

Владимирский государственный университет

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Учебное пособие

Владимир 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Учебное пособие

Электронное издание



Владимир 2025

ISBN 978-5-9984-2016-0

© ВлГУ, 2025

УДК 658.26
ББК 31.28

Автор-составитель: Ю. П. Максимов

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой электротехники и электроэнергетики
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Н. П. Бадалян

Кандидат технических наук, доцент
декан факультета автоматики и электроники Ковровской
государственной технологической академии им. В. А. Дегтярева
А. А. Митрофанов

Кандидат технических наук
доцент кафедры электроники, приборостроения и биотехнических
систем Владимирского государственного университета имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
В. В. Евграфов

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Надежность электроснабжения потребителей [Электронный ресурс] : учеб. пособие / авт.-сост. Ю. П. Максимов ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2025. – 94 с. – ISBN 978-5-9984-2016-0. – Электрон. дан. (2,51 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Рассмотрены основные понятия теории надёжности и вопросы проектирования и эксплуатации систем электроснабжения. Кратко изложен математический аппарат теории надёжности, ориентированный на применение при расчётах систем электроснабжения потребителей. Описаны математические модели и методы расчёта надёжности систем электроснабжения потребителей. Приведены примеры расчётов технических и технико-экономических задач повышения надёжности. Рассматриваются вопросы, связанные с оптимизацией надёжности систем электроснабжения.

Предназначено для студентов вузов всех форм обучения направления подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Ил. 20. Табл. 6. Библиогр.: 11 назв.

ISBN 978-5-9984-2016-0

© ВлГУ, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список основных сокращений	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЁЖНОСТИ.....	7
1.1. Категории надёжности электроприёмников	7
1.2. Понятие и классификация отказов	10
1.3. Объект, элемент и система в теории надёжности. Состояние объекта	15
1.4. Основные средства обеспечения надёжности систем электроснабжения	18
1.5. Свойства и показатели надёжности	22
1.6. Контрольные вопросы	31
2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ТЕОРИИ НАДЁЖНОСТИ	33
2.1. Основы теории вероятностей применительно к системам электроснабжения	33
2.2. Законы распределения случайных величин в теории надёжности	37
2.3. Математическая статистика в системах электроснабжения	44
2.4. Контрольные вопросы	49
3. МЕТОДЫ РАСЧЁТА НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	51
3.1. Аналитический метод расчета надёжности схем систем электроэнергетики	51
3.2. Логико-вероятностный метод расчета надёжности систем электроснабжения	53
3.3. Метод минимальных путей и сечений схем систем электроснабжения	56
3.4. Контрольные вопросы	62

4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ В ЗАДАЧАХ НАДЁЖНОСТИ	64
4.1. Определение ущерба потребителей от перерывов электроснабжения	64
4.2. Экономический эффект от повышения надёжности систем электроснабжения	68
4.3. Контрольные вопросы	69
5. МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ВОПРОСОВ	71
5.1. Решение практических примеров.....	71
5.2. Расчётно-графическая работа «Расчёт и выбор варианта районной электрической сети с точки зрения надёжности»	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	94
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	96

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ВЛ – воздушная линия
 ГПП – главная понижающая подстанция
 ДО – дерево отказов
 ДС – дерево событий
 ИП – источник питания
 ЛВМ – логико-вероятностный метод
 ЛЭП – линия электропередачи
 НТД – нормативно-техническая документация
 ПУЭ – правила устройства электроустановок
 РП – распределительный пункт
 СЭС – система электроснабжения
 ТП – трансформаторная подстанция
 ЭП – электроприемник
 ЭЭС – электроэнергетическая система

ВВЕДЕНИЕ

Задача обеспечения надёжности является одной из важнейших проблем при проектировании, внедрении и эксплуатации любой технической системы.

Надёжность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. С другой стороны, надёжность – свойство объекта выполнять заданные функции в заданном объёме в течение заданного времени при определённых условиях функционирования, сохраняя свои эксплуатационные показатели в соответствии с нормативно-технической документацией.

Под надёжностью электроснабжения понимается свойство электротехнической установки, участка электрической сети и энергосистемы в целом обеспечивать в нормальных условиях эксплуатации бесперебойное электроснабжение потребителей электрической энергией нормированного качества и в необходимом количестве.

Надёжность электроснабжения зависит от принятой схемы электроснабжения, надёжности используемого в ней энергетического оборудования и технических устройств, а также компетентности и адекватности действий обслуживающего персонала при эксплуатации оборудования.

Надёжность электроснабжения оценивается частотой и средней продолжительностью нарушений электроснабжения потребителей, относительной величиной аварийного резерва, необходимого для обеспечения заданного уровня бездефицитной работы энергосистемы и её отдельных узлов.

Кроме того, под надёжностью электроснабжения понимают *непрерывное обеспечение потребителей электроэнергией заданного качества в соответствии с договорными обязательствами*. В современных рыночных условиях надёжность электроснабжения неразрывно

связана с экономическими показателями и энергетической безопасностью промышленных предприятий. Надёжность электроснабжения является товаром, имеющим свою цену, и реализуется через рыночные услуги.

Задача обеспечения надёжности систем электроснабжения включает в себя целый комплекс технических, экономических и организационных мер, направленных на снижение ущерба от нарушения нормального режима работы потребителей электроэнергии, а именно [1]:

- выбор критериев и количественных характеристик надёжности;
- испытание на надёжность и прогнозирование надёжности действующего оборудования;
- выбор оптимальной структуры проектируемых (реконструируемых) систем электроснабжения по критерию надёжности;
- обеспечение заданных технических и эксплуатационных характеристик работы потребителей;
- разработку наиболее рациональной с точки зрения обеспечения надёжности программы эксплуатации системы (обоснование режимов профилактических работ, норм запасных элементов и методов поиска неисправностей).

Цель изучения дисциплины «Надёжность электроснабжения» – формирование у будущих бакалавров знаний в области теории и практики надёжности систем электроснабжения и приобретение навыков самостоятельного решения инженерных задач по расчёту и выбору схем электроснабжения с учётом надёжности.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЁЖНОСТИ

1.1. Категории надёжности электроприёмников

Требования к надёжности электроснабжения в настоящий момент – важнейший аспект работы потребителей. От существующего уровня надёжности энергоснабжения электроприёмников потребителя зависит количество брака на производстве, качество изготавливаемой продукции и, как следствие, конкурентоспособность компании в целом. В соответствии с [2] все электроприёмники по надёжности электроснабжения подразделяются на три категории.

К первой категории относят электроприёмники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, значительный материальный ущерб, повреждение дорогостоящего оборудования, массовый брак продукции, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства. Из их состава выделяется особая группа электроприёмников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов, пожаров и повреждения дорогостоящего основного оборудования. Перерывы электроснабжения таких приёмников допустимы лишь на время срабатывания автоматических устройств включения резерва.

Во вторую категорию входят электроприёмники, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности значительного количества городских и сельских жителей. Для электроприёмников второй категории при нарушении электроснабжения от одного из источников питания допустимы перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания действиями дежурного персонала или выездной оперативной бригады.

Допускается питание электроприёмников второй категории по одной ВЛ, в том числе с кабельной вставкой, если обеспечена возможность проведения аварийного ремонта этой линии за время не более одних суток. Кабельные вставки этой линии должны выполняться двумя кабелями, каждый из которых выбирается по наибольшему длительному току ВЛ. Допускается питание электроприёмников второй

категории по одной кабельной линии, состоящей не менее чем из двух кабелей, присоединённых к одному общему аппарату. При наличии централизованного резерва трансформаторов и возможности замены повредившегося трансформатора за время не более одних суток допускается питание электроприёмников второй категории от одного трансформатора.

К третьей категории относят все остальные электроприёмники, не подходящие под определения первой и второй категорий.

Надёжность электроснабжения определяется числом независимых источников питания и схемой электроснабжения потребителей, поэтому обеспечение надёжности электроснабжения, как правило, связано с дополнительными экономическими затратами. Так, электроприёмники первой категории должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервируемых источников питания. Для особой группы электроприёмников первой категории должно предусматриваться дополнительное питание от третьего независимого источника (местной электростанции, аккумуляторных батарей и т. п.), что приводит к дополнительному усложнению и удорожанию схемы электроснабжения. Электроприёмники второй категории должны также обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервируемых источников питания, а электроприёмники третьей категории запитываются от одного источника питания.

В соответствии с правилами технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей к электрическим сетям, утверждёнными постановлением Правительства РФ от 27.12.2004 № 861, категория надёжности электроснабжения электроприёмников потребителей определяется в процессе технологического присоединения энергопринимающих устройств к электрическим сетям. При этом потребитель самостоятельно определяет, какая категория надёжности энергоснабжения ему необходима.

Однако стоит понимать, что при выборе второй или первой категории надёжности, стоимость подключения электричества возрастёт примерно в два раза относительно присоединения по третьей категории надёжности: ведь для энергоснабжения по первой или второй категории необходимо два независимых источника питания и присоединение к каждому из них будет стоить примерно одинаково.

Для первой и второй категорий надёжности допустимое число часов отключения в год и сроки восстановления энергоснабжения

определяются сторонами в зависимости от конкретных параметров схемы электроснабжения, наличия резервных источников питания и особенностей технологического процесса потребителя, но не могут быть более соответствующих величин, предусмотренных для третьей категории надёжности.

Для третьей категории надёжности допустимое число часов отключения в год составляет 72 часа, но не более 24 часов подряд, включая срок восстановления энергоснабжения, за исключением случаев, когда для производства ремонта объектов электросетевого хозяйства необходимы более длительные сроки, согласованные с федеральным органом исполнительной власти по государственному энергетическому надзору.

Разделение потребителей на категории в первую очередь позволяет правильно спроектировать тот или иной участок электросети, связать его с объединённой энергосистемой. Основная цель – построить максимально эффективную сеть, которая, с одной стороны, должна обеспечивать в полной мере потребности в электроснабжении всех потребителей, удовлетворять требованиям по надёжности электроснабжения, а с другой – быть максимально упрощённой с целью оптимизации средств на обслуживание и ремонт сетей. В процессе эксплуатации электрических сетей разделение потребителей на категории электроснабжения позволяет сохранить стабильность работы объединённой энергосистемы в случае возникновения дефицита мощности по причине отключения блока электростанции либо серьёзной аварии в магистральных сетях. В данном случае работают автоматические устройства, отключающие от сети потребителей третьей категории, а при больших дефицитах мощности – второй категории. Эти меры позволяют оставить в работе наиболее важных потребителей первой категории и избежать техногенных катастроф в масштабах регионов, гибели людей, аварий на отдельных объектах, материального ущерба.

В отечественных системах электроснабжения часто используется принцип горячего резерва: мощность трансформаторов ТП, ГПП (и пропускная способность всей цепи питания к ним) выбирается большей, чем этого требует поддержание нормального режима, для обеспечения электроснабжения электроприёмников первой и второй категорий в послеаварийном режиме, когда одна цепь питания отказывает в результате аварии (или отключается по плану).

Холодный резерв, как правило, не используется (хотя более выгоден по суммарной пропускной способности), так как предусматривает автоматическое включение под нагрузку элементов сети без предварительных испытаний.

1.2. Понятие и классификация отказов

Одним из основных понятий теории надёжности следует рассматривать понятие отказа. Отказ представляет собой потерю способности изделия выполнить требуемую функцию. Основными причинами возникновения отказов можно назвать конструктивные, технологические, эксплуатационные дефекты и старение или износ оборудования.

По *типу* отказы подразделяются:

- на **отказы функционирования** (выполнение основных функций изделием прекращается, например происходит поломка зубьев шестерни);

- **отказы параметрические** (некоторые параметры изделия изменяются в недопустимых пределах, например потеря точности станка).

По своей *природе* отказы бывают:

- **случайные**, обусловленные непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала или сбоями системы управления и т. п.;

- **систематические**, обусловленные закономерными и неизбежными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений: усталость, износ, старение, коррозия и т. п.

Отказы элементов систем могут возникать в результате:

- 1) первичных отказов;
- 2) вторичных отказов;
- 3) ошибочных команд (инициированные отказы).

Первичный отказ элемента определяют как нерабочее состояние этого элемента, причиной которого является он сам, и необходимо выполнить ремонтные работы для возвращения элемента в рабочее состояние. Первичные отказы происходят при входных воздействиях, значение которых находится в пределах, лежащих в расчётном диапазоне, а отказы объясняются естественным старением элементов. Разрыв резервуара вследствие старения (усталости) материала служит примером первичного отказа.

Вторичный отказ отличается тем, что сам элемент не является причиной отказа. Вторичные отказы объясняются воздействием

предыдущих или текущих избыточных напряжений на элементы. Амплитуда, частота, продолжительность действия этих напряжений могут выходить за пределы допусков или иметь обратную полярность. Примером вторичных отказов служит срабатывание предохранителя от повышенного электрического тока. Следует отметить, что устранение источников повышенных напряжений не гарантирует возвращение элемента в рабочее состояние, так как предыдущая перегрузка могла вызвать необратимое повреждение в элементе, требующее в этом случае ремонта.

Ошибочные команды. Операторы и обслуживающий технический персонал также являются возможными источниками вторичных отказов, если их действия приводят к выходу элементов из строя. Ошибочные команды представляются в виде элемента, находящегося в нерабочем состоянии из-за неправильного сигнала управления или помех (при этом лишь иногда требуется ремонт для возвращения данного элемента в рабочее состояние). Самопроизвольные сигналы управления или помехи часто не оставляют последствий (повреждений), и в нормальных последующих режимах элементы работают в соответствии с заданными требованиями. Типичные примеры ошибочных команд: переключатель случайно не разомкнулся из-за помех, помехи на входе контрольного прибора в системе безопасности вызвали ложный сигнал на остановку, оператор не нажал на аварийную кнопку (ошибочная команда от аварийной кнопки).

Множественный отказ (отказы общего характера) есть событие, при котором несколько элементов выходят из строя по одной и той же причине. К числу таких причин могут быть отнесены следующие:

- конструкторские недоработки оборудования (дефекты, не выявленные на стадии проектирования и приводящие к отказам вследствие взаимной зависимости между электрическими и механическими подсистемами или элементами избыточной системы);
- ошибки эксплуатации и технического обслуживания (неправильная регулировка или калибровка, небрежность оператора, неправильное обращение и т. п.);
- воздействие окружающей среды (влажность, пыль, грязь, температура, вибрация, а также экстремальные режимы нормальной эксплуатации);
- внешние катастрофические воздействия (естественные внешние явления, такие как наводнение, землетрясение, пожар, ураган);

– общий изготовитель (резервируемое оборудование или его компоненты, поставляемые одним и тем же изготовителем, могут иметь общие конструктивные или производственные дефекты. Например, производственные дефекты могут быть вызваны неправильным выбором материала, ошибками в системах монтажа, некачественной пайкой и т. п.);

– общий внешний источник питания (общий источник питания для основного и резервного оборудования, резервируемых подсистем и элементов);

– неправильное функционирование (неверно выбранный комплекс измерительных приборов или неудовлетворительно спланированные меры защиты).

Известен целый ряд примеров множественных отказов: так, некоторые параллельно соединённые пружинные реле выходили из строя одновременно и их отказы были вызваны общей причиной; вследствие неправильного расцепления муфт при техническом обслуживании два клапана оказались установлены в неправильное положение; из-за разрушения паропровода имели место сразу несколько отказов коммутационного щита. В некоторых случаях общая причина вызывает не полный отказ резервированной системы (одновременный отказ нескольких узлов, т. е. предельный случай), а менее серьёзное общее понижение надёжности, что приводит к повышению вероятности совместного отказа узлов систем. Такое явление наблюдается в случае исключительно неблагоприятных окружающих условий, когда ухудшение характеристик приводит к отказу резервного узла. Наличие общих неблагоприятных внешних условий приводит к тому, что отказ второго узла зависит от отказа первого и спарен с ним.

Для каждой общей причины необходимо определить все вызываемые ею исходные события. При этом определяют сферу действия каждой общей причины, а также место расположения элементов и время происшествий. Некоторые общие причины имеют лишь ограниченную сферу действия. Например, утечка жидкости может ограничиваться одним помещением, и электрические установки, их элементы в других помещениях не будут повреждены вследствие утечек, если только эти помещения не сообщаются друг с другом.

Отказ считают по сравнению с другим более критичным, если его предпочтительнее рассматривать в первую очередь при разработке

вопросов надёжности и безопасности. При сравнительной оценке критичности отказов учитывают последствия отказа, вероятность возникновения, возможность обнаружения, локализацию и т. д.

Указанные выше свойства технических объектов и промышленная безопасность взаимосвязаны. Так, при неудовлетворительной надёжности объекта вряд ли следует ожидать хороших показателей его безопасности. В то же время перечисленные свойства имеют свои самостоятельные функции. Если при анализе надёжности изучается способность объекта выполнять заданные функции (при определённых условиях эксплуатации) в установленных пределах, то при оценке промышленной безопасности выявляют причинно-следственные связи возникновения и развития аварий и других нарушений со всесторонним анализом последствий этих нарушений.

Отказы по *причинным схемам возникновения* подразделяются на следующие группы:

- отказы с мгновенной схемой возникновения;
- отказы с постепенной схемой возникновения;
- отказы с релаксационной схемой возникновения;
- отказы с комбинированными схемами возникновения.

Отказы с мгновенной схемой возникновения характеризуются тем, что время наступления отказа не зависит от времени предшествующей эксплуатации и состояния объекта, момент отказа наступает случайно, внезапно. Примерами реализации такой схемы могут служить отказы изделий под действием пиковых нагрузок в электрической сети, механическое разрушение посторонним внешним воздействием и т. п.

Отказы с постепенной схемой возникновения происходят за счёт накопления повреждений вследствие физико-химических изменений в материале. При этом значения некоторых «решающих» параметров выходят за допустимые границы, и объект (система) не способен выполнять заданные функции. Примерами реализации постепенной схемы возникновения могут служить отказы вследствие снижения сопротивления изоляции, электрической эрозии контактов и т. п.

Отказы с релаксационной схемой возникновения характеризуются первоначальным постепенным накоплением повреждений, которые создают условия для скачкообразного (резкого) изменения состояния объекта, после которого возникает отказное состояние. Примером

реализации релаксационной схемы возникновения отказов может служить пробой изоляции кабеля вследствие коррозионного разрушения брони.

Отказы с комбинированными схемами возникновения характерны для ситуаций, когда одновременно действуют несколько причинных схем. Примером, реализующим эту схему, может служить отказ двигателя в результате короткого замыкания по причинам снижения сопротивления изоляции обмоток и перегрева.

При анализе надёжности необходимо выявлять преобладающие причины отказов и лишь затем, если в этом есть необходимость, учитывать влияние остальных причин.

По временному аспекту и степени предсказуемости отказы подразделяются на *внезапные* и *постепенные*.

По характеру устранения с течением времени различают *устойчивые (окончательные)* и *самоустраняющиеся (кратковременные)* отказы. Кратковременный отказ называется сбоем. Характерный признак сбоя проявляется в том, что восстановление работоспособности после его возникновения не требует ремонта аппаратуры. Примером может служить кратковременно действующая помеха при приёме сигнала, дефекты программы и т. п. Для анализа и исследования надёжности причинные схемы отказов можно представить в виде статистических моделей, которые вследствие вероятностного возникновения повреждений описываются вероятностными законами. Основные признаки классификации отказов представлены в таблице.

Основные признаки классификации отказов

Характер возникновения	• <i>внезапный отказ</i> – отказ, проявляющийся в резком (мгновенном) изменении характеристик объекта
	• <i>постепенный отказ</i> – отказ, происходящий в результате медленного, постепенного ухудшения качества объекта
Внезапные отказы обычно проявляются в виде механических повреждений элементов (трещины – хрупкое разрушение, пробой изоляции, обрывы и т. п.) и не сопровождаются предварительными видимыми признаками их приближения. Внезапный отказ характеризуется независимостью момента наступления от времени предыдущей работы. Постепенные отказы связаны с износом деталей и старением материалов	

Окончание

Причина возникновения	• <i>конструкционный отказ</i>, вызванный недостатками и неудачной конструкцией объекта
	• <i>производственный отказ</i>, связанный с ошибками при изготовлении объекта по причине несовершенства или нарушения технологии
	• <i>эксплуатационный отказ</i>, вызванный нарушением правил эксплуатации
Характер устранения	• <i>устойчивый отказ</i>
	• <i>перемежающийся отказ</i> (возникающий/исчезающий)
	• последствия отказа: лёгкий отказ (легкоустранимый)
	• <i>средний отказ</i>, не вызывающий отказы смежных узлов – вторичные отказы
Дальнейшее использование объекта	• <i>тяжёлый отказ</i>, вызывающий вторичные отказы или приводящий к угрозе жизни и здоровья человека
	• <i>полные отказы</i>, исключающие возможность работы объекта до их устранения
Лёгкость обнаружения	• <i>частичные отказы</i>, при которых объект может частично использоваться
	• <i>очевидные (явные) отказы</i>
Время возникновения	• <i>скрытые (неявные) отказы</i>
	• <i>прирабочные отказы</i>, возникающие в начальный период эксплуатации
	• <i>отказы при нормальной эксплуатации</i>
	• <i>износосовые отказы</i>, вызванные необратимыми процессами износа деталей, старения материалов и пр.

1.3. Объект, элемент и система в теории надёжности.

Состояние объекта

В теории надёжности используются понятия объект, элемент и система.

Объект – техническое изделие определенного целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации. Объектами могут быть различные системы и их элементы, в частности: сооружения, установки, технические изделия, устройства, машины, аппараты, приборы и их части, агрегаты и отдельные детали.

Элемент системы – объект, представляющий отдельную часть системы. Само понятие элемента условно и относительно, так как любой элемент, в свою очередь, всегда можно рассматривать как совокупность других элементов. Понятия **система** и **элемент** выражены друг через друга, поскольку одно из них следовало бы принять в качестве исходного. Понятия эти относительны: объект, считавшийся системой в одном исследовании, может рассматриваться как элемент, если изучается объект большего масштаба. Кроме того, само деление системы на элементы зависит от характера рассмотрения (функциональные, конструктивные, схемные или оперативные элементы), от требуемой точности проводимого исследования, от уровня наших представлений, от объекта в целом. Человек-оператор также представляет собой одно из звеньев системы **человек – машина**.

Система – объект, представляющий собой совокупность элементов, связанных между собой определёнными отношениями и взаимодействующих таким образом, чтобы обеспечить выполнение системой некоторой достаточно сложной функции. Признаком системности является структурированность системы, взаимосвязанность составляющих её частей, подчинённость организации всей системы определённой цели. Системы функционируют в пространстве и времени.

Состояние объекта

Исправность – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией (НТД).

Неисправность – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных НТД.

Работоспособность – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров в пределах, установленных НТД.

Основные параметры характеризуют функционирование объекта при выполнении поставленных задач и устанавливаются в нормативно-технической документации.

Неработоспособность – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного заданного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям, установленным НТД.

Понятие «исправность» шире, чем понятие «работоспособность». Работоспособный объект в отличие от исправного удовлетворяет лишь тем требованиям НТД, которые обеспечивают его нормальное функционирование при выполнении поставленных задач. Работоспособность и неработоспособность в общем случае могут быть полными или частичными. Полностью работоспособный объект обеспечивает в определённых условиях максимальную эффективность его применения. Эффективность применения в этих же условиях частично работоспособного объекта меньше максимально возможной, но значения ее показателей при этом ещё находятся в пределах, установленных для такого функционирования, которое считается нормальным. Частично неработоспособный объект может функционировать, но уровень эффективности при этом ниже допустимого. Полностью неработоспособный объект применять по назначению невозможно.

Понятия частичной работоспособности и частичной неработоспособности применяют главным образом к сложным системам, для которых характерна возможность нахождения в нескольких состояниях. Эти состояния различаются уровнями эффективности функционирования системы. Работоспособность и неработоспособность некоторых объектов могут быть полными, т. е. они могут иметь только два состояния.

Работоспособный объект в отличие от исправного обязан удовлетворять лишь тем требованиям НТД, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. При этом он может не удовлетворять, например, эстетическим требованиям, если ухудшение внешнего вида объекта не препятствует его нормальному (эффективному) функционированию. Очевидно, что работоспособный объект может быть неисправным, однако отклонения от требований НТД при этом не настолько существенны, чтобы нарушалось нормальное функционирование.

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению должно быть прекращено из-за неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого отклонения заданных параметров за установленные пределы, недопустимого увеличения эксплуатационных расходов или необходимости проведения капитального ремонта. Признаки (критерии) предельного состояния устанавливаются НТД на данный объект. Применение (использование) объекта по назначению прекращается в следующих случаях:

- при неустранимом нарушении безопасности;
- при неустранимом отклонении величин заданных параметров;
- при недопустимом увеличении эксплуатационных расходов.

Для некоторых объектов предельное состояние является последним в его функционировании, т. е. объект снимается с эксплуатации, для других – определённой фазой в эксплуатационном графике, требующей проведения ремонтно-восстановительных работ.

По характеру исполнения и функционирования объекты могут быть восстанавливаемые и невосстанавливаемые. Если при возникновении отказа работоспособность объекта может быть восстановлена путем проведения ремонтов и технического обслуживания, то такой объект называется **восстанавливаемым**. Если же при отказе объект либо не подлежит, либо не поддается восстановлению в процессе эксплуатации, то он называется **невосстанавливаемым**.

Восстановление – событие, заключающееся в повышении уровня работоспособности объекта или относительного уровня его функционирования, которое достигается проведением ремонтов, отключений или изменением режима работы. Отказ и восстановление – это два противоположных случайных события. К числу невосстанавливаемых объектов можно отнести, например, подшипники качения, полупроводниковые изделия и т. п. Энергетические объекты в целом следует считать восстанавливаемыми, хотя могут быть случаи, когда отдельные элементы или части объектов на некотором временном интервале необходимо рассматривать как невосстанавливаемые.

1.4. Основные средства обеспечения надёжности систем электроснабжения

Основными средствами обеспечения надёжности систем электроснабжения являются резервирование, техническое обслуживание, ремонт и управление процессами производства, передачи и распределения электроэнергии.

Резервирование – это применение дополнительных элементов для обеспечения повышенной надёжности. Резервирование, в свою очередь, подразделяется на структурное, функциональное, временное и информационное. Структурное резервирование – использование избыточных элементов структуры объекта, например установка вторых трансформаторов на подстанциях, сооружение вторых цепей и т. д. Функциональное резервирование – использование способности элементов, систем, устройств выполнять дополнительные функции, например резервировать отказы генераторов на станциях работой межсистемных ЛЭП. Временное резервирование – использование избыточного времени в графике работы оборудования. Информационное резервирование – использование избыточных и дублирующих информационных каналов.

Техническое обслуживание – обеспечение надёжности путём выполнения комплекса мероприятий для поддержания работоспособности объекта (систематическое диагностирование, поддержание режимов работы и т. п.).

Ремонт – обеспечение надёжности путём выполнения комплекса работ для восстановления работоспособности объекта. Система ремонтов включает в себя предупредительные (текущие, расширенные текущие, капитальные) и аварийные ремонты.

Управление процессами производства, передачи и распределения энергии – обеспечение надёжности путём создания системы управления, оптимальной по критериям и показателям надёжности.

Остановимся более подробно на структурном резервировании. Существуют два метода повышения надёжности систем путём структурного резервирования:

- 1) общее резервирование, при котором резервируется система в целом;
- 2) раздельное (поэлементное) резервирование, при котором резервируются отдельные части (элементы) системы.

Схемы общего и раздельного структурного резервирования представлены соответственно на рис. 1.1 и 1.2, где n – число последовательных элементов в цепи, m – число резервных цепей (при общем

резервировании) или резервных элементов для каждого основного элемента (при раздельном резервировании). При $m = 1$ имеет место дублирование, а при $m = 2$ – троирование. Обычно стремятся по возможности применять раздельное резервирование, так как при этом выигрыш в надёжности часто достигается значительно меньшими затратами, чем при общем резервировании.

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

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

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

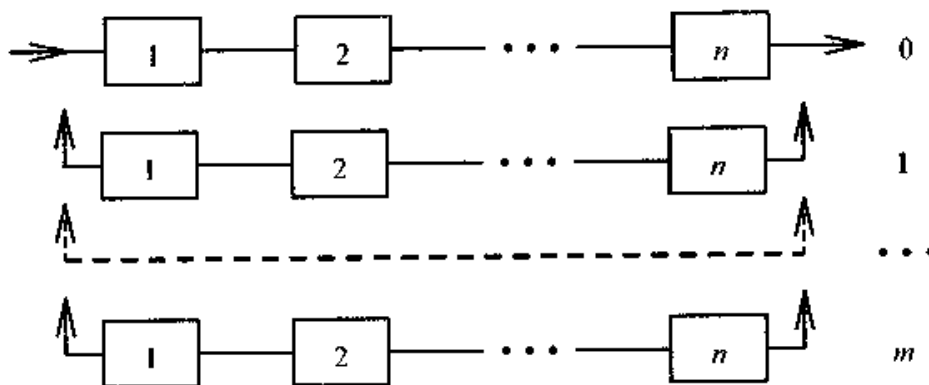


Рис. 1.1. Схема общего структурного резервирования

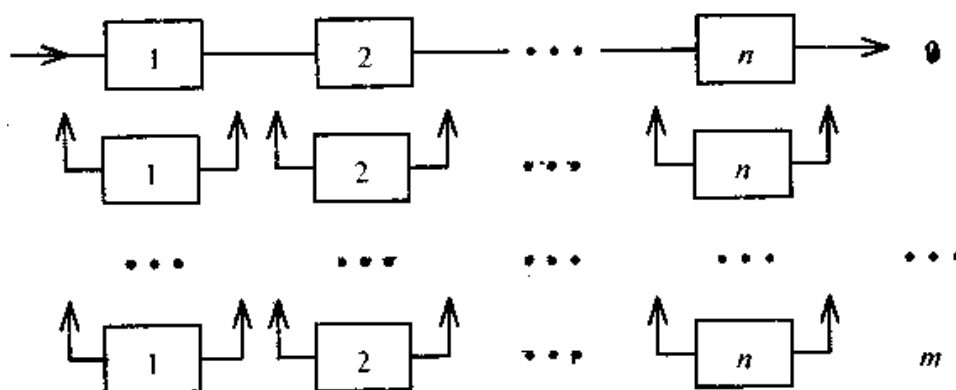


Рис. 1.2. Схема отдельного структурного резервирования

Скользящее резервирование представляет собой разновидность резервирования замещением, при котором основные элементы объекта резервируются элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший элемент. Оба вида резервирования (постоянное и замещением) имеют свои преимущества и недостатки. Достоинством постоянного резервирования является простота, так как в этом случае не требуются контролирующие и переключающие устройства, понижающие надёжность системы в целом, и, самое главное, отсутствует перерыв в работе. Недостатком постоянного резервирования можно назвать нарушение режима работы резервных элементов при отказе основных.

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

В зависимости от режима работы резервных элементов различают нагруженный (горячий), облегченный (теплый) и ненагруженный (холодный) резервы.

Нагруженный (горячий) резерв в энергетике называют также вращающимся, или включённым. 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 (тёплый) резерв характеризуется тем, что резервный элемент находится в менее нагруженном режиме, чем основной.

Поэтому, хотя ресурс резервных элементов также начинает расходоваться с момента включения всей системы в целом, интенсивность расхода ресурса резервных элементов до момента их включения вместо отказавших значительно ниже, чем в рабочих условиях. Этот вид резерва обычно размещается на агрегатах, работающих на холостом ходу, и, следовательно, в данном случае ресурс резервных элементов срабатывается меньше по сравнению с рабочими условиями, когда агрегаты несут нагрузку.

Вероятность безотказной работы резервных элементов в случае этого вида резерва будет зависеть как от момента их включения в работу, так и оттого, насколько отличаются законы распределения вероятности их безотказной работы в рабочем и резервном условиях.

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

1.5. Свойства и показатели надёжности

Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определённые сочетания этих свойств. Надёжность электроэнергетических установок и систем, кроме перечисленных свойств, включает также устойчивоспособность, режимную управляемость, живучесть и безопасность.

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

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

Ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособлении к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов (повреждений), к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путём проведения технического обслуживания и ремонтов.

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

Устойчивость – способность объекта переходить от одного устойчивого режима к другому при различных возмущениях. Свойство системы непрерывно сохранять устойчивость в течение некоторого интервала времени называется *устойчивоспособностью*.

Управляемость – свойство объекта поддерживать нормальный режим посредством управления, т. е. свойство, которое определяет эффективность управления системой. Способность объекта обеспечивать включение, отключение и изменение режима работы элементов по заданному алгоритму называется режимной управляемостью. В электрических системах с большим количеством взаимосвязанных элементов и автоматической коммутационной аппаратуры значительное влияние на надёжность оказывает не только структура системы, но и надёжность функционирования автоматики и коммутационной аппаратуры в аварийных режимах работы.

Живучесть – свойство системы противостоять крупным возмущениям режима, не допуская их каскадного развития и массового отключения потребителей, не предусмотренного алгоритмом работы противоаварийной автоматики.

Безопасность – свойство объекта или систем не допускать ситуаций, опасных для людей и окружающей среды во всех возможных режимах работы и аварийных ситуациях.

Показатели надёжности – это количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надёжность объекта. Если показатель надёжности характеризует одно из свойств надёжности, то он называется единичным, если же несколько свойств – комплексным показателем надёжности.

Комплексные показатели надёжности

Из большого многообразия этих показателей рассмотрим основные:

Коэффициент готовности – характеризует совокупность свойств безотказности и ремонтпригодности и представляет собой вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени

$$k_{\Gamma} = \frac{\bar{t}_0}{\bar{t}_0 + \bar{t}_B},$$

$$q = 1 - k_{\Gamma},$$

где $\bar{t}_0$ – средняя наработка на отказ; $\bar{t}_B$ – среднее время восстановления; q – коэффициент неготовности или аварийного состояния.

Коэффициент технического использования – характеризует те же свойства, что и коэффициент готовности, но учитывает дополнительно предупредительные ремонты

$$k_{\text{т.и.}} = k_{\Gamma}(1 - \tau),$$

$$\tau = \sum_{i=1}^n \omega_i \bar{t}_{ni},$$

где τ – относительная длительность нахождения во всех видах ремонта; ω_i – частота ремонтов; $\bar{t}_{ni}$ – средняя длительность i -го предупредительного ремонта.

В основе большинства показателей надёжности лежат оценки наработки, т. е. продолжительности объёма работы, выполненной объектом. Когда система работает с перерывами, учитывается суммарная наработка. Если объект эксплуатируется в различных режимах, влияющих на показатели надёжности, то наработки могут суммироваться для каждого режима отдельно. Рассмотрим показатели надёжности. На стадиях экспериментальной отработки, испытаний и эксплуатации роль показателей надёжности выполняют статистические оценки соответствующих вероятностных характеристик. К основным показателям надёжности невосстанавливаемых объектов относятся: $P(t)$; $Q(t)$; $a(t)$; $\lambda(t)$; T .

Вероятность безотказной работы $P(t)$ – вероятность того, что в течение рассматриваемого промежутка времени $(0, t)$ в системе или элементе не произойдёт отказ. Статистически $P(t)$ определяется как отношение числа элементов, безотказно проработавших до момента t $N(t) = N_0 - n(t)$, к первоначальному числу элементов, поставленных на испытание N_0 :

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0},$$

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

$$0 < P(t) < 1, P(0) = 1, P(\infty) = 0.$$

Например, на испытания поставлено 1000 образцов однотипных реле, т. е. $N_0 = 1000$ реле. При испытании отказавшие реле не заменялись исправными. За время t отказало 10 реле. Следовательно, $P(t) = 0,99$, поэтому любое реле из данной испытываемой выборки не откажет за время t с вероятностью $P(t) = 0,99$. Иногда целесообразно пользоваться не вероятностью безотказной работы, а вероятностью отказа $Q(t)$.

Вероятность появления отказа $Q(t)$ – вероятность того, что в заданном интервале времени $(0, t)$ произойдёт отказ. Поскольку работоспособность и отказ являются состояниями несовместными и противоположными, то их вероятности связаны зависимостью

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

тогда $Q(t) = 1 - P(t)$.

Статистическая оценка вероятности отказа $Q(t)$

$$Q(t) = 1 - \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = \frac{n(t)}{N_0}.$$

Частотой отказов называется отношение числа отказавших элементов системы в единицу времени к числу элементов, первоначально установленных на испытание при условии, что отказавшие элементы не восстанавливаются и не заменяются исправными.

Статистическая оценка $a(t)$

$$a(t) = \frac{n(t, \Delta t)}{N_0 \Delta t},$$

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

Интенсивность отказов – это отношение числа отказавших элементов системы в единицу времени к среднему числу элементов, исправно работающих в данный отрезок времени при условии, что отказавшие элементы не восстанавливаются и не заменяются исправными. Таким образом, $\lambda(t)$ представляет собой относительную скорость появления отказа.

Статистическая оценка интенсивности отказов имеет вид

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{cpi} \cdot \Delta t_i},$$

где $n(\Delta t_i)$ – число отказавших элементов в интервале (Δt_i) ; $N_{\text{ср}i}$ – среднее число исправно работающих элементов в интервале (Δt_i) ; (Δt_i) – интервал времени;

$$N_{\text{ср}i} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2},$$

где N_i – число работоспособных объектов в начале интервала Δt_i ; $N_i + 1$ – число работоспособных объектов в конце интервала Δt_i .

Различие между частотой и интенсивностью отказов в том, что первый показатель характеризует вероятность отказа элемента за интервал $(t, t + \Delta t)$, взятого из группы элементов произвольным образом, причём неизвестно, в каком состоянии (работоспособном или неработоспособном) находится выбранный элемент. Вторым показателем характеризует вероятность отказа элемента за тот же интервал времени, взятого из группы элементов, оставшихся работоспособными, к моменту времени t . Для высоконадежных элементов и систем электроснабжения, где $P(t) \geq 0,99$, $a(t) \approx \lambda(t)$. Поэтому в практических расчётах возможна их замена.

Одним из основных понятий теории надёжности является понятие «наработка», так как отказы и переходы в предельное состояние объектов обусловлены их работой.

Наработка до отказа – это наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа, измеряемая в единицах времени. Средней наработкой до отказа (среднее время безотказной работы) называется математическое ожидание наработки объекта до первого отказа T

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

Этот показатель относится и к восстанавливаемым объектам, при эксплуатации которых допускаются многократно повторяющиеся отказы. Эксплуатация таких объектов может быть описана следующим образом: в начальный момент времени объект начинает ее и продолжает работу до первого отказа; после отказа происходит восстановление работоспособности и объект вновь работает до отказа и т. д. Средняя наработка на отказ объекта (наработка на отказ) определяется как отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к числу отказов, происшедших за суммарную наработку

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n(t)},$$

где t_i – наработка между отказами, ч; $n(t)$ – суммарное число отказов за время t .

Для статистической оценки величины T применяется формула

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

где N_0 – число работоспособных однотипных невосстанавливаемых объектов при $t = 0$ (в начале испытания); t_i – время безотказной работы i -го элемента.

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

$$P(t) = 1 - \int_0^t a(t)dt;$$

$$Q(t) = \int_0^t a(t)dt.$$

Частота отказов, являясь плотностью распределения, наиболее полно характеризует такое случайное явление, как время возникновения отказов. Вероятность безотказной работы, математическое ожидание, дисперсия и т. п. являются лишь удобными характеристиками распределения и всегда могут быть получены, если известна частота отказов $a(t)$. В этом её основное достоинство как характеристики надёжности. Частота отказов $a(t)$ – это производная от вероятности появления отказа, означающая вероятность того, что отказ элемента произойдёт за единицу времени $(t, t + \Delta t)$

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

Интенсивность отказов λt – условная вероятность отказа после момента t за единицу времени Δt_i при условии, что до момента t отказа элемента не было. Интенсивность отказов связана с частотой отказов и вероятностью безотказной работы

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}.$$

Восстанавливаемые объекты – это такие объекты, при эксплуатации которых допускаются многократно повторяющиеся отказы. Эксплуатация таких объектов может быть описана следующим образом: в начальный момент времени объект начинает ее и продолжает работу до первого отказа; после отказа происходит восстановление работоспособности и объект вновь работает до отказа и т. д.

Случайные события, следующие одно за другим в некоторой последовательности, образуют *поток случайных событий*. Поток отказов называется простейшим, если он одновременно обладает тремя свойствами: *ординарностью, стационарностью и отсутствием последствий*. В ординарном потоке невозможно появление двух и более отказов в один и тот же момент времени. В стационарном потоке вероятность возникновения n отказов в любом промежутке времени Δt_i зависит только от величины Δt_i , но не зависит от сдвига Δt_i по оси времени. В потоке без последствий будущее развитие процесса появления отказов не зависит от того, как этот процесс протекал в прошлом. При решении задач надёжности электроснабжения и электрооборудования простейший поток отказов находит широкое применение. Процесс функционирования восстанавливаемого объекта можно представить как последовательность чередующихся интервалов работоспособности и восстановления (простоя).

Параметр потока отказов $\omega(t)$ – математическое ожидание числа отказов, происшедших за единицу времени начиная с момента t при условии, что все элементы, вышедшие из строя, заменяются работоспособными, т. е. число наблюдаемых элементов сохраняется одинаковым в процессе эксплуатации. Этот показатель также характеризует восстанавливаемый объект и по статистическим данным определяется с помощью формулы

$$\omega(t) = \frac{n(t_2) - n(t_1)}{t_2 - t_1},$$

где $n(t_1)$ и $n(t_2)$ – количество отказов объекта, зафиксированных соответственно по истечении времени t_1 и t_2 .

Если используются данные об отказах по определённому количеству восстанавливаемых объектов, то

$$\omega(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_0 \Delta t_i},$$

где $n(\Delta t_i)$ – количество отказов по всем объектам за интервал времени (Δt_i) ; N_0 – количество однотипных объектов, участвующих в эксперименте (отказавший объект восстанавливается, $N_0 = \text{const}$).

Для экспоненциального закона надёжности интенсивность и параметр потока отказов не зависят от времени и совпадают, т. е.

$$\lambda(t) = \omega(t) = \lambda = \omega = \text{const}.$$

Параметры потока отказов основных элементов электроснабжения приводятся в справочной литературе.

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

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

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

$$S(t) = \frac{N_B}{N_B(0)}, \quad (1.1)$$

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

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

Статистическая оценка величины $G(t)$

$$G(t) = \frac{N_B(0) - N_B}{N_B(0)}. \quad (1.2)$$

Из анализа выражений (1.1) и (1.2) следует, что всегда

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

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

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

Для численного определения величины $a(t)$ используется статистическая оценка

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

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

Интенсивность восстановления $\mu(t)$ – условная вероятность восстановления после момента t за единицу времени Δt при условии, что до момента t восстановления элемента не произошло. Интенсивность восстановления связана с частотой восстановления

$$\mu(t) = \frac{a_B(t)}{G(t)}. \quad (1.3)$$

Статистически интенсивность восстановления определяется следующим образом:

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

$$N_{cp} = N_B(0) - N_B, \quad (1.4)$$

где N_{cp} – среднее количество элементов, находящихся в невосстановленном состоянии на интервале времени Δt .

Сравнение формул для определения частоты (1.3) и интенсивности (1.4) восстановления показывает, что они отличаются числом элементов в знаменателе. В отличие от процесса отказов, который развивается во времени естественным образом, процесс восстановления является целиком искусственным (ремонт элемента) и тем самым полностью определяется организационно-технической деятельностью эксплуатационного персонала. Так как установлены обоснованные нормативы времени на проведение ремонтных работ, то принимают интенсивность восстановления независимо от времени $\mu(t) = \mu = \text{const}$. Численные значения интенсивности восстановления сведены в справочные таблицы по видам оборудования и ремонтов [3].

Для экспоненциального распределения времени восстановления при постоянной интенсивности восстановления имеем следующие зависимости:

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

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

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

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

Статистическая оценка величины T_B

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n(t)},$$

где t_i – наработка между $i-1$ и i -м отказами, ч; $n(t)$ – суммарное число отказов за время t .

При экспоненциальном распределении времени восстановления, когда интенсивность восстановления $\mu = \text{const}$, имеем соотношение $T_B = \frac{1}{\mu}$, т. е. среднее время восстановления численно равно средней по множеству однотипных элементов (объектов) продолжительности восстановления, приходящейся на один объект. Поскольку $\mu = \text{const}$, то и $T_B = \text{const}$. Численные значения T_B некоторых элементов электроснабжения приводятся в справочной литературе.

1.6. Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте особую группу электроприёмников в соответствии с категориями надёжности.
2. На какое время допустимы перерывы электроснабжения для потребителей второй категории надёжности?
3. Какое число независимых источников питания должно быть обеспечено для потребителей первой категории надёжности?
4. Какие типы отказов вы знаете?
5. На какие виды по своей природе подразделяются отказы?
6. Что такое первичный отказ?
7. Что такое вторичный отказ?
8. Как подразделяются отказы по временному аспекту?
9. Как подразделяются отказы по характеру устранения с течением времени?
10. Приведите классификацию отказов по причине возникновения.
11. Сравните понятия «элемент» и «система».
12. Сравните понятия «работоспособность» и «исправность».
13. Что такое предельное состояние объекта?
14. Дайте определения восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектов.
15. Что такое резервирование?
16. Дайте определения структурного, функционального, временного и информационного резервирования.
17. Назовите два метода повышения надёжности систем путём структурного резервирования.
18. Что такое постоянное резервирование?
19. Что такое резервирование замещением?
20. Дайте определение понятию «скользящее резервирование».

21. Что такое горячий и холодный резерв?
22. Приведите примеры восстанавливаемых и невосстанавливаемых технических изделий.
23. Раскройте смысл понятий устойчивости, режимной управляемости и живучести технической системы.
24. Какие свойства надёжности вы знаете?
25. Расскажите о единичных и комплексных показателях надёжности.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ТЕОРИИ НАДЁЖНОСТИ

2.1. Основы теории вероятностей применительно к системам электроснабжения

Надёжность систем электроснабжения зависит от множества факторов, большинство из которых являются случайными. Для практических расчётов в системах электроснабжения применяют количественные характеристики надёжности, полученные методами теории вероятности и математической статистики.

Теория вероятностей – математическая наука, изучающая закономерности массовых однородных случайных событий. В основе теории вероятностей лежит понятие события. Случайным событием называют событие, которое при осуществлении определённой совокупности условий S может либо произойти, либо не произойти. При этом достоверным называется событие, которое при конкретных условиях S обязательно произойдёт, а невозможным – событие, которое при заданных условиях S не может произойти. Случайной величиной называется величина, принимающая в результате опыта то или иное значение, неизвестное заранее (априори). Случайной функцией называется величина, изменяющаяся случайным образом при изменении аргумента.

Для количественного сравнения случайных событий между собой по частоте их появления используют вероятность события P . Вероятность есть число, характеризующее степень возможности появления случайного события при конкретных условиях S . Если при вычислении вероятности появления события A никаких других ограничений, кроме конкретных условий S , не присутствует, т. е. рассматривается независимое случайное событие, то такую вероятность называют безусловной $P(A)$. Для зависимых случайных событий имеются дополнительные условия (ограничения), лишь при выполнении которых может появиться случайное событие A . Вероятность появления такого зависимого случайного события A называют условной. Условная вероятность $P(A/B)$ определяет вероятность появления случайного события A , вычисленную в предположении, что случайное событие B уже произошло. Возможны два метода определения безусловной вероятности случайного события – классический и статистический. Классическая вероятность случайного события A , $P(A)$ применима только в том случае, если изучаемое случайное событие образует полную группу Z элементарных несовместных и равновероятностных исходов, т. е.

$$P(A) = \frac{m}{n},$$

где m – число благоприятствующих этому случайному событию A равновероятностных несовместных элементарных исходов; n – общее число исходов для случайного события A .

На практике m и n определить трудно, поэтому в системах электроснабжения вместо классической вероятности случайного события обычно используют статистическую вероятность случайного события, под которой понимают относительную частоту появления события A при достаточно большом числе испытаний

$$\Sigma P(A) = \frac{mA}{n},$$

где mA – общее число появлений случайного события A ; n – общее число испытаний.

Различают дискретные и непрерывные случайные величины. Под дискретной понимают величину, которая принимает отдельные изолированные значения с определёнными вероятностями. Непрерывной называют случайную величину, которая может принимать различные значения, из некоторого конечного промежутка (области) или бесконечного пространства. Количественная оценка наиболее просто осуществляется для дискретной случайной величины. Для этой цели используются основные статистические характеристики, а именно:

Математическим ожиданием случайной величины X называется среднее значение $m_x = \sum_{i=1}^n x_i p_i$ – для дискретной случайной величины; $m_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$ – для непрерывной случайной величины.

Здесь p_i – вероятность значения x_i случайной величины X .

Дисперсия случайной величины X есть математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины от её математического ожидания, т. е. характеризует степень рассеивания (разброса) значений случайной величины относительно её математического ожидания:

– для дискретной случайной величины $D_x = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i$;

– для непрерывной случайной величины

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx.$$

Среднеквадратическое отклонение случайной величины X есть корень квадратный из дисперсии $\sigma_x = \sqrt{D_x}$.

Величины, определяющие характер распределения случайной величины (смещения центра группирования, рассеяние относительно

центра группирования и др.), называются параметрами закона распределения. Математическое выражение для среднего значения случайной величины

$$M(x) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx.$$

Статистическое определение среднего значения случайной величины

$$M(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

где x_i – опытное значение случайной величины; n – число измерений.

Математическое выражение дисперсии

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

События называются несовместными, если никакие два из них не могут появиться вместе, и наоборот, 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. Если вероятность одного события не изменяется оттого, произошло или не произошло другое событие, то такие события называются независимыми, и наоборот. Несколько событий образуют *полную группу событий*, если в результате опыта обязательно должно произойти хотя бы одно из них.

На основании введённых понятий формулируются следующие основные теоремы теории вероятностей, которые применяются при решении задач надёжности электроснабжения.

Теорема сложения вероятностей. Суммой n событий называется сложное событие, заключающееся в появлении хотя бы одного из n . Вероятность суммы n несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий

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

где $A = \sum_{i=1}^n A_i$.

Следствие 1. Если появление хотя бы одного из n несовместных событий является достоверным событием A_n , то события A_i составляют полную группу несовместных событий, для которых выполняется соотношение

$$P(A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i) = 1.$$

Следствие 2. Сумма вероятностей противоположных событий равна единице: $P(A) + P(\bar{A})$, $P(A) = 1 - P(\bar{A})$. Если события A и B совместны (рис. 2.1), вероятность суммы этих событий выражается формулой $P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB)$.

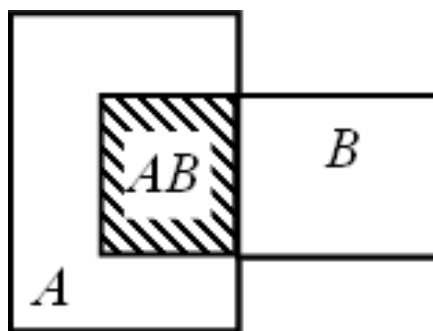


Рис.2.1. Иллюстрация совместности двух событий диаграммой Венна

Вероятность суммы любого числа событий выражается

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

Теорема умножения вероятностей. Произведением n событий называется сложное событие, заключающееся в совместном проявлении всех n событий. Вероятность произведения независимых событий

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

где $A = \prod_{i=1}^n A_i$.

Вероятность события A_1 , вычисленная при условии, что произошло событие A_2 , называется условной вероятностью события A_1 и обозначается $P(A_1|A_2)$. Для зависимых событий A_1 и A_2

$$P(A_1 A_2) = P(A_1)P(A_2|A_1) = P(A_2)P(A_1|A_2).$$

В общем виде

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

Формула полной вероятности. Пусть требуется определить вероятность некоторого события A , которое может произойти с одним из событий $H_1, H_2, \dots, H_n$, образующих полную группу несовместных событий. Эти события будем называть гипотезами. В этом случае

$$P(A_n) = \sum_{i=1}^n P(H_i)P(A|H_i).$$

Теорема гипотез (формула Байеса). Следствием теоремы умножения вероятностей и формулы полной вероятности является теорема гипотез, или формула Байеса. Пусть имеется полная группа несовместных гипотез $H_1, H_2, \dots, H_n$. Вероятности этих гипотез до опыта известны и равны соответственно $P(H_1), P(H_2), \dots, P(H_n)$. Произведён опыт, в результате которого наблюдалось событие A . Требуется определить вероятности событий $H_1, H_2, \dots, H_n$, после опыта. На основании теоремы умножения и формулы полной вероятности имеем

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

2.2. Законы распределения случайных величин в теории надёжности

События и величины, используемые в теории надёжности, носят случайный характер. Отказы объектов вызываются большим числом причин, связь между которыми установить невозможно, поэтому отказы изделий принадлежат к категории случайных событий. Время до возникновения отказа может принимать различные значения в пределах некоторой области возможных значений и принадлежит к категории случайных величин. Каждый тип отказов описывается собственной математической моделью, где в качестве основных характеристик используется функция распределения времени безотказной работы объекта. Все остальные показатели надёжности можно определить по функциям распределения.

Исчерпывающее представление о случайной величине даёт закон распределения случайной величины – соотношение между значениями случайной величины и их вероятностями. Для электротехнических изделий, находящихся в эксплуатации, наиболее часто применяются следующие законы:

– для дискретных случайных величин – биномиальный закон; закон Пуассона;

– для непрерывных случайных величин – экспоненциальный закон; закон нормального распределения (Гаусса); закон Вейбулла; χ^2 -распределение.

Биноминальный закон. В системах электроснабжения для нормальной эксплуатации используется однотипное оборудование (выключатели, трансформаторы, разъединители и т. п.). Это оборудование может находиться в двух состояниях: работоспособном и неработоспособном. Если производится n независимых опытов, в каждом из которых событие A появится с вероятностью p , то вероятность того, что событие A появится ровно m раз, может быть выражено формулой

$$p_n^m = p^m q^{n-m} + \dots + p^m q^{n-m} = C_n^m p^m q^{n-m},$$

где p_n^m – число слагаемых вида $p^m q^{n-m}$, которое равно числу сочетаний.

Вероятность каждой такой комбинации по теореме умножения для независимых событий будет равна $C_n^m p^m q^{n-m}$.

Если производится n независимых опытов, в каждом из которых событие A появится с вероятностью p , то вероятность того, что событие A появится ровно m раз, выражается формулой

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

где $q = 1 - p$.

Приведенная выше формула является аналитическим выражением закона распределения и носит название формулы Бернулли. В этом выражении коэффициент $C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$ есть коэффициент разложения бинома $(p + q)^n$, который по форме представляет собой вероятность p_n^m . Поэтому такое распределение вероятностей называется **биномиальным распределением**. Свойства данного распределения следующие:

- 1) число независимых опытов n – целое положительное число;
- 2) математическое ожидание биномиального распределения $m_x = np$;
- 3) центральный момент второго порядка, т. е. дисперсия, где $q = 1 - p$.

Закон Пуассона. Если случайная величина X , которая может принимать только целые неотрицательные значения 0, 1, 2, ... и распределена по закону Пуассона, то вероятность того, что на интервале

времени t произойдет n случайных событий (отказов), определяется формулой

$$P_n(t) = \frac{a^n}{n!} e^{-a},$$

где $a = \lambda t$ – некоторая положительная величина, называемая параметром закона Пуассона, т. е. среднее число отказов на интервале времени t ; e – основание натурального логарифма ($e = 2,718\dots$).

Приведем основные числовые характеристики случайной величины X , наиболее часто используемые и распределенные по закону Пуассона:

– математическое ожидание

$$m_x = M[X] = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = \sum_{n=0}^{\infty} n \frac{a^n}{n!} e^{-a},$$

где $m_x = a$ – параметр, который представляет собой не что иное, как математическое ожидание случайной величины X ;

– дисперсия, другая числовая характеристика тоже равна параметру a , т. е. $D_x = a$.

Таким образом, дисперсия случайной величины, распределенной по закону Пуассона, будет равна ее математическому ожиданию a .

$$m_x = D_x = a.$$

Закон Пуассона используется тогда, когда необходимо определить вероятность того, что в системе за данное время произойдет один, два, три и т. д. отказов.

Экспоненциальный закон. Функция распределения случайной величины

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

где λ – интенсивность отказа; t – время возникновения отказа.

Если непрерывная случайная величина T распределена по показательному закону, то

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ \lambda e^{-\lambda t} & \text{при } t \geq 0, \end{cases}$$

а математическое ожидание будет

$$m_t = M(T) = \frac{1}{\lambda}.$$

Таким образом, математическое ожидание показательного распределения равно обратной величине параметра λ , а дисперсия

$$D(T) = \frac{1}{\lambda^2}.$$

Распределение вероятностей непрерывной случайной величины T описывается плотностью

$$f(t) \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} [1 - P(t)] = -\frac{dP(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t},$$

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

Это вероятность того, что за время t отказ не возникнет.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ изменяется во времени следующим образом:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = \text{const.}$$

Среднее время безотказной работы при экспоненциальном законе распределения интервала безотказной работы выражается формулой $T_1 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}.$

Таким образом, признаком экспоненциального закона распределения времени до отказа служит постоянство интенсивности отказов, что характерно для внезапных отказов на интервале времени, когда период приработки объекта закончился, а период износа и старения ещё не наступил. Также постоянной становится $\lambda(t)$ системы, если отказы вызываются отказами большого числа комплектующих элементов, отказ каждого из которых приводит к отказу объекта. Этими факторами, а также тем, что экспоненциальное распределение случайной величины существенно упрощает расчёты надёжности, не вызывая значительных погрешностей, обусловлено широкое применение экспоненциального закона в инженерной практике. Типичная функция интенсивности отказов во времени (в течение срока службы объекта) имеет U -образный характер (рис. 2.2).

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.

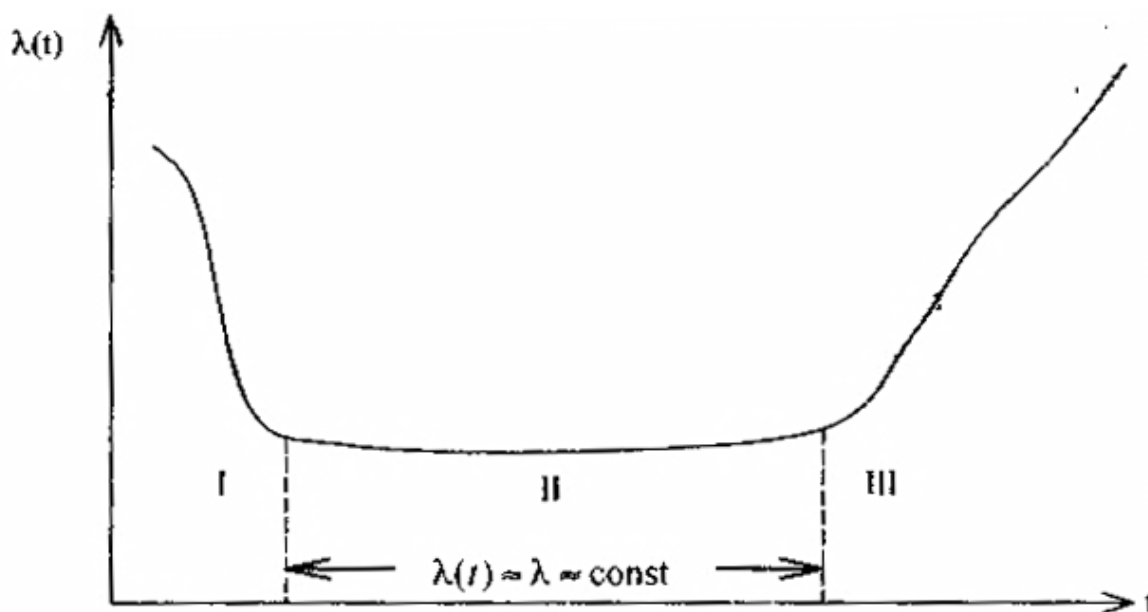


Рис. 2.2. График функции интенсивности отказов во времени:
 I – период приработки; II – период нормальной эксплуатации;
 III – период аварийного износа, здесь преобладают постепенные отказы

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

$$P(t) = \exp(-\lambda t);$$

$$Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t);$$

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

Закон нормального распределения (Гаусса) получил наибольшее распространение при оценке надёжности СЭС, так как он достаточно полно описывает случайные величины массовых явлений. Значения этих величин зависят от большого числа равно влияющих факторов и обычно равномерно распределяются вокруг среднего значения. Нормальный закон распределения характеризуется плотностью вероятности вида

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

где σ и T – параметры закона распределения (σ – среднеквадратическое отклонение t относительно T ; T – среднее значение t). На рис. 2.3 представлен график плотности распределения нормального закона.

При анализе надёжности электроустановок в виде случайной величины, кроме времени, часто выступают значения тока, электрического напряжения и других аргументов. Вероятность безотказной работы для нормального закона распределения будет определяться по формуле

$$P(t) = 1 - \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}} dt,$$

а интенсивность отказов $\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}$.

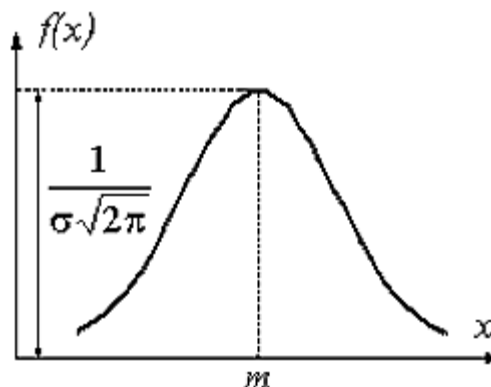


Рис.2.3. Плотность распределения нормального закона

Исследования показали, что нормальное распределение является наиболее приемлемой математической моделью для постепенных отказов при оценке надёжности объектов, подверженных действию старения и износа. Оно широко используется при анализе безотказности сложных систем на последнем периоде эксплуатации – III (см. рис. 2.2).

Распределение Вейбулла. Модель распределения случайной величины, предложенная шведским учёным Вейбуллом, находит широкое применение ввиду своей простоты и гибкости, так как в зависимости от значений параметров характер модели видоизменяется. Это распределение чаще всего используется при исследовании интенсивности отказов для периодов приработки и старения, а также при отказах системы, состоящей из последовательно соединённых дублированных элементов. Модель удобна для выбора наиболее подходящего аналитического выражения при определении показателей надёжности объекта на основе опытных данных. Вероятность безотказной работы за время t $P(t) = e^{-\lambda_0 t^a}$,

где λ_0, a – параметры закона распределения.

Функция плотности распределения времени до отказа

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = \lambda_0 a t^{a-1} e^{-\lambda_0 t^a}.$$

Интенсивность отказов

$$\lambda(t) = -\frac{f(t)}{P(t)} = \lambda_0 a t^{a-1}.$$

Если $a = 1$, то распределение Вейбулла совпадает с экспоненциальным, у которого $\lambda = \text{const}$. Если $a < 1$, интенсивность отказов – монотонно убывающая функция; при $a > 1$ интенсивность отказов – монотонно возрастающая функция (рис. 2.4).

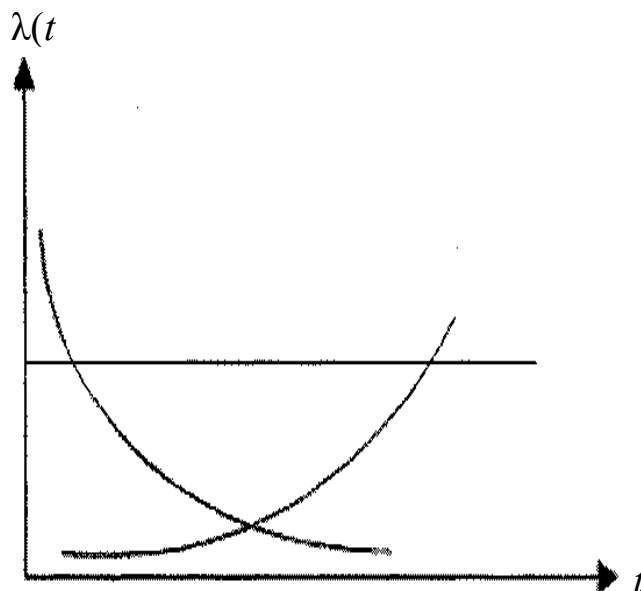


Рис. 2.4. Зависимость $\lambda = f(t)$ в модели надёжности Вейбулла

Математическое ожидание, или среднее время безотказной работы,

$$M = T = \Gamma \lambda_0^{\frac{1}{\alpha}} \frac{(1 + \frac{1}{\alpha})}{\frac{1}{\alpha}},$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

χ^2 -распределение возникает при некоторых условиях формирования случайной величины. Если случайная величина t распределена по нормальному закону с параметрами $T = 0$, $s = 1$, то $x = \sum_1^n t_i^2$ будет случайной величиной, распределенной по закону χ^2 -распределения с параметром распределения $k = n$. Параметр k в данном случае равен числу слагаемых. Отношение удвоенного значения наработки на отказ к средней наработке, т. е. удвоенное число отказов, также подчиняется закону χ^2 -распределения. Из рис. 2.5 видно, что форма кривых зависит от значения параметра k – числа свободы. Чем меньше k , тем больше χ^2 -распределение становится несимметричным; чем больше k , тем больше оно приближается к нормальному распределению. При $k = 30$ его можно считать практически совпадающим с нормальным.



Рис. 2.5. Плотность распределения χ -квадрат:
 $k = 1; k = 3; k > 30$

Чтобы определить значение χ^2 , пользуясь таблицей χ^2 -распределения, необходимо знать число степеней свободы k и α – уровень значимости, или вероятность того, что χ^2 будет больше найденного значения. Например, при $k = 2$ и $\alpha = 0,95$ значение $\chi^2 = 0,103$. Значения k определяются по определенным правилам. Например, если в качестве χ^2 используется сумма квадратов $\sum_1^n t_i^2$, тогда для плотности распределения χ^2 числом степеней свободы k будет число слагаемых.

Если в качестве χ^2 используется $\frac{2^t p}{T} = 2n$ (где T – суммарная наработка изделия; n – суммарное число отказов), тогда числом степеней свободы для $f(\chi^2)$ будет удвоенное число отказов ($k = 2n$).

Значение P также выбирается по определенным правилам в каждом конкретном случае с использованием справочных таблиц.

2.3. Математическая статистика в системах электроснабжения

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

- определение причин отказов;
- выявление тех деталей, сборочных единиц и комплектующих, которые ограничивают надёжность изделия;
- установление и корректировка нормируемых показателей надёжности;
- установление норм расхода запасных частей и системы планово-предупредительных ремонтов;

- выявление условий и режимов эксплуатации, влияющих на надёжность;
- определение экономической эффективности повышения надёжности.

Статистические данные о надёжности изделий и оборудования можно получить либо в результате наблюдений за ними в ходе нормальной или опытной (подконтрольной) эксплуатации, либо в результате стендовых испытаний. Наблюдения при нормальной эксплуатации – самый доступный источник получения экспериментальных данных о надёжности. Его недостатки – запаздывание данных, ограниченные возможности активного эксперимента, влияние субъективных факторов на объем и содержание информации. При опытной эксплуатации наблюдения за работоспособностью оборудования проводятся с участием представителей служб надёжности, имеющих специальную подготовку и независимых от воздействия местных субъективных факторов. Однако ограничения по времени и числу сотрудников, а также по режиму использования оборудования не позволяют проводить широкие активные эксперименты.

Стендовые испытания являются централизованными и проводятся либо на заводах-изготовителях, либо в специальных испытательных центрах отрасли. Это весьма дорогостоящий вид испытаний, осуществляемых не в реальных, а в имитируемых условиях, отвлекающий значительное количество продукции от использования по назначению и продажи. Однако стендовые испытания дают возможность получить информацию о недостатках конструкции, технологии и использовать эти данные для повышения надёжности изделий. Стендовые испытания позволяют проводить активные эксперименты с выявлением слабых мест и проверкой экстремальных воздействий, а следовательно, ускорить получение данных.

Для описания системы двух случайных величин кроме математических ожиданий и дисперсий этих случайных величин используют и другие характеристики – корреляционные моменты и коэффициенты корреляции. Если же эти величины взаимосвязаны (коррелированы), то любому значению одной из них соответствует тот или иной закон распределения вероятностей другой величины. Зависимость закона распределения вероятностей одной величины от значений другой назы-

вают корреляционной зависимостью. Корреляционным моментом случайных величин X и Y называют математическое ожидание произведения отклонений этих величин. Коэффициентом корреляции случайных величин X и Y называют отношение корреляционного момента к произведению средних квадратичных отклонений этих величин.

Корреляционный анализ служит одним из методов статистического анализа взаимозависимости нескольких признаков – компонент случайного вектора X . Основная задача корреляционного анализа состоит в оценке корреляционной матрицы генеральной совокупности по выборке и в определении на её основе оценок частных и множественных коэффициентов корреляции и детерминации. Парный (частный) коэффициент корреляции характеризует тесноту линейной зависимости между двумя переменными соответственно на фоне действия (при исключении влияния) всех остальных показателей, входящих в модель.

На разных стадиях статистического исследования и моделирования возникает необходимость в формулировке и экспериментальной проверке некоторых предположений (гипотез) относительно природы и величины неизвестных параметров анализируемой генеральной совокупности. Такие предположения называются статистическими гипотезами. Сопоставление высказанной гипотезы относительно генеральной совокупности с имеющимися выборочными данными осуществляется с помощью того или иного статистического критерия и называется проверкой статистических гипотез. Выдвинутая гипотеза называется нулевой (основной). Её принято обозначать H_0 . По отношению к высказанной (основной) гипотезе всегда можно сформулировать альтернативную гипотезу, которую обозначают H_1 .

Цель статистической проверки гипотез состоит в том, чтобы на основании выборочных данных принять решение о справедливости основной гипотезы H_0 . Если выдвигаемая гипотеза сводится к утверждению о том, что значение некоторого неизвестного параметра генеральной совокупности содержит только одно предположение, то такая гипотеза называется *простой*. В других случаях гипотеза называется *сложной*, когда она состоит из конечного или бесконечного числа простых гипотез. В качестве нулевой гипотезы H_0 принято выдвигать простую гипотезу, так как обычно удобнее проверять более строгое утверждение.

Так как статистические гипотезы проверяются на основании выборочных данных, т. е. ограниченного ряда наблюдений, решения относительно нулевой гипотезы H_0 имеют вероятностный характер. Другими словами, такое решение неизбежно сопровождается некоторой, хотя возможно и очень малой, вероятностью ошибочного заключения как в ту, так и в другую сторону.

Так, в какой-то небольшой доле случаев α нулевая гипотеза H_0 может оказаться отвергнутой, в то время как в действительности в генеральной совокупности она является справедливой. Такую ошибку называют *ошибкой первого рода*, а её вероятность принято называть *уровнем значимости* и обозначать α .

Наоборот, в какой-то небольшой доле случаев β нулевая гипотеза H_0 принимается, в то время как на самом деле в генеральной совокупности она ошибочна, а справедлива альтернативная гипотеза H_1 . Такую ошибку называют *ошибкой второго рода*. Вероятность *ошибки второго рода* принято обозначать β . Вероятность $1 - \beta$ называют *мощностью критерия*.

При фиксированном объёме выборки по своему усмотрению можно выбрать величину вероятности только одной из ошибок α или β . Увеличение вероятности одной из них приводит к снижению другой. Принято задавать вероятность ошибки первого рода α -уровень значимости. Как правило, пользуются некоторыми стандартными значениями уровня значимости α : 0,1; 0,05; 0,025; 0,01; 0,005; 0,001. Тогда, очевидно, из двух критериев, характеризующихся одной и той же вероятностью α , следует принять тот, который сопровождается меньшей ошибкой второго рода β , т. е. большей мощностью. Снижения вероятностей обеих ошибок α и β можно добиться путём увеличения объёма выборки.

Правильное решение относительно нулевой гипотезы H_0 также может быть двух видов:

1) будет принята нулевая гипотеза H_0 , тогда как и на самом деле в генеральной совокупности верна нулевая гипотеза H_0 ; вероятность такого решения $1 - \alpha$;

2) нулевая гипотеза H_0 будет отклонена в пользу альтернативной H_1 , тогда как и на самом деле в генеральной совокупности нулевая гипотеза H_0 отклоняется в пользу альтернативной H_1 ; вероятность такого решения $1 - \beta$ – мощность критерия.

Статистические гипотезы проверяются с помощью *статистического критерия* (назовём его в общем виде K), являющегося функцией от результатов наблюдения.

Статистический критерий – это правило (формула), по которому определяется мера расхождения результатов выборочного наблюдения с высказанной гипотезой H_0 . Статистический критерий, как и всякая функция от результатов наблюдения, является случайной величиной и в предположении справедливости нулевой гипотезы H_0 подчинена некоторому хорошо изученному теоретическому закону распределения с плотностью распределения $f(k)$.

Выбор критерия для проверки статистических гипотез может быть осуществлён на основании различных принципов. Чаще всего для этого пользуются *принципом отношения правдоподобия*, который позволяет построить критерий наиболее мощный среди всех возможных критериев. Значение критерия, рассчитываемое по специальным правилам на основании выборочных данных, называется *наблюдаемым значением критерия* ($K_{\text{набл.}}$).

Значения критерия, разделяющие совокупность значений критерия на *область допустимых значений* (наиболее правдоподобных в отношении нулевой гипотезы H_0) и *критическую область* (область значений, менее правдоподобных), называются *критическими точками* ($K_{\text{кр.}}$).

Областью допустимых значений (областью принятия нулевой гипотезы H_0) называют совокупность значений критерия K , при которых нулевая гипотеза H_0 не отклоняется. *Критической областью* называют совокупность значений критерия K , при которых нулевая гипотеза H_0 отклоняется в пользу конкурирующей H_1 .

Алгоритм проверки статистических гипотез сводится к следующему:

1. Сформулировать нулевую H_0 и альтернативную H_1 гипотезы.
2. Выбрать уровень значимости α .
3. В соответствии с видом выдвигаемой нулевой гипотезы H_0 выбрать статистический критерий для её проверки, т. е. специально подобранную случайную величину K , точное или приближенное распределение которой заранее известно.
4. По таблицам распределения случайной величины K , выбранной в качестве статистического критерия, найти его критическое значение $K_{\text{кр.}}$ (критическую точку или точки).

5. На основании выборочных данных по специальному алгоритму вычислить наблюдаемое значение критерия $K_{\text{набл.}}$.

6. По виду конкурирующей гипотезы H_1 определить тип критической области.

7. Определить, в какую область (допустимых значений или критическую) попадает наблюдаемое значение критерия $K_{\text{набл.}}$, и в зависимости от этого принять решение относительно нулевой гипотезы H_0 .

2.4. Контрольные вопросы

1. Определите надёжность системы, состоящей из элементов, соединённых последовательно.

2. Определите надёжность системы, состоящей из элементов, соединённых параллельно.

3. В чем заключается методика определения надёжности систем, состоящих из последовательно и параллельно соединённых элементов?

4. Как можно охарактеризовать соединение элементов типа «мост»?

5. Какова методика определения надёжности системы произвольной конфигурации?

6. Дайте определение характеристикам рассеяния случайных распределений – среднему значению, среднему квадратическому отклонению и коэффициенту вариации.

7. Сформулируйте понятие законов распределения случайных величин и поясните их назначение.

8. В каких случаях на практике целесообразно применять нормальное распределение, каков вид кривых его плотности и функции распределения?

9. В каких случаях на практике целесообразно применять экспоненциальное распределение, каковы вид кривых его плотности и функции распределения?

10. В каких случаях на практике целесообразно применять распределение Вейбулла, каковы вид кривых его плотности и функции распределения?

11. Поясните термин «структурное резервирование».

12. Какие виды резервирования в зависимости от схемы включения резерва вы можете перечислить?

13. Дайте определения вероятности безотказной работы и вероятности отказа. Поясните их математический смысл.

14. Что называется интенсивностью отказов? Сформулируйте математический и физический смыслы этого понятия.

15. Дайте определение параметра потока отказов. Каков физический смысл этого понятия?

16. Как изменяется параметр потока отказов технической системы в течение её срока службы?

17. Какие основные коэффициенты характеризуют надёжность технических систем?

18. Назовите статистические законы распределения, применяемые в теории надёжности, и область их применения.

19. Сформулируйте алгоритм испытания надёжности технической системы.

20. Каков общий смысл статистических критериев согласия?

21. Для чего в исследованиях надёжности используются статистические критерии однородности?

22. Дайте определения простой и сложной гипотез.

23. Как определить ошибки первого рода?

24. Дайте определение ошибки второго рода.

25. Что такое мощность критерия?

3. МЕТОДЫ РАСЧЁТА НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

3.1. Аналитический метод расчета надёжности схем систем электроэнергетики

Данный метод позволяет количественно оценить надёжность электрической схемы любой сложности. Он основан на композиции системного анализа и теории вероятностей. Его сущность заключается в определении количественных вероятностных значений показателей надёжности для расчёта случаев надёжности, к которым относятся полное погашение схемы (состояние полного отказа), разрыв транзита, оценка возможных недоотпусков электроэнергии при частичных отказах схемы.

Алгоритм метода

1. Определяется перечень расчётных случаев надёжности выделенной части схемы рассматриваемой системы для анализируемого или расчётного режима:

- состояние полного отказа (полное погашение схемы);
- состояние полной работоспособности;
- состояния частичных отказов (частичных перерывов в электроснабжении), приводящих к недоотпуску электроэнергии;
- разрыв транзита.

2. Составляется расчётная схема для каждого из перечисленных в п. 1 расчетных случаев. Расчётная схема включает в себя только те элементы схемы, которые нормально включены в рассматриваемом режиме.

3. Для каждого элемента расчётной схемы по справочным или эксплуатационным данным определяются следующие показатели надёжности:

- интенсивность отказа, или параметр потока отказов λ или ω ;
- среднее время восстановления t_v ;
- частота плановых или преднамеренных отключений $\mu_{пл}$ или $\mu_{пр}$;
- время плановых или преднамеренных отключений $t_{пл}$ или $t_{пр}$.

4. По расчётной схеме (п. 1) составляется схема замещения. При этом каждый элемент, который может отказать, замещается прямоугольником. Прямоугольники соединяются последовательно или па-

параллельно в смысле надёжности. Последовательное соединение используется для нерезервируемых частей схем; параллельное – для частей схем с резервированием замещением.

5. Последовательно соединённые элементы в схеме замещения заменяются одним эквивалентным элементом, для которого рассчитываются следующие показатели надёжности:

- параметр потока отказа ω_c ;
- коэффициент вынужденного простоя $C_{кп}$;
- коэффициент готовности C_k ;
- время восстановления, $t_{вс}$.

6. Параллельно соединённые элементы или цепочки схемы замещения заменяются одним эквивалентным элементом, для которого определяется тот же перечень показателей надёжности, что и в п. 5.

7. Далее алгоритм повторяется до тех пор, пока схема замещения не будет сведена к набору параллельных цепочек. Определяются возможные дефициты мощности для расчётного случая. Под дефицитом мощности понимается разность между требуемой мощностью и пропускной способностью элемента. Последняя соответствует максимально возможной мощности, которая может быть передана через элемент с учётом его перегрузочной способности и статической устойчивости системы. Определяется вероятность возможных дефицитов мощности, т. е. вероятность частичных отказов схемы с помощью теорем умножения вероятностей.

8. Параллельно соединённые цепочки эквивалентизируются до одного элемента, для которого находятся показатели надёжности, перечисленные в п. 5. Отказ этого элемента и соответствует полному отказу схемы для рассматриваемого расчётного случая.

9. Определяются расчётное время безотказной работы схемы и время её восстановления.

10. Определяются недоотпуски электроэнергии и ограничения мощности для состояний частичных и полного отказов.

11. Рассчитываются ущербы от частичных и полного отказов схемы, и определяется суммарный ущерб.

В разд. 5.2. приведён пример расчёта надёжности системы электроснабжения района в рамках расчётно-графической работы.

3.2. Логико-вероятностный метод расчета надёжности систем электроснабжения

Если структурная модель системы описывается с помощью математической логики, а количественная оценка надёжности производится на основе теории вероятностей, то такой метод называется логико-вероятностным (ЛВМ). Множество возможных состояний системы можно описать с помощью алгебры логики, состоящей из трёх основных операций:

а) НЕ – отрицание. Отрицание обозначается через X и значения истинности определяются соотношениями $1 = 0; 0 = 1$.

б) И – конъюнкция, или логическое умножение. Значения истинности конъюнкции определяются следующими соотношениями:

$$0 \cdot 0 = 0; 0 \cdot 1 = 0; 1 \cdot 0 = 0; 1 \cdot 1 = 1.$$

в) ИЛИ – дизъюнкция, или логическое сложение. Значения истинности дизъюнкции определяются следующими соотношениями:

$$0 + 0 = 0; 0 + 1 = 1; 1 + 0 = 1; 1 + 1 = 1.$$

Основные правила преобразования:

$$X \cdot 1 = X; X + 1 = 1; X + 0 = X; X \cdot 0 = 0; X \cdot X = X; X + X = X; X \cdot X = 0; X + X = 1.$$

Ассоциативный закон:

$$X_1(X_2 \cdot X_3) = (X_1 \cdot X_2)X_3 = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3;$$

$$X_1 + (X_2 + X_3) = (X_1 + X_2) + X_3 = X_1 + X_2 + X_3.$$

Коммутативный закон

$$X_1 \cdot X_2 = X_2 \cdot X_1; X_1 + X_2 = X_2 + X_1.$$

Дистрибутивный закон:

$$X_1(X_2 + X_3) = X_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot X_3;$$

$$X_1 + (X_2 \cdot X_3) = (X_1 + X_2)(X_1 + X_3).$$

Закон инверсий: $X_1 \cdot X_2 = X_1 + X_2$.

Операция поглощения: $X_1 + X_1 \cdot X_2 = X_1$; $X_1 X_1(X_1 + X_2) = X_1$.

Если через Z обозначить состояние системы электроснабжения, тогда при $Z = 1$ система работоспособна, а в случае $Z = 0$ – неработоспособна. Функция $\neg Z$ называется логической функцией работоспособности СЭС, а Z – функцией неработоспособности.

Определим логическую функцию неработоспособности (Z) для упрощённой схемы электропитания потребителя ЭП [7], представленной на рис. 3.1, в состав этой схемы входят:

КЛ – кабельная линия, Т – трансформатор, АИ – резервный автономный источник (генератор), КА – коммутационный аппарат, Ф – фидер, АВ – автоматический выключатель, БУП – блок управления переключением, БРЗ – блок релейной защиты. Логическую функцию неработоспособности определим на основе построения дерева отказов (ДО) для этой схемы. Конечным событием дерева отказов является отключение электропитания объекта. Это произойдёт, если:

- 1) трансформатор Т или резервный автономный источник АИ теряют питание;
- 2) коммутационный аппарат КА отключён;
- 3) либо отказал фидер Ф, либо отключён автоматический выключатель АВ.

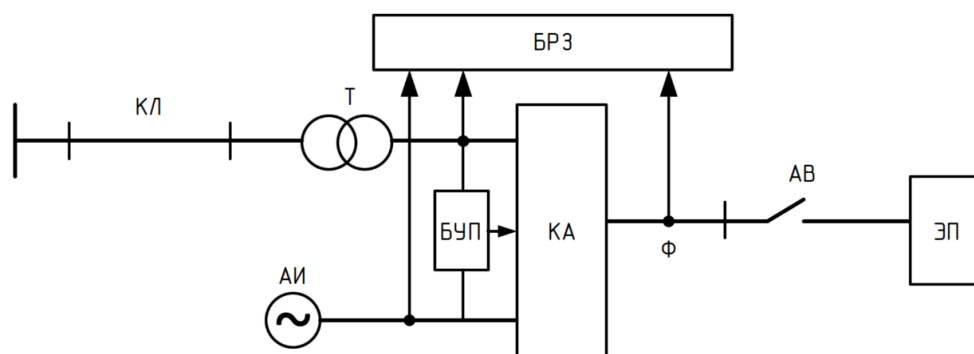


Рис. 3.1. Упрощённая схема электропитания потребителя ЭП

Дерево отказов строим исходя из определения конечного события и схемы электропитания потребителя (см. рис. 3.1). Цель анализа ДО – определить вероятность конечного события, так как конечное событие – это отказ системы Z , анализ даёт вероятность $P(Z)$. На рис. 3.2 приведено построение дерева отказов вниз от конечного события Z . В прямоугольниках описаны отказы подсистем, которые можно анализировать далее, а в кружочках обозначены отказы элементов, которые далее не анализируются.

Промежуточные события следующие: P – отключение коммутационного аппарата КА; Q – полная потеря питания от кабельной линии

КЛ и автономного источника АИ; R – потеря питания на вводе электроприёмника ЭП; S – срабатывание защиты, действующей на отключение коммутационного аппарата КА; T – потеря питания от кабельной линии КЛ; U – отключение автоматического выключателя АВ.

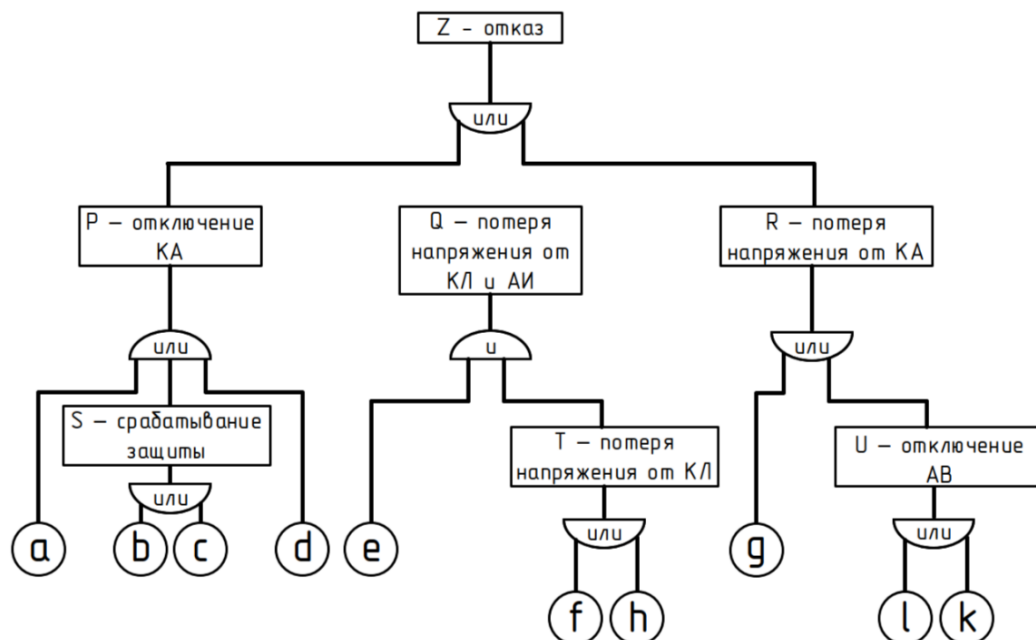


Рис. 3.2. Дерево отказов для схемы электропитания потребителя ЭП

Первичные события: a – отказ блока управления переключениями; b – аварийное отключение, например при перегрузке; c – ложное срабатывание защиты; d – отказ коммутационного аппарата; e – отказ кабельной линии; f – отказ трансформатора; g – отказ автономного источника; h – отказ питающего фидера; i – отказ автоматического выключателя; k – срабатывание защиты автоматического выключателя АВ.

По дереву отказов определим логическую функцию отказов системы. Логический символ ИЛИ заменяем на знак сложения, а логический символ И на знак произведения; события в формуле обозначаются их буквенными символами. Передвигаясь на один уровень ниже от конечного события, проходим через узел ИЛИ, который указывает на существование трех сечений: $\{P\}$, $\{Q\}$, $\{R\}$, где P , Q , R – события отказов. Каждое из этих сечений может быть разделено далее на большее число сечений. На последнем шаге множества сечений состоят только из элементов. Далее по дереву событий составляется логическая функция отказов (функция неработоспособности):

$$Z = P + Q + R = \{a + d + S\} + \{e T\} + \{g + U\} = a + b + c + d + e f + e h + g + l + k.$$

Слагаемые в этом выражении представляют собой сечения, отказ элементов которых приводит к отказу системы. Вероятность отказа вычисляется на основании формул сложения и умножения.

Алгоритм метода

1. Составляется эквивалентная структурная схема системы.
2. Строится граф дерева событий на основе алгебры логики, начиная с нижнего яруса. При этом в кружках изображаются элементы, отказ которых приводит к отказу части системы. Затем элементы соединяются логическими связями $\wedge$ или $\vee$, в зависимости от структуры надёжности обозначается вершинное действие, т. е. отказ.
3. Дается логическое описание отказов в системе на основе графа дерева событий. При этом работоспособность обозначается Z , а отказ $\bar{Z}$.
4. Осуществляется переход от логических переменных к вероятностным совместно с подстановкой соответствующих алгебраических знаков операции.
5. Рассчитывается численное значение вероятности отказов с учётом автоматического ввода резерва, если он предусмотрен в анализируемой схеме.

Преимущества логико-вероятностного метода:

- 1) можно применять при любой логической структуре системы, а не только при последовательно-параллельных логических схемах;
- 2) можно применять при любых распределениях наработки до отказа.

Недостатки:

- 1) не всегда удаётся составить логическую функцию работоспособности или отказа, соответствующую рассматриваемой системе;
- 2) громоздкость метода для сложных систем преобразования.

3.3. Метод минимальных путей и сечений схем систем электроснабжения

Для схем произвольной конфигурации в смысле надёжности возникает задача определения состояний работоспособности и состояний отказа относительно узла. Элементы, входящие в такие состояния, образуют так называемые пути и сечения схемы.

Пути схемы относительно узла (узлов) нагрузки называются минимальные совокупности элементов, безотказные состояния которых (в любой из совокупностей) обеспечивают безотказное состояние схемы (передачу электроэнергии) относительно узла.

Минимальными сечениями схемы называются совокупности минимального набора элементов, отказы которых в любой из совокупностей приводят к состоянию отказа схемы (прекращение передачи электроэнергии) относительно узла.

Иными словами, путь от источника питания до узла – это тот минимальный набор элементов схемы, который обеспечивает один из возможных самостоятельных вариантов выполнения задачи – передачи электроэнергии в узел нагрузки. Минимальные сечения – это тот минимальный набор элементов схемы, отказ которых приводит к отказу системы относительно узла, т. е. к прекращению передачи электроэнергии. В определении путей и сечений не предусматривается ограничение пропускных способностей элементов. В схеме с последовательным соединением элементов имеется один путь, состоящий из совокупности элементов $1, 2, \dots, n$, и n сечений: $(1), (2), \dots, (n)$. В схеме с параллельным соединением элементов имеется одно сечение $(1, 2, \dots, n)$ и n путей: $(1), (2), \dots, (n)$. Таким образом, данный подход целесообразно использовать для определения вероятностей полного отказа и полной работоспособности системы. Представим все минимальные сечения и пути схемы с последовательным соединением элементов в виде матриц минимальных сечений C и путей P . Их столбцы соответствуют элементам, строки – сечениям (путям). Если элемент i входит в сечение j , то на пересечении столбца i и строки j ставится 1, в противном случае – 0:

В сложных системах может быть несколько минимальных путей и несколько минимальных сечений.

Для системы типа «мостик» (рис. 3.3):

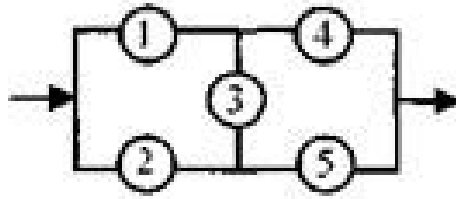


Рис. 3.3. Система типа «мостик»

минимальными путями будут

1) 1, 4; 2) 2, 5; 3) 1, 3, 5; 4) 2, 3, 4;

минимальные сечения:

1) 1, 2; 2) 4, 5; 3) 1, 3, 5; 4) 2, 3, 4.

Для последовательного соединения элементов имеется всего один путь и n сечений, если n – число последовательно включенных элементов (рис. 3.4).

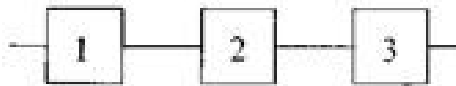


Рис. 3.4. Последовательное соединение

Минимальными путями будут

1) 1; 2; 3;

минимальные сечения:

1) 1; 2) 2; 3) 3.

Для параллельного соединения из n элементов число путей равно n , т. е. равно числу элементов, а сечений всего одно (рис. 3.5):

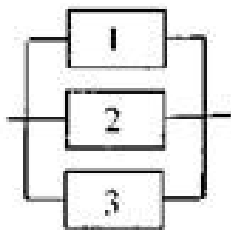


Рис. 3.5. Параллельное соединение

Методика определения надёжности сложных систем с помощью минимальных путей и минимальных сечений на примере системы «2 из 3»

Этап 1. Определить для сложной системы минимальные пути и минимальные сечения

Для системы «2 из 3» (рис. 3.6):

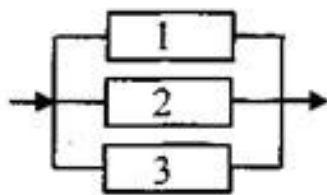


Рис. 3.6. Система «2 из 3»

минимальными путями будут:

1) 1, 2; 2) 1, 3; 3) 2, 3;

минимальные сечения:

1) 1, 2; 2) 1, 3; 3) 2, 3.

Этап 2. Составить некоторую фиктивную структурную схему соединения.

Существует два варианта составления таких схем:

1) структурная схема составляется в виде параллельного соединения всех минимальных путей;

2) все минимальные сечения в виде блоков с параллельным соединением элементов требуется соединить последовательно.

Фиктивные схемы для системы «2 из 3» будут иметь вид:

– на основе минимальных путей (рис. 3.7);

– на основе минимальных сечений (рис. 3.8).

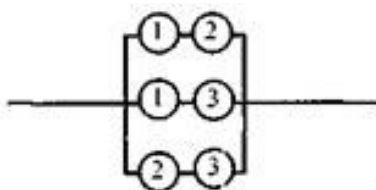


Рис. 3.7. Фиктивная структурная схема на основе минимальных путей

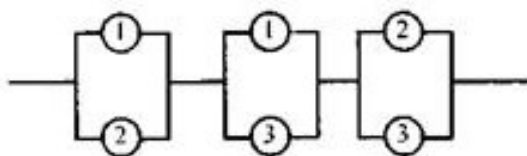


Рис. 3.8. Фиктивная структурная схема на основе минимальных сечений

Этап 3. Составить условные системные функции для фиктивных схем.

Условная системная функция на основе путей по рис. 3.7 имеет следующий вид:

$$\Phi_{\text{пут}}(X) = 1 - (1 - x_1x_2)(1 - x_1x_3)(1 - x_2x_3), \quad (3.1)$$

где x_i – показатель надёжности элементов, принимающий значения «да» или «нет», т. е. $x_i = 1$, если элемент работоспособен, и $x_i = 0$, если элемент отказывает; i – номера элементов.

Условная системная функция на основе сечений по рис. 3.8 имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{сеч}}[1 - (1 - x_1)(1 - x_2)][1 - (1 - x_2)(1 - x_3)] \\ [1 - (1 - x_2)(1 - x_3)]. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Особенностью условной системной функции является то, что она составлена на использовании альтернативных или булевых переменных, которые могут принимать значения 1 или 0. Значит, и сама условная системная функция $\Phi(x)$ тоже может принимать значения 1 или 0. А это значит, что при решении уравнений (3.1) и (3.2) степени при x не имеют никакого значения, так как 1 и 0 в любых степенях дают все равно 1 и 0.

Преобразование (3.1) и (3.2) и удаление степеней приведёт к следующему:

$$\Phi_{\text{пут}}(x) = \Phi_{\text{сеч}}(x) = \Phi_c(x) = x_1x_2 + x_1x_3 + x_2x_3 - 2x_1x_2x_3. \quad (3.3)$$

Этап 4. Заменить условную системную функцию функцией надёжности первоначальной структурной схемы технического объекта $P_c(x)$.

Булевы переменные x_i заменяются соответствующими функциями $P_i(t)$, т. е. функциями надёжности элементов. После замены булевой функции и булевых переменных в формуле (3.3) придём к выражению следующего вида:

$$P_c(t) = P_1(t)P_2(t) + P_1(t)P_3(t) + P_2(t)P_3(t) - 2P_1(t)P_2(t)P_3(t). \quad (3.4)$$

К выражению (3.4), как мы установили, можно прийти как через минимальные пути, так и через минимальные сечения. В частном случае для системы «2 из 3», если

$$P_i(t) = P_2(t) = P_3(t) = P(t) = P, \quad (3.5)$$

уравнение (3.5) приведёт к знакомому выражению

$$P_c = 3p^2 - 2p^3, \quad (3.6)$$

которое было получено и методом перебора, и комбинированным методом.

Для сложных произвольных структур метод путей и сечений даёт приближённую оценку надёжности технической системы, причём метод путей даёт верхнюю границу оценки надёжности.

Отсюда, если элемент входит в состав всех путей, то он образует одноэлементное сечение. Если элемент входит в состав всех сечений, то он образует путь. Для выявления одноэлементных сечений по матрице путей достаточно выявить её столбцы, состоящие из одних единиц (пересечение всех путей в одном элементе).

Двухэлементные сечения получаются в результате логического сложения двух любых столбцов матрицы путей (пересечение всех путей в двух элементах). Если в результате получается столбец, состоящий из одних единиц, то эти два элемента образуют двухэлементное сечение. Трёхэлементные сечения получаются в результате логического сложения трёх столбцов (пересечение всех путей в трёх элементах) и т. д. Вспомним правила логического сложения:

$$0 + 0 = 0$$

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 0 = 1$$

$$1 + 1 = 1$$

В результате подобного анализа можно по матрице путей получить матрицу сечений.

И ещё два важных для расчёта надёжности сложных систем выводы:

1. Если все пути схемы пересекаются в одном элементе, то этот элемент является одноэлементным сечением.

2. Если все пути пересекаются в двух элементах, то эти элементы образуют двухэлементные сечения.

Способ определения одно- и двухэлементных сечений, основанный на пересечении путей, можно получить иначе через независимые пути схемы:

– если два независимых пути вынужденно пересекаются в одном элементе, то он образует одноэлементное сечение.

– если две пары независимых путей вынужденно пересекаются в двух элементах, то они образуют двухэлементное сечение.

Используя способ вынужденного пересечения независимых путей, можно регулировать в процессе расчёта количество состояний системы, выявляя только состояния с числом отказавших элементов не более двух. Для этого достаточно найти четыре максимально независимых пути. Вынужденные пересечения двух путей выявляют одноэлементные сечения, пересечения пар путей – двухэлементные сечения.

Подводя итог, можно отметить: если в системе преобладает последовательное соединение элементов, то задача более быстро решается с выделением состояния работоспособности. Если в системе много поперечных связей и резервирования – то с выделением состояний отказов.

3.4. Контрольные вопросы

1. Приведите формулу для расчёта вероятности отказа (состояние полного отказа) системы при последовательном соединении элементов.

2. Приведите формулу для расчёта вероятности отказа (состояние полного отказа) системы при параллельном соединении элементов.

3. Какую формулу применяют для расчёта вероятности безотказной работы системы (состояние полной работоспособности) при последовательном соединении элементов?

4. Приведите формулу для расчёта вероятности безотказной работы системы (состояние полной работоспособности) при параллельном соединении элементов.

5. Что характеризует собой интенсивность отказа?

6. Каким образом определяется среднее время восстановления?

7. Из каких трёх основных операций состоит алгебра логики?

8. Какими соотношениями определяются значения истинности при использовании операции «отрицание»?

9. Какими соотношениями определяются значения истинности при использовании операции «конъюнкция»?

10. Какими соотношениями определяются значения истинности при использовании операции «дизъюнкция»?

11. Что представляет собой и как строится «дерево событий»?

12. В чем заключается методика определения надёжности системы, состоящей из элементов, образующих соединение типа «мост»?

13. Дайте определение минимального пути схемы относительно узла нагрузки.

14. Дайте определение минимального сечения схемы относительно узла нагрузки.

15. Если в системе преобладает последовательное соединение элементов, то с помощью какого метода – минимальных путей или минимальных сечений – быстрее решается задача?

16. Если в системе преобладает параллельное соединение элементов, то с помощью какого метода – минимальных путей или минимальных сечений – быстрее решается задача?

4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ В ЗАДАЧАХ НАДЁЖНОСТИ

4.1. Определение ущерба потребителей от перерывов электроснабжения

Для обеспечения надёжности электроснабжения применяются следующие мероприятия:

- повышение надёжности элементов электроснабжения;
- резервирование;
- своевременное проведение планово-предупредительных ремонтов.

Выполнение этих мероприятий связано с дополнительными затратами, но позволяет снизить ущерб от перерывов в электроснабжении. Экономически целесообразная степень надёжности при сравнении вариантов будет соответствовать минимуму приведённых затрат с учётом ущерба

$$Z_i = E_n K_i + I_i + M(Y) \Rightarrow \min,$$

где E_n – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, равный 0,12, а для новой техники $E_n = 0,15$; K_i – капиталовложения по i -му варианту; I_i – текущие затраты по тому же варианту; $M(Y)$ – математическое ожидание ежегодных издержек, связанных с нарушением электроснабжения.

Сравнение вариантов по капиталовложениям и текущим затратам должно производиться при соблюдении полной сопоставимости вариантов, основой которого является равенство потребительского эффекта. Применительно к проблеме надёжности в электроэнергетике сравниваться должны варианты, обеспечивающие одинаковую надёжность электроснабжения потребителей.

Современные СЭС представляют собой сложные и многократно резервируемые сети, получающие питание от нескольких источников. Кроме того, они оснащены большим количеством устройств релейной защиты, автоматики и телемеханики. Но в то же время отказ в электроснабжении хотя бы одного потребителя приводит к невыполнению системой основной задачи – снабжение потребителей электроэнергией в нужном количестве и должного качества. В этом случае происходит

снижение выходного эффекта системы, который для абсолютно надёжной СЭС выражается в количестве отпущенной в соответствии с требованиями для потребителей электроэнергии $\mathcal{E}_и$. Реальный эффект $\mathcal{E}_р$ представляет собой количество отпущенной электроэнергии с учётом отказов. Разность между идеальным и реальным эффектами является **мерой оценки надёжности** СЭС и представляет собой количество недоотпущенной потребителям электроэнергии в результате отказов

$$H = \mathcal{E}_и - \mathcal{E}_р,$$

где $\mathcal{E}_и, \mathcal{E}_р$ – идеальный и реальный эффекты.

Количество отпущенной потребителям электроэнергии при отсутствии отказов в СЭС определяется как

$$\mathcal{E}_и = \sum_{i=1}^M \mathcal{E}_{иi} = \sum_{i=1}^M P_{pi} T_{\max i},$$

где P_{pi} – расчётная нагрузка i -го потребителя; $T_{\max i}$ – число часов использования максимума i -м потребителем; M – число потребителей.

По количеству отпускаемой энергии для СЭС применяются коэффициенты необеспеченности надёжности ρ и необеспеченности электроэнергии π , которые определяются по следующим формулам:

$$\rho = \frac{H}{\mathcal{E}_и};$$

$$\pi = \frac{\mathcal{E}_р}{\mathcal{E}_и} = 1 - \frac{H}{\mathcal{E}_и} = 1 - \rho.$$

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

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

а ожидаемый недоотпуск i -му потребителю будет определяться как произведение средней величины нагрузки $P_{срi}$ на эквивалентную продолжительность простоя $\Theta_{\mathcal{E}i}$ за тот же период времени

$$W_i = P_{срi} \times \Theta_{\mathcal{E}i}.$$

Эквивалентная продолжительность простоя i -го потребителя

$$\Theta_{\mathcal{E}i} = \lambda_i T_{\text{в}i} + \xi \lambda_{\text{пп}} T_{0i}, \quad (4.1)$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го потребителя; T_{vi} – время восстановления i -го потребителя; ξ – коэффициент, отражающий меньшую тяжесть последствия от планово-предупредительных отключений по сравнению с внезапными отказами. В практических расчётах принимают $\xi = 0,33$; $\lambda_{пп}$ – интенсивность отказов из-за планово-предупредительных отключений; T_{0i} – продолжительность планово-предупредительных отключений.

Все показатели надёжности, используемые в формуле (4.1), можно найти в справочной литературе. При нарушении электроснабжения возникает ущерб Y как у потребителя $Y_{потр.}$, так и в энергосистеме Y_c

$$Y = Y_{потр.} + Y_c. \quad (4.2)$$

При своевременном предупреждении потребителя о предстоящем отказе можно так организовать производственный процесс, чтобы убытки от прекращения подачи электроэнергии были минимальными, и тем самым можно уменьшить величину ущерба. Ущерб от перерыва электроснабжения можно разделить на прямой и дополнительный как у потребителя, так и в энергосистеме. Размер ущерба Y зависит от характера технологического процесса, длительности перерыва и определяется двумя составляющими

$$Y = Y_{пр} + Y_{доп},$$

где $Y_{пр}$ – прямой ущерб; $Y_{доп}$ – дополнительный ущерб.

Прямой ущерб $Y_{пр}$, связанный с самим фактом перерыва электроснабжения, т. е. ущерб, возникающий при выходе из строя оборудования и инструмента, браке продукции, расстройстве технологического процесса, ухудшении технико-экономических показателей технологического процесса и т. п., определяется по формуле

$$Y_{пр} = Y_{пр(0)} + Y_{пр(1)}(t_э) + Y_{пр(2)}(t_{втп}),$$

где $Y_{пр(0)}$ – постоянная составляющая прямого ущерба, определяемая фактом отказа в электроснабжении; $Y_{пр(1)}(t_э)$ – составляющая прямого ущерба за время восстановления электроснабжения $t_э$; $Y_{пр(2)}(t_{втп})$ – составляющая прямого ущерба от момента восстановления электроснабжения до доведения технологического процесса установки до нормального режима.

Время восстановления электроснабжения и технологического оборудования $t_{\text{ВЭТ}} = t_{\text{э}} + t_{\text{ВТП}}$.

Дополнительный ущерб $Y_{\text{доп}}$, связанный с длительностью перерыва электроснабжения, т. е. ущерб от простоя рабочих, порчи сырья и материалов, недовыработки продукции и т. п., определяется по формуле

$$Y_{\text{доп}} = \Delta P(\Delta t_{\text{ВЭТ}}) \Delta Y_{\text{д}},$$

где $\Delta P(\Delta t_{\text{ВЭТ}})$ – объем недовыпущенной продукции; $\Delta Y_{\text{д}}$ – удельный ущерб на единицу недовыпущенной продукции.

$$\Delta P(\Delta t_{\text{ВЭТ}}) = P_{\text{п}} - P_{\text{ф}},$$

где $P_{\text{п}}$, $P_{\text{ф}}$ – плановый и фактический с учётом $(\Delta t_{\text{ВЭТ}})$ объёмы выпускаемой продукции.

В инженерной практике при определении величины ущерба обычно пользуются понятием удельного ущерба, т. е. величиной ущерба, отнесённой к единице выпускаемой продукции. Это позволяет сопоставлять решения для объектов с различным объёмом производства. Для некоторых технологических процессов величина ущерба определяется также фактом отказа и мощностью отключённого оборудования. Для ряда производств большое значение имеет время простоя.

Для расчёта на основе удельного ущерба пользуются упрощённым методом

$$\Delta Y_{\text{д}} = (y_{\text{ов}} \cdot q_{\Sigma \text{в}} + y_{\text{оп}} \cdot q_{\Sigma \text{п}}) P_{\text{м}} T_{\text{м}},$$

где $y_{\text{ов}}$, $y_{\text{оп}}$ – удельные ущербы от внезапных перерывов и перерывов планово-предупредительных в зависимости от длительности перерыва, руб./кВт·ч; $q_{\Sigma \text{в}}$ – вероятность отказа технической системы; $q_{\Sigma \text{п}}$ – средняя вероятность планово-предупредительного отключения; $P_{\text{м}} T_{\text{м}}$ – количество недоотпущенной электроэнергии потребителю, кВт·ч.

$$\text{Вероятность отказа элемента } q_{\text{в}} = \lambda \cdot T_{\text{в}},$$

где λ – интенсивность отказа, 1/г.; $T_{\text{в}}$ – время восстановления, лет/откл.

$$\text{Вероятность планово-предупредительного отключения } Q_{\text{п}} = \lambda_{\text{п}} \cdot T_{\text{п}},$$

где $\lambda_{\text{п}}$ – интенсивность планово-предупредительного отключения, 1/г.; $T_{\text{п}}$ – среднее время планово-предупредительных простоев, лет/откл.

Все эти показатели также можно найти в справочной литературе. Для определения вероятности отказа системы строится эквивалентная схема замещения. Недоотпуск электроэнергии при нарушении надёжности электроснабжения определяется как

$$W_{\text{нэ}} = (P_{\text{м}} - P_{\text{р}})T_{\text{м}} \cdot q_{\Sigma\text{в}},$$

где $P_{\text{м}}$, $P_{\text{р}}$ – соответственно максимальная расчетная нагрузка потребителя и возможный резерв мощности от другого источника энергии; $T_{\text{м}}$ – число часов использования максимальной нагрузки.

4.2. Экономический эффект от повышения надёжности систем электроснабжения

В настоящее время в России отсутствует рекомендованная регулирующими органами удельная стоимость компенсации ущерба от аварийных ограничений потребителей электроэнергии. В зарубежной практике удельная величина ущерба от внезапных ограничений принимается в диапазоне от 2 до 4,5 долл./кВт·ч. В расчётах экономической эффективности стоимость ущерба от аварийных ограничений до ее официального установления Правительством Российской Федерации рекомендуется оценивать исходя из зарубежного опыта компенсации ущерба потребителям в размере 1,5 – 4 долл./кВт·ч. Эти данные являются усреднёнными и могут быть использованы для ориентировочной оценки ущерба на случай аварийных перерывов электроснабжения в сети общего пользования с разным составом потребителей. Ущерб от возможных внезапных перерывов электроснабжения рекомендуется учитывать при технико-экономическом сравнении вариантов.

Экономическая эффективность технических средств – степень выгоды экономических затрат на освоение, внедрение и использование этих средств. Техничко-экономические расчёты позволяют определить экономический эффект от каждого мероприятия, улучшающего основное производство и энергетику предприятия. Наиболее эффективным мероприятием является замена старого оборудования на новое, прогрессивное и экономичное. Замена изношенного электрооборудования не требует обоснования, поскольку оно снижает надёжность работы, требует повышенных затрат на ремонтное обслуживание, а также имеет низкие эксплуатационные характеристики. Повышение надёжности должно предотвратить экономический ущерб от аварийных перерывов электроснабжения, а особенно таких, где перерыв недопустим (металлургия, химическая и нефтеперекачивающая промышленности).

Экономический эффект от повышения надёжности электроснабжения определяется сопоставлением дополнительных капиталовложений, требующихся для этого K_n , дополнительных расходов при эксплуатации устройств, повышающих надёжность I_n , с величиной, которая предотвращает средний экономический ущерб от перерывов электроснабжения (Y , руб./г.), умноженного на параметр интенсивности отказов в системе λ , (1/г.)

$$\mathcal{E}_n = Y \cdot \lambda - (E_n K_n + I_n).$$

Энергосберегающая политика должна стать экономическим рычагом для конкурентоспособной деятельности промышленных предприятий на рынке, где с её помощью можно получить дополнительную прибыль.

4.3. Контрольные вопросы

1. Какие мероприятия применяются для обеспечения надёжности электроснабжения?
2. Что является мерой оценки надёжности системы электроснабжения?
3. Какая существует связь между коэффициентом необеспеченности надёжности ρ и коэффициентом необеспеченности электроэнергии π ?
4. Как определяется ожидаемое количество электроэнергии, недоотпущенное потребителям за год?
5. Как определяется ожидаемый недоотпуск электроэнергии i -му потребителю?
6. Поясните, как определяется прямой ущерб.
7. Поясните, как определяется дополнительный ущерб.
8. Что такое удельный ущерб?
9. Назовите единицу измерения интенсивности отказа.
10. Как определяется экономический эффект от повышения надёжности?
11. Что такое экономическая эффективность технических средств?
12. Назовите основные мероприятия, повышающие экономическую эффективность технических средств.

5. МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ВОПРОСОВ

5.1. Решение практических примеров

Пример 1. Известно время наработки до отказа четырёх одно-
типных ламп

$$t_1 = 270, t_2 = 300, t_3 = 360, t_4 = 230 \text{ сут.}$$

Определим среднюю наработку до отказа

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} = \frac{270 + 300 + 360 + 230}{4} = 290.$$

Интенсивность отказов составит

$$\lambda = \frac{1}{\bar{T}} = \frac{1}{290} = 0,0034.$$

Вероятность безотказной работы в течение двух лет для невоз-
становливаемых элементов определяется по экспоненциальному закону

$$P(t) = \exp(-\lambda t) = e^{-0,0034 \times 2} = 0,993.$$

Пример 2. Определим коэффициенты готовности и простой для
трансформатора с интенсивностью отказов $\lambda = 0,05 \text{ год}^{-1}$ и время вос-
становления $\bar{T}_B = 120 \text{ ч.}$

Сначала найдём среднюю наработку до отказа

$$\bar{T}_P = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,05} = 20 \text{ лет} \approx 175\,200 \text{ ч.}$$

Тогда коэффициент готовности $k_r = \frac{\bar{T}_P}{\bar{T}_P + \bar{T}_B} = \frac{175200}{175200 + 120} = 0,999$,
а коэффициент простоя $k_n = 1 - k_r = 1 - 0,999 = 0,001$.

Пример 3. Вероятность выхода из строя электрического при-
бора равна P . Для повышения надёжности в прибор поставлены m дуб-
лирующих ветвей. Определить, во сколько раз k увеличится надёж-
ность прибора, если под надёжностью понимать вероятность безотказ-
ной 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 $R = 1 - P$.

Искомая величина $k = \frac{P(B)}{R} - \frac{1 - P^m}{1 - P}$.

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

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

Пример 4. Две цепи электроснабжения работают параллельно на общую нагрузку (рис. 5.1). Вероятность аварийного простоя одной цепи $q_1 = 0,6 \cdot 10^{-3}$, второй $q_2 = 0,8 \cdot 10^{-3}$. 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.

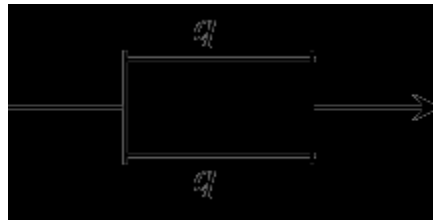


Рис. 5.1 Схема питания

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

$$q = q_1 + q_2 = 0,6 \cdot 10^{-3} + 0,8 \cdot 10^{-3} = 1,4 \cdot 10^{-3}.$$

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

$$q = q_1 + q_2 = (0,6 \cdot 10^{-3})(0,8 \cdot 10^{-3}) = 1,48 \cdot 10^{-6}.$$

Дополнение. Вероятность безаварийной работы

$$P = P_1 + P_2 - P_1 P_2 = 0,9994 + 0,9992 - 0,9994 \cdot 0,9992 = 0,9999996.$$

Пример 5. Питание потребителя осуществляется по одной цепи, состоящей из кабельной линии, трансформатора, выключателя (рис. 5.2). Вероятность безотказной работы за время t для этих элементов: $P_{\text{кл}} = 0,7$, $P_{\text{Т}} = 0,8$, $P_{\text{В}} = 0,9$. Отказ любого элемента приводит к перерыву питания, причём отказы взаимно независимы. Найти вероятность безотказной работы передачи.



Рис. 5.2. Схема питания

Решение. Обозначим $A_{\text{кл}}$ – безотказная работа линии, $A_{\text{т}}$ – трансформатора, $A_{\text{в}}$ – выключателя, A – всей системы. По теореме умножения для независимых событий

$$P(A) = P(A_{\text{кл}})P(A_{\text{т}})P(A_{\text{в}}) = 0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 0,504.$$

Дополнение. Вероятность отказа этой системы

$$P(B) = (1 - P_{\text{кл}}) + (1 - P_{\text{т}}) + (1 - P_{\text{в}}) - (1 - P_{\text{кл}})(1 - P_{\text{т}}) - (1 - P_{\text{кл}})(1 - P_{\text{в}}) - (1 - P_{\text{т}})(1 - P_{\text{в}}) + (1 - P_{\text{кл}})(1 - P_{\text{т}})(1 - P_{\text{в}}).$$

Пример 6. Силовые трансформаторы изготавливаются тремя заводами, причём вероятность того, что трансформатор выпущен на первом заводе, равна 0,2, на втором – 0,3, на третьем – 0,5. Вероятности того, что при определённых условиях работы трансформатор сохранит работоспособность в течение 25 лет, для первого, второго и третьего заводов соответственно равны: 0,9; 0,92; 0,808. Чему равна вероятность того, что поступивший для монтажа трансформатор сохранит работоспособность в течение 25 лет?

Решение. Этот трансформатор может оказаться с первого завода (событие H_1), со второго (H_2), с третьего (H_3). Интересующее нас событие A имеет вероятность

$$P(A) = \sum_{i=1}^3 P(H_i)P(A|H_i) = 0,2 \cdot 0,9 + 0,3 \cdot 0,92 + 0,5 \cdot 0,803 = 0,86.$$

Пример 7. Пропускная способность канала связи в системах телемеханики зависит от появления ошибки внутри канала (рис. 5.3). На вход канала могут подаваться два сигнала x_1 и x_2 . На выходе принимаются соответственно y_1 и y_2 ; 40 % времени канал занят передачей сигнала x_1 и 60 % времени – сигнала x_2 . Вероятность безошибочной передачи сигнала x_1 как y_1 равна 0,75. Вероятность того, что входной сигнал x_1 будет ошибочно принят как y_2 , равна 0,25. Аналогично вероятность того, что сигнал, первоначально переданный как x_2 , будет принят как y_2 и y_1 , равна соответственно 0,9 и 0,1. При заданных условиях получен выходной сигнал y_1 .

Какова вероятность того, что исходный сигнал был x_1 ?

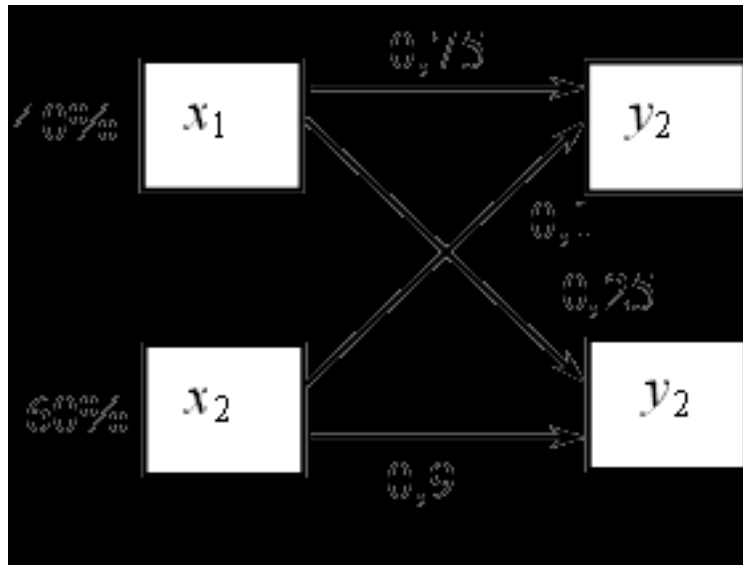


Рис. 5.3. Схема канала связи

Решение. Вероятности гипотез

$$P(H_1) = 0,4, P(H_2) = 0,6.$$

Условные вероятности события (получен входной сигнал y_1) равны $P(y_1|H_1) = 0,75, P(y_2|H_2) = 0,25$.

По теореме Байеса

$$P(y_1|H_1) = \frac{P(H_1)P(y_1|H_1)}{P(H_1)P(y_1|H_1) + P(H_2)P(y_1|H_2)} = \frac{0,4 \cdot 0,75}{0,4 \cdot 0,75 + 0,6 \cdot 0,1} = 0,83.$$

Пример 8. Энергосистема ограничивает промышленное предприятие в потреблении электрической мощности. При этом в течение года возможны дефициты в 5, 10 и 15 МВт с вероятностями соответственно 0,001, 0,0004 и 0,0002. Определить математическое ожидание недоотпуска электроэнергии промышленному предприятию за год.

Решение.

$$M[P] = \sum_{i=1}^3 p_i x_i = 0,001 \cdot 5 + 0,0004 \cdot 10 + 0,0002 \cdot 15 = 0,012 \text{ МВт.}$$

В году 8760 часов.

$$M[W] = 8760 \cdot M[P] = 8760 \cdot 0,012 = 105,12 \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

Пример 9. Выпущена партия резисторов в количестве 100 000 шт. Вероятность того, что резистор имеет брак, $p = 0,0001$. Найти вероятность того, что в партии ровно пять бракованных резисторов.

Решение.

$$a = Np = 100\,000 \cdot 0,0001 = 10.$$

$$P_5 = \frac{a^k}{k!} e^{-a} = \frac{10^5}{5!} e^{-10} = 0,375.$$

Пример 10. Определить вероятность того, что за 500 ч работы произойдут два отказа в сложном изделии, если известно, что интенсивность отказов $\lambda = 1 \cdot 10^{-3}$.

Решение.

$$P_2(500) = \frac{(10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^2)}{2!} e^{-10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^2} = 0,075.$$

Пример 11. В распределительном пункте (РП) установлено пять автоматических выключателей. Нормальная работа потребителей обеспечивается при их исправном состоянии. При монтаже РП выключатели выбирались из партии объёмом в 1000 шт., в которой было 950 исправных выключателей и 50 неисправных. Найти вероятность исправной работы РП.

Решение. Число элементарных событий $n = C_n^m$,

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}.$$

Пусть событие A есть исправная работа РП, оно осуществляется, если все выключатели выбраны из числа исправных. Число элементарных событий, благоприятствующих событию A , равно $m = C_{950}^5$. Следовательно,

$$P(A) = \frac{m}{n} = C_{950}^5 / C_{1000}^5 \approx 0,77.$$

Пример 12. При уровне значимости 0,05 проверить нулевую гипотезу об однородности двух выборок объёмом $n_1 = 6$ и $n_2 = 8$:

x_i 15, 23, 25, 26, 28, 29

y_i 12, 14, 18, 20, 22, 24, 27, 30

при конкурирующей гипотезе $H_1: F_1(x) \neq F_2(x)$.

Решение. Расположим варианты обеих выборок в виде одного вариационного ряда и перенумеруем их

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Выборки	12	14	15	18	20	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Найдём наблюдаемое значение критерия Вилкоксона – сумму порядковых номеров первого варианта первой выборки

$$W_{\text{набл.}} = 3 + 7 + 9 + 10 + 12 + 13 = 54.$$

Найдём по справочной таблице [11] нижнюю критическую точку, учитывая, что $Q = \alpha/2 = 0,05/2 = 0,025$, $n_1 = 6$, $n_2 = 8$.

$$W_{\text{нижн.кр}}(0,025; 6, 8) = 29.$$

Найдём верхнюю критическую точку

$$W_{\text{верхн.кр}} = (n_1 + n_2 + 1)n_1 - w_{\text{верхн.кр}} = (6 + 8 + 1)6 - 29 = 61.$$

Так как $29 < 54 < 61$, т. е. $w_{\text{нижн.кр}} < W_{\text{набл.}} < w_{\text{верхн.кр}}$, нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу об однородности выборок.

5.2. Расчётно-графическая работа «Расчёт и выбор варианта районной электрической сети с точки зрения надёжности»

Задание. Используя аналитический метод расчёта надёжности, построить два варианта конфигурации районной электрической сети, состоящей из подстанции и пяти потребителей (А, Б, В, Г, Д). Сравнить оба варианта и выбрать наилучший с точки зрения надёжности.

Исходные данные

В табл. 5.1 представлены мощность, заданная в пунктах А, Б, В, Г, Д, и соответствующий им $\cos \varphi$.

Таблица 5.1

Номер вари- анта	Заданные значения мощности, МВт				
	$P_A/\cos \varphi_A$	$P_B/\cos \varphi_B$	$P_V/\cos \varphi_V$	$P_\Gamma/\cos \varphi_\Gamma$	$P_D/\cos \varphi_D$
1	12,62/0,91	47,30/0,92	40,63/0,9	11,80/0,93	12,30/0,91
2	12,70/0,91	47,40/0,92	41,60/0,9	11,40/0,93	11,40/0,91
3	13,15/0,91	46,50/0,92	45,70/0,9	13,20/0,93	44,50/0,91
4	15,20/0,91	44,80/0,92	23,00/0,9	14,60/0,93	42,80/0,91
5	15,60/0,91	47,80/0,92	45,60/0,9	17,50/0,93	46,80/0,91
6	14,20/0,91	43,20/0,92	46,80/0,9	17,50/0,93	45,60/0,91
7	15,80/0,91	42,40/0,92	27,50/0,9	12,50/0,93	47,50/0,91

Окончание табл. 5.1

Номер вари- анта	Заданные значения мощности, МВт				
	$P_A/\cos \varphi_A$	$P_B/\cos \varphi_B$	$P_V/\cos \varphi_V$	$P_\Gamma/\cos \varphi_\Gamma$	$P_D/\cos \varphi_D$
8	10,30/0,91	45,00/0,92	42,50/0,9	11,50/0,93	38,50/0,91
9	12,30/0,91	47,00/0,92	43,00/0,9	12,50/0,93	39,40/0,91
10	13,40/0,91	48,00/0,92	42,80/0,9	10,50/0,93	44,50/0,91
11	15,50/0,91	47,50/0,92	44,50/0,9	15,70/0,93	45,00/0,91
12	16,70/0,91	42,30/0,92	47,00/0,9	14,50/0,93	48,20/0,91
13	14,30/0,91	41,50/0,92	42,80/0,9	17,20/0,93	46,20/0,91
14	13,50/0,91	20,00/0,92	43,20/0,9	21,20/0,93	46,50/0,91
15	17,20/0,91	21,00/0,92	44,00/0,9	20,00/0,93	45,00/0,91
16	15,50/0,91	48,00/0,92	42,70/0,9	12,50/0,93	43,20/0,91
17	14,70/0,91	49,00/0,92	47,50/0,9	13,50/0,93	45,50/0,91
18	18,50/0,91	49,50/0,92	42,70/0,9	15,70/0,93	42,00/0,91
19	14,20/0,91	45,50/0,92	41,80/0,9	16,40/0,93	47,20/0,91
20	25,40/0,91	37,40/0,92	45,70/0,9	15,20/0,93	48,20/0,91
21	28,30/0,91	40,00/0,92	48,00/0,9	12,40/0,93	47,00/0,91
22	32,30/0,91	37,00/0,92	49,50/0,9	13,20/0,93	21,00/0,91
23	35,00/0,91	40,00/0,92	25,70/0,9	14,70/0,93	36,00/0,91
24	37,00/0,91	35,50/0,92	32,20/0,9	17,50/0,93	28,00/0,91
25	40,00/0,91	37,00/0,92	40,00/0,9	30,00/0,93	38,00/0,91
26	35,00/0,91	45,00/0,92	27,50/0,9	22,00/0,93	25,00/0,91
27	22,30/0,91	27,00/0,92	40,00/0,9	17,50/0,93	33,40/0,91
28	11,50/0,91	28,00/0,92	40,00/0,9	15,60/0,93	22,90/0,91
29	16,00/0,91	20,50/0,92	47,50/0,9	12,00/0,93	35,60/0,91
30	20,50/0,91	16,40/0,92	21,00/0,9	21,00/0,93	34,00/0,91

В табл. 5.2 даны расстояния от пунктов А, Б, В, Г, Д до центральной подстанции и расстояния между пунктами в километрах.

Таблица 5.2

Номер варианта	L _A	L _Б	L _В	L _Г	L _Д	L _{АБ}	L _{БВ}	L _{ВГ}	L _{ГД}
1	25	95	45	80	25	70	90	60	65
2	27	110	35	85	25	60	110	75	60
3	28	90	36	86	26	65	105	61	59
4	30	91	37	87	27	72	102	60	58
5	31	93	38	88	28	63	103	59	57
6	35	94	39	89	29	60	104	58	56
7	32	95	40	90	30	61	105	57	55
8	34	92	41	91	31	58	103	55	54
9	36	100	42	92	32	64	101	54	53
10	32	102	43	93	33	70	102	53	52
11	35	97	33	94	34	62	103	52	51
12	27	95	34	85	35	68	100	50	50
13	28	98	35	84	36	70	102	49	49
14	30	100	36	83	35	70	104	48	48
15	31	102	37	82	34	71	100	47	47
16	32	105	38	81	33	73	95	45	45
17	34	101	39	80	32	68	94	44	44
18	33	95	40	89	30	62	95	43	43
19	30	96	41	90	31	66	94	42	42
20	32	97	42	91	29	65	95	41	41
21	28	98	43	92	27	70	97	40	40
22	29	95	44	93	28	66	98	41	39
23	30	100	45	94	25	70	95	42	42
24	32	110	44	95	24	78	90	43	43
25	34	107	43	96	23	73	91	44	44
26	35	108	42	97	32	73	92	45	45
27	33	103	41	90	31	70	93	46	46
28	29	104	40	89	32	75	94	47	47
29	25	105	39	88	35	80	95	48	48
30	27	106	40	87	30	79	96	50	50

В табл. 5.3 представлен состав потребителей нагрузки в пунктах питания с учётом категорий надёжности.

Таблица 5.3

Номер варианта	Пункты питания	Состав потребителей в пунктах питания, %		
		I категория	II категория	III категория
1, 6, 11, 16, 21, 26	А	—	—	100
	Б	—	—	100
	В	20	20	60
	Г	15	45	40
	Д	40	30	30
2, 7, 12, 17, 22, 27	А	50	20	30
	Б	—	—	100
	В	40	50	10
	Г	30	30	40
	Д	—	—	100
3, 8, 13, 18, 23, 28	А	20	70	10
	Б	25	45	30
	В	—	—	100
	Г	20	30	50
	Д	—	—	100
4, 9, 14, 19, 24, 29	А	30	60	10
	Б	40	50	10
	В	—	—	100
	Г	—	—	100
	Д	20	40	40
5, 10, 15, 20, 25, 30	А	—	—	100
	Б	15	45	40
	В	40	40	20
	Г	—	—	100
	Д	25	60	15

Значения интенсивностей отказов и среднее время восстановления для различных элементов электрических сетей приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Показатель	Элементы системы			
	Выключатель	Трансформатор	Секция шин	ЛЭП
λ , 1/г.	0,02	0,03	0,01	0,016 L*
t В,ч	15	120	5	10
λ п. р., 1/г.	0,6	0,7	0,5	1,6
t п. р., ч	12	34	4	22

*L – длина линии электропередачи, км

Методика расчёта

1. Для расчёта надёжности необходимо составить два варианта (произвольной конфигурации, но с учётом категории надёжности потребителей) структуры районной электрической сети.

2. Составить однолинейные схемы для первого и второго вариантов.

3. Составить схему замещения для каждого варианта и выделить последовательные участки сети.

4. Определить показатели надёжности последовательно соединённых элементов:

4.1. Определить интенсивность отказов последовательно соединённых элементов $\lambda_1 = \sum_{i=1}^n \lambda_i + \lambda_{\text{пр. max}}$,

где: λ_i – интенсивность отказов i -го элемента;

4.2. Для ЛЭП: $\lambda_{\text{ВЛ}} = \lambda \cdot l$;

$\lambda_{\text{пр. max}}$ – интенсивность плановых ремонтов, наибольшая из рассматриваемых элементов.

5. Вероятность отказов определяется по формуле $q = \frac{\lambda \cdot t_{\text{В}}}{T_{\Gamma}}$;

6. Время восстановления элемента $t_{\text{Вс}} = \frac{q}{\lambda^*}$,

где $\lambda^* = \lambda - \lambda_{\text{пр. max}}$.

7. Определяем показатели надёжности параллельно соединённых элементов:

7.1. Интенсивность отказа двух параллельных участков сети

$$\lambda_c = (\lambda_I \cdot q_{II} + \lambda_{II} \cdot q_I + \lambda_I^* \cdot q_{пр.II} + \lambda_{II}^* \cdot q_{пр.I}) T_{\Gamma},$$

где $q_{пр.} = \lambda_{нб} \cdot q_{нб}$;

$\lambda_{нб}$ и $q_{нб}$ – наибольшие интенсивность и вероятность отказов.

7.2. Вероятность отказа двух параллельных участков сети

$$q_c = k_{nc} = q_I \cdot q_{II} + k_{прI} \cdot q_{прI} \cdot q_{II} + k_{прII} \cdot q_{прII} \cdot q_I,$$

где k_{nc} – коэффициент, учитывающий фактор уменьшения вероятности преднамеренного ремонта элемента и аварийного отключения другого; $k_{пр}$ – коэффициент, учитывающий снижение вероятности отказа

из-за запрета наложения ремонта: $k_{nc} = 1 - e^{-\frac{t_{прI}}{t_{ВИ}}}$; $k_{ncII} = 1 - e^{-\frac{t_{прII}}{t_{ВИ}}}$.

7.3. Расчётное время восстановления системы $t_{вс} = \frac{q_c}{\lambda_c}$.

7.4. Расчётное время безотказной работы системы

$$T_p = \ln(1 - \alpha) \frac{1}{\lambda_c} = 0,105 \frac{1}{\lambda_c}.$$

7.5. Средний недоотпуск энергии из-за перерывов в электроснабжении

$$W_{нед} = P_{нед} \cdot p^{(P_{деф})} \cdot T_{\Gamma},$$

где $P_{деф} = P_{\max \text{ зим.}}$; $p^{(P_{деф})} = q_c$.

7.6. Ущерб от недоотпуска энергии (учитывается только первая категория) определяется следующим образом: $J = J_0 \cdot W_{нед}$,
где J_0 – удельный ущерб ($J_0 = 0,42$).

Пример расчёта

Рассмотрим вариант расчёта надёжности со следующими исходными данными:

по табл. 5.1

Вариант	Заданные значения мощности, МВт				
	$P_A/\cos \varphi_A$	$P_B/\cos \varphi_B$	$P_{В}/\cos \varphi_{В}$	$P_{Г}/\cos \varphi_{Г}$	$P_{Д}/\cos \varphi_{Д}$
*	23,9	19,4	23,4	14,9	18,75

по табл. 5.2

Расстояние от пунктов А, Б, В, Г, Д до подстанции и между ними, км								
L_A	L_B	L_V	L_Γ	L_D	L_{AB}	L_{BV}	L_{VG}	L_{GD}
35	94	39	89	29	72,47	102	58	44,72

по табл. 5.3

Номер варианта	Пункты питания	Состав потребителей в пунктах питания, %		
		I категория	II категория	III категория
*	А	—	50	50
	Б	20	20	60
	В	—	40	60
	Г	20	20	60
	Д	10	20	70

по табл. 5.4

Элементы системы	λ , 1/г.	λ , 1/г.	t , ч	t , ч
Выключатели	0,02	0,5	15	20
Сборные шины	0,01	1	5	1
Трансформаторы	0,03	40	150	30
ВЛ	1	20	10 на 100 км	25

Составим два варианта конфигурации районной электрической сети.

Схема № 1

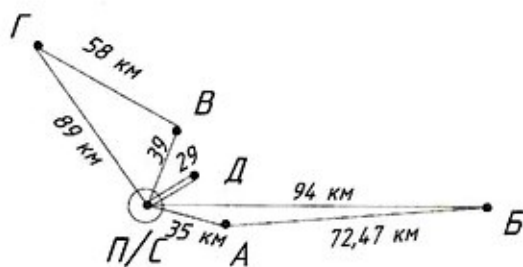
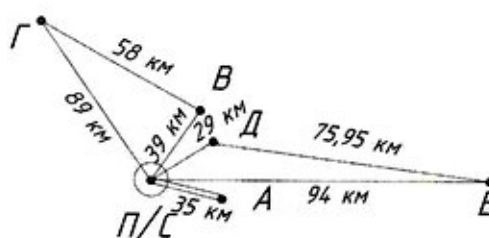
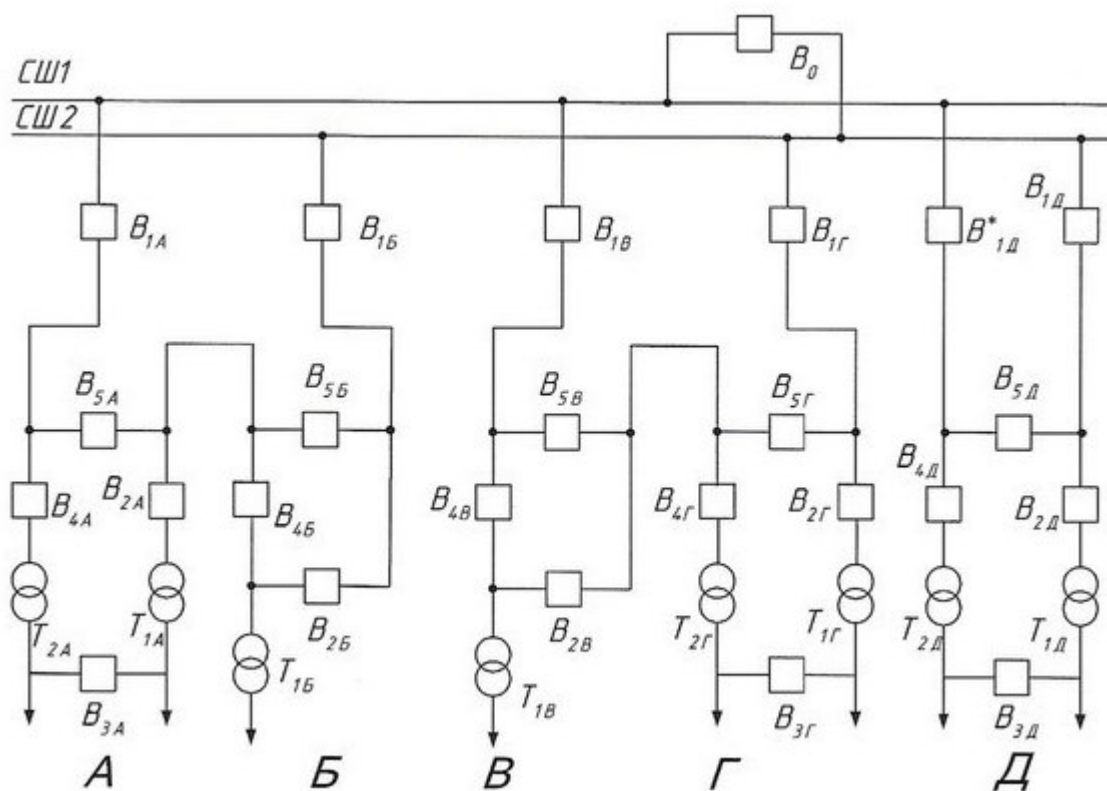


Схема № 2

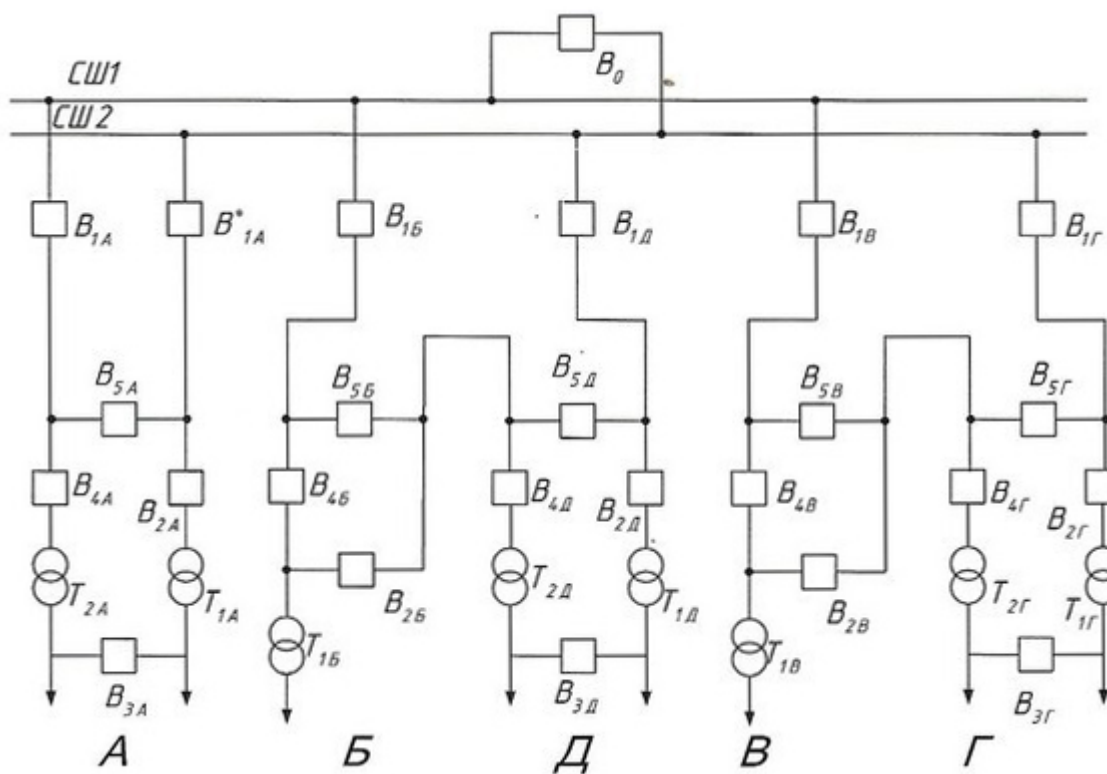


Схемы выбранных вариантов сетей

Составим однолинейные схемы для первого и второго вариантов.

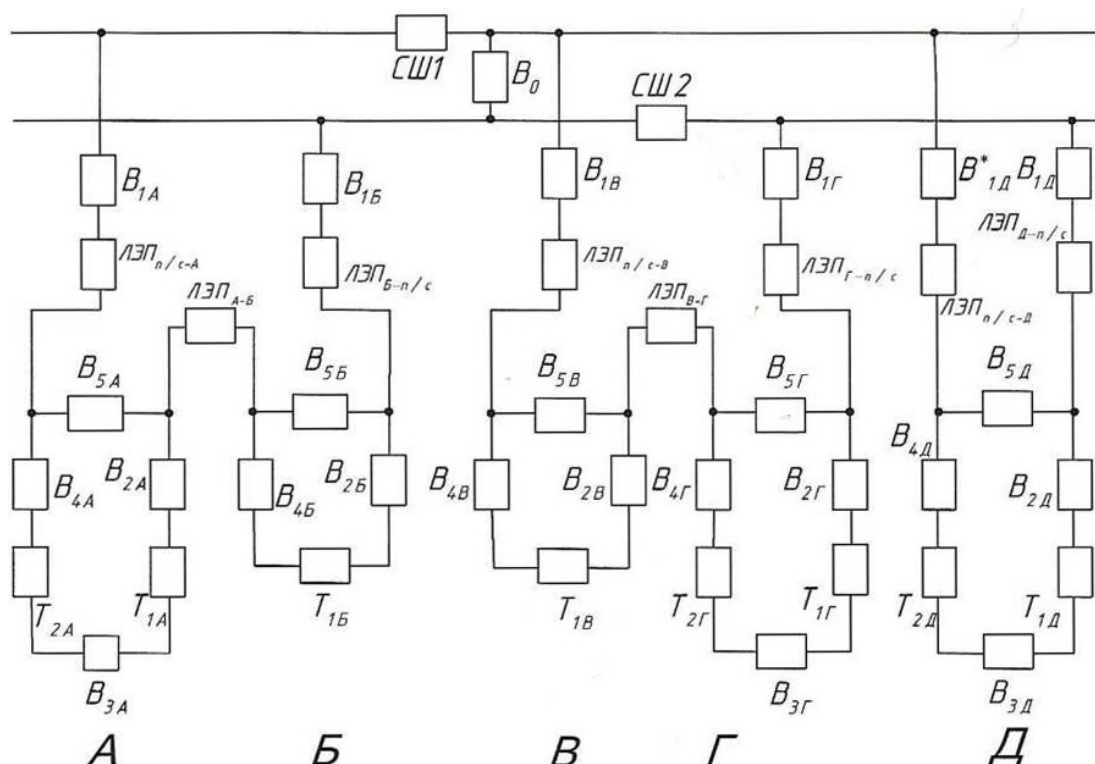


Сети внешнего электроснабжения по первому варианту



Сети внешнего электроснабжения по второму варианту

Составим схему замещения для первого варианта и проведём по нему расчёт.



Для схемы замещения определим показатели надёжности последовательно соединённых элементов, эквивалентируя их в 1...11.

Интенсивность отказов элементов системы 1...11:

$$\lambda_1 = \lambda_{B_{2Д}} + \lambda_{B_{4Д}} + \lambda_{T_{1Д}} + \lambda_{\text{пр. max}} = 2 \cdot 0,02 + 0,03 + 0,7 = 0,77 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_2 = \lambda_{B_{2Г}} + \lambda_{B_{3Г}} + \lambda_{B_{4Г}} + \lambda_{T_{1Г}} + \lambda_{T_{2Г}} + \lambda_{\text{пр. max}} = 3 \cdot 0,02 + 2 \times 0,03 + 0,7 = 0,82 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_3 = \lambda_2 = \lambda_{B_{2Г}} + \lambda_{B_{3Г}} + \lambda_{B_{4Г}} + \lambda_{T_{1Г}} + \lambda_{T_{2Г}} + \lambda_{\text{пр. max}} = 3 \cdot 0,02 + 2 \cdot 0,03 + 0,7 = 0,82 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_4 = \lambda_1 = \lambda_{B_{2Д}} + \lambda_{B_{4Д}} + \lambda_{T_{1Д}} + \lambda_{\text{пр. max}} = 2 \cdot 0,02 + 0,03 + 0,7 = 0,77 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_5 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_{B_{2Г}} + \lambda_{B_{3Г}} + \lambda_{B_{4Г}} + \lambda_{T_{1Г}} + \lambda_{T_{2Г}} + \lambda_{\text{пр. max}} = 3 \cdot 0,02 + 2 \cdot 0,03 + 0,7 = 0,82 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_6 = \lambda_{B_{1D}} + \lambda_{ЛЭП \frac{n}{c} - D} + \lambda_{пр. \max} = 0,02 + 0,016 \cdot 29 + 1,6 = 2,084 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_7 = \lambda_6 = \lambda_{B_{1D}} + \lambda_{ЛЭП \frac{n}{c} - D} + \lambda_{пр. \max} = 0,02 + 0,016 \cdot 29 + 1,6 = 2,084 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_9 = \lambda_{B_{1B}} + \lambda_{ЛЭП \frac{n}{c} - B} + \lambda_{пр. \max} = 0,02 + 0,016 \cdot 39 + 1,6 = 2,244 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_{10} = \lambda_{B_{1B}} + \lambda_{ЛЭП \frac{B-n}{c}} + \lambda_{пр. \max} = 0,02 + 0,016 \cdot 94 + 1,6 = 3,124 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_{11} = \lambda_{B_{1A}} + \lambda_{ЛЭП \frac{n}{c} - A} + \lambda_{пр. \max} = 0,02 + 0,016 \cdot 35 + 1,6 = 2,18 \frac{1}{\text{год}}.$$

Вероятность отказов элементов в системе 1... 11:

$$q_1 = \lambda_{B_{2D}} \cdot t_{B_{2D}} + \lambda_{B_{4D}} \cdot t_{B_{4D}} + \lambda_{T_{1D}} \cdot t_{T_{1D}} = \frac{2 + 0,02 \cdot 15 + 0,03 \cdot 120}{8760} = 0,48 \cdot 10^{-3}.$$

$$q_2 = \lambda_{B_{2\Gamma}} \cdot t_{B_{2\Gamma}} + \lambda_{B_{4\Gamma}} \cdot t_{B_{4\Gamma}} + \lambda_{T_{1D}} \cdot t_{T_{1D}} + \lambda_{B_{4D}} \cdot t_{B_{4D}} + \lambda_{T_{1D}} \times \\ \times t_{T_{1D}} + \lambda_{T_{2D}} \cdot t_{T_{2D}} = \frac{3 + 0,02 \cdot 15 + 2 \cdot 0,03 \cdot 120}{8760} = 0,92 \cdot 10^{-3};$$

$$q_3 = q_2 = q_5 = \frac{3 + 0,02 \cdot 15 + 2 \cdot 0,03 \cdot 120}{8760} = 0,92 \cdot 10^{-3};$$

$$q_4 = q_1 = \frac{2 + 0,02 \cdot 15 + 0,03 \cdot 120}{8760} = 0,48 \cdot 10^{-3};$$

$$q_6 = \lambda_{B_{1D}} \cdot t_{B_{1D}} + \lambda_{ЛЭП \frac{n}{c} - D} \cdot t_{ЛЭП \frac{n}{c} - D} = \frac{0,02 \cdot 15 + 0,016 \cdot 29 \cdot 10}{8760} = 0,56 \cdot 10^{-3};$$

$$q_7 = \frac{0,02 \cdot 15 + 0,016 \cdot 29 \cdot 10}{8760} = 0,56 \cdot 10^{-3};$$

$$q_8 = \lambda_{B_{1\Gamma}} \cdot t_{B_{1\Gamma}} + \lambda_{\text{ЛЭП}\frac{\Gamma-n}{c}} \cdot t_{\text{ЛЭП}\frac{\Gamma-n}{c}} =$$

$$= \frac{0,02 \cdot 15 + 0,016 \cdot 29 \cdot 10}{8760} = 1,7 \cdot 10^{-3};$$

$$q_9 = \lambda_{B_{1B}} \cdot t_{B_{1B}} + \lambda_{\text{ЛЭП}\frac{B-n}{c}} \cdot t_{\text{ЛЭП}\frac{B-n}{c}} =$$

$$= \frac{0,02 \cdot 15 + 0,016 \cdot 39 \cdot 10}{8760} = 0,75 \cdot 10^{-3};$$

$$q_{10} = \lambda_{B_{1B}} \cdot t_{B_{1B}} + \lambda_{\text{ЛЭП}\frac{n}{c}} \cdot t_{\text{ЛЭП}\frac{n}{c}} = \frac{0,02 \cdot 15 + 0,016 \cdot 94 \cdot 10}{8760} =$$

$$= 1,75 \cdot 10^{-3};$$

$$q_{10} = \lambda_{B_{1B}} \cdot t_{B_{1B}} + \lambda_{\text{ЛЭП}\frac{n}{c}} \cdot t_{\text{ЛЭП}\frac{n}{c}} = \frac{0,02 \cdot 15 + 0,016 \cdot 94 \cdot 10}{8760} =$$

$$= 1,75 \cdot 10^{-3};$$

$$q_{11} = \lambda_{B_{1B}} \cdot t_{B_{1B}} + \lambda_{\text{ЛЭП}\frac{n}{c}} \cdot t_{\text{ЛЭП}\frac{n}{c}} = \frac{0,02 \cdot 15 + 0,016 \cdot 94 \cdot 10}{8760} =$$

$$= 0,67 \cdot 10^{-3}.$$

Определим среднее время восстановления 1...11-го элементов схемы замещения:

$$t_{B_1} = \frac{q_1}{\lambda_1 \cdot \lambda_{\text{пр1}}} = \frac{0,48 \cdot 10^{-3} \cdot 8760}{0,77 - 0,7} = 60,07 \text{ ч};$$

$$t_{B_2} = \frac{q_2}{\lambda_2 \cdot \lambda_{\text{пр2}}} = \frac{0,98 \cdot 10^{-3} \cdot 8760}{0,82 - 0,7} = 67,16 \text{ ч};$$

$$t_{B_3} = \frac{q_3}{\lambda_3 \cdot \lambda_{\text{пр3}}} = \frac{0,98 \cdot 10^{-3} \cdot 8760}{0,82 - 0,7} = 67,16 \text{ ч};$$

$$t_{B_4} = \frac{q_4}{\lambda_4 \cdot \lambda_{\text{пр4}}} = \frac{0,48 \cdot 10^{-3} \cdot 8760}{0,77 - 0,7} = 60,07 \text{ ч};$$

$$t_{B_5} = \frac{q_5}{\lambda_5 \cdot \lambda_{\text{пр5}}} = \frac{0,48 \cdot 10^{-3} \cdot 8760}{0,77 - 0,7} = 67,16 \text{ ч};$$

$$t_{B_6} = \frac{q_6}{\lambda_6 \cdot \lambda_{\text{пр6}}} = \frac{0,56 \cdot 10^{-3} \cdot 8760}{2,084 - 0,7} = 3,54 \text{ ч};$$

$$t_{B7} = \frac{q_7}{\lambda_7 \cdot \lambda_{\text{пр}7}} = \frac{0,56 \cdot 10^{-3} \cdot 8760}{2,084 - 1,6} = 10,14 \text{ ч};$$

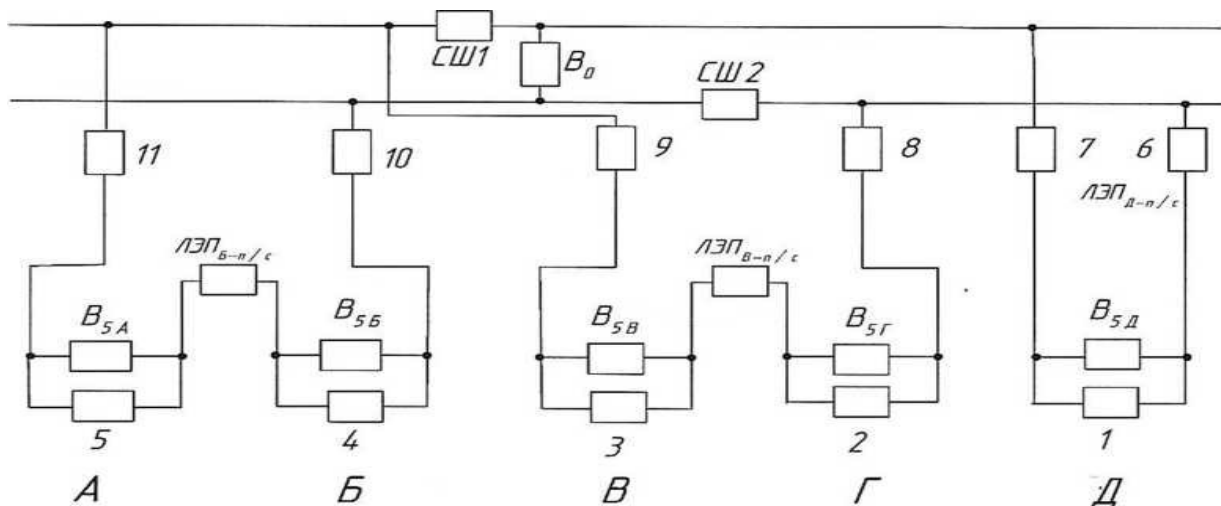
$$t_{B8} = \frac{q_8}{\lambda_8 \cdot \lambda_{\text{пр}8}} = \frac{1,7 \cdot 10^{-3} \cdot 8760}{3,044 - 1,6} = 10,31 \text{ ч};$$

$$t_{B9} = \frac{q_9}{\lambda_9 \cdot \lambda_{\text{пр}9}} = \frac{0,75 \cdot 10^{-3} \cdot 8760}{2,244 - 1,6} = 10,20 \text{ ч};$$

$$t_{B10} = \frac{q_{10}}{\lambda_{10} \cdot \lambda_{\text{пр}10}} = \frac{1,75 \cdot 10^{-3} \cdot 8760}{3,124 - 1,6} = 10,06 \text{ ч};$$

$$t_{B11} = \frac{q_{11}}{\lambda_{11} \cdot \lambda_{\text{пр}11}} = \frac{0,67 \cdot 10^{-3} \cdot 8760}{2,18 - 1,6} = 10,12 \text{ ч};$$

Упростим схему замещения.



Упрощённая схема замещения № 1 по первому варианту

Для упрощённой схемы определим интенсивность отказа элементов, учитывая, что они соединены параллельно:

$$\begin{aligned} \lambda_{12} &= \lambda_1 \cdot q_{B5Д} + \lambda_{B5Д} \cdot q_1 + \lambda_1^* \cdot q_{\text{пр}B5Д} + \lambda_{B5Д}^* \cdot q_{\text{пр}1} = \\ &= 0,77 \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} + 0,62 \cdot 0,48 \cdot 10^{-3} + 0,07 \cdot 1,03 \cdot 10^{-3} + 0,02 \times \\ &\times 2,72 \cdot 10^{-3} = 1,24 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{год}}; \end{aligned}$$

$$q_{B5Д} = \lambda_{B5Д} \cdot t_{B5Д} = \frac{(0,02+0,6) \cdot 15}{8760} = 1,06 \cdot 10^{-3};$$

$$\lambda_1^* = \lambda_1 + \lambda_{\text{пр1}} = 0,77 - 0,7 = 0,07 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_{\text{B5Д}}^* = \lambda_{\text{B5Д}} - \lambda_{\text{прB5Д}} = 0,02 + 0,6 - 0,6 = 0,02 \frac{1}{\text{год}};$$

$$q_{\text{прB5Д}} = \lambda_{\text{прB5Д}} \cdot t_{\text{B5Д}} = \frac{0,6 \cdot 15}{8760} = 1,03 \cdot 10^{-3};$$

$$q_{\text{пр1}} = \lambda_{\text{пр1}} \cdot t_{\text{пр1}} = \frac{0,7 \cdot 34}{8760} = 2,72 \cdot 10^{-3};$$

$$\begin{aligned} \lambda_{13} &= \lambda_2 \cdot q_{\text{B5Г}} + \lambda_{\text{B5Г}} \cdot q_2 + \lambda_2^* \cdot q_{\text{прB5Г}} + \lambda_{\text{B5Г}}^* \cdot q_{\text{пр2}} = \\ &= 0,82 \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} + 0,62 \cdot 0,92 \cdot 10^{-3} + 0,12 \cdot 1,03 \cdot 10^{-3} + 0,02 \times \\ &\times 2,72 \cdot 10^{-3} = 1,62 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{год}}; \end{aligned}$$

$$q_{\text{B5Г}} = \lambda_{\text{B5Г}} \cdot t_{\text{B5Г}} = \frac{(0,02+0,6)15}{8760} = 1,06 \cdot 10^{-3};$$

$$\lambda_2^* = \lambda_2 + \lambda_{\text{пр2}} = 0,82 - 0,7 = 0,12 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_{\text{B5Г}}^* = \lambda_{\text{B5Г}} - \lambda_{\text{прB5Г}} = 0,02 + 0,6 - 0,6 = 0,02 \frac{1}{\text{год}};$$

$$q_{\text{прB5Г}} = \lambda_{\text{прB5Г}} \cdot t_{\text{B5Г}} = \frac{0,6 \cdot 15}{8760} = 1,03 \cdot 10^{-3};$$

$$q_{\text{пр2}} = \lambda_{\text{пр2}} \cdot t_{\text{пр2}} = \frac{0,7 \cdot 34}{8760} = 2,72 \cdot 10^{-3};$$

$$\begin{aligned} \lambda_{14} &= \lambda_3 \cdot q_{\text{B5В}} + \lambda_{\text{B5В}} \cdot q_3 + \lambda_3^* \cdot q_{\text{прB5В}} + \lambda_{\text{B5В}}^* \cdot q_{\text{пр3}} = \\ &= 0,82 \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} + 0,62 \cdot 0,92 \cdot 10^{-3} + 0,12 \cdot 1,03 \cdot 10^{-3} + 0,02 \times \\ &\times 2,72 \cdot 10^{-3} = \lambda_{13} = 1,62 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{год}}; \end{aligned}$$

$$\lambda_{15} = \lambda_{12} = 1,24 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_{13} = \lambda_{14} = 1,24 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{год}}.$$

Определим вероятность отказа элементов 12...16 (для параллельно соединённых элементов).

$$\begin{aligned} q_{12} &= k_{\text{пс}} = q_1 \cdot q_{\text{B5Д}} + k_{\text{пр1}} \cdot q_{\text{пр1}} \cdot q_{\text{прB4Д}} + k_{\text{прB5Д}} \cdot q_{\text{прB5Д}} \times \\ &\times q_{\text{пр1}} = 0,48 \cdot 10^{-3} \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} + 0,8963 \cdot 2,72 \cdot 10^{-3} \cdot 1,03 \cdot 10^{-3} + \\ &+ 0,181 \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} \cdot 2,72 \cdot 10^{-3} = 3,54 \cdot 10^{-6}; \end{aligned}$$

$$k_{\text{пр1}} = 1 - e^{-\frac{t_{\text{пр1}}}{t_{\text{B5Д}}}} = 1 - e^{-\frac{34}{15}} = 0,8963;$$

$$k_{\text{прB5Д}} = 1 - e^{-\frac{t_{\text{пр1B5Д}}}{t_{\text{B1}}}} = 1 - e^{-\frac{12}{62,07}} = 0,181;$$

$$q_{13} = k_{\text{пс}} = q_2 \cdot q_{\text{В5Г}} + k_{\text{пр2}} \cdot q_{\text{пр2}} \cdot q_{\text{прВ4Д}} + k_{\text{прВ4Г}} \cdot q_{\text{прВ5Г}} \times \\ \times q_{\text{пр2}} = 0,92 \cdot 10^{-3} \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} + 0,8963 \cdot 2,72 \cdot 10^{-3} \cdot 1,03 \cdot 10^{-3} + \\ + 0,165 \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} \cdot 2,72 \cdot 10^{-3} = 3,96 \cdot 10^{-6};$$

$$k_{\text{пр2}} = 1 - e^{-\frac{t_{\text{пр2}}}{t_{\text{В5Г}}}} = 1 - e^{-\frac{34}{15}} = 0,8963;$$

$$k_{\text{прВ5Д}} = 1 - e^{-\frac{t_{\text{прВ5Г}}}{t_{\text{В2}}}} = 1 - e^{-\frac{12}{67,16}} = 0,165;$$

$$q_{14} = q_{13} = 3,96 \cdot 10^{-6};$$

$$q_{15} = q_{12} = 3,54 \cdot 10^{-6};$$

$$q_{16} = q_{13} = q_{14} = 3,96 \cdot 10^{-6}.$$

Определим время восстановления 12...16-го элементов.

$$t_{\text{В12}} = \frac{q_{12}}{\lambda_{12}} = \frac{3,54 \cdot 10^{-6} \cdot 8760}{1,24 \cdot 10^{-3}} = 24,97 \text{ ч};$$

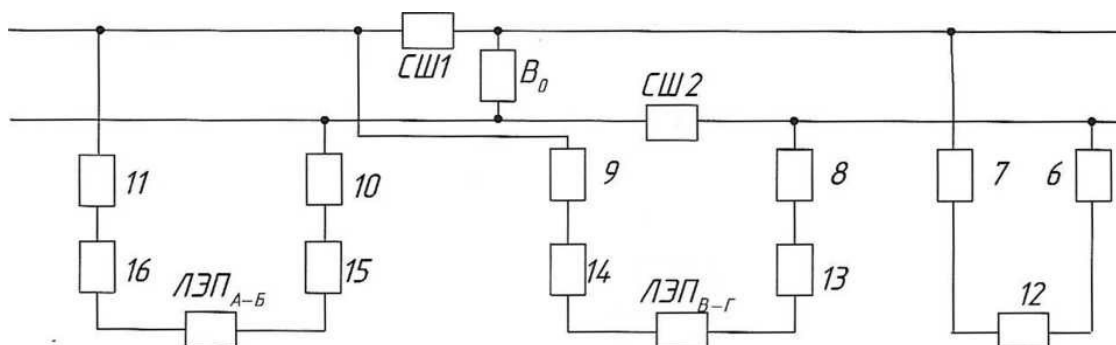
$$t_{\text{В13}} = \frac{q_{12}}{\lambda_{12}} = \frac{3,96 \cdot 10^{-6} \cdot 8760}{1,62 \cdot 10^{-3}} = 21,37 \text{ ч};$$

$$t_{\text{В14}} = t_{\text{В13}} = 21,37 \text{ ч};$$

$$t_{\text{В15}} = t_{\text{В12}} = 24,97 \text{ ч};$$

$$t_{\text{В16}} = t_{\text{В13}} = t_{\text{В14}} = 21,37 \text{ ч}.$$

Упростим схему замещения ещё раз.



Упрощённая схема замещения № 2 по второму варианту

Рассчитаем интенсивность отказа 17, 18 и 19-го элементов:

$$\lambda_{17} = \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_{12} + \lambda_{\text{пр.мах}} = 2,084 + 2,084 + 1,24 \cdot 10^{-3} + \\ + 0,7 = 4,87 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_{18} = \lambda_8 + \lambda_{13} + \lambda_{14} + \lambda_{\text{ЛЭП}_{\text{В-Г}}} + \lambda_9 + \lambda_{\text{пр. max}} = 2,244 + 1,62 \times 10^{-3} + 1,62 \cdot 10^{-3} + 0,016 \cdot 58 + 3,124 + 1,6 = 7,9 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_{19} = \lambda_{11} + \lambda_{16} + \lambda_{15} + \lambda_{\text{ЛЭП}_{\text{А-Б}}} + \lambda_{10} + \lambda_{\text{пр. max}} = 2,18 + 1,062 \cdot 10^{-3} + 1,24 \cdot 10^{-3} + 0,016 \cdot 72,47 + 3,124 + 1,6 = 8,06 \frac{1}{\text{год}}.$$

Определим вероятность отказа элементов 17, 18 и 19-й схем:

$$q_{17} = \lambda_6 \cdot t_{\text{В}_6} + \lambda_7 \cdot t_{\text{В}_7} + \lambda_{12} \cdot t_{\text{В}_{12}} = \frac{2,084 \cdot 3,54 + 2,084 \cdot 10,14 + 1,24 \cdot 10^{-3} \cdot 24,97}{8760} = 3,56 \cdot 10^{-3};$$

$$q_{18} = \lambda_8 \cdot t_{\text{В}_8} + \lambda_9 \cdot t_{\text{В}_9} + \lambda_{13} \cdot t_{\text{В}_{13}} + \lambda_{14} \cdot t_{\text{В}_{14}} + \lambda_{\text{ЛЭП}_{\text{В-Г}}} \times t_{\text{В}_{\text{ЛЭП}_{\text{В-Г}}}} = \frac{3,044 \cdot 10,31 + 2,244 \cdot 10,20 + 2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-3} \cdot 21,37 + 0,016 \cdot 58 \cdot 10}{8760} = 6,25 \cdot 10^{-3};$$

$$q_{19} = \lambda_{10} \cdot t_{\text{В}_{10}} + \lambda_{11} \cdot t_{\text{В}_{11}} + \lambda_{15} \cdot t_{\text{В}_{15}} + \lambda_{16} \cdot t_{\text{В}_{16}} + \lambda_{\text{ЛЭП}_{\text{А-Б}}} = \frac{3,124 \cdot 10,06 + 2,18 \cdot 10,12 + 1,24 \cdot 10^{-3} \cdot 24,97 + 1,62 \cdot 10^{-3} \cdot 21,37 + 0,016 \cdot 72,47 \cdot 10}{8760} = 7,44 \cdot 10^{-3}.$$

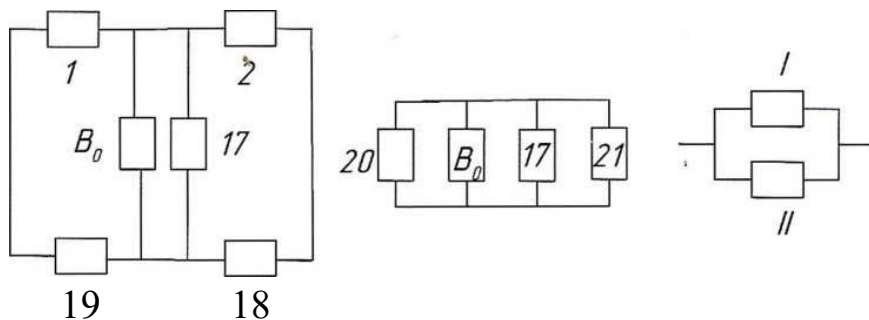
Найдем время восстановления 17, 18 и 19-го элементов:

$$t_{\text{В}_{17}} = \frac{q_{17}}{\lambda_{17}} = \frac{3,56 \cdot 10^{-3}}{4,87} 8760 = 6,4 \text{ ч};$$

$$t_{\text{В}_{18}} = \frac{q_{18}}{\lambda_{18}} = \frac{6,25 \cdot 10^{-3}}{7,9} \cdot 8760 = 6,93 \text{ ч};$$

$$t_{\text{В}_{19}} = \frac{q_{19}}{\lambda_{19}} = \frac{7,44 \cdot 10^{-3}}{8,06} 8760 = 6,93 \text{ ч}.$$

Получим следующую схему замещения:



Конечные схемы замещения

Определим интенсивность отказа следующих элементов:

$$\lambda_{20} = \lambda_{(1)} + \lambda_{19} + \lambda_{\text{пр. max}} = 0,51 + 8,06 + 1,6 = 10,17 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_{(1)} = \lambda_{\text{СШ}} + \lambda_{\text{пр}} = 0,01 + 0,5 = 0,51 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_0 = \lambda_{B_0} + \lambda_{\text{пр}} = 0,02 + 0,6 = 0,62 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_1 = \lambda_{20} \cdot q_0 + \lambda_0 \cdot q_{20} + \lambda_{20}^* \cdot q_{\text{пр}0} + \lambda_0^* \cdot q_{\text{пр}20} = 10,17 \cdot 1,06 \times 10^{-3} + 0,62 \cdot 7,73 \cdot 10^{-3} + 8,57 \cdot 0,82 \cdot 10^{-3} + 0,02 \cdot 0,82 \cdot 10^{-3} = 22,62 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_0 = 0,62 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_0^* = 0,02 \frac{1}{\text{год}};$$

$$q_0 = \lambda_0 \cdot t_{B_0} = \frac{0,62 \cdot 15}{8760} = 1,06 \cdot 10^{-3};$$

$$q_{\text{пр}0} = \lambda_{\text{пр}0} \cdot t_{\text{пр}0} = \frac{0,6 \cdot 12}{8760} = 0,82 \cdot 10^{-3};$$

$$q_{20} = \lambda(1)t_B(1) + \lambda_{19} \cdot t_{B_{19}} = \frac{0,51 \cdot 5 + 8,06 \cdot 8,09}{8760} = 7,73 \cdot 10^{-3};$$

$$\lambda_{20}^* = \lambda_{20} t_{\text{пр}20} = \frac{1,6 \cdot 22}{8760} = 4,02 \cdot 10^{-3};$$

$$\lambda_{11} = \lambda_{21} \cdot q_{17} + \lambda_{17} \cdot q_{21} + \lambda_{21}^* \cdot q_{\text{пр}17} + \lambda_{17}^* \cdot q_{\text{пр}21} = 10,17 \times 3,56 \cdot 10^{-3} + 4,87 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} + 8,41 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} + 3,27 \cdot 3,26 \cdot 10^{-3} = 90,6 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_{21} = \lambda_{(2)} + \lambda_{18} + \lambda_{\text{пр. max}} = 0,51 + 7,9 + 1,6 = 10,01 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_{(2)} = \lambda_{\text{СШ}} + \lambda_{\text{пр}} = 0,01 + 0,5 = 0,51 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_0 = \lambda_{B_0} + \lambda_{\text{пр}} = 0,02 + 0,6 = 0,62 \frac{1}{\text{год}};$$

$$q_{\text{пр}17} = \lambda_{\text{пр}17} \cdot t_{\text{пр}17} = \frac{1,6 \cdot 22}{8760} = 1,5 \cdot 10^{-3};$$

$$q_{21} = \lambda_{(1)} \cdot t_{B(1)} + \lambda_{19} \cdot t_{B_{19}} = \frac{0,51 \cdot 5 + 7,9 \cdot 6,93}{8760} = 6,5 \cdot 10^{-3};$$

$$\lambda_{21}^* = \lambda_{21} - \lambda_{\text{пр}} = 10,01 - 1,6 = 8,41 \frac{1}{\text{год}};$$

$$q_{\text{пр}17} = \lambda_{\text{пр}21} \cdot t_{\text{пр}21} = \frac{1,6 \cdot 22}{8760} = 3,26 \cdot 10^{-3}.$$

Рассчитаем вероятность отказа I и II элементов:

$$q_1 = q_0 \cdot q_{20} + k_{\text{пр}0} \cdot q_{\text{пр}0} \cdot q_{\text{пр}20} + k_{\text{пр}20} \cdot q_{\text{пр}0} \cdot q_{\text{пр}20} = 1,06 \times 10^{-3} \cdot 7,73 \cdot 10^{-3} + 0,7693 \cdot 0,82 \cdot 10^{-3} \cdot 4,02 \cdot 10^{-3} + 0,82 \cdot 0,82 \times 10^{-3} \cdot 4,02 \cdot 10^{-3} = 13,27 \cdot 10^{-6};$$

$$k_{\text{пр}0} = 1 - e^{-\frac{t_{\text{пр}0}}{t_{\text{B}20}}} = 1 - e^{-\frac{12}{6,6}} = 0,83;$$

$$k_{\text{пр}20} = 1 - e^{-\frac{t_{\text{пр}20}}{t_{\text{B}0}}} = 1 - e^{-\frac{22}{15}} = 0,7693;$$

$$t_{\text{B}20} = \frac{q_{20}}{\lambda_{20}} = \frac{3,73 \cdot 10^{-3} \cdot 8760}{10,17} = 6,66 \text{ ч};$$

$$\begin{aligned} q_{11} &= q_{17} \cdot q_{21} + k_{\text{пр}17} \cdot q_{\text{пр}17} \cdot q_{\text{пр}21} + k_{\text{пр}21} \cdot q_{\text{пр}21} \cdot q_{\text{пр}17} = \\ &= 3,56 \cdot 10^{-3} \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} + 0,793 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,26 \cdot 10^{-3} + 0,967 \times \\ &\times 3,26 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 32,17 \cdot 10^{-6}; \end{aligned}$$

$$k_{\text{пр}17} = 1 - e^{-\frac{t_{\text{пр}17}}{t_{\text{B}21}}} = 1 - e^{-\frac{22}{5,7}} = 0,979;$$

$$k_{\text{пр}21} = 1 - e^{-\frac{t_{\text{пр}21}}{t_{\text{B}17}}} = 1 - e^{-\frac{22}{6,4}} = 0,967;$$

$$t_{\text{B}21} = \frac{q_{21}}{\lambda_{21}} = \frac{6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 8760}{10,01} = 5,7 \text{ ч}.$$

Определим время восстановления I и II элементов:

$$t_{\text{B}1} = \frac{q_1}{\lambda_1} = \frac{13,27 \cdot 10^{-3}}{22,68 \cdot 10^{-3}} 8760 = 5,7 \text{ ч};$$

$$t_{\text{B}11} = \frac{q_{11}}{\lambda_{11}} = \frac{13,27 \cdot 10^{-3}}{90,6 \cdot 10^{-3}} 8760 = 3,11 \text{ ч}.$$

Определим интенсивность отказа всей системы:

$$\begin{aligned} \lambda_c &= \lambda_1 \cdot q_{11} + \lambda_{11} \cdot q_1 + \lambda_1^* \cdot q_{\text{пр}11} + \lambda_{11}^* \cdot q_{\text{пр}1} = 22,68 \cdot 32,17 \times \\ &\times 10^{-3} + 90,6 \cdot 13,27 \cdot 10^{-3} + 1,577 \cdot 4,02 \cdot 10^{-3} + 89 \cdot 4,02 \cdot 10^{-3} = \\ &= 15,67 \frac{1}{\text{год}}; \end{aligned}$$

$$\lambda_1^* = \lambda_1 - \lambda_{\text{пр}} = 22,68 - 1,6 = 1,577 \frac{1}{\text{год}};$$

$$\lambda_{11}^* = \lambda_{11} - \lambda_{\text{пр}} = 90,6 - 1,6 = 89 \frac{1}{\text{год}};$$

$$q_{\text{пр}1} = \lambda_{\text{пр}1} \cdot t_{\text{B}1} = \frac{1,6 \cdot 22}{8760} = 4,02 \cdot 10^{-3};$$

$$q_{\text{пр}11} = \lambda_{\text{пр}11} \cdot t_{\text{B}11} = \frac{1,6 \cdot 22}{8760} = 4,02 \cdot 10^{-3};$$

Определим вероятность отказа всей системы:

$$\begin{aligned} q_c &= q_1 \cdot q_{11} + k_{\text{пр}1} \cdot q_{\text{пр}1} \cdot q_{\text{пр}11} + k_{\text{пр}11} \cdot q_{11} \cdot q_{\text{пр}1} = 13,27 \cdot \\ &\times 10^{-3} \cdot 32,17 \cdot 10^{-3} + 0,999 \cdot 4,02 \cdot 10^{-3} \cdot 4,02 \cdot 10^{-3} + 0,998 \times \\ &\times 4,02 \times 10^{-3} \cdot 4,02 \cdot 10^{-3} = 31,9 \cdot 10^{-6}; \end{aligned}$$

$$k_{\text{пр1}} = 1 - e^{-\frac{t_{\text{пр1}}}{t_{\text{В11}}}} = 1 - e^{-\frac{34}{3,11}} = 0,999;$$

$$k_{\text{пр11}} = 1 - e^{-\frac{t_{\text{пр11}}}{t_{\text{В1}}}} = 1 - e^{-\frac{34}{5,125}} = 0,998.$$

Найдем среднее время восстановления системы

$$t_{\text{Вс}} = \frac{q_c}{\lambda_c} = \frac{31,9 \cdot 10^{-6}}{15,67 \cdot 10^{-3}} \cdot 8760 = 1,875 \text{ ч.}$$

Рассчитаем расчётное время безотказной работы системы:

$$T_p = -\ln(1 - \lambda) \frac{1}{\lambda_c};$$

$$T_p = \frac{0,105}{15,67 \cdot 10^{-3}} = 6,7 \text{ г.};$$

$$W_{\text{нед}} = P_{\text{деф}} \cdot q_c \cdot T_p, \text{ МВт} \cdot \text{ч};$$

$$P_{\text{деф}} = \sum P_i, \text{ МВт} \cdot \text{ч} - \text{суммарная нагрузка всех узлов}; W_{\text{нед}} = 174,67 \cdot 31,9 \cdot 10^{-6} \cdot 8760 = 48,81 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$$

Ущерб от недоотпуска энергии определяется следующим образом:

$$J = J_0 \cdot W_{\text{нед}},$$

где J_0 – удельный ущерб ($J_0 = 0,42$).

$J = 0,42 \cdot 48,81 = 20,500$. Результаты расчётов обоих вариантов сводим в таблицу.

Задание	Схема № 1	Схема № 2
$\lambda_c, \frac{1}{\text{год}};$	$15,62 \cdot 10^3$	$15,73 \cdot 10^3$
q_c	$31,9 \cdot 10^{-6}$	$32,3 \cdot 10^{-6}$
$t_{\text{Вс}}, \text{ч}$	1,875	1,933
T_p	6,7	6,62
$W_{\text{нед}} \text{ МВт} \cdot \text{ч}$	48,81	48,96
J, тыс. руб	20,500	20,563

ВЫВОД: Схема № 1 является более надёжной, так как ущерб, недоотпуск электроэнергии и вероятность её отказа ниже, чем в другом конкурирующем варианте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие основных областей науки и техники невозможно без решения вопросов и расчетов надежности, что служит стимулом для развития общей теории надежности, но развитие теории и методов расчета надежности систем электроснабжения имеет свои особенности, которые необходимо учитывать. К таким особенностям следует отнести:

1. Непрерывность процесса производства, передачи и потребления электроэнергии.
2. Многоцелевое использование электроэнергии, когда имеются потребители с различной категорией надежности.
3. Трудности получения статистических материалов испытаний.
4. Взаимодействие между системой электроснабжения и природой (внешней средой) носит вероятностный характер, т. е. передача электроэнергии потребителю осуществляется с некоторой вероятностью.

Повышения уровня надежности как технических систем, так и систем электроснабжения можно добиться двумя путями: при проектировании и производстве; в процессе эксплуатации. В процессе проектирования и конструирования используют схемотехнические методы повышения надежности:

- проектирование электрических схем с минимально необходимым количеством элементов;
- резервирование элементов, блоков и узлов;
- использование аппаратных и программных решений, снижающих или исключающих опасные последствия отказов;
- применение отказоустойчивых решений и др.

Методы повышения надежности систем электроснабжения, используемые в процессе эксплуатации, могут быть разделены на две группы. К первой группе относятся мероприятия, связанные с совершенствованием или доработкой эксплуатируемого объекта. Вторая группа мероприятий, повышающих качество систем при эксплуатации, относится к деятельности обслуживающего персонала:

- повышение квалификации обслуживающего персонала;
- совершенствование человеко-машинного интерфейса;
- диагностика технического состояния электрооборудования;
- разработка и внедрение способов прогнозирования неисправностей и др.

Задача обеспечения надежности систем электроснабжения решается комплексом технических, экономических и организационных мер, направленных на снижение ущерба от нарушения нормального режима работы потребителей электроэнергии. В учебном пособии при решении поставленной задачи были использованы элементы теории вероятности и математической статистики. Издание призвано формировать у студентов знания в области теории и практики надежности систем электроснабжения и применять их для решения инженерных задач исходя из актуальных потребностей по расчету и выбору схем электроснабжения с учетом надежности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шеметов, А. Н. Надёжность электроснабжения : учеб. пособие / А. Н. Шеметов. – Магнитогорск : МГТУ, 2007. – 138 с. – ISBN 5-89514-800-X.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – М. : Энергосервис, 2009. – 330 с.
3. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро. – М. : Энергоиздат, 1989. – 352 с.
4. Аввакумов, В. Г. Постановка и решение электроэнергетических задач исследования операции / В. Г. Аввакумов. – Киев : Вища шк., 1983. – 240 с.
5. Арзамасцев, Д. А. Модели и методы оптимизации развития энергосистем / Д. А. Арзамасцев, А. В. Липес, А. Л. Мызин. – Свердловск : Изд-во Урал. пед. ин-та, 1976. – 148 с.
6. Волков, Н. Г. Надёжность электроснабжения : учеб. пособие / Н. Г. Волков, А. А. Сивков, А. С. Сайгаш. – 2-е изд., доп. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2011. – 160 с.
7. Малафеев, С. И. Надёжность электроснабжения : учеб. пособие / С. И. Малафеев. – СПб. : Лань, 2017. – 368 с. – ISBN 978-5-8114-1876-3.
8. Гук, Ю. Б. Теория надёжности. Введение / Ю. Б. Гук, В. В. Карпов, А. А. Лапидус. – СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2010. – 160 с. – ISBN 978-5-7422-2516-4.
9. Китушин, В. Г. Надёжность энергетических систем / В. Г. Китушин. – М. : Высш. шк., 2004. – 256 с. – ISBN 978-5-7782-0309-8.
10. Конюхова, Е. А. Надёжность электроснабжения промышленных предприятий / Е. А. Конюхова, Э. А. Киреева. – М. : Энергопрогресс, 2001. – 92 с.
11. Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – М. : Наука, 1983. – 416 с.

Учебное электронное издание

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Учебное пособие

Автор-составитель
МАКСИМОВ Юрий Павлович

Редактор А. П. Володина
Технический редактор Ш. Ш. Амирсейидов
Компьютерная верстка П. А. Некрасова
Корректор Н. В. Пустовойтова
Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ;
дисковод CD-ROM.

Тираж 9 экз.

Издательство Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87