откажут ни генератор, ни аккумуляторная батарея:

$$P_{2,3} = (t - \tau) \exp[-(\lambda_2 + \lambda_3)(t - \tau)].$$

Подставим в $P_B(t)$ значение $a_1(t)$ и $p_{2,3}(t - \tau)$ и после интегрирования получим

$$\begin{aligned} P_B(t) &= \int_0^t \lambda_1 \cdot \exp(-\lambda_1 t) \exp(-(\lambda_2 + \lambda_3)(t - \tau)) d\tau = \\ &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_1} \exp(-\lambda_1 t) [1 - \exp(-(\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_1)t)]. \end{aligned}$$

По аналогии с гипотезой Б получим вероятность гипотезы В:

$$P_B(t) = \int_0^t a_1(\tau) \cdot p_{2,3}(\xi, t - \tau),$$

где $p_{2,3}(\xi, t - \tau) = \int_0^t a_3(\xi) p_2(\xi, t - \tau) d\xi$ – вероятность того, что аккумуляторная батарея

в момент ξ откажет, а генератор будет работать в течение времени $(t - \tau)$; $a_3(\xi) = \lambda_3 \exp(-\lambda_3 \xi)$ – частота отказов аккумуляторной батареи в момент ξ ;

$p_2(\xi, t - \tau) = \exp(-\lambda_2(t - \tau))(\exp(-\lambda_2'(t - \tau)))$ – вероятность того, что автономный генератор работоспособен в течение времени $(t - \tau)$ при условии, что аккумуляторная батарея отказала в момент ξ .

Подставив значения $a_3(\xi)$, $p_2(\xi, t - \tau)$, $p_{2,3}(\xi, t - \tau)$, в выражение для $P_B(t)$, получим

$$\begin{aligned} P_B(t) &= \int_0^t \lambda_1 \cdot \exp(-\lambda_1 \tau) \int_0^t \lambda_3 \cdot \exp(-\lambda_3(\xi - t)) \cdot \exp(-\lambda_2(t - \xi)) d\xi d\tau = \\ &= \left(\frac{\lambda_1 \lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_1 - \lambda_3} \right) \left(\frac{\exp(-(\lambda_2 + \lambda_3)t) [\exp(-(\lambda_1 + \lambda_2)t) - 1]}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) - \\ &\quad - \left(\frac{\lambda_1 \lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_1 - \lambda_3} \right) \left(\frac{\exp(-(\lambda_1 + \lambda_3)t) - \exp(-\lambda_2 t)}{\lambda_2 - \lambda_1 - \lambda_3} \right). \end{aligned}$$

Вероятность безотказной работы электроэнергетической системы

$$P_{\text{ЭС}}(t) = P_A(t) + P_B(t) + P_B(t) = P_{\text{ЭС}}(100) = 0,999.$$

Надежность систем со смешанным соединением элементов. Оценка надежности систем с последовательно-параллельными связями элементов может осуществляться следующим образом. Если система состоит из n эле-

ментов, 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. Определить вероятность безотказной работы в течение 4 лет системы, схема замещения которой по надежности представлена на рисунке 3.9). Интенсивность отказов элементов $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0,01 \text{ год}^{-1}$.

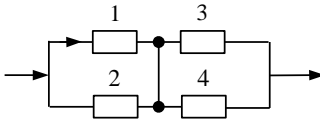


Рисунок 3.9 – Схема замещения системы по надежности

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

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

Вероятности безотказной работы и отказов i -го элемента в течение 4 лет рассчитываются по формулам

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

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

Вероятность безотказной работы системы в целом

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

Однако подобному подходу присущи значительные трудности, заключающиеся в том, что выделение работоспособных и неработоспособных состояний произвести непросто. Поэтому 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 примере, исходная схема которого представлена на рисунке 3.10.

Метод свертки состоит из нескольких этапов.

На *первом этапе* рассматриваются все параллельные соединения, которые заменяются эквивалентными элементами. После первого этапа преобразований схема принимает вид, изображенный на рисунке 3.11.

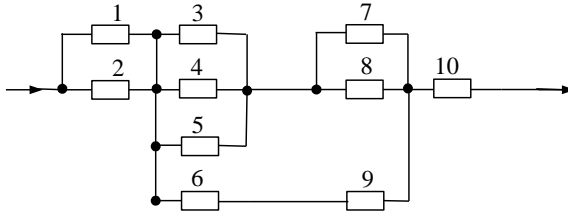


Рисунок 3.10 – Схема замещения по надежности системы из десяти элементов

Вероятности безотказной работы эквивалентных элементов определяются на основании формул:

$$P_{12} = 1 - q_{12} = 1 - q_3 q_4 q_5;$$

$$P_{13} = 1 - q_{13} = 1 - q_7 q_8.$$

На *втором этапе* рассматриваются все последовательные соединения элементов, которые заменяются эквивалентными элементами. После второго этапа преобразований схема принимает вид, изображенный на рисунке 3.12.

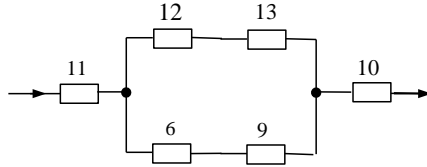


Рисунок 3.11 – Первый этап преобразования схемы замещения по надежности

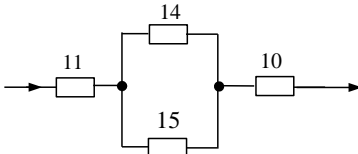


Рисунок 3.12 – Второй этап преобразования схемы замещения по надежности

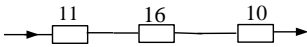


Рисунок 3.13 – Третий этап преобразования схемы замещения по надежности

рисунке 3.13 $P_{16} = 1 - q_{16} = 1 - q_{14} q_{15}$.

На *четвертом этапе* определяется вероятность безотказной работы всей системы $P_c = P_{11} P_{16} P_{10}$.

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

Вероятности безотказной работы эквивалентных элементов в схеме на рисунке 3.12:

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

На *третьем этапе* вновь рассматриваются все параллельные соединения, которые заменяются эквивалентными элементами. Результат третьего этапа представлен на рисунке 3.13.

Вероятность безотказной работы эквивалентного элемента в схеме на

Приближенный метод преобразования треугольника в звезду и обратно. На практике нередко встречаются системы, в которых схемы соединения элементов в надежностном смысле не могут быть сведены к последовательно-параллельным. Это системы, содержащие элементы типа треугольник и звезда. Такие схемы встречаются, например, в электрических соединениях 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 a и b (рисунок 3.14). Вероятности отказов для цепей при условии, что точка c присоединена к точке b , будут равны: для звезды – $q_1 + q_2 q_3 - q_1 q_2 q_3$, а для треугольника – $q_{12} q_{31}$. Аналогично можно записать равенства и для двух других возможных вариантов соединения точек.

Таким образом, можно составить следующую систему уравнений:

$$q_1 + q_2 q_3 - q_1 q_2 q_3 = q_{12} q_{31};$$

$$q_2 + q_3 q_1 - q_2 q_3 q_1 = q_{23} q_{12};$$

$$q_3 + q_1 q_2 - q_3 q_1 q_2 = q_{31} q_{23}.$$

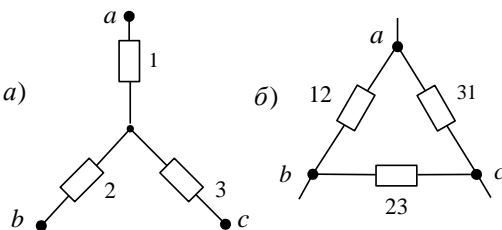


Рисунок 3.14 – Схема преобразования вероятностей отказов элементов из звезды в треугольник (а) и обратно (б)

Считая, что вероятности отказов элементов малы, и пренебрегая произведениями $q_i q_j$ и $q_i q_j q_r$ – вероятностями более высокого порядка малости, чем q_i , получим следующие приближенные выражения преобразования вероятностей

отказов элементов из звезды в треугольник:

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

Перемножив соответственно левые и правые части двух первых равенств системы и разделив на третье равенство, получим

$$\frac{q_1 q_2}{q_3} \approx \frac{q_{12} q_{31} q_{23} q_{12}}{q_{31} q_{23}}.$$

После сокращения одинаковых сомножителей формулы преобразования вероятностей отказов элементов из треугольника в звезду примут вид

$$q_{12} \approx \sqrt{\frac{q_1 q_2}{q_3}}; \quad q_{23} \approx \sqrt{\frac{q_2 q_3}{q_1}}; \quad q_{31} \approx \sqrt{\frac{q_3 q_1}{q_2}}.$$

3.2.3 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, предполагая, что выбранные элементы абсолютно:

- 1) надежны (вероятность безотказной работы элементов равна единице);
- 2) 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:

$$p_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i,$$

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

Окончательно вероятность безотказной работы системы определяется по формуле

$$p_c = p_{\min} + (p_{\max} - p_{\min})p_{\text{cp}}.$$

Если $p_{\text{cp}} = 1$ (абсолютно надежные исключаемые элементы), то $p_c = p_{\max}$, а при $p_{\text{cp}} = 0$ (абсолютно ненадежные элементы), то $p_c = p_{\min}$.

Особенности метода исключения элементов:

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

Пример. Определить приближенно вероятность безотказной работы системы, представленной на рисунке 3.15, двумя методами: преобразованием треугольника в звезду и исключением элементов.

Вероятности безотказной работы всех элементов $p_i = p = 0,9; i = \overline{1,5}$.

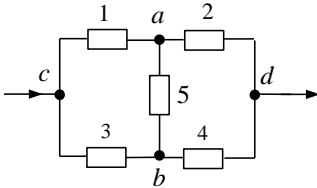


Рисунок 3.15 – Схема замещения по надежности системы из пяти элементов

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

$$p_C = p_6 [1 - (1 - p_2 p_7)(1 - p_4 p_8)] = 0,99 [1 - (1 - 0,9 \cdot 0,99)(1 - 0,9 \cdot 0,99)] = 0,9782.$$

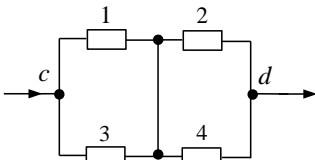


Рисунок 3.17 – Схема замещения по надежности системы, предусматривающая короткое замыкание

Во второй структуре в месте нахождения элемента 5 будет разрыв цепи (рисунок 3.18), для которой определим вероятность безотказной работы

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

Средневзвешенное значение вероятности безотказной работы исключаемого элемента $p_{cp} = p = 0,9$. На основании формулы вероятности безотказной работы по методу исключения элементов получаем

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

Решение. Преобразуем треугольник, образуемый элементами 1, 3, 5, в звезду с элементами 6, 7, 8 (рисунок 3.16). Рассчитаем вероятности отказов элементов, используя приближенные выражения преобразования вероятностей отказов элементов из звезды в треугольник:

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

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

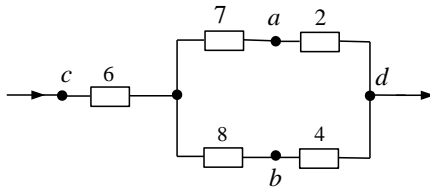


Рисунок 3.16 – Схема замещения по надежности системы с преобразованием вероятностей отказов элементов из звезды в треугольник

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 (рисунок 3.17). Вероятность безотказной работы

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

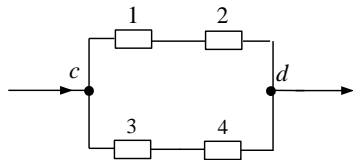


Рисунок 3.18 – Схема замещения по надежности системы, предусматривающая разрыв цепи

Сравнение значений вероятностей безотказной работы, полученных рассмотренными приближенными методами, показывает, что они близки. Исследователь сам принимает решение о применяемом методе расчета исходя из требуемой точности результатов расчета.

3.2.4 Расчёт надёжности систем электроснабжения логико-вероятностным методом

Алгебра логики – это раздел математики, занимающийся исчислением высказываний. Под высказыванием X понимается любое предложение, относительно которого можно утверждать, ложно оно или истинно без учёта конкретного содержания. Переменная величина, которая устанавливает лишь два значения (1 и 0), называется двоичной. Функция, определяемая набором двоичных аргументов и принимающая лишь два значения (1 и 0), называется функцией алгебры логики.

В алгебре логики рассматриваются три основные логические операции:

а) *НЕ – отрицание*. Отрицание высказывания обозначается через \bar{X} и значения истинности определяются соотношениями

$$\bar{1} = 0, \quad \bar{0} = 1;$$

б) *И – конъюнкция*. Конъюнкция (логическое умножение) высказываний X_1 и X_2 истинна тогда и только тогда, когда истинны составляющие её высказываний X_1 и X_2 . Значения истинности конъюнкции определяются соотношениями

$$0 \cdot 0 = 0; \quad 0 \cdot 1 = 0; \quad 1 \cdot 0 = 0; \quad 1 \cdot 1 = 1;$$

в) *ИЛИ – дизъюнкция*. Дизъюнкция (логическое сложение) высказываний X_1 и X_2 ложна тогда и только тогда, когда ложны составляющие её высказывания X_1 и X_2 . Значения истинности дизъюнкции определяются соотношениями

$$0 + 0 = 0; \quad 0 + 1 = 1; \quad 1 + 0 = 1; \quad 1 + 1 = 1.$$

Основные правила преобразования:

$$X \cdot 1 = X; \quad X + 1 = 1; \quad X + 0 = X; \quad X \cdot 0 = 0;$$

$$X \cdot X = X; \quad X + X = X; \quad X \cdot \bar{X} = 0; \quad X + \bar{X} = 1.$$

Ассоциативный закон:

$$X_1 \cdot (X_2 \cdot X_3) = (X_1 \cdot X_2) \cdot X_3 = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3;$$

$$X_1 + (X_2 + X_3) = (X_1 + X_2) + X_3 = X_1 + X_2 + X_3.$$

Коммутативный закон:

$$X_1 \cdot X_2 = X_2 \cdot X_1; \quad X_1 + X_2 = X_2 + X_1.$$

Дистрибутивный закон:

$$X_1 (X_2 + X_3) = X_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot X_3; \quad X_1 + (X_2 \cdot X_3) = (X_1 + X_2)(X_1 + X_3).$$

Закон инверсий:

$$\overline{X_1 \cdot X_2} = \bar{X}_1 + \bar{X}_2, \quad \overline{X_1 + X_2} = \bar{X}_1 \cdot \bar{X}_2.$$

Операция поглощения:

$$X_1 + X_1 \cdot X_2 = X_1, \quad X_1 (X_1 + X_2) = X_1.$$

Логические функции работоспособности и неработоспособности. Если через Z обозначить состояние СЭС, тогда $Z = 1$ в случае, когда СЭС работоспособна, и $Z = 0$ в случае, когда СЭС неработоспособна. Функция Z называется логической функцией работоспособности СЭС. Тогда при последовательном соединении двух элементов имеем $Z_{\text{послед}} = X_1 \cdot X_2$, а при параллельном соединении – $Z_{\text{послед}} = X_1 + X_2$.

Если через \bar{Z} обозначить состояние СЭС, тогда $\bar{Z} = 1$ в случае, когда СЭС неработоспособна, и $\bar{Z} = 0$, когда СЭС работоспособна. Функция \bar{Z} называется логической функцией неработоспособности СЭС. При последовательном соединении двух элементов – $\bar{Z} = \bar{X}_1 + \bar{X}_2$, а при параллельном соединении – $\bar{Z} = \bar{X}_1 \cdot \bar{X}_2$.

Рассмотрим СЭС, схема замещения которой представлена на рисунке 3.19.

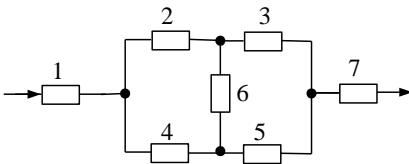


Рисунок 3.19 – Схема замещения по надежности СЭС

Требуется определить логическую функцию работоспособности Z и логическую функцию неработоспособности \bar{Z} :

$$Z = (X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_7) + (X_1 \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot X_7) + (X_1 \cdot X_2 \cdot X_6 \cdot X_5 \cdot X_7) + (X_1 \cdot X_4 \cdot X_6 \cdot X_3 \cdot X_7).$$

Каждое слагаемое – это один из возможных путей передачи мощности от источника к потребителю, обеспечивающих работоспособность СЭС. Причём это кратчайшие пути успешного функционирования СЭС, когда нельзя изъять ни одну из компонент, не нарушив функционирования СЭС.

$$\bar{Z} = (\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3 + \bar{X}_7) \cdot (\bar{X}_1 + \bar{X}_4 + \bar{X}_5 + \bar{X}_7) \times (\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_6 + \bar{X}_5 + \bar{X}_7) \cdot (\bar{X}_1 + \bar{X}_4 + \bar{X}_6 + \bar{X}_3 + \bar{X}_7).$$

После преобразований получаем

$$\bar{Z} = \bar{X}_1 + \bar{X}_2 \cdot \bar{X}_4 + \bar{X}_3 \cdot \bar{X}_5 + \bar{X}_2 \cdot \bar{X}_6 \cdot \bar{X}_5 + \bar{X}_4 \cdot \bar{X}_6 \cdot \bar{X}_3 + \bar{X}_7.$$

Каждое слагаемое включает в себя те элементы, неработоспособное состояние которых приводит к тому, что передачу мощности от источника к потребителю осуществить нельзя. Причём нельзя изъять ни одно слагаемое, не нарушив условия неработоспособности СЭС.

Вероятность работоспособного и неработоспособного состояния СЭС. Если потребуется найти вероятность P успешного функционирования СЭС, тогда, имея выражение Z , необходимо найти P_1 – вероятность безотказного функционирования первого пути передачи мощности от источника потребителю через вероятности безотказной работы элементов, образующих этот путь. Для схемы замещения по надежности СЭС, представленной на рисунке 3.19, получим следующие выражения:

$$\begin{aligned}
 P_I &= P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_7; \\
 P_{II} &= P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_7; \\
 P_{III} &= P_1 \cdot P_2 \cdot P_6 \cdot P_5 \cdot P_7; \\
 P_{IV} &= P_1 \cdot P_4 \cdot P_6 \cdot P_3 \cdot P_7.
 \end{aligned}$$

Тогда результирующая вероятность успешного функционирования СЭС

$$P = 1 - (1 - P_I) (1 - P_{II}) (1 - P_{III}) (1 - P_{IV}).$$

Вероятность Q неуспешного функционирования СЭС находится как

$$Q = 1 - P = (1 - P_I) (1 - P_{II}) (1 - P_{III}) (1 - P_{IV}).$$

3.2.5 Особенности расчета надежности схем электроснабжения

При анализе реальных СЭС следует учитывать особенности их построения. Последовательное и параллельное соединения элементов в надежности смысле могут отличаться от аналогичных электрических соединений. Например, ЛЭП, состоящая из двух цепей, подсоединенных под один выключатель (рисунок 3.20), электрически представляет собой параллельное соединение.

Рисунок 3.20 – Схема ЛЭП, состоящей из двух цепей

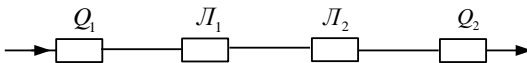
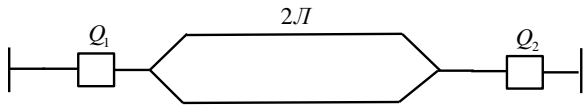


Рисунок 3.21 – Схема замещения по надежности ЛЭП

С точки зрения надежности, эти элементы (цепи) соединены последовательно (рисунок 3.21), поскольку выход из строя любой из цепей приводит к выключению всей системы, состоящей из двух линий.

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 стороны, преднамеренные отключения понижают надежность электроснабжения потребителей, так как создают резервированные схемы.

Преднамеренные отключения создают поток событий, не являющихся случайными, поскольку они вызываются направленным действием обслуживающего персонала. При определении надежности на короткий период времени, например, при решении в сетях оперативных задач, связанных с изменением режимов, преднамеренные отключения считаются детерминированными событиями.

Если надежность анализируется за длительный промежуток времени, например при проектировании СЭС, то заранее предусмотреть число и дли-

тельность 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.

Преднамеренные отключения при последовательном соединении элементов. Полагая преднамеренные отключения независимыми случайными событиями, характеризуем их аналогичными показателями.

Интенсивность преднамеренных отключений последовательно соединенных n элементов

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

где v_i – интенсивность преднамеренных отключений i -го элемента.

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

$$T_{0c} = v_c^{-1} \sum_{i=1}^n v_i T_{0i},$$

где T_{0i} – продолжительность плано-предупредительного ремонта i -го элемента.

Однако при ремонте электрооборудования обычно отключаются одновременно несколько взаимосвязанных элементов, например ЛЭП и понижающая подстанция, питающаяся по данной линии, трансформатор и шины распределительного устройства. 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 таблице 3.3 [20].

Таблица 3.3 – Расчетные значения показателей надежности элементов СЭС

Условное обозначение	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
Воздушная линия (ВЛ) 6, 10 кВ	0,7	1,0	0,6	–
Кабельная линия (КЛ) 6, 10 кВ	0,6	1,0	0,5	–
Ячейка распредустройства 6, 10 кВ	0,3	0,6	0,4	1,0
Ячейка РУ 35, 110 кВ	0,8	–	0,6	–
Ячейка выключателя 6, 10 кВ	0,8	0,8	0,7	–
Трансформатор 35, 110/10 кВ	0,6	–	1,0	–
” ” 6, 10/0,4 кВ	0,3	0,6	0,4	1,0
Шины 35, 110 кВ	0,6	–	0,8	–
” ” 6, 10 кВ	0,75	–	0,7	0,8
Сборка НН ТП	–	0,4	–	0,8

С учетом коэффициента совпадения формулы для определения показателей преднамеренных отключений последовательно включенных элементов принимают вид:

– для интенсивности преднамеренных отключений –

$$v_c = v_6 + \sum_{i=1, i \neq 6}^n v_i (1 - g_i);$$

– для среднего времени восстановления после преднамеренного отключения –

$$T_{0c} = v_c^{-1} [v_6 T_{06} + v_{\max} (T_{0\max} - T_{06}) + \sum_{i=1, i \neq 6}^n v_i T_{0i} (1 - g_i)],$$

где v_6, T_{06} – интенсивность преднамеренных отключений и среднее время обслуживания базового элемента;

$v_{\max}, T_{0\max}$ – то же для элемента цепочки, у которого максимальное время обслуживания.

Пример. Определить показатели надежности участка электросети (рисунок 3.22). Длина ВЛ 110 кВ составляет 15 км.

Решение. Составляем схему замещения участка по надежности (рисунок 3.23).

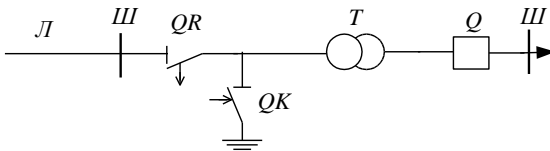


Рисунок 3.22 – Схема участка электросети

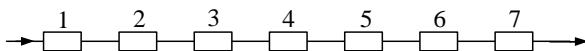


Рисунок 3.23 – Схема замещения по надежности участка электросети

Исходные данные о надежности и коэффициенты совпадения преднамеренных отключений элементов приведены из таблице 3.4 [16, 20].

Таблица 3.4 – Расчетные значения показателей надежности элементов СЭС

Номер элемента	Условное обозначение	λ , год ⁻¹ ,	T_b , ч	ν , год ⁻¹ ,	T_0 , ч	g
1	Л 110	$0,08 \cdot 15 = 1,2$	8	$0,15 \cdot 15 = 2,25$	8	1,0
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 интенсивность отказов и среднее время восстановления схемы:

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^7 \lambda_i = 1,382 \text{ год}^{-1}; \quad T_{вс} = \lambda_c^{-1} \sum_{i=1}^7 \lambda_i T_{вi} = 8,08 \text{ ч.}$$

Для рассматриваемого участка сети преднамеренные отключения – зависимые события. Поэтому интенсивность преднамеренных отключений рассчитываем по формуле интенсивности преднамеренных отключений, за базовый принимаем элемент 1:

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

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

$$T_{0c} = \nu_c^{-1} \left[\nu_1 T_{01} + \nu_5 (T_{05} - T_{01}) + \sum_{i=2}^7 \nu_i T_{0i} (1 - g_i) \right] = 11,2 \text{ ч.}$$

Если не учитывать взаимного влияния преднамеренных отключений элементов, то интенсивность преднамеренных отключений

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

а среднее время обслуживания

$$T'_{0c} = \nu_c^{-1} \sum_{i=1}^7 \nu_i T_{0i} = 7,41 \text{ ч.}$$

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:

$$\lambda_c = \lambda^0 + \lambda' + \lambda'',$$

где λ^0 – возможность отказа одного из элементов во время простоя другого элемента после отказа;

λ' – возможность отказа первого элемента во время простоя после преднамеренного отключения второго элемента;

λ'' – возможность отказа второго элемента при простое после преднамеренного отключения первого элемента.

Чем чаще и продолжительнее преднамеренные отключения, тем больше λ' и λ'' и тем ниже надежность системы.

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

$$\lambda_c = [\lambda_1 \lambda_2 (T_{в1} + T_{в2}) + \lambda_1 v_2 T_{02} + \lambda_2 v_1 T_{01}] \cdot 8760^{-1};$$

$$T_{вс} = \lambda_c^{-1} (\lambda^0 T_{в}^0 + \lambda' T_{в}' + \lambda'' T_{в}''),$$

где $T_{в}^0 = T_{в1} T_{в2} (T_{в1} + T_{в2})^{-1}$; $T_{в}' = T_{в1} T_{02} (T_{в1} + T_{02})^{-1}$; $T_{в}'' = T_{в2} T_{01} (T_{в2} + T_{01})^{-1}$.

Пример. Определить показатели надежности схемы, представленной на рисунке 3.24. Показатели надежности выключателей и шин РУ не принимаются во внимание. Длина ВЛ 10 кВ равна 10 км, КЛ 10 кВ – 3 км.

Решение. Схема замещения состоит из двух параллельно соединенных элементов 1 и 2 (рисунок 3.25). Исходные показатели надежности определены по данным таблицы 3.4 с учетом длин ВЛ и КЛ:

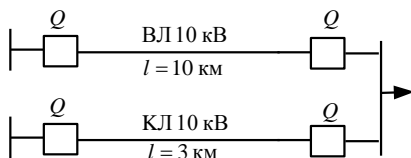


Рисунок 3.24 – Схема участков электросети

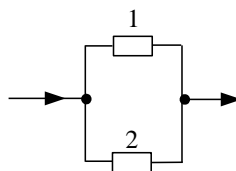


Рисунок 3.25 – Схема замещения по надежности участков электросети

$$\lambda_1 = 0,25 \cdot 10 = 2,5 \text{ год}^{-1}; T_{в1} = 6 \text{ ч}; v_1 = 0,25 \cdot 10 = 2,5 \text{ год}^{-1}; T_{01} = 5,8 \text{ ч};$$

$$\lambda_2 = 0,1 \cdot 3 = 0,3 \text{ год}^{-1}; T_{в2} = 25 \text{ ч}; v_2 = 0,5 \cdot 3 = 1,5 \text{ год}^{-1}; T_{02} = 3 \text{ ч}.$$

Результаты расчетов интенсивностей отказов системы:

$$\begin{aligned} \lambda_c &= \lambda^0 + \lambda' + \lambda'' = [2,5 \cdot 0,3 (6 + 25) + 2,5 \cdot 1,5 \cdot 3 + 0,3 \cdot 2,5 \cdot 5,8] \cdot 8760^{-1} = \\ &= 2,654 \cdot 10^{-3} + 1,284 \cdot 10^{-3} + 0,496 \cdot 10^{-3} = 4,434 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}; \end{aligned}$$

$$T_{в}^0 = 6 \cdot 25 (6 + 25)^{-1} = 4,84 \text{ ч}; T_{в}' = 6 \cdot 3 (6 + 3)^{-1} = 2 \text{ ч}; T_{в}'' = 25 \cdot 5,8 (25 + 5,8)^{-1} = 4,71 \text{ ч};$$

$$T_{вс} = 4,434^{-1} \cdot 10^3 (2,654 \cdot 10^{-3} \cdot 4,84 + 1,284 \cdot 10^{-3} \cdot 2 + 0,496 \cdot 10^{-3} \cdot 4,71) = 4 \text{ ч}.$$

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

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 таблице 3.5 приведены ориентировочные значения времени локализации отказов для объектов с различными видами обслуживания [20].

Таблица 3.5 – Ориентировочные значения времени локализации отказов

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

Восстановление электроснабжения в схемах с вводом резерва вручную рассмотрим на примере цепочки распределительной линии 10 кВ, выполненной кабелем. Линейные ячейки 10 кВ в трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ (ТП) оборудованы выключателями нагрузки (QW). Цепочка разомкнута на линейной ячейке РУ 10 кВ ТП5 в сторону ТП4 (рисунок 3.26).

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.

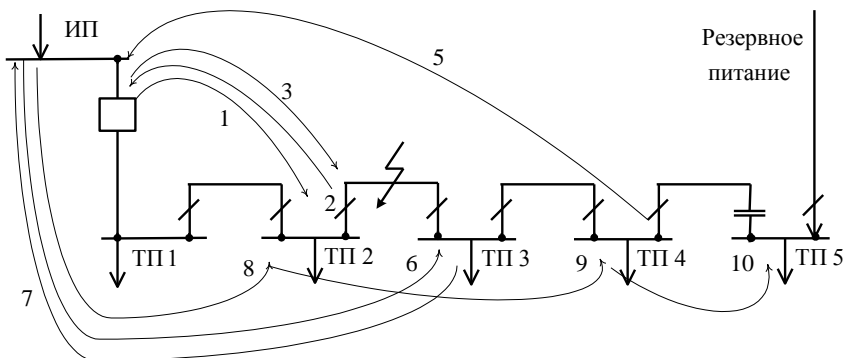


Рисунок 3.26 – Схема участка электроснабжения с вводом резерва вручную

Диспетчер определяет последовательность выполнения коммутационных операций по поиску поврежденного участка и последующему восстановлению электроснабжения. ОВБ, получив задание от диспетчера, выезжает на 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.

Влияние надежности коммутационной аппаратуры, 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 подачу резервного питания в расчетный узел нагрузки (рисунок 3.27). 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.

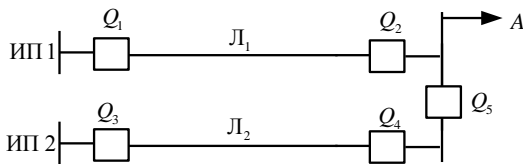


Рисунок 3.27 – Схема распределительного устройства с двумя секциями шин

При поврежденной линии L_1 происходит следующее: релейная защита на выключателе Q_1 подает команду на его отключение; срабатывает Q_1 , отключающий L_1 от ИП, релейная защита на Q_2 подает команду на отключение Q_2 ; срабатывает Q_2 , отключающий L_1 от узла нагрузки A ; от исчезновения напряжения на секции шин срабатывает устройство АВР и подает команду на включение Q_5 ; срабатывает Q_5 и напряжение от L_2 через секцию шин и Q_5 подается на A .

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 нужно учитывать надежность УРЗА и КА.

С одной стороны, коммутационные аппараты являются элементом силовой электрической цепи и несут нагрузку (электрическую, механическую) в нормальном режиме. Поэтому КА, как и другие элементы электрической сети, могут отказать в нормальном режиме. Такие отказы называют *статическими* (например, перекрытие опорной изоляции, перегрев контактов). С другой стороны, на КА воздействуют с 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 требовании 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 заменяются эквивалентной схемой 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 $m_{ИКА}(t)$ исполнительного 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 типичных схем релейной защиты и устройств автоматического ввода резерва приведены в таблице 3.6 [16].

Таблица 3.6 – Ориентировочные значения вероятности несрабатывания

Наименование устройства	Вероятность несрабатывания $q_{КА}$	
	$U = 6, 10$ кВ	$U = 35, 110$ 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 α – интенсивность требований, поступающих на УРЗА и КА.

Требованиями считаются устойчивые отказы, которые фиксируются как отказы в электроснабжении, 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

$$\alpha_n = k_n \lambda_n^0 l_n,$$

где k_n – коэффициент увеличения числа требований на срабатывание за счет учета неустойчивых отказов;

λ_n^0 – удельная интенсивность отказов ВЛ;

l_n – длина защищаемой ВЛ.

Примерные значения величин: $k_n = 1,6$ для ВЛ 35, 110 кВ и $k_n = 1,6$ 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 Q_1 (рисунок 3.28), то поступает заявка на отключение шинного выключателя Q_2 , 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.

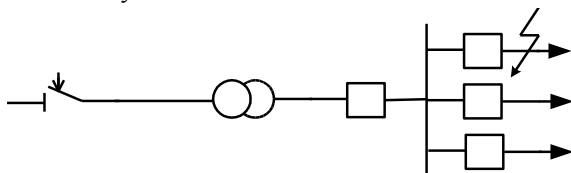


Рисунок 3.28 – Схема участка электросети

Пример. Требуется определить показатели надежности в расчетной точке А схемы (рисунок 3.27). Длина ВЛ1 составляет 25 км, ВЛ2 – 20 км. Показатели надежности элементов приведены в таблице 3.4. Надежность

выключателей 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 Q_2 или Q_5) на время устранения отказа в срабатывании.

Схема замещения представлена на рисунке 3.29, где элементы 1 и 2 замещают ВЛ1 и ВЛ2, а элементы 3, 4, 5 отражают отказы в срабатывании Q_1 , Q_2 , Q_5 . Время восстановления элементов 3, 4, 5 определяется временем локализации отказа.

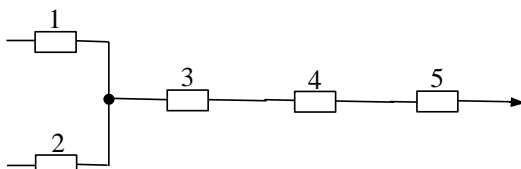


Рисунок 3.29 – Схема замещения по надежности системы электроснабжения

Численные значения показателей надежности:

$$\lambda_1 = \lambda_{л1}^0 \lambda_{л1} = 0,08 \cdot 25 = 2 \text{ год}^{-1}; \quad T_{в1} = 8 \text{ ч}; \quad v_1 = v_{л1}^0 \lambda_{л1} = 0,15 \cdot 25 = 3,75 \text{ год}^{-1}; \quad T_0 = 8 \text{ ч};$$

$$\lambda_2 = 1,6 \text{ год}^{-1}; \quad T_{в2} = 8 \text{ ч}; \quad v_2 = 3 \text{ год}^{-1}; \quad T_0 = 8 \text{ ч};$$

$$\alpha_{л1} = k_n \lambda_{л1}^0 \lambda_{л1} = 1,6 \cdot 0,08 \cdot 25 = 3,2 \text{ год}^{-1}; \quad \lambda_3 = \alpha_{л3} q_A = 3,2 \cdot 0,015 = 0,048 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{в3} = T_{л}^{\text{овб}} = 2 \text{ ч}; \quad \lambda_4 = 0,048 \text{ год}^{-1}; \quad T_{в4} = 2 \text{ ч}; \quad \lambda_5 = \alpha_{л5} q_A = 0,064 \text{ год}^{-1}; \quad T_{в5} = 2 \text{ ч}.$$

Для параллельно соединенных элементов с учетом преднамеренных отключений определяем показатели надежности эквивалентного элемента:

$$\lambda_6 = \lambda^0 + \lambda' + \lambda'' = [\lambda_1 \lambda_2 (T_{в1} + T_{в2}) + \lambda_1 v_2 T_{02} + \lambda_2 v_1 T_{01}] \cdot 8760^{-1};$$

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

$$T^0 = T_{в1} T_{в2} (T_{в1} + T_{в2})^{-1} = 4 \text{ ч}; \quad T_v' = T_{в1} T_{02} (T_{в1} + T_{02})^{-1} = 4 \text{ ч}; \quad T_v'' = 4 \text{ ч}.$$

Показатели надежности структуры:

$$\lambda_{\text{кф}} = \lambda_6 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 = 0,1772 \text{ год}^{-1}; \quad T_{\text{вкв}} = 2,19 \text{ ч}.$$

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 %.

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 эквивалентруется 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 подстанциях (имеются в виду статические показатели надежности выключателей, а не показатели надежности их функционирования) рассчитываются по формулам для последовательно соединенных элементов:

$$\lambda_{\text{уч}} = 2\lambda_{\text{в}} + \lambda_{\text{л}}^0 I_{\text{л}}; \quad T_{\text{в уч}} = \lambda_{\text{уч}}^{-1} (2\lambda_{\text{в}} T_{\text{вв}} + \lambda_{\text{л}}^0 I_{\text{л}} T_{\text{вл}}),$$

где λ_v – интенсивность отказов выключателя;

$\lambda_{л}^o$ – удельная интенсивность отказов линии;

$l_{л}$ – длина линии;

$T_{вв}$ – среднее время восстановления выключателя;

$T_{вл}$ – 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 рисунке 3.30 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.

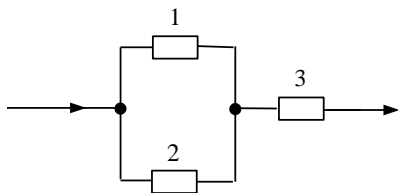


Рисунок 3.30 – Схема надежности двухцепных линий или кабелей в одной траншее с учетом одновременности отказов

1) при отказе самих шин на время ремонта, при этом интенсивность отказов шин принимается прямо пропорциональной количеству присоединений $N_{пр}$:

$$\lambda_{ш} = \lambda_{ш}^o N_{пр},$$

где $\lambda_{ш}^o$ – интенсивность отказов одного соединения;

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

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

Показатели надежности шин распределительных устройств (узлов) также определяются расчетами. Рассмотрим надежность узла – секции шин распределительного устройства (рисунок 3.31). Шины могут быть обесточены в следующих случаях:

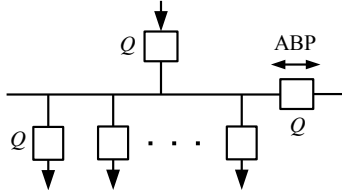


Рисунок 3.31 – Схема секции шин распределительного устройства

где λ_{Qi} – интенсивность отказов ячейки РУ (выключателя);

N – число отходящих линий, включая трансформатор собственных нужд;

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

$$\lambda_{p3a} = \lambda_{p3a} (q_{p3} + q_{ABP});$$

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

$$\lambda_{omx} = \sum_{i=1}^{n_{л}} \lambda_{ли} k_{ни} q_{p3i},$$

где $n_{л}$ – число отходящих линий.

Схема замещения по надежности рассмотренного узла представлена на рисунке 3.32.

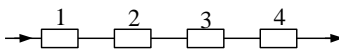


Рисунок 3.32 – Схема замещения по надежности секции шин РУ

Расчет показателей надежности электроустановок (ЭУ). Он относится прежде всего к понизительным подстанциям и распределительным пунктам. Электроустановки различаются схемой построения, способом ввода резервного питания, применяемым оборудованием. Показатели надежности для подстанций, как правило, определяются на шинах РУ низшего напряжения.

Выход из 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.

Для определения показателей надежности электроустановок аналитическим методом необходимо составить расчетную схему соединения их элементов, которая отражает логику связей элементов с точки зрения надежности работы всей установки или с точки зрения отказа всей установки. Расчетная схема СЭС часто не совпадает с электрической схемой. Иногда последовательно соединенные в электрической схеме элементы на логической схеме должны быть изображены параллельным соединением и наоборот. Например, шинные разъединители всех параллельных по электрической схеме присоединений составляют последовательную цепочку, если рассматривается погашение сборных шин. Расчет проводится путём замены параллельных и последовательных цепей эквивалентными элементами, для чего используются формулы, определяющие общее число аварийных отключений, длительность аварийных простоев для эквивалентного элемента.

Длительность планового ремонта для каждого случая подсчитывается

исходя из существующих закономерностей ремонтных работ. Здесь необходимо учитывать, что одновременные отключения цепи из двух параллельных элементов в плановый период не допускаются. За время отключения элемента с большой длительностью ремонта может быть произведен ремонт других элементов (с относительно меньшей длительностью ремонта).

В зависимости от применяемой схемы соединения восстановление электроснабжения может заключаться: в замене отказавшего элемента; ремонте поврежденного элемента; операции автоматического секционирования; АВР, АПВ; производстве переключений вручную.

Основные допущения аналитического расчета [20]:

1 Перерывы электроснабжения, ликвидируемые работой автоматики (АПВ, АВР), не учитываются. Устройства релейной защиты считаются действующими безотказно.

2 Кратковременные отключения (производство переключений вручную) подсчитываются отдельно. Длительность перерывов электроснабжения при кратковременных отключениях принимается 20–30 мин. Расчетная схема для кратковременных отключений должна содержать только элементы, соединенные последовательно; параллельные ветви учитывать не следует.

3 Для длительных отключений (ремонт элементов) рассматриваются также отказы параллельных цепей, вызванные наложениями повреждений одного элемента на аварийное восстановление другого и аварийных повреждений на плановые отключения.

4 Расчетные схемы для всех видов отключений составляются отдельно для каждого потребителя или (и) групп потребителей.

5 Аналитические расчёты основываются на предположении, что поток отказов элементов на расчетном промежутке – простейший, пуассоновский, а закон распределения вероятности восстановления – экспоненциальный.

При сделанных допущениях для показателей надёжности элементов электроустановок справедливы следующие формулы теории надёжности. Для коэффициентов аварийного и планового простоя

$$q_{ав} = \frac{\lambda T_{в}}{8760}; \quad q_{пл} = \frac{\tau_{пл}}{8760}.$$

Для последовательного соединения элементов

$$\lambda_{посл} = \sum_{i=1}^n \lambda_i; \quad T_{в\text{ посл (авар)}} = \frac{1}{\lambda_{посл}} \sum_{i=1}^n \lambda_i T_{ви}; \quad q_{ав\text{ посл}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i T_{ви}}{8760}.$$

Пример 1. На рисунке 3.33 приведена схема питания упрощенных подстанций 110 кВ, предназначенных для глубокого ввода на территорию промышленного предприятия. Расчётные значения показателей надёжности элементов этой схемы даны в таблице 3.7 [16].

Показателями надёжности для схем питания потребителей являются частоты аварийных отключений подстанций $\lambda_{ав}$ и коэффициенты аварийного простоя $q_{ав}$.

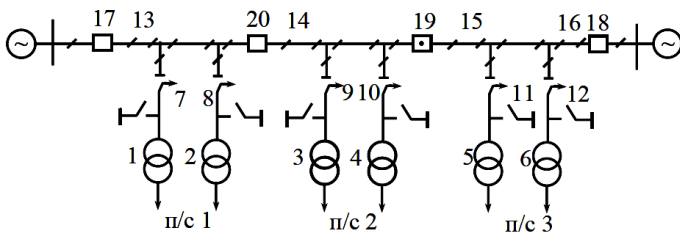
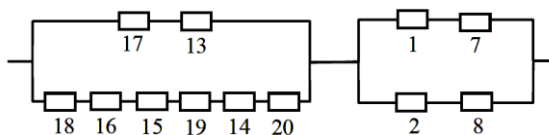
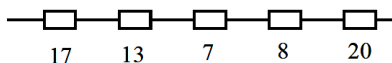


Рисунок 3.33 – Схема питания упрощенных подстанций

Таблица 3.7 – Расчётные значения показателей надёжности элементов

Элемент	№ на схеме	$\lambda_i, \text{год}^{-1}$	$T_B, \text{ч}$	$\tau_{\text{пл}}, \text{ч/ГОД}$
Трансформатор	1–6	0,01	100	25
Короткозамыкатель с отделителем	7–12	0,05	8	8
Участок ВЛ	13–16	0,50	8	50
Масляный выключатель	17–20	0,02	20	30

Рисунке 3.34 – Схема замещения по надёжности при кратковременном



Рисунке 3.35 – Схема замещения по надёжности при длительном отключении

Решение. Составим расчетные схемы (рисунок 3.34 и 3.35) для кратковременных и длительных аварийных отключений.

В соответствии с расчетной схемой определим значения показателей надёжности схемы:

$$\lambda_{\text{ав кратк. откл/ср1}} = \lambda_{17} + \lambda_{13} + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_{20} = 0,64 \text{ откл/год};$$

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{ав долг/ср1}} &= (\lambda_1 + \lambda_7)(q_2 + q_8) + (\lambda_2 + \lambda_8)(q_1 + q_7) + \\ &+ (\lambda_{13} + \lambda_{17})(q_{18} + q_{16} + q_{15} + q_{19} + q_{14} + q_{20}) + \\ &+ (\lambda_{18} + \lambda_{16} + \lambda_{15} + \lambda_{19} + \lambda_{14} + \lambda_{20})(q_{13} + q_{17}) = \\ &= 0,02 + 0,5 + 0,05 + 0,05 + 0,02 = 0,64 \text{ откл/год}. \end{aligned}$$

Коэффициент простоя

$$q = q_{\text{ав}} + q_{\text{пл}} = \frac{\lambda_1 T_{B1} + \lambda_7 T_{B7}}{8760} + \frac{\tau_{\text{пл1}}}{8760}.$$

Выполним подстановку значений показателей надёжности элементов

$$q_2 + q_8 = q_1 + q_7 = \frac{0,01 \cdot 100 + 0,05 \cdot 8}{8760} + \frac{25}{8760} = 0,003;$$

$$q_{18} + q_{16} = q_{19} + q_{15} = q_{20} + q_{14} = q_{17} + q_{13} =$$

$$= \frac{\lambda_{18} T_{в18} + \lambda_{16} T_{в16}}{8760} + \frac{\tau_{н16}}{8760} = \frac{0,02 \cdot 20 + 0,5 \cdot 8}{8760} + \frac{50}{8760} = 0,0062;$$

$$\lambda_{ав дпт/срт} = (0,01 + 0,05) \cdot 0,03 + (0,01 + 0,05) \cdot 0,03 +$$

$$+ (0,5 + 0,02) \cdot 3 \cdot 0,0062 + (0,5 + 0,02) \cdot 3 \cdot 0,0062 = 0,023 \text{ год}^{-1}.$$

При кратковременных отключениях персоналом подстанции время перерыва питания составляет 0,25 ч, а если переключения производит выездная оперативная бригада, то перерыв питания равен 0,5 ч.

Суммарная частота отключений

$$\lambda_{ав п/срт} = 0,64 + 0,023 = 0,663 \text{ год}^{-1}.$$

Пример 2. Определить показатели надежности на шинах 10 кВ понизительной подстанции 110/10 кВ (рисунок 3.36). Подстанция с закрытым РУ 10 кВ обслуживается без дежурного персонала и имеет четыре отходящие линии 10 кВ, общая длина которых $l = 50$ км. Длина питающей ВЛ 110 кВ $l_{110} = 25$ км. Показатели надежности элементов приведены в таблице 3.7.

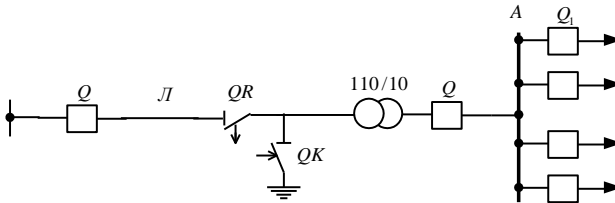


Рисунок 3.36 – Схема понизительной подстанции

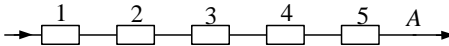


Рисунок 3.37 – Схема замещения по надежности понизительной подстанции

Решение. Схема замещения приведена на рисунке 3.37.

Показатели надежности элемента 1 (ВЛ 110 кВ):

$$\lambda_1 = \lambda_{110} l_{110} = 0,08 \cdot 25 = 2 \text{ год}^{-1}; \quad T_{в1} = T_{в110} = 8 \text{ ч};$$

$$v_1 = 0,15 \cdot 25 = 3,75 \text{ год}^{-1}; \quad T_{01} = T_{0110} = 8 \text{ ч}.$$

Показатели надежности элемента 2 (отделителя):

$$\lambda_2 = \lambda_{QR} = 0,05 \text{ год}^{-1}; \quad T_{в2} = T_{QR} = 4 \text{ ч};$$

$$v_2 = v_{QR} = 0,3 \text{ год}^{-1}; \quad T_{02} = T_{0QR} = 5 \text{ ч}.$$

Показатели надежности элемента 3 (короткозамыкателя):

$$\lambda_3 = \lambda_{QK} = 0,05 \text{ год}^{-1}; \quad T_{в3} = T_{QK} = 4 \text{ ч};$$

$$v_3 = v_{QK} = 0,3 \text{ год}^{-1}; \quad T_{03} = T_{0QK} = 5 \text{ ч}.$$

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

$$\lambda_4 = \lambda_{\tau} + \lambda_{Q10} = 0,45 \text{ год}^{-1}; T_{в4} = \lambda_4^{-1}(\lambda_{\tau} T_{в\tau} + \lambda_Q T_{вQ}) = 22 \text{ ч};$$

$$v_4 = v_{\tau} = 0,4 \text{ год}^{-1}; T_{04} = T_{\tau} = 11 \text{ ч}.$$

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

– отказ шин секции –

$$\lambda_{ш} = \lambda_{ш10}^0 N_{пр} = 0,006 \text{ год}^{-1}; T_{вш} = 4 \cdot 4 = 16 \text{ ч},$$

где $N_{пр} = 6$ (четыре присоединения – отходящие линии, одно – выключатель трансформатора 110/10 кВ, одно – трансформатор собственных нужд 10/0,4 кВ);

– отказ присоединения –

$$\lambda_{пр} = 4\lambda_{QR} + \lambda_{QS} = 0,062 \text{ год}^{-1}; T_{впр} = T_{пер} = 2 \text{ ч}; T_{опр} = 0 \text{ ч};$$

– отказ в срабатывании РЗ отходящих ВЛ 10 кВ –

$$\lambda_{отх} = \sum_{i=1}^4 \lambda_{ли} k_{ш} q_{рзi} = k_{ш} q_{рз} \lambda_{ли}^0 l_{0\Sigma} = 1,5 \cdot 0,02 \cdot 0,1 \cdot 50 = 0,15 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{вотх} = T_{пер} = 2 \text{ ч}; T_{0отх} = 0 \text{ ч}.$$

Итоговые показатели надежности элемента 5:

$$\lambda_5 = \lambda_{ш} + \lambda_{пр} + \lambda_{отх} = 0,218 \text{ год}^{-1}; v_5 = \lambda_{ш} = 0,15 \text{ год}^{-1};$$

$$T_{в5} = \lambda_5^{-1}(\lambda_{ш} T_{вш} + \lambda_{пр} T_{впр} + \lambda_{отх} T_{вотх}) = 2,39 \text{ ч}; T_{05} = T_{0ш} = 5 \text{ ч}.$$

Окончательно показатели надежности на шинах 10 кВ подстанции следующие:

$$\lambda_a = \sum_{i=1}^5 \lambda_i = 2,363 \text{ год}^{-1}; T_{ва} = \lambda_a^{-1} \sum_{i=1}^5 \lambda_i T_{ви} = 7,58 \text{ ч}.$$

С учетом преднамеренных отключений получаем показатели надежности на шинах 10 кВ понизительной подстанции (за базовый элемент принимаем 1 – ВЛ 110 кВ):

$$v_a = 3,75 + 0,3(1 - 0,8) + 0,3(1 - 0,8) + 0,4(1 - 0,6) + 0,15(1 - 0,75) = 4,0675 \text{ год}^{-1};$$

$$T = \frac{1}{4,0675} [3,75 \cdot 8 + 0,4(11 - 8) + 5 \cdot 0,3 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 \cdot 0,2 +$$

$$+ 11 \cdot 0,4 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,15 \cdot 0,25] = 8,37 \text{ ч}.$$

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.

3.3 Применение методов имитационного моделирования

Имитационное моделирование – метод научного исследования систем, для которого характерно воспроизведение (на ЭВМ) процессов функционирования элементов системы с сохранением их алгоритмов, причинно-следственных связей, последовательности протекания и вероятностного характера (детальное описание реализованных имитационных моделей представлено в справочнике [3]). Так, в процессе имитации с помощью ге-

нератора случайных чисел разыгрываются моменты наступления и виды отказов некоторых элементов и проверяются условия работоспособности системы в этот момент. Если существующие отказы элементов не нарушают условий работоспособности системы, то разыгрываются очередные отказы. Наряду с моделированием отказов имитируются процессы восстановления отказавших элементов. В процессе имитации отслеживаются и фиксируются определенные события и состояния системы (наработка до отказа, продолжительность восстановления и др.), по которым оцениваются показатели надежности системы.

При создании имитационной модели могут быть учтены:

- структура исследуемой системы и возможности её модификации;
- различные режимы функционирования системы и их характеристики;
- условия, накладываемые на зависимость отказов элементов.

В имитационной модели могут быть реализованы произвольные вероятностные закономерности надежностных свойств элементов и воздействий на систему. Поэтому стандарты [6] определяют имитационное моделирование в качестве наиболее универсального метода исследования надежности систем.

Другими достоинствами имитационного моделирования является возможность [7, 8]:

- визуального наблюдения за процессом функционирования системы в течение некоторого времени;
- рассматривать различные варианты системы, отвечающие различным сторонам функционирования и возможным структурным преобразованиям;
- имитировать большое число отказов аппаратных и программных средств, что практически неосуществимо при натурных испытаниях;
- оценивать значения всех необходимых количественных показателей надежности;
- создать во время испытаний всё множество технологических ситуаций;
- проводить испытания модели системы в ускоренном или замедленном машинном времени. Так, в течение нескольких секунд на ЭВМ можно проимитировать многолетнее функционирование системы, собрать статистику о тысячах отказов. Известны также приложения имитационного моделирования для изучения процесса ядерного взрыва, продолжительность которого составляет всего доли секунды;
- использовать имитационную модель в качестве тренажера для отработки навыков принятия технических и управленческих решений. Общеизвестно применение имитаторов для тренировки пилотирования самолета (в том числе в нештатных ситуациях), управления движением поездов на участке железной дороги.

Многokrатно воспроизводя процесс функционирования имитационной модели системы до отказа, можно собрать статистический материал, достаточный для оценки интересующих показателей надежности системы с заданной точностью. Такой подход исследования называется статистическим моделированием.

Особенности имитационного моделирования на ЭВМ. Ограничения имитационного моделирования. В процессе имитации приходится оперировать большими объемами данных о функционировании и взаимодействии элементов системы, отслеживать факторы с требуемыми вероятностными характеристиками, накапливать и анализировать статистику об отказах. Поэтому основным техническим средством автоматизации имитационного моделирования является ЭВМ, а имитационная модель по существу является компьютерной программой.

Создание имитационной модели на ЭВМ предполагает:

- 1) формализацию исследуемых систем;
- 2) описание на языке, понятном ЭВМ (например, Паскаль, Си):
 - алгоритмов функционирования и взаимодействия элементов системы;
 - условий работоспособности систем;
 - надежностных характеристик элементов;
 - вероятностных характеристик входных воздействий;
 - режимов эксплуатации и технического обслуживания.

Ограничения имитационного моделирования на ЭВМ:

– не предоставляется непосредственное решение задачи (как при использовании аналитических методов). Имитационная модель служит лишь средством для анализа поведения системы в условиях, определяемых экспериментатором;

– результаты имитационного моделирования зачастую носят вероятностный характер и требуют применения многочисленных методов статистического анализа данных;

– имитационная модель зачастую применима для решения лишь определенной узкой задачи исследования. Незначительная корректировка задачи может потребовать новую имитационную модель;

– имитационная модель, как любая компьютерная программа, требует *верификации* – проверки соответствия фактического алгоритма функционирования имитационной модели замыслу исследования;

– задача *проверки адекватности* (характерная для любой модели) в имитационном моделировании стоит наиболее остро, что связано с вероятностным характером результатов моделирования;

– имитационная модель надежности системы с большим количеством элементов может потребовать значительных ресурсов оперативной памяти ЭВМ и машинного времени для воспроизведения процессов функционирования каждого элемента;

– имитационное моделирование высоконадежных систем весьма ресурсоёмко. Так, для подтверждения вероятности безотказной работы системы 0,99999 с доверительной вероятностью 0,995 необходимо не менее 529830 реализаций имитационной модели до отказа.

Преодоление многих перечисленных выше ограничений состоит в создании специализированных средств автоматизации имитационного моделирования надежности. По сравнению с универсальными языками программирования (Паскаль, Си), специализированные средства автоматизации имитационного моделирования надежности имеют ярко выраженную концептуальную направленность на класс исследуемых систем и решаемых задач. Основными функциями таких средств являются:

- наглядность построения и представления имитационных моделей надежности некоторого класса исследуемых систем;
- автоматизация этапов построения и отладки имитационных моделей;
- автоматизация постановки и проведения имитационных экспериментов с моделями, для чего в средствах автоматизации имитационного моделирования могут быть реализованы типовые методики;
- автоматическое документирование и наглядность представления результатов моделирования;
- автоматизация анализа результатов моделирования;
- поддержка в принятии решений относительно значений показателей надежности систем.

Основу имитационного моделирования составляет *метод статистического моделирования (метод Монте-Карло)*. Название метода происходит от города Монте-Карло, в игорных домах которого в качестве источника случайных величин используется рулетка.

Использование имитационного моделирования для расчёта надёжности сложных технических систем основано на том, что процесс их функционирования представляется математической вероятностной моделью, отражающей в реальном масштабе времени все события (отказы, восстановление), происходящие в системе. С помощью такой модели программными средствами многократно моделируется процесс функционирования системы, и по полученным результатам определяются искомые статистические характеристики этого процесса, являющиеся показателями надёжности.

Применение методов имитационного моделирования позволяет учитывать зависимые отказы, произвольные законы распределения случайных величин и другие факторы, влияющие на надёжность. Однако эти методы, как и любые другие численные методы, дают лишь частное решение поставленной задачи, соответствующее конкретным (частным) исходным данным, не позволяя получить показатели надёжности в функции времени. Поэтому для проведения всестороннего анализа надёжности приходится многократно моделировать процесс функционирования системы с разными ис-

ходными данными. В нашем случае это прежде всего различная структура электрической системы, различные значения вероятностей отказа и длительностей безотказной работы, которые могут изменяться в процессе эксплуатации системы, и другие показатели функционирования.

Рассмотрим схематическое изображение процесса функционирования ЭЭС, состоящей из n элементов (рисунок 3.38), где приняты следующие обозначения: t_{oi} – момент i -го отказа (k -го элемента); или t_{bj} – момент j -го восстановления; τ_{oi} – интервал времени безотказной работы; τ_{bh} – продолжительность восстановления; A_m – m -е состояние ЭЭС.

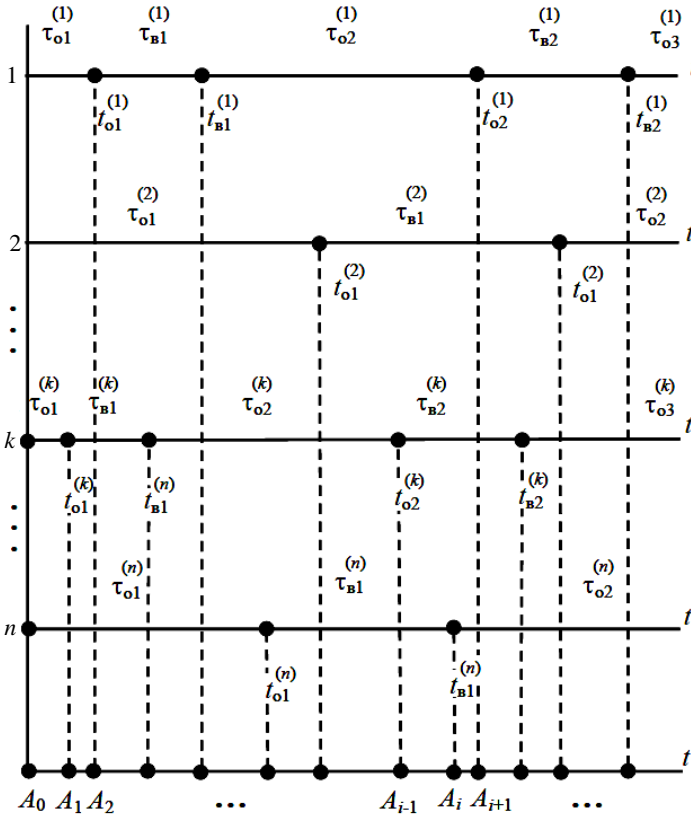


Рисунок 3.38 – Состояния ЭЭС

Процесс функционирования электрической системы (или электротехнической установки) представляется как поток случайных событий, изменений состояния, происходящих в случайные моменты времени. Изменение со-

стояний ЭЭС вызывается отказами и восстановлениями составляющих его элементов.

Отказы и восстановления происходят в случайные моменты времени. Моделирование процесса, функционирования состоит в том, что моделируются моменты, изменения состояния ЭЭС в соответствии с заданными законами распределения наработок между отказами и времени восстановления составляющих элементов на интервале времени T .

Возможны два подхода к моделированию функционирования ЭЭС.

При первом подходе необходимо сначала для каждого элемента системы определить в соответствии с заданными законами распределения наработок между отказами и временами восстановления. Затем вычислить моменты отказов и восстановлений каждого элемента, которые могут произойти за весь исследуемый период T функционирования ЭЭС. После этого можно расположить моменты отказов и восстановлений элементов, являющиеся моментами изменения состояний ЭЭС в порядке их возрастания, как показано на рисунке 3.38. При переходе от события A_m к A_{m+1} проводится анализ системы на принадлежность к области работоспособных или отказовых состояний. При таком подходе в памяти компьютера необходимо фиксировать все моменты отказов и восстановлений всех элементов ЭЭС.

Более удобным является второй подход, при котором для всех элементов сначала моделируются только моменты первого их отказа. По минимальному из них формируется первый переход ЭЭС в другое состояние (из A_0 в A_1) и одновременно проверяется принадлежность полученного состояния к области работоспособных или неработоспособных. Затем моделируется и фиксируется момент времени восстановления и следующего отказа того элемента, который вызвал изменение предыдущего состояния ЭЭС. Снова определяется наименьший из моментов времени первых отказов и этого второго отказа элементов, формируется и анализируется второе состояние ЭЭС – A_2 и т.д. Такой подход к моделированию в большей мере соответствует процессу функционирования реальной ЭЭС, так как позволяет учесть зависимые события. При первом подходе обязательно предполагается независимость функционирования элементов ЭЭС.

Время счёта показателей надёжности методом имитационного моделирования зависит от полного числа опытов N , числа рассматриваемых состояний ЭЭС, числа элементов в ней. Анализ сформированных состояний производится на протяжении всего рассматриваемого интервала времени T .

Программа расчёта показателей надёжности состоит из главной части и отдельных логически самостоятельных блоков-подпрограмм. В главной части в соответствии с общей логической последовательностью расчёта происходят обращения к подпрограммам специального назначения, расчёт показателей надёжности по известным формулам и анализ статистических результатов.

4 ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

4.1 Влияние качества электроэнергии на надежность систем электроснабжения

Качество электроэнергии влияет не только на технологический процесс производства, но и на потери электроэнергии, работу релейной защиты, автоматики и т.д. Поэтому качество электроэнергии является одним из основных требований, обеспечивающих нормальную работу системы электроснабжения.

В нормальном режиме работы системы электроснабжения показатели качества электроэнергии (ПКЭ) не должны выходить за пределы допустимых значений, установленных ГОСТ 13109–98. Этот ГОСТ указывает на необходимость установления на границе балансовой принадлежности системы электроснабжения требуемых значений ПКЭ, которые должны определяться по согласованию между договаривающимися сторонами. При подключении нового промышленного потребителя контроль ПКЭ проводят до и после его присоединения. Периодичность контроля ПКЭ осуществляется в зависимости от самого показателя и от потребителя. Длительность измерений ПКЭ должна быть не менее 1 сут. Контроль ПКЭ необходимо осуществлять также в характерных точках системы электроснабжения.

Наиболее значительное влияние на надежность работы приемников электроэнергии и технологических установок оказывают такие ПКЭ, как отклонения, несимметрия и несинусоидальность напряжения.

Основными факторами, вызывающими отклонения напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий, являются: изменение режимов работы приемников электроэнергии и режима работы источника питания; нерациональное подключение однофазных и ударных нагрузок к элементам системы электроснабжения.

Изменение напряжения на зажимах приемника электроэнергии даже в пределах, установленных ГОСТ, вызывает изменение его технико-экономических показателей. Кроме того, отклонения напряжения влияют на потери мощности и электроэнергии электрооборудования.

Существенное влияние оказывают отклонения напряжения на надежность работы асинхронных двигателей (АД), которые являются наиболее распространенным промышленным приемником электроэнергии. Приближенно можно считать, что вращающий момент АД пропорционален квадрату напряжения на его зажимах, т.е. $M_{вр} \sim U^2$. Поэтому при снижении напряжения уменьшается вращающий момент и несколько снижается частота вращения АД. Снижение частоты вращения зависит также от закона изменения момента сопротивления M_c и от загрузки АД. При малых нагрузках

АД частота вращения ротора будет больше номинальной (при номинальной нагрузке двигателя). В таких случаях понижение напряжения не приводит к уменьшению производительности механизмов, так как не происходит снижения частоты вращения двигателей ниже номинальной. Для АД, работающих с полной нагрузкой, понижение напряжения приводит к уменьшению частоты вращения. Если производительность механизмов зависит от частоты вращения двигателя, то на зажимах таких двигателей рекомендуется поддерживать напряжение не ниже $U_{ном}$. При значительном снижении напряжения на зажимах электродвигателя, работающего с полной нагрузкой, M_c механизма может превысить M_{max} , что приведет к "опрокидыванию" двигателя, т.е. к его остановке. При правильном выборе мощности электродвигателя и элементов цеховой электрической сети явления "опрокидывания" двигателей, как правило, исключаются.

Практический интерес представляет зависимость потребляемой двигателем активной и реактивной мощности от напряжения на его зажимах. При отклонениях напряжения $+10\%$ активная мощность на валу двигателя меняется незначительно. В то же время потери активной и реактивной мощностей в двигателе колеблются в значительных пределах. Изменения потерь активной мощности в АД соизмеримы с потерями в цеховой электрической сети и оказывают при этом заметное влияние на электропотребление.

Непостоянство активной и реактивной мощностей и напряжения вызывает изменение тока двигателя. При полной нагрузке двигателя и отклонении напряжения на $+10\%$ его ток незначительно отличается от $I_{ном}$. При отклонении же напряжения на -10% от номинального тока двигателя $I_{ном}$ увеличивается на 10% . Поэтому с точки зрения нагрева более опасными являются отрицательные отклонения напряжения, которые влияют и на надежность работы других приемников электроэнергии. Так, для дуговых печей сопротивления установлено, что в зависимости от параметра регулирования уменьшение напряжения, подводимого к печному трансформатору, снижает активную мощность печи. Поэтому одним из условий повышения надежности и улучшения энергетического режима работы дуговых печей является регулирование напряжения под нагрузкой.

Опыт эксплуатации показал [14], что при отжиге заготовок в печах сопротивления при незначительном снижении напряжения технологический процесс удлиняется, а при снижении напряжения на 10% процесс отжига производить невозможно. У машин точечной сварки при отклонениях напряжения $\pm 15\%$ получается 100% -ный брак продукции. На каждый процент понижения напряжения световой поток ламп накаливания уменьшается почти на 4% . Снижение светового потока ведет в конечном счете к снижению производительности труда.

Несимметрия напряжения неблагоприятно сказывается на работе и сроке службы, а следовательно, на надежности АД. Так, несимметрия напря-

жения в 1 % вызывает значительную несимметрию токов в обмотках (до 9 %). Токи обратной последовательности накладываются на токи прямой последовательности и вызывают дополнительный нагрев статора и ротора, что приводит к ускоренному старению изоляции и уменьшению располагаемой мощности двигателя. Известно, что при несимметрии напряжения в 4 % срок службы АД, работающего с номинальной нагрузкой, сокращается примерно в 2 раза; при несимметрии напряжения в 5 % располагаемая мощность АД уменьшается на 5–10 %.

Магнитное поле токов обратной последовательности статора синхронных машин индуцирует в массивных металлических частях ротора значительные вихревые токи, вызывающие повышенный нагрев ротора и вибрацию вращающейся части машины. При значительной несимметрии вибрация может оказаться опасной для машины.

Несимметрия напряжения не оказывает заметного влияния на работу кабельных и воздушных линий, однако у трансформаторов наблюдается значительное сокращение срока службы.

Токи нулевой последовательности постоянно проходят через заземлители и отрицательно сказываются на их работе, вызывая высушивание грунта и увеличение сопротивления растеканию.

Несинусоидальные режимы, обусловленные протеканием токов высших гармоник по элементам системы электроснабжения промышленного предприятия, вызывают дополнительные потери активной мощности и электроэнергии. Наибольшие потери имеют место в трансформаторах, двигателях и генераторах.

При наличии высших гармоник в кривой напряжения более интенсивно протекает процесс старения изоляции. Так, например, при несинусоидальности в 5 % через 2 года эксплуатации в 2 раза увеличивается $\text{tg}\delta$ конденсаторов. Ускоренное старение изоляции наблюдается и в силовых кабелях.

За счет высших гармоник тока довольно часто однофазные КЗ переходят в двухфазные в месте первого пробоя вследствие прожигания кабеля. Следовательно, высшие гармоники в кривой напряжения питающей сети приводят к сокращению срока службы силовых кабелей, повышению аварийности в кабельных сетях, увеличению числа необходимых ремонтов. Опыт эксплуатации показал, что при несинусоидальности 5–10 % амортизационные отчисления и стоимость текущих ремонтов кабелей возрастают на 15–20 %.

Если силовые кабели используются в качестве каналов связи между полуккомплектами диспетчерского и контролируемого пунктов, то высшие гармоники тока и напряжения ухудшают работу телемеханических устройств, вызывая сбои в их работе. Кроме того, высшие гармоники вызывают ложную работу устройств релейной защиты, в которой используются фильтры токов обратной последовательности, до 10 % увеличивают погрешность индукционных счетчиков электроэнергии.

Эксплуатация систем электроснабжения отечественных и зарубежных промышленных предприятий показала, что батареи конденсаторов, работающие при несинусоидальных режимах, часто выходят из строя в результате вспучивания или взрыва. Причиной разрушения конденсаторов является перегрузка их токами высших гармоник, обуславливающих возникновение в системе электроснабжения резонансного режима на частоте одной из гармоник.

4.2 Повышение надежности работы электрооборудования, релейной защиты и автоматики

К настоящему времени разработаны различные методы оценки надежности электрооборудования. Для практического применения этих методов необходимы статистические данные о работе отдельных видов электрооборудования. Эти данные должны содержать информацию, достаточную для анализа причин повреждений и отказов электрооборудования, а также для расчетов оценок надежности и выбора оптимального варианта системы электроснабжения.

Отказы в работе электрооборудования в зависимости от длительности перерыва и принесенного ущерба считаются авариями или браком в работе. Отказы в работе в период пуска, наладки и испытаний нового и реконструированного электрооборудования как авария или брак не регистрируются и учитываются особо. Их учет необходим, так как они характеризуют период приработки и освоения нового электрооборудования и несут важную для проектировщиков, эксплуатационников и изготовителей информацию.

Более полные сведения о надежности электрооборудования дает учет всех отказов, включая дефекты. Однако дефекты электрооборудования, обнаруженные при профилактическом обслуживании, не попадают в систему учета, в то время как их учет дает возможность получить информацию, необходимую для оптимизации систем профилактики и резервирования.

Для достоверной количественной оценки надежности требуется надлежащая организация сбора статистических данных о повреждаемости с развернутыми формами и актами, отражающими нарушения в работе данного электрооборудования. С помощью этих данных можно установить функциональную зависимость повреждаемости от внешних условий и режимов работы (нагрузки, температуры и прочих климатических условий, частоты операций, качества применяемых материалов и т.д.).

Для выбора рациональной системы электроснабжения необходимы следующие основные данные, характеризующие надежность работы электрооборудования:

– периодичность повреждений, неисправностей и отказов в работе электрооборудования, периодичность отказов, ложных и неправильных действий устройств защиты и автоматики;

- время ликвидации аварии данного вида электрооборудования, трудозатраты и стоимость аварийно-восстановительных работ;
- периодичность проведения плановых ремонтно-эксплуатационных работ, связанных с выводом электрооборудования из работы, трудозатраты и стоимость эксплуатационно-ремонтных работ.

На основе собранного и обработанного статистического материала об электрооборудовании определяются экономически обоснованные показатели надежности. Последние являются исходными данными для решения задач повышения надежности СЭС.

Надежная работа системы электроснабжения зависит от надежной работы электрооборудования, устройств релейной защиты и автоматики. Важно не только правильно выбрать указанное выше оборудование, но и надлежащим образом поддерживать его надежность в процессе эксплуатации, т.е. должны выполняться организационные меры по его хранению, ремонту и использованию; профилактическое обслуживание с учетом характеристик износа и старения этого оборудования. Если оно обладает ремонтпригодностью и замена его изношенных деталей осуществляется проверенными и приработанными деталями, то в эксплуатации можно обеспечить высокую живучесть оборудования, рассчитанного на многократное использование.

В процессе эксплуатации существенное значение имеют субъективные факторы, т.е. степень квалификации обслуживающего персонала и уровень организации эксплуатации. Надежность, которая свойственна данному изделию, может быть и не реализована из-за этих факторов.

При выборе электрооборудования необходимо исходить из следующих основных положений: электрооборудование должно удовлетворять условиям длительной номинальной работы, режиму перегрузки (форсированный режим), режиму возможных КЗ и перенапряжений и соответствовать условиям окружающей среды (открытая или закрытая установка, температура, задымленность, влажность и др.)

Одними из главных элементов в системе электроснабжения промышленных предприятий являются **выключатели**, от работы которых зависит надежное и безопасное функционирование как отдельных узлов, так и всей системы в целом. Поэтому высокая надежность определяет их главное достоинство, так как отказ выключателя ведет к расширению аварии и большим материальным потерям. При выборе выключателей руководствуются следующими требованиями:

- время отключения выключателя должно быть наименьшим, что позволяет уменьшить последствия аварийного режима, а также увеличить запас устойчивости параллельной работы подстанций и, следовательно, пропускную способность линий электропередачи;

- габаритные размеры выключателя должны быть минимальными, что позволяет уменьшить размеры РУ и, следовательно, удешевить установку;

– коммутационный ресурс выключателя должен быть наибольшим, что позволяет упростить эксплуатацию и сократить расходы на ремонт.

Кроме того, при выборе выключателей необходимо учитывать их пожаробезопасность, отсутствие выброса масла и др.

В настоящее время наиболее надежными выключателями считаются вакуумные [14], достоинствами которых являются: небольшие габариты, простота конструкции, отсутствие сжатого воздуха или трансформаторного масла, взрывобезопасность, малое время отключения (0,05–0,075 с), высокая скорость восстановления прочности дугогасительного промежутка, бесшумность работы, отсутствие выброса в атмосферу, герметизация дугогасительного устройства, значительный коммутационный ресурс (50 000–100 000 при $I_{ном}$; 100 при отключении КЗ), отсутствие ударной нагрузки на фундамент, пожаробезопасность, малые эксплуатационные расходы, большой срок службы (25 лет), широкий диапазон температуры окружающей среды (от $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$), повышенная устойчивость к ударным и вибрационным нагрузкам, удобство обслуживания и др.

Для правильной эксплуатации коммутационного электрооборудования необходимо учитывать его назначение, область применения и особенности работы. Так, например, разъединители, предназначенные для отключения и включения цепей без тока и для создания видимого разрыва цепи в воздухе, можно использовать при следующих отключениях: намагничивающего тока силовых трансформаторов (не более 3,5 А при 6 кВ; не более 3 А при 10 кВ); зарядного тока шин, оборудования, воздушных и кабельных линий (не более 2 А при 10 кВ; не более 2,5 А при 6 кВ); тока замыкания на землю (не более 4 А при 6 кВ; не более 3 А при 10 кВ).

Между силовым выключателем и разъединителем должны предусматриваться механическая и электромагнитная блокировки, не допускающие отключения разъединителя при включенном выключателе, когда в цепи протекает ток нагрузки.

Для менее ответственных потребителей с целью снижения стоимости РУ 6–10 кВ подстанции вместо силовых выключателей небольшой и средней мощностей применяют выключатели нагрузки, способные отключать рабочие токи линий, трансформаторов и других приемников электроэнергии. Для отключения токов КЗ, превышающих допустимые значения для выключателей нагрузки, последние комплектуются кварцевыми предохранителями ПК. При эксплуатации такого комплекта (ВНП) необходимо учитывать, что при каждом отключении выключателя нагрузки происходит износ газогенерирующих дугогасящих вкладышей, ограничивающих число допустимых отключений КЗ.

Широкое применение в системах электроснабжения промышленных предприятий находят **измерительные трансформаторы** тока (ТТ) и напряжения (ТН), которые являются основными источниками информации

для устройств релейной защиты и автоматики. Точная работа ТТ и ТН обеспечивает надежное и быстрое отключение КЗ и своевременное сообщение об опасных перегрузках электрооборудования. От исправности и точности работы ТТ зависят не только правильный повседневный учет электроэнергии, отпускаемой потребителям, но и бесперебойность их электрообеспечения, сохранность самой электроустановки, особенно при КЗ.

В ПУЭ приведены требования к точности ТТ, которая в одинаковой степени важна и необходима как для традиционных электромеханических и статических аналоговых реле, так и для цифровых реле и терминалов релейной защиты, в особенности при использовании цифровых токовых защит с обратно зависимыми время-токовыми характеристиками. Это объясняется тем, что большинство устройств релейной защиты, в том числе и цифровые, получают основную информацию от традиционных электромагнитных ТТ.

При сильном искажении формы вторичного тока ТТ может произойти отказ защиты из-за ненадежного замыкания контактов некоторых реле (ЭТ-520, ИМБ, РМБ, РТ-40).

Говоря о **надежности устройств РЗ**, различают аппаратную надежность и надежность функционирования. *Аппаратная надежность* не зависит от характеристик объекта, на котором установлено данное устройство; *надежность функционирования* связана с выполнением функций, которые возложены на данное устройство, и зависит от свойств защищаемого или автоматизируемого объекта. В отличие от элементов систем электроснабжения, отказы которых приводят к выводу их из работы, последствием отказа устройств РЗ может быть либо излишнее действие, либо несрабатывание, когда оно необходимо. Излишнее действие может быть как в момент отказа устройства – ложное срабатывание, так и при возмущении в системе, на которое устройство не должно реагировать, – неселективное срабатывание.

Надежность подстанций как элемента системы электроснабжения зависит от быстроты и безотказности действия устройств РЗ линий и трансформаторов.

Во время работы системы электроснабжения возникают кратковременные переходные процессы, вызванные изменениями перетоков мощности, аварийными режимами, действиями средств противоаварийной автоматики. Эти процессы могут отразиться на режиме работы потребителей электроэнергии, особенно промышленных предприятий с непрерывным технологическим процессом.

Опыт эксплуатации систем электроснабжения показал, что значительная часть автоматических отключений линий электропередачи вызывается неустойчивыми самоустраняющимися повреждениями. Устройство АПВ позволяет в большинстве отключений восстановить нормальную схему электроснабжения. Также успешно может быть использовано АПВ, если отключение линии произошло из-за ложной или неселективной работы РЗ.

Неустойчивые повреждения могут возникать также на выводах трансформаторов, шинах подстанций, шинных сборках и др.

Применение устройств АПВ питающих кабельных линий 6–10 кВ в системах электроснабжения промышленных предприятий не всегда целесообразно, так как повреждения в этих случаях, как правило, являются устойчивыми. Действия АПВ при устойчивом КЗ на кабельных линиях могут вызвать развитие аварии и еще большие повреждения.

В таблице 4.1 приведены средние оценки показателей надежности основных видов устройств РЗ.

Таблица 4.1 – Средние оценки показателей надежности устройств РЗ

Тип устройства РЗА	Интенсивность отказов, год ⁻¹			Вероятность отказа в срабатывании, 10 ⁻³
	требуемых, 10 ⁻³	ложных, 10 ⁻³	неселективных, 10 ⁻³	
ДФЗ-2	1,3	10	19	2,4
ПЗ-162, ПЗ-164, ПЗ-164А	1,0	3,9	18	7,8
ПЗ-158, ПВБ-158	0,77	6,8	27	5,9
ПЗ-157, ПЗ-158, ПЗ-159	0,7	7,7	7,3	5,7
ПЗ-151, ПЗ-152, ПЗ-153	0,30	0,74	1,8	8,0
ДЗШ	0,16	4,2	11	29
УРОВ	0,044	2,8	2,8	63
ДЗТ	0,032	1,4	5,6	22
Газовая	0,014	4,4	0,93	3,0
МТЗ	–	1,4	2,6	0,6
АПВ	1,3	–	–	7,2
АВР	0,11	7,0	–	117
АЧР	0,18	1,7	2,5	1,6

Успешное действие АПВ имеет место на воздушных линиях электропередачи; в этих случаях электроснабжение можно восстановить за время, менее 1 с, что позволяет повысить надежность электроснабжения потребителей.

Другим эффективным средством повышения надежности электроснабжения является восстановление питания потребителей с помощью АВР источников взамен поврежденных или ошибочно отключенных источников питания.

На предприятиях разных отраслей промышленности широко используются СД мощностью до 5000 кВт (например, для привода насосов, компрессоров); на их долю иногда приходится до 75 % всей потребляемой предприятием электроэнергии. Кратковременное (0,15–0,2 с) снижение напряжения до $0,6U_{ном}$ приводит к выпадению из синхронизма этих двигате-

лей, остановке компрессоров и расстройству технологического процесса. Успешное действие АПВ и АВР в этих схемах не обеспечит бесперебойность работы. С целью повышения надежности системы электроснабжения с синхронной нагрузкой применяются быстродействующие АВР (БАВР).

Основными приемниками электроэнергии на промышленных предприятиях являются АД, которые в силу специфики своей работы отрицательно влияют на значение коэффициента реактивной мощности $\text{tg}\varphi$. Для повышения последнего применяют различные способы компенсации реактивной мощности, в том числе и с помощью батарей конденсаторов. Опыт эксплуатации показал, что целесообразнее заменять, где это возможно, АД на СД, так как СД в режиме перевозбуждения может работать источником реактивной мощности и приводным двигателем одновременно. При этом повышается надежность систем электроснабжения, так как вместо АД с батареей конденсаторов будет работать только СД. Кроме того, батареи конденсаторов имеют недостатки, понижающие надежность системы электроснабжения, а именно: генерируемая или реактивная мощность существенно зависит от напряжения; батареи могут выходить из строя при наличии в сети высших гармоник, и они имеют недостаточную прочность, особенно при КЗ и перенапряжениях.

4.3 Практические рекомендации по повышению надежности систем электроснабжения

Не следует беспредельно добиваться повышения надежности систем электроснабжения. Так, например, усложнение системы за счет введения многократного резервирования приводит лишь к относительно небольшому снижению времени аварийного простоя, причем незначительный рост надежности обычно связан с весьма существенными затратами. Следовательно, не всегда более дорогостоящая система электроснабжения обладает более высокой надежностью.

Перечислим **основные пути повышения надежности систем электроснабжения** [14].

1 *Рациональное резервирование:*

- в цеховых сетях по высокому (ВН) или низкому (НН) напряжению в трансформаторных подстанциях (ТП);
- за счет отдельной или параллельной работы линий, трансформаторов в зависимости от условий и требований;
- за счет выбора числа независимых источников питания с учетом категории потребителей.

На рисунке 4.1 приведен фрагмент схемы электроснабжения с резервированием по ВН и НН (наличие резервной перемычки, отдельное питание секций шин). На рисунке 4.2 даны схемы радиального питания с резервированием, а на рисунке 4.3 – двойная магистральная схема с односторонним питанием при отсутствии сборных шин на цеховых ТП. В случае аварии на

одной из магистралей цеховые ТП переключаются на магистраль, оставшуюся в работе. При необходимости это может быть сделано с помощью АВР на секционном автоматическом выключателе (резервирование по НН).

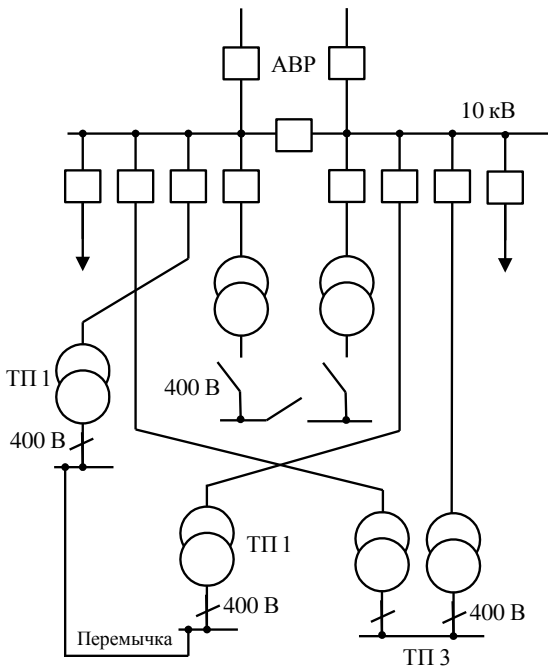


Рисунок 4.1 – Фрагмент схемы электроснабжения с резервированием по ВН и НН

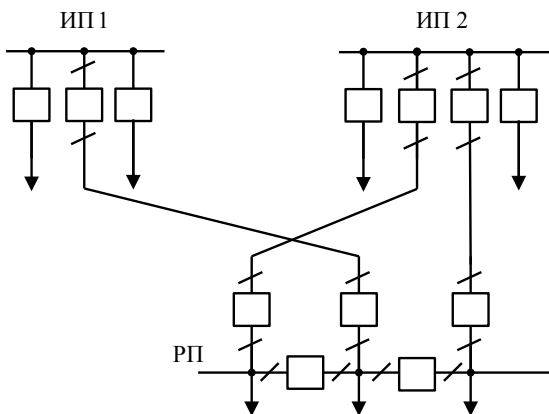


Рисунок 4.2 – Схема радиального питания одного РП от двух источников

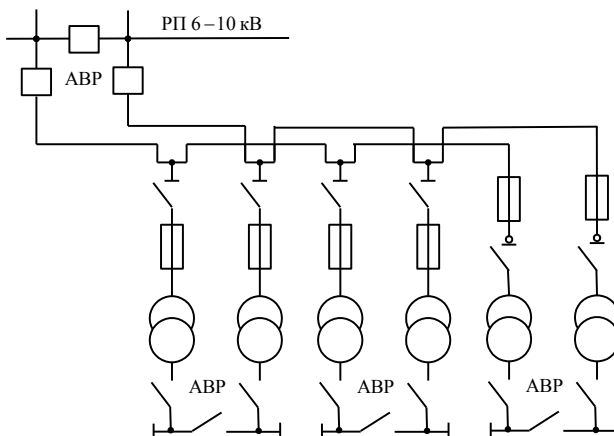


Рисунок 4.3 – Двойная магистральная схема с односторонним питанием при отсутствии сборных шин на цеховых ТП

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

Исследования, проведенные различными организациями по допустимой перегрузке электрооборудования, показали следующее:

- а) кратковременная (до 2–2,5 ч) перегрузочная способность выключателей ВН может быть принята равной 125 % номинальной;
- б) для выключателей нагрузки (ВНП) допустимы такие же перегрузки, как для силовых масляных и сухих трансформаторов;
- в) для проходных изоляторов, работающих в диапазоне температур от -50 до $+60$ °С, допустимая перегрузка составляет $(0,85-1,73)I_{ном}$;
- г) перегрузка воздушных линий возможна практически всегда при сохранении нормального габарита до земли и составляет 30–35 %;
- д) допустимая перегрузка кабельных линий напряжением до 10 кВ зависит от значения и длительности максимума нагрузки линии в нормальном режиме и от способа их прокладки.

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

4 *Повышение качества ремонта оборудования*, что увеличивает межремонтные сроки, снижает затраты труда и материальных средств. Такой ремонт должен производиться квалифицированным персоналом, хорошо знающим конструкцию оборудования, современную технологию ремонта,

а также обладающим высокой профессиональной подготовкой и практическими навыками.

Допустимую перегрузку кабельных линий, находящихся в эксплуатации более 15 лет, принимают на 10 % ниже, чем указано в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Допустимая перегрузка кабельных линий

Коэффициент загрузки в нормальном режиме	Вид прокладки	Коэффициент допустимой перегрузки в зависимости от напряжения и длительности максимума, ч					
		до 10 кВ			20–35 кВ		
		1	2	6	1,5	2	3
0,6	В земле	1,50	1,35	1,25	1,35	1,30	1,15
	В воздухе	1,35	1,25	1,25	1,25	1,15	1,10
	В трубах в земле	1,30	1,20	1,15	1,20	1,10	1,10
0,8	В земле	1,35	1,25	1,20	1,20	1,15	1,1
	В воздухе	1,30	1,25	1,25	1,20	1,15	1,1
	В трубах в земле	1,20	1,15	1,10	1,20	1,05	1,0

5 *Применение, правильный выбор и компоновка современного оборудования.* Выбранное оборудование должно быть устойчиво к действиям токов КЗ. Что касается компоновки, то при особенно высоких требованиях к надежности электроснабжения, секции РУ располагают в разных помещениях.

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

При наличии СД целесообразно в качестве пускового органа устройств АВР применять реле минимального напряжения совместно с реле минимальной частоты или устройство БАВР.

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

Опыт эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий показал, что возможности повышения надежности функционирования находящихся в эксплуатации аналоговых устройств РЗ исчерпаны. Применение микропроцессорных устройств и систем РЗ открывает широкие возможности качественного повышения надежности их функционирования. Опыт же эксплуатации микропроцессорных устройств РЗ за рубежом свидетельствует, что эти устройства имеют равные или лучшие показатели надежности и значительно меньшие трудозатраты на техобслуживание по сравнению с традиционными системами.

На рисунке 4.4 показана простая схема защиты параллельных линий однофазного питания на традиционной элементной базе, которую целесообразно использовать вместо сложной и дорогой дифференциальной защиты. Схема позволяет отключать любую из двух параллельных линий в зависимости от места КЗ.

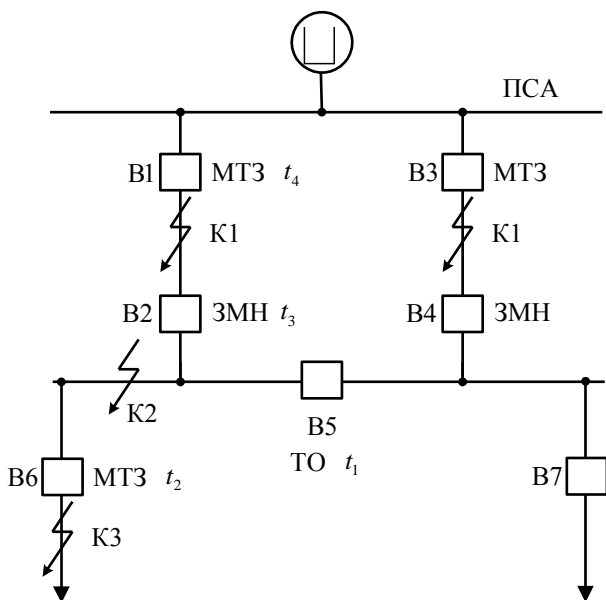


Рисунок 4.4 – Защита параллельных линий одностороннего питания в системах промышленного электроснабжения:
 МТЗ – максимальная токовая защита; ЗМН – защита минимального напряжения;
 ТО – токовая отсечка без выдержки времени; $t_1 = 0$; $t_2 = 0,5$ с; $t_3 = 1,0$ с; $t_4 = 1,5$ с;
 в исходном положении В5 включен

При применении микропроцессорных устройств РЗ в системах электроснабжения наравне с релейно-контактными устройствами особое внимание необходимо обращать на готовность этой системы по обеспечению электромагнитной совместимости.

При эксплуатации газовой защиты трансформаторов возможна ее ложная работа, которая может иметь место при попадании воздуха в бак трансформатора (например, при доливке масла, после ремонта системы охлаждения). Во избежание ложного срабатывания земляной защиты (максимальной токовой защиты нулевой последовательности) необходимо воронку, броню и оболочку кабеля на участке от воронки до ТТ нулевой последовательности (ТНП) изолировать от земли, а заземляющий провод присоединить к воронке кабеля и пропустить через отверстие магнитопровода ТНП в направлении кабеля.

При применении интегральной и цифровой защит необходимо строго выполнять указания по ее эксплуатации. Так, например, если не применять специальных мер (экранирование и пр.), то возникающие по разным причинам помехи могут вызвать ложное срабатывание защиты.

8 *Выбор наиболее целесообразного времени вывода оборудования в ремонт*, а именно совмещение ППР электрооборудования с ППР технологического оборудования, заблаговременный перевод электроснабжения на временное питание от резервных источников и др. Например, плановый ремонт одного из двух трансформаторов двухтрансформаторной ТП целесообразнее проводить в период работы со сниженной нагрузкой потребителя.

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

10 *Применение самозапуска ответственных двигателей (АД и СД)*. Самозапуск необходим для обеспечения устойчивости технологических процессов непрерывных производств при КЗ, отключениях выключателя в цепи питания узла нагрузки и т.д. Самозапуск возникает после кратковременного перерыва и автоматического восстановления электроснабжения. Двигатели, участвующие в самозапуске, при кратковременных перерывах электроснабжения от сети не отключаются.

11 *Обеспечение пожарной безопасности электротехнических сооружений* (подстанций, кабельных туннелей и др.), *внедрение устройств телесигнализации и локализации пожаров*.

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

13 *Внедрение ремонтов под напряжением*.

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

15 *Компенсация реактивной мощности*. За счет данного мероприятия по НН можно разгрузить цеховой трансформатор ТП и при росте нагрузки загрузить его дополнительно активной мощностью.

16 *Повышение статической и динамической устойчивости системы электроснабжения*. Наиболее приемлемым средством достижения этой цели является уменьшение времени действия устройств РЗ.

17 *Повышение качества электроэнергии*. Снижения несимметрии напряжений можно достичь, как показывает опыт эксплуатации систем электроснабжения, в основном двумя путями:

- рациональным пофазным распределением однофазных нагрузок;
- применением симметрирующих устройств.

Для снижения несинусоидальности напряжений (уменьшения высших гармоник) применяют следующие средства:

– раздельное питание приемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой и обычных общепромышленных приемников, которое осуществляют от разных секций шин подстанций;

– увеличение числа фаз выпрямления; так, при переходе от 6-фазной схемы к 12-фазной схеме выпрямления несинусоидальность напряжений

сети уменьшается примерно в 1,4 раза;

– фильтры высших гармоник, которые могут одновременно использоваться для компенсации реактивной мощности.

18 *Совершенствование конструкций и материалов*, из которых изготавливают электрооборудование для систем электроснабжения.

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

4.4 Обеспечение запасными частями электроустановок

4.4.1 Виды комплектов запасных частей

В организации эксплуатации электроустановок существенную роль играет обеспечение их запасными частями (ЗЧ), инструментом, принадлежностями и эксплуатационными материалами.

В процессе эксплуатации любой элемент или оборудование может выйти из строя. Чтобы не снижалась эффективность использования объекта, элемент необходимо заменить в кратчайший срок новым. Опытом эксплуатации установлено, что таких элементов, способных к отказу, в объекте не так уже много. Если предусмотреть их доставку на объект, то в процессе эксплуатации можно будет оперативно заменить отказавший элемент. Для выполнения этих работ необходимо иметь на объекте или ремонтной базе необходимое количество установленной номенклатуры элементов, объединенных общим названием запасные части. **Запасная часть** – составная часть объекта, предназначенная для замены находящейся в эксплуатации такой же части в целях поддержания или восстановления работоспособности объекта. К запасным частям относятся детали, узлы, агрегаты, необходимые для технического обслуживания и ремонта объектов.

Одиночный комплект ЗЧ предназначен для поддержания объекта в работоспособном состоянии путем проведения технических обслуживаний и текущего ремонта силами эксплуатирующего его персонала в объеме требований эксплуатационной документации. Одиночный комплект разрабатывается на каждый объект и поставляется вместе с ним на все время эксплуатации. Израсходованные из состава одиночного комплекта ЗЧ детали должны своевременно пополняться одноименными из группового комплекта.

Групповой комплект ЗЧ разрабатывают для группы одноименных объектов. Он предназначен для обеспечения технического обслуживания и ремонта объектов с истекшими гарантийными сроками эксплуатации, в объеме требований эксплуатационной документации. Кроме того, групповой комплект ЗЧ используется для пополнения соответствующих одиночных комплектов ЗЧ. Он поставляется промышленностью вместе с соответствующей группой объектов один раз на все время их эксплуатации и нахо-

дится, как правило, на складе эксплуатирующей организации. Состав группового комплекта ЗЧ определяется исходя из обеспечения эксплуатации группы объектов в течение установленного документацией времени.

Ремонтный комплект ЗЧ разрабатывается промышленностью на группу одноименных объектов для их ремонта на ремонтных предприятиях, базах, в ремонтных мастерских, а также для пополнения групповых комплектов ЗЧ.

Запасные части россыпью предназначаются для пополнения групповых и ремонтных комплектов ЗЧ при техническом обслуживании и ремонте объектов. Планирование поставок ЗЧ россыпью производится исходя из ежегодных сведений о расходе ЗЧ.

Эксплуатационные (расходные) материалы предназначены для использования при техническом обслуживании и ремонте оборудования. К таким материалам относятся жидкие диэлектрики (трансформаторное масло), твердые диэлектрики (гитенакс, стеклотекстолит, электрокартон, пластмасса), конструкционные материалы (металлы, проволока), проводниковые и магнитные материалы и др. По оперативности использования эксплуатационные материалы подразделяются на расходные по потребности и нерасходные до определенного срока. Номенклатура и количество эксплуатационных материалов определяются на основании содержания технического обслуживания и ремонта объектов.

4.4.2 Расчет комплектов запасных частей

Недостаточно обоснованный состав комплектов ЗЧ приводит, с одной стороны, к созданию неиспользуемых запасов на складах служб материально-технического обеспечения (МТО) отдельных объектов, а с другой, – к значительному дефициту некоторых агрегатов, узлов и деталей.

Оптимизация состава ЗЧ и системы их обеспечения повышает эффективность использования объектов во время эксплуатации; уменьшает дефицит необходимых ЗЧ; сокращает неиспользуемые запасы на складах; уменьшает расходы на приобретение, доставку и хранение ЗЧ; устанавливает номенклатуру и количество запасных агрегатов, узлов и деталей.

Основная задача расчета комплектов ЗЧ состоит в обосновании номенклатуры запасных частей и их количества. Для ее решения требуются специальные методы. Состав заменяемых частей зависит от многих факторов: ресурса заменяемых частей и степени его использования; годовой наработки и межремонтного ресурса деталей; степени старения и износа деталей; внешних воздействий; условий эксплуатации. Кроме того, при определении количества запасных частей нужно учитывать сроки выполнения заказов, особенно дорогостоящих и технологически сложных по выполнению, а также возможность доставки их на базы. В общем случае обоснование состава комплектов ЗЧ заключается в предварительном определении их номенклатуры, а затем количества элементов каждого наименования.

Для установления номенклатуры запасных частей анализируются конструкция объекта, технологические возможности по замене элементов в зависимости от сил и средств технического обслуживания и ремонта. При определении номенклатуры одиночного комплекта выявляются возможности персонала, эксплуатирующего объект (квалификация, наличие времени с учетом конструкции образца оборудования). При определении номенклатуры ЗЧ группового комплекта учитываются технологические возможности ремонтного подразделения (предприятия, базы), а также наименования элементов, подлежащих планово-предупредительным заменам.

Метод, основанный на потоке заявок. В основу *расчетов количества запасных частей* каждого уже установленного наименования в комплектах ЗЧ при их разработке может быть положено использование параметра потока заявок на ЗЧ (обозначим его через χ). Показатель χ – количество запросов на ЗЧ одного наименования в единицу времени (часы, сутки, год) при расчете соответствующего комплекта ЗЧ.

Пользуясь показателем χ , можно определить среднее количество z запасных частей (одного наименования), расходуемых за установленное время t : $z = \chi t$. Обоснование комплекта с помощью z слишком приближенное. Это объясняется тем, что z – математическое ожидание количества израсходованных ЗЧ, а вероятность того, что будет использовано не более z запасных частей, равна 50 %. Даются более высокие значения вероятности: 90; 95; 99 %. Потребное количество ЗЧ:

$$P(k) = \frac{\bar{z}^k}{k!} e^{-\bar{z}},$$

где $P(k)$ – вероятность того, что будет израсходовано k одноименных ЗЧ.

Тогда вероятность того, что будет израсходовано не более z одноименных ЗЧ,

$$P(z) = \sum_{k=0}^z P(k), \quad P(z) = e^{-\bar{z}} \sum_{k=0}^z \frac{\bar{z}^k}{k!}.$$

По заданному значению $P(z)$ и предварительно вычисленному \bar{z} можно установить z . Обычно для этой цели берут таблицы или номограммы (см., например, таблицу 4.3).

Заметим, что для достаточно больших z ($z > 20$) значения z при $P(z) = 95\%$ можно вычислять по приближенным формулам

$$z = 5 + 1,12 \bar{z} \text{ при } 20 < \bar{z} \leq 60 \dots 70; \quad z = 10 + 1,06 \bar{z} \text{ при } \bar{z} > 60 \dots 70.$$

Одиночный комплект ЗЧ. На стадии разработки одиночных комплектов ЗЧ для определения χ ограничиваются учетом лишь интенсивности отказа λ соответствующего элемента и количества n всех элементов в объекте. Тогда $\chi_0 = \lambda n$.

Таблица 4.3 – Отношение требуемого количества запасных частей к его математическому ожиданию

\bar{z}	z/\bar{z} при $P(z)$, %		
	90	95	99
1	1,80	2,30	3,40
2	1,65	2,00	2,65
3	1,57	1,83	2,40
4	1,50	1,75	2,25
5	1,47	1,67	2,05
6	1,40	1,63	2,00
7	1,37	1,60	1,85

Пример. Установа, содержащая $n = 350$ однотипных элементов, имеющих интенсивность отказов $\lambda = 0,86 \cdot 10^{-5}$ 1/ч, должна находиться в эксплуатации $t = 2000$ ч. Требуется определить число запасных элементов z для одиночного комплекта ЗЧ, если гарантийная вероятность $P(z) = 0,99$.

Решение. Определим: $\bar{z} = \chi_0 t = \lambda n t = 0,86 \cdot 10^{-5} \cdot 350 \cdot 2 \cdot 10^3 = 6$ элементов. Из таблицы 4.3 для $\bar{z} = 6$ и $P(z) = 0,99$ находим отношение $z/\bar{z} = 2$. Отсюда $z = 2\bar{z} = 2 \cdot 6 = 12$.

Групповой комплект ЗЧ. В случае расчета группового комплекта ЗЧ учитывается количество объектов N_r – для которых предназначен комплект. В связи с этим при расчете групповых комплектов $\chi_r = \lambda n N_r$.

Пример. Определить требуемое количество однотипных элементов для группового комплекта ЗЧ при $P(z) = 95\%$, если комплект пополняется при $t = 20$ тыс.ч и предназначен для $N_r = 14$ трансформаторов, каждый из которых содержит $n = 25$ однотипных элементов с $\lambda = 3 \cdot 10^{-7}$ 1/ч.

Решение. Находим: $\bar{z} = \chi_r t = \lambda n N_r t = 3 \cdot 10^{-7} \cdot 25 \cdot 12 \cdot 20 \cdot 10^3 = 21$ элемент. Так как $\bar{z} > 20$, то $z = 5 + 1,12 \cdot 21 = 29$.

Результаты расчетов значений z для каждого наименования выбранной номенклатуры элементов позволяют в совокупности сформировать одиночный или групповой комплект ЗЧ. При формировании группового комплекта ЗЧ следует также учесть ЗЧ, необходимые для замены отказавших элементов, а для планово-предупредительных замен – при проведении ТО. Так, если элемент подлежит планово-предупредительной замене при j -м обслуживании, то для таких обслуживаний в интервале t времени эксплуатации N_r объектов потребуется в групповом комплекте $z_j = N_r t / T_{ТО}$ частей.

Если планово-предупредительные замены элемента проводятся при ТО нескольких видов, то $z_{ТО} = \sum_{j=1}^l z_j$.

Таким образом, при формировании групповых комплектов ЗЧ учитыва-

ются элементы, предназначенные как для восстановления работоспособности машин, так и для предупреждения отказов, то есть для проведения ТО соответствующих видов. На практике большое распространение находят приближенные методики расчета ЗЧ с последующей корректировкой состава комплектов по результатам эксплуатации объектов.

Для *пополнения групповых комплектов* приближенно требуется среднее количество одноименных ЗЧ

$$\bar{z}_{п.г.} = v_r N_r t_r,$$

где v_r – прогнозируемый среднегодовой расход одноименных ЗЧ из расчета на один объект (из групповых комплектов);

t_r – количество лет, в течение которых за счет ремонтного комплекта пополняются групповые комплекты.

По значению $\bar{z}_{п.г.}$ можно определить $\bar{z}_{п.г.}$ используя одно из соотношений для z .

Состав комплектов ЗЧ в процессе эксплуатации подвергается корректировке на основе данных об отказах элементов, деталей, сведений о фактическом расходе ЗЧ. Эти данные отличаются от тех усредненных показателей надежности, которыми пользуются на стадии разработки комплектов ЗЧ.

Для *корректировки одиночных и групповых комплектов* ЗЧ используют среднегодовой расход одноименных элементов ЗЧ при эксплуатации одного объекта:

$$v_{ср} = v_{г.ср} / n_{г.ср},$$

где $v_{г.ср}$ – среднегодовой расход одноименных элементов ЗЧ на эксплуатацию объекта в принятой для анализа группе организаций, предприятий в течение установленного интервала эксплуатации;

$n_{г.ср}$ – среднегодовое количество объектов, находящихся в эксплуатации, в принятой для анализа группе организаций, предприятий в течение установленного интервала эксплуатации.

Значение $v_{г.ср}$ и $n_{г.ср}$ определяют по формулам

$$v_{г.ср} = \frac{1}{r} \sum_{\gamma=1}^r v_{\gamma}; \quad n_{г.ср} = \frac{1}{r} \sum_{\gamma=1}^r n_{\gamma},$$

где v_{γ} – суммарное количество одноименных элементов ЗЧ, израсходованных в γ -м году установленного для анализа интервала эксплуатации в принятой для анализа группе организаций, предприятий;

n_{γ} – количество объектов, находившихся в эксплуатации в γ -м году, установленного для анализа интервала эксплуатации в соответствующей группе организаций, предприятий.

Исходные данные в виде значений показателя v_{cp} необходимо получить для всей номенклатуры ЗЧ, входящих в состав анализируемых одиночных и групповых комплектов ЗЧ. Значения v_{cp} , полученные в результате анализа исходных данных и отражающие фактический расход ЗЧ, а также запросы на элементы комплектов новых наименований используют для расчета среднего потребного количества запасных частей одного наименования \bar{z} . Так, для одиночных комплектов ЗЧ (каждого наименования элементов)

$$\bar{z}_0 = v_{cp.0} t_0,$$

где t_0 – средний интервал времени между моментами пополнения одиночных комплектов ЗЧ (в годах).

Для групповых комплектов ЗЧ

$$\bar{z}_{гр} = v_{cp} N_{г} t_{г},$$

где $t_{г}$ – периодичность пополнения групповых комплектов ЗЧ (в годах).

Показатели \bar{z}_0 , $\bar{z}_{гр}$ характеризуют в среднем потребное количество элементов соответствующего наименования.

Помимо статистических данных о фактическом расходе ЗЧ при корректировке одиночных и групповых комплектов применяют следующую документацию: технические описания (руководства), инструкции по эксплуатации (руководства по ремонту), ведомости комплектов ЗЧ, каталоги деталей и сборочных единиц (чертежи основного производства), перечни сборных единиц и деталей, подлежащих обязательному восстановлению при ремонте. Эта документация помогает анализировать комплекты ЗЧ по введенной в их состав номенклатуре элементов. При этом учитывается назначение комплектов ЗЧ, их принадлежность (использование эксплуатационным персоналом, ремонтным подразделением).

Ремонтный комплект ЗЧ формируется путем обоснования состава необходимых для плановых ремонтов объектов (среднего, капитального ремонтов) и пополнения групповых комплектов ЗЧ. Методика приближенного расчета ремонтных комплектов ЗЧ основана на использовании такого показателя, как норма расхода ЗЧ. Под *нормой расхода запасных частей* понимается максимально допустимые затраты их на один объект (или несколько объектов), обеспечивающая восстановление работоспособности объектов в заданных условиях.

Для определения состава ремонтных комплектов чаще всего используют нормы расхода ЗЧ на плановый ремонт определенного количества объектов. Нормы расхода ЗЧ на средний или капитальный ремонт объектов разрабатывают с учетом объема работ, выполняемых при ремонте, и включают в состав ремонтной документации. Пользуясь такой нормой, можно приближенно определить требуемое для *среднего или капитального ремонта* количество одноименных запасных частей:

$$\bar{z}_p = \frac{R}{k} N_p l,$$

где R – норма расхода одноименных ЗЧ на средний или капитальный ремонт k объектов;

N_p – количество объектов, обеспечиваемых одним ремонтным комплектом ЗЧ;

l – возможное число средних или капитальных ремонтов объектов за установленное время эксплуатации.

Метод, основанный на показателях надежности. Рассмотрим подходы к расчету одиночного и ремонтного комплектов ЗЧ с использованием показателей надежности. Исходными данными для определения номенклатуры ЗЧ объектов являются:

- назначенный ресурс T_p объекта;
- средний ресурс объекта до капитального ремонта $T_{p,k}$;
- средняя наработка детали до отказа T_o ;
- наработка электроустановки на отказ T_o .

Одиночный комплект ЗЧ. Среднее количество ЗЧ для него

$$\bar{z} = n \left(\frac{T_{p,k}}{T_o} - 1 \right) \eta_b,$$

где n – количество деталей одного типа в объекте;

T_o – средняя наработка до отказа элементами одного типа (для невосстанавливаемых) или на отказ (для восстанавливаемых);

$\eta_b = 1/(m_b + 1)$ – коэффициент повторного восстановления элемента;

m_b – число восстановлений элемента одного типа.

Для невосстанавливаемых элементов $\eta_b = 1$, тогда формула примет вид

$$\bar{z} = n \left(T_{p,k} / T_o - 1 \right).$$

Ремонтный комплект ЗЧ рассчитывают для выполнения одного капитального ремонта. В ремонтный комплект необходимо включать элементы, сборочные единицы и комплектующие изделия, ресурс которых меньше ресурса до списания объекта, то есть $T < T_p$. В этот комплект входят элементы и сборочные единицы одиночного комплекта ЗЧ.

При эксплуатации ЭУ могут потребоваться элементы в количестве, превышающем среднее. Это обстоятельство учитывают вероятностным методом с помощью уровня достаточности φ – вероятности того, что не будет простоев объекта из-за нехватки элементов в одном комплекте ЗЧ. Расчетное число запасных частей \bar{z}_φ , отвечающих этой вероятности, находят по номограмме [21] с учетом выражения

$$\varphi = p(m \leq z_\varphi),$$

где m – число отказов элементов одного типа в рассматриваемом интервале.

Для определения количества ЗЧ в каждом конкретном случае уровень достаточности ϕ задают, учитывая условия эксплуатации объекта. В зависимости от последствий отказа каждого элемента объектов принимают следующий уровень достаточности:

- при отказе с тяжелыми последствиями (связанными с угрозами человеческой жизни) – $\phi = 0,95 \dots 0,99$;
- при отказе, вызывающем большие убытки от простоя ЭУ, – $\phi = 0,92 \dots 0,95$;
- при невыполнении заданных функций – $\phi = 0,9 \dots 0,92$.

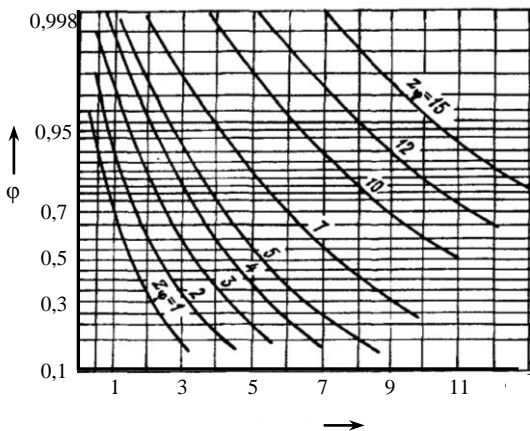


Рисунок 4.5 – Номограмма для определения количества ЗЧ при распределении отказов по экспоненциальному закону

а ресурс генератора до капитального ремонта $T_{p,к} = 5000$ ч, до списания $T_p = 10000$ ч. Подшипник относится к невосстанавливаемым сборочным единицам. Преобладающий вид отказа подшипника – внезапный. Уровень достаточности $\phi = 0,9$.

Решение. Отношение $T_{p,к} / T_p = 5000 / 3500 = 1,4$. Среднее число подшипников для одиночного комплекта ЗЧ определим по формуле $\bar{z} = n \left(\frac{T_{p,к}}{T_0} - 1 \right) = 1$. По номограмме, представленной на рисунке 4.5 (линия 1) расчетное количество ЗЧ $\bar{z}_\phi = 3$. Так как наработка подшипника до отказа $T_0 < T_{p,к}$, ремонтный комплект ЗЧ следует назначить $z = 3$.

Если для элементов ЭУ характерным является постепенный вид отказа, наработка на отказ, как правило, подчиняется нормальному и гамма-распределениям. Расчетное количество запасных частей \bar{z}_ϕ для таких элементов находят по номограмме, приведенной на рисунке 4.6.

Если у элемента ЭУ преобладают внезапные отказы, наработка до отказа чаще всего подчиняется экспоненциальному закону, а поток отказов – закону Пуассона. В этом случае расчетное количество запасных частей \bar{z}_ϕ с учетом уровня достаточности ϕ определяют по номограмме, представленной на рисунке 4.5.

Пример 1. Рассчитать необходимое количество подшипников для одиночного и ремонтного комплектов ЗЧ генератора, если наработка подшипника до отказа $T_0 = 3500$ ч, количество подшипников в генераторе $n = 2$,

Пример 2. Рассчитать количество пусковых реостатов асинхронного двигателя с фазным ротором для одиночного и ремонтного комплектов ЗЧ. Ресурс до капитального ремонта $T_{p,к} = 10000$ ч, а до списания $T_p = 20000$ ч. Нарботка на отказ $T_0 = 1500$ ч. Используются три реостата, $n = 2$. Реостат относится к восстанавливаемому изделию, число восстановлений $m_b = 1$. Преобладающий вид отказа – постепенный, характер отказа – износ, уровень достаточности $\phi = 0,92$.

Решение. Отношение $T_{p,к}/T_p = 10000 / 1500 = 6,6$.

По формуле $\bar{z} = n \left(\frac{T_{p,к}}{T_0} - 1 \right) \eta_b$

среднее количество реостатов для одиночного комплекта ЗЧ $z = 6$. По номограмме, приведенной на рисунке 4.6, расчетное количество запасных частей $\bar{z}_\phi = 6$. Так как ресурс $T_0 < T_{p,к}$ для ремонтного комплекта ЗЧ $z = 6$.

Опыт эксплуатации ЭУ [21] показывает, что часть элементов и сборочных единиц, от которых зависит безопасность обслуживающего персонала, противопожарная безопасность и т.п., при расчете комплектов ЗЧ не учитываются.

В одиночный комплект ЗЧ необходимо включать элементы системы защиты в количестве: $z = 1$ при $n = 1$; $z > 0,5 n$ при $n > 1$. Количество резинотехнических изделий назначают равным n ; их пополняют по истечении срока сохранности. Для устройств, не защищенных от случайных повреждений, рекомендуется планировать: $z = 1$ при $n = 1 \dots 4$; $\bar{z} = 0,25 n$ при $n > 4$. В ремонтный комплект ЗЧ дополнительно к расчетному следует включать комплектующие элементы, не обеспечивающие ресурс изделий до списания. При заказе этих элементов необходимо учитывать опыт эксплуатации и фактически выработанный ресурс объекта, а также количество элементов, рассчитанных на прочность и износ в течение работы до капитального ремонта.

Для дальнейшего уточнения полученных значений количества ЗЧ целесообразно использовать статистические данные о замене элементов, сборочных единиц и комплектующих изделий в реальных условиях эксплуатации.

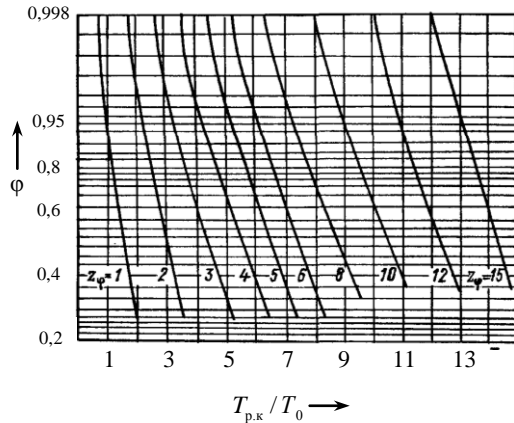


Рисунок 4.6 – Номограмма для определения количества ЗЧ при распределении отказов по нормальному закону

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Боровиков, В. П.** Популярное введение в программу STATISTICA / В. П. Боровиков. – М. : КомпьютерПресс, 1998. – 69 с.
- 2 **Жученко, Ю. М.** Статистическая обработка информации с применением персональных компьютеров : практ. руководство для студентов 5-го курса / Ю. М. Жученко. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2007. – 101 с.
- 3 Задачи и модели исследования операций. Ч.3. Технология имитации на ЭВМ и принятие решений : учеб. пособие / И. В. Максимей [и др.]. – Гомель : БелГУТ, 1999. – 150 с.
- 4 **Анищенко, В. А.** Надёжность систем электроснабжения / В. А. Анищенко. – Минск : УП “Технопринт”, 2001. – 160 с.
- 5 **Герасимович, А. И.** Математическая статистика пособие / А. И. Герасимович. – Мн. : Высш. шк., 1983. – 275 с.
- 6 **Жаднов, В. В.** Современные проблемы автоматизации расчетов надежности / В. В. Жаднов, И. В. Жаднов, С. Н. Полесский // Надежность. – 2007. – № 2 (21). – С. 3–12.
- 7 **Максимей, И. В.** Имитационное моделирование на ЭВМ / И. В. Максимей. – М. : Радио и связь, 1988. – 232 с.
- 8 **Сертификация** и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики / под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1997. – 288 с.
- 9 **Надежность** и эффективность в технике : справ. : в 10 т. / под ред. В. И. Патрушева и А. И. Рембезы. – М. : Машиностроение, 1988. – Т.5 : Проектный анализ надежности – 316 с.
- 10 **Проников, А. С.** Надежность машин / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978. – 592 с.
- 11 **Проников, А. С.** Параметрическая надежность машин / А. С. Проников. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 560 с.
- 12 **Рыжкин, А. А.** Основы теории надежности : учеб. пособие / А. А. Рыжкин, Б. Н. Слюсарь, К. Г. Шучев. – Ростов н/Д : Издательский центр ДГТУ, 2002. – 182 с.
- 13 **Капур, К.** Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон. – М. : Мир, 1980. – 606 с.
- 14 **Конюхова, Е. А.** Надежность электроснабжения промышленных предприятий / Е. А. Конюхова, Э. А. Киреева. – М. : НТФ “Энергопрогресс”, 2001. – 92 с.
- 15 **Фокин Ю. А.** Надежность и эффективность сетей электрических систем / Ю. А. Фокин. – М. : Высш.шк. 1989. – 149 с.
- 16 Основы теории надежности систем электроснабжения / В. В. Карпов [и др.]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2003. – 72 с.
- 17 **Шевченко, Д. Н.** Основы теории надежности : учеб.-метод. пособие для студ. техн. спец. / Д. Н. Шевченко; под ред. Л. А. Сосновского; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 250 с.
- 18 **Шевченко Д. Н.** Теория вероятностей и математическая статистика / Д. Н. Шевченко. – Гомель : БелГУТ, 2006. – 318 с.
- 19 **Анализ** статистических данных на персональном компьютере : лаб. практик. / Т. В. Прищепова [и др.]; под ред. В. С. Серёгиной; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2006. – 95 с.
- 20 **Папков, Б. В.** Надежность и эффективность электроснабжения : учеб. пособие / Б. В. Папков, Д. Ю. Пашали. – Уфа : Уфимс. гос. авиац. техн. ун-т, 2005. – 380 с.
- 21 **Калявин, В. П.** Надежность и диагностика элементов электроустановок : учеб. пособие для вузов / В.П. Калявин, Л. М. Рыбаков. – СПб. : Элмор, 2009. – 331 с.

Учебное издание

*Галушко Виктор Николаевич
Додолев Сергей Григорьевич*

**НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Учебно-методическое пособие

Редактор И. И. Э в е н т о в
Технический редактор В. Н. К у ч е р о в а

Подписано в печать 17.03.2014 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 9,07. Уч.-изд. л. 9,82. Тираж 175 экз.
Зак. № . Изд. № 106.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный университет транспорта:
ЛИ № 02330/0552508 от 09.07.2009 г.
ЛП № 02330/0494150 от 03.04.2009 г.
246653 г. Гомель, ул. Кирова, 34