А.А. Астахов

Учебное пособие

Теория надежности энергосистем

МИИТ

Брянск – 2013

Глава 1 Основы теории надежности электрических систем

1.1. Развитие науки о надежности электрических систем. Ее особенности и задачи

Проблема надежности электрических систем относиться к задачам определения и оптимизации их показателей на этапах планирования, проектирования, сооружения и эксплуатации. ***Надежность*** – свойство объекта или технического устройства выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки. (ГОСТ 27.002-83).

Объект – предмет целевого назначения, рассматриваемый в период проектирования, производства, эксплуатации, изучения, исследования и испытания на надежность (объектами могут быть системы и их элементы, в частности сооружения, установки, технические изделия, устройства, машины, аппараты, приборы и их части, агрегаты и отдельные детали).

В технике надежность имеет точное значение. Она может быть определена, рассчитана, оценена, измерена, испытана и распределена между отдельными частями системы, объекта и аппаратуры.

Первые систематические попытки изучения надежности и создания ее теории связаны с техническим прогрессом в 40-50 годах, когда недостаточная надежность стала тормозом на пути реализации новых идей в авиации, кораблестроении, ракетостроении, радиотехники, ядерной и космической промышленности.

Применительно к энергосистемам основные принципы расчета надежности были даны в 30-40-х годах. Первые серьезные работы в области надежности энергосистем были посвящены расчетам резерва. Теория надежности применительно к энергосистемам имеет ряд особенностей и опирается на спецдисциплины («Электрические системы и сети», «Переходные процессы в энергосистемах», «Электрические машины», «Релейную защиту и автоматику»).

Наука о надежности занимается анализом общих закономерностей, определяющих долговечность работы различных устройств и сооружений, разработкой способов предупреждения отказов на стадиях проектирования, сооружения, эксплуатации, оценивает количественно вероятность того, что характеристики объекта будут в пределах технических норм на протяжении заданного периода времени. ***Математический аппарат теории надежности*** основан на применении таких разделов современной математики как теория случайных процессов, теория массового обслуживания, математическая логика, теория графов, теория распознавания образов, теория экспертных оценок, а также теория вероятностей, математическая статистика и теория множеств. Проблема надежности в технике вызвала к жизни новые научные направления, такие как теория надежности, физика отказов, техническая диагностика, статистическая теория прочности, инженерная психология, исследование операций, планирование эксперимента и т.п.

В практической деятельности инженеру-энергетику приходиться принимать различные решения. Например, выбирать проектный вариант энергосистемы или ее части, производить реконструкцию ее сетей и станций, назначать режимы. В энергетике на выбор решения влияет большое количество факторов. Одни из них

можно численно проанализировать и сократить область вариантов решения. Другие не имеют теоретической ясности для количественного описания. Появляется неопределенность, преодолевать ее помогают знания, опыт, интуиция, качественный анализ. Появляется риск выбора неоптимальных и некачественных решений. Среди других факторов, надежность имеет особое место, ее надо учитывать всегда. Последствия от ненадежности такие серьезные, что требуется постоянное совершенствование методов проектирования, строительства, эксплуатации энергосистем, позволяющих полнее учитывать надежность.

Основной задачей энергосистем является снабжение потребителей электроэнергией в нужном количестве и при необходимом качестве. На это влияют непредвиденные причины – отказы или аварии в энергосистемах, перебои в топливноснабжающей системе, нерегулярное поступление топлива, гидроресурсов и т.п. Известны различные средства, повышающие надежность энергосистем: релейная защита от коротких замыканий, автоматические повторные включения, автоматический ввод резерва, автоматическое регулирование возбуждения, автоматическая частотная разгрузка, автоматическое регулирование частоты и мощности, автоматизация генераторов, автоматическое отключение генераторов на гидростанциях. Кроме этого, специальные схемные и режимные мероприятия по повышению надежности (неполнофазные режимы, плавка гололеда, дублирование генераторной мощности, увеличение пропускной способности межсистемных связей, трансформаторных подстанций, специальное автоматическое отключение нагрузки при системных авариях, резервирование мощности). Деление потребителей на категории по надежности и рекомендации по построению схем способствует обеспечению структурной надежности энергосистем.

От надежности электроснабжения зависят промышленность, быт, сельское хозяйство. Зависимость эта такая сильная, что ее нарушение приводит к огромному материальному ущербу, имеющему масштабы национального бедствия. Например, Нью-Йоркская авария в ноябре 1965г в США привела к тому, что на территории с населением 30 млн. человек более 10 часов была приостановлена жизнедеятельность, ущерб оценивался приблизительно 100 млн. долларов. Последовавшие за ней десятки подобных аварий завершились аварией 13 июля 1977 года в Нью-Йорке с еще более тяжелыми последствиями. В течение 25 часов была парализована жизнь одного из крупнейших городов мира. Ущерб составил приблизительно 1 млрд. долларов. Чернобыльская авария на атомной электростанции – самая страшная. Ущерб оценивается сотнями млрд. долларов.

В энергосистемах последние несколько десятков лет наблюдается тенденция укрупнения всех элементов, увеличение их единичной мощности. Так, например, в энергетике СССР за период с 1970г по 1985 год возросла степень концентрации генерирующих мощностей: количество ТЭС и АЭС мощностью 2000 МВт и более достигло 28, ГЭС мощностью 2000 МВт и более - 6; наибольшая мощность агрегата ТЭС увеличилась с 800 до 1200 МВт, АЭС - с 365 до 1500 МВт, ГЭС - с 500 до 640 МВт. Мощность наиболее крупных электростанций достигла: ТЭС - 4000 МВт, АЭС - 4000 МВт, ГЭС - 6000 МВт (против соответствующих значений 1970г - 3000, 575 и 5000 МВт). Технический прогресс в развитии генерирующих мощностей проявился также в увеличении с 1970 по 1985г доли конденсационных

энергоблоков на сверхкритические параметры пара, а также доли теплофикационных агрегатов на давление пара 13-24 МПа. Общая протяженность (в одноцепном исчислении) линий напряжением 220 кВ и выше - с 9,8 до 35,9 тыс. км. (в том числе 750 кВ - с 0,1 до 4,35 тыс. км, 1150 кВ с 0 до 0,9 тыс. км).

Указанные обстоятельства привели к тому, что обеспечение надежности энергетических систем стало ключевой проблемой современной энергетики. Связь между энергосистемой, ее элементами и внешней средой носит стохастический (вероятностный) характер и можно говорить лишь о вероятности полного достижения энергосистемой своей цели – передачи электроэнергии потребителю. Поэтому надежность работы энергосистемы всегда включает ***отказ (нарушение)***. Неполнота надежности энергосистемы дает потери выходного эффекта ее работы, на практике – ***недоотпуск энергии потребителям***.

Теория надежности энергосистем основывается на вероятностно-статистической природе ее поведения. В последнее время с увеличением системных аварий, разрабатываются методы оценки вероятности и путем их каскадного развития, обусловленных отказами автоматики и коммутационной аппаратуры, возникновение недопустимых режимов работы элементов. Так как отказ элемента при обширной зоне действия на другие элементы вызывает необходимость работы автоматических коммутационных аппаратов, которые тоже могут отказать. Возникает задача составления расчетных схем по надежности.

Для применения при анализе надежности энергосистемы теории вероятности энергосистема должна быть избыточной (***избыточность*** – дополнительные средства и возможности для выполнения энергосистемой заданных функций). ***Избыточность энергосистемы выступает в следующих формах.***

1. Резервирование (повышение надежности дублированием элементов и функций, предоставление дополнительного времени для выполнения задачи, использование избыточно информации при управлении);
2. Совершенствование конструкций и материалов, из которых сделаны элементы энергосистемы, повышение их запасов прочности, долговечности, устойчивости неблагоприятным явлениям внешней и внутренней среды;
3. Совершенствование технического обслуживания, оптимизация периодичности и глубины капитальных и профилактических ремонтов, снижение продолжительности аварийных ремонтов;
4. Совершенствование систем контроля и управления процессами в электрических системах.

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

1. Резким увеличением сложности энергосистем, включающих миллионы потребителей, тысячи узлов и элементов;
2. Экстремальностью условий эксплуатации многих элементов энергосистем (высокие скорости, ускорения, температуры и давления, вибрация, повышенная радиация и т.д.);
3. Повышение требований к качеству работы (эффективность, высокие параметры энергии);

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

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

1.2. Основные понятия, термины и определения надежности электрических систем

▪ ***Надежность электрической системы (объединения)*** – способность выполнения ей основной функции – бесперебойного электроснабжения потребителей электроэнергией требуемого (нормативного) качества и исключение ситуаций опасных для людей и окружающей среды. Это термин комплексного характера, по функциональному признаку имеем понятия структурных составляющих электрической системы.

▪ ***Надежность системы генерации*** – способность электростанции поддерживать требуемый баланс мощности при нормативном значении частоты.

▪***Надежность основной электрической сети*** – способность устойчиво передавать мощность из частей энергосистемы с избытком в части с ее дефицитом.

▪***Надежность распределительной сети*** – способность этой сети поддерживать бесперебойное питание узлов нагрузки (отдельных потребителей или их групп).

Кроме этого различают:

▪***Надежность в установившемся режиме электрической системы*** – способность обеспечения баланса мощности и электрической энергии при нормативном качестве электроэнергии.

▪***Надежность электрической системы в переходном процессе*** – способность электрической системы и ее отдельных структурных частей противостоять нарушениям режима и обеспечивать электроснабжение потребителей.

▪***Уровень надежности*** определяется относительным значением ***недоотпуска*** электроэнергии потребителям. ***Его причинами могут быть:***

•оперативные ограничения и отключения потребителей диспетчером для ликвидации аварии или ее предупреждения;

•оперативные отключения в электроустановках персоналом для спасания от повреждения оборудования и предупреждения нарушения технологического процесса в условиях резкого снижения качества электрической энергии;

•автоматические аварийные отключения питающих элементов или полное погашение питающих подстанций из-за аварийного нарушения схемы ЭС;

•автоматическое отключение электроприемников и установок потребителей от действия противоаварийной автоматики при аварийных режимах электрической системы или уменьшения частоты или напряжения.

Надежность электрической системы является комплексным показателем, определяющим ее свойства длительно сохранять во времени и устойчиво воспроизводить в процессе эксплуатации свои рабочие характеристики и

параметры. ***Надежность электрической системы обеспечивается такими свойствами как безотказность, долговечность, ремонтопригодность, устойчивоспособность, управляемость, живучесть, безопасность, качество.***

▪***безотказность электрической системы (сети)*** – ее свойство непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного интервала времени;

▪***работоспособность электрической системы (сети)*** – выполнение ею функций с заданными параметрами электрической энергии;

▪***долговечность электрической системы (сети)*** – сохранение ею работоспособности до предельного состояния (т.е. снижения качества передаваемой энергии, эффективности ее транспорта, снижения безопасности эксплуатации);

▪***управляемость электрической системы (сети)*** – приспособленность ее к управлению с целью поддержания в ней установившегося режима работы;

▪***ремонтопригодность электрической системы (сети)*** – приспособленность к предупреждению и обнаружению причин отказа (события, заключающегося в нарушении работоспособности) отдельных элементов и их устранения;

▪***безопасность электрической системы (сети)*** – недопускание в ней ситуаций опасных для людей и окружающей среды;

▪***живучесть электрической системы*** – свойство системы противостоять возмущениям не допуская их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей;

▪***качество электрической системы (сети)*** – совокупность свойств, определяющих степень пригодности системы по назначению.

Кроме этого электрическим системам и их элементам как объектам (системам) для исследования надежности присущи в полной или частичной мере следующие свойства:

•***старение*** – процесс постепенного изменения параметров, вызываемый действием различных факторов, независимых от режима работы объекта;

•***износ*** – процесс постепенного изменения параметров, вызываемый действием факторов, наличие которых зависит от режима работы объекта;

•***резервирование*** – способ повышения надежности объекта путем включения дополнительных элементов при проектировании или в процессе эксплуатации, а так же за счет использования избыточной информации или избыточного времени;

•***гибкость*** – приспособленность объекта к сохранению работоспособности путем обеспечения различных режимов работы;

•***готовность*** – способность обеспечить функционирование объекта в произвольный момент времени;

•***оперативная готовность*** – способность объекта обеспечить исправное состояние объекта в произвольный момент времени и проработать безотказно заданное время;

•***срок службы*** – календарная продолжительность эксплуатации объекта от ее начала или возобновления после ремонта до наступления предельного состояния;

•***восстанавливаемость*** – свойство объекта после отказа устранить повреждение;

• ***невосстанавливаемость*** – свойство объекта однократного использования, срок службы которого до первого отказа.

Применительно к перечисленным свойствам электрической системы, как объекта изучения надежности под ***показателем надежности*** понимается количественная характеристика одного или нескольких ее свойств.

В технике при исследовании надежности, понятие системы рассматривается как совокупность элементов взаимодействующих между собой в процессе выполнения заданных функций. Для ***электрической системы*** – это производство, передача и распределение электрической энергии.

Элементы системы – законченные устройства, способные выполнять локальные функции в системе. Для ***электрической системы*** – это генераторы, трансформаторы, линии и т.п. или генерирующие источники, системообразующие сети, распределительные сети. Любой элемент, в свою очередь, может рассматриваться как система. Например, линия состоит из элементов: изоляторы, опоры, фундаменты, провода, тросы, заземлители и т.п.

Рассматривая свойства и характеристики элементов и систем при изучении их надежности, считают их предметами определенного целевого назначения – ***объектами.*** Например, при исследовании надежности электрической станции считаем ее системой, а элементы: генераторы, трансформаторы, выключатели, шины. Если рассматриваем надежность генератора, то ***элементы*** – статор, ротор, обмотки.

Деление системы на элементы зависит от характера рассмотрения (функциональное, конструктивное, схемное, оперативное и т.д.), точности исследования, наличия статистических материалов, масштабности объекта в целом.

1.3. Состояния и события при изучении надежности электрических систем, типы отказов

▪ ***Работоспособность системы (элемента)*** – состояние при котором значения ее параметров находятся в пределах, установленных документацией.

▪ ***неработоспособность системы (элемента)*** – состояние, при котором значение хотя бы одного параметра находится не в пределах нормы.

▪ ***отказ*** – событие, заключающееся в нарушении работоспособности системы (элемента) т.е. перехода ее из исправного в неисправное состояние.

▪ ***отказ электрической системы*** – событие, приводящее к недоотпуску электрической энергии потребителям (всем или части, соответственно полный или частичный отказ) при прекращении или ограничении электроснабжения. Отказом электрической системы также следует считать снижение частоты или напряжения ниже допустимых значений по действующим нормам.

В теории надежности различают три характерных типа отказов, внутренне присущих техническим устройствам:

▪ ***отказы приработочные,*** происходящие вследствие несовершенной технологии изготовления, эти отказы могут быть исключены путем «отбраковки» при испытании или наладке устройства;

▪***отказы износовые*** (постепенные), вызываемые износом отдельных частей устройства или их старением, могут предотвращаться путем периодической замены элементов;

▪***отказы внезапные*** (случайные), обусловленные случайными сочетаниями многих внешних факторов, и преобладающие на промежутке нормальной эксплуатации устройства.

Характерными внезапными отказами в электрической системе являются отказы типа «короткое замыкание» и «обрыв». Внезапные отказы происходят в электрической системе под действием релейной защиты. Различают также ***отказы устойчивые*** и ***неустойчивые***. При устойчивом отказе для восстановлении работоспособности надо вмешательство обслуживающего персонала. Неустойчивый отказ самоустраняется или устраняется автоматически. К последним можно отнести переходящие КЗ на линиях электропередачи, когда их работа восстанавливается автоматом повторного включения. Кроме этого в энергосистеме наблюдаются отказы, выявляемые персоналом по контрольным приборам при обходах и осмотрах оборудования.

Отличительный признак или группа признаков, по которым устанавливается факт отказа – ***критерии отказа***.

Рассмотрим понятие «***наработка до отказа***». Считаем, что система начала работать в момент времени t = 0, находясь в работоспособном состоянии. Допустим, что система отключается только вследствие отказа. Обозначим T – время до отказа. Это ***время –*** функция случайных отклонений технологических условий изготовления элементов, условий монтажа, наладки эксплуатации – случайная величина. Отключение системы может быть для технического обслуживания, ремонта из-за циклического графика работы, аварии в других объектах. Продолжительность работы системы в этой ситуации – ***наработка***, а случайная величина т.е. длительность работы без отказа – ***наработка до отказа***. Эту величину также обозначим «T». Наработка до отказа может измеряться временем (в большинстве случаев) или числом включений (срабатываний, циклов).

Например, рассмотрим график эксплуатации системы автоматического управления (рис. 1.1).

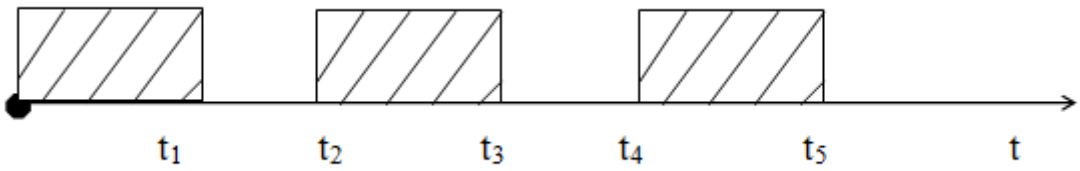


Рис. 1.1

Здесь (по рис. 1.1) имеем:

$$T = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) \qquad (1.1)$$

где t_1 – момент отключения системы автоматического управления из-за остановки технологического агрегата;

t_2, t_4 – момент включения системы в работу;

t_3 – момент отключения системы на профилактику;

t_5 – момент отказа системы.

Для систем без отключений (кроме отказов), наработка до отказа совпадает со временем безотказной работы.

▪ ***Восстанавливаемость системы*** – событие, заключающееся в ее переходе из неработоспособного состояния в работоспособное. Это свойство системы (объекта) позволяющее в случае отказа устранить повреждение, получить значения параметров, удовлетворяющие требованиям ее функционирования. Соответственно имеют место восстанавливаемые системы (объекты). К таким системам относятся и электрические системы, а также большинство их элементов, в которых производится восстановление после отказа;

▪ ***невосстанавливаемые системы*** (объекты) – т.е., восстановление которых после отказа – невозможно или нецелесообразно. ***Невосстанавливаемость –*** свойство объекта однократного использования, который не поддается восстановлению в случае отказа. Следует отметить, что изучение показателя надежности для невосстанавливаемых и восстанавливаемых систем производится отдельно.

Глава 2. Технологические особенности обеспечения надежности в электрических системах

2.1. Свойства электрических систем, влияющие на надёжность их работы

- непрерывность и жесткая связь во времени процессов производства, распределения и потребления электрической и тепловой энергии;
- вероятностный характер формирования энергетических и тепловых нагрузок, определяемых условиями функционирования энергопотребляющих отраслей промышленности и изменением климатических факторов;
- зависимость структуры располагаемых энергоресурсов от складывающейся топливной конъюнктуры, работы транспортных систем, обеспечения гидроресурсами;
- быстрота протекания аварийных процессов;
- решающее влияние степени надежности электроснабжения на работу всех отраслей хозяйства, социальных структур и условия жизни населения;
- высокие требования к системе управления ЭС, ограниченность резервов генерируемой мощности и чувствительность ЭС к внезапным отклонениям частоты;
- наличие в сетях 110…330 кВ большого количества выключателей отключающая способность которых не соответствует уровням токов кз в ЭС, это приводит к секционированию сетей этих напряжений (для ЕЭС);
- влияние понижения напряжения в распределительных сетях (дефицит реактивной мощности).

2.2. Схемы соединения ЭС и их надёжность

Схемы соединения ЭС играют важную роль в обеспечении надежности электроснабжения, как и схемы ее соединения с потребителем электрической энергии. Схемы соединения ЭС с потребителями .выполняется в зависимости от категории электроприемников. Для электроустановок, работающих круглосуточно, не допускающих перерыва в питании схема электроснабжения должна быть выполнена таким образом, чтобы при выходе любого ее элемента электроснабжение было сохранено. Схема ЭС должна предусматривать снабжение этих объектов от двух независимых источников питания.

Для электроприемников, где перерыв в электроснабжении дает недовыпуск продукции, создаются схемы, допускающие перерыв электроснабжения на время включения резервного питания дежурного персонала.

Для остальных потребителей допускаются схемы, создающие перерыв электроснабжения на время ремонта или замен поврежденного элемента.

При проектировании схем электросетей надо использовать простые схемы с повышенными напряжениями. Источники питания следует приближать к центрам нагрузки потребителей, делая глубокие вводы U = 35, 110, 220 кВ.

Выбор варианта с надежной схемой электрических соединений ЭС решается технико-экономическими расчетами нескольких вариантов по напряжению и схеме соединений.

Надежность схемы соединения проверяется по следующим условиям:

- обеспечение коэффициента запаса статической устойчивости по нормальному и послеаварийному режиму;
- обеспечение динамической устойчивости;
- ограничение величины тока кз;
- обеспечение распределения мощностей в послеаварийных и ремонтных режимах;
- обеспечение правильной работы устройств релейной защиты и систем автоматики;
- возможность дальнейшего развития электрической сети без коренных ее изменений.

По мере развития сети высокого напряжения энергосистемы изменяется и значения более низких ступеней напряжения. Эти сети превращаются в распределительные и их схемы меняются.

Одно из основных свойств схемы ЭС – ***жесткость ее узловых точек***. Она характеризуется для точки ***величиной прироста нагрузки,*** при котором величина или фаза напряжения в ней изменяются на единицу. Чем больше этот прирост, тем больше жесткость ЭС в этой точке.

Прирост активной мощности нагрузки ($P_н$) приводит к изменению фазы напряжения, т.к. приток мощности из смежных узловых точек может возникнуть лишь при сдвиге фазного угла напряжения в сторону отставания. Прирост реактивной мощности нагрузки ($Q_н$) приводит к изменению величины напряжения т.к. приток реактивной мощности от смежных точек возникает при понижении напряжения в данной точке.

Жесткость узлов точки есть функция от относительного сопротивления, связывающего эту точку с другими; жесткости других узловых точек. Чем ближе точка к шинам бесконечной мощности, тем она жестче.

Сеть высокого напряжения ЭС определяет жесткость ЭС, должна быть достаточно развитой, резервированной и связывать основные части ЭС и узлы с большими нагрузками.

Наилучшее, с точки зрения надежности – замкнутые схемы электрических сетей, опирающиеся на несколько источников питания. Сети должны быть рассчитаны на поддержание значений напряжения во всех узлах при отключении любой линии сети, это предъявляет повышенное требование к ***головным*** участкам сети.

Замкнутые сети имеют большие токи к.з., поэтому в нормальном режиме допускается их работа как разомкнутых, но с обеспечением АВР.

2.3. Надежность работы объединенной ЭС

Повышение надежности работы ЭС достигается также их объединением. При этом увеличивается резерв мощности. Для увеличения динамической устойчивости объединенной ЭС при многофазных кз желательно двухцепная связь. При однофазном кз на линиях связи разрыв ЭС можно предотвратить путем использования быстродействующего ОАПВ с $t_{вкл}$ = 0,3 – 0,5 с.

Запас статической устойчивости при одноцепных связях должен быть в каждой ЭС при отсутствии недостаточной мощности, этот запас должен обеспечиваться аварийной автоматической разгрузкой.

Асинхронный режим двух ЭС опасен – большие качания величин тока и мощности (I и S) особенно для электростанций вблизи линий связи ЭС.

Величина тока качания является функцией реактивности межсистемных связей, влияющей на величину обменного потока.

Когда асинхронный режим нежелателен – при его появлении следует автоматически разрывать связи.

При увеличении мощности ЭС и увеличения количества межсистемных связей растут величины токов кз, что ***понижает надежность***. К.З. становятся опасными для выключателей и аппаратуры, установленной в первые периоды развития ЭС. Снижается динамическая устойчивость.

Ограничения токов к.з.:

- установить токоограничивающие реакторы;
- секционировать сети;
- частично разземлить нейтрали трансформаторов или заземлить их через сопротивление.

Защиту аппаратуры, выключателей, кабелей на вторичном напряжении подстанции и шин электростанций от токов кз производят токоограничивающими реакторами. Их лучше ставить на низком напряжении силового трансформатора.

Если нет реакторов, то делают секционирование, оно снижает несимметричные токи короткого замыкания, т.к. повышаются сопротивления всех последовательностей. При этом нарушается электрическая связь между секционированными частями сети, связь сохраняется только через трансформаторы и сети высшего напряжения.

Недостатки секционирования:

- Снижается жесткость системы;
- затрудняются нормальные и утяжеляются послеаварийные режимы;
- усложняются условия регулирования напряжения;
- увеличивается потери мощности и энергии в сети.

Поэтому секционирования сетей избегают и считают временным, вынужденным решением до момента усиления аппаратуры или установки реакторов.

Частичное разземление нейтрали или заземление через сопротивление проводится для уменьшения токов нулевой последовательности и улучшения динамической устойчивости при несимметричном коротком замыкании.

2.4. Устройства управления режимом ЭС, влияющие на её надёжность

Автоматическое управление ЭС в темпе нормальных или аварийных процессов происходит с помощью автоматических систем и устройств поддерживающих параметры режима в допустимых пределах, помогающих избегать аварийных нарушений или ограничивающих развитие аварий. К ним относятся:

- Системы АРЧ и ограничение перетоков активной мощности по межсистемным и внутренним связям ЭС (АРЧМ);

- устройства АРН – трансформаторов;
- АРВ синхронных машин с форсировкой возбуждения при аварийных отклонений напряжения;
- устройства релейной защиты, отключающие поврежденные элементы ЭС и устройства АПВ, восстанавливающие схему при неустойчивых кз;
- устройства АВР (автоматического ввода резервного питания);
- системы и устройства противоаварийной автоматики, предотвращающие нарушение устойчивости, ликвидирующие асинхронные режимы и аварийные отклонения частоты и напряжения;
- устройства, обеспечивающие после устранения аварийных нарушений автоматическое обратное включение потребителей;
- устройства технологической автоматики электростанций и сетей, обеспечивающие устранение опасных для оборудования нарушений технологического процесса или его отключающие для предотвращения повреждений.

2.5. Понятие о структурной и функциональной надежности электрических систем

Выделение в надежности ЭС составляющих: структурной и функциональной позволяет упростить методы ее анализа и точнее наметить мероприятия по изменению ее уровня.

Структурная надежность – обусловлена составом элементов ЭС, их связями, пропускными способностями без учета их функций в системе (особенно важна в проектировании).

Функциональная надежность – основана на анализе режимов, их ограничений, пропускной способности при изменении структуры ЭС (особенно важна в эксплуатации).

Показатели структурной надежности определяются для узлов нагрузки (вероятность безотказной работы, вероятность отказа, параметр потока отказов, наработка до отказа с заданной вероятностью ее максимума, иногда недоотпуск энергии, ущерб).

Для оценки структурной надежности используются вероятностные модели, основанные на средних вероятностях состояния элементов ($К_г$, $К_п$ – вынужденного простоя, поток отказов (частота)).

Допущения:

♦ Отказы элементов – независимы, исключаются отказы от общих факторов (ураган, гололед).

♦ Время безотказной работы много больше времени восстановления.

2.6. Показатели качества энергии, влияющие на надежность

Существенное влияние на надежность оказывает снижение показателей качества электроэнергии.

- Понижение напряжения в распределительных сетях из-за местных дефицитов реактивной мощности приводит к уменьшению пропускной способности сети, когда она ограничена предельными токовыми нагрузками;

▪уменьшение напряжения в основных сетях, пропускная способность которых определяется условиями устойчивости, приводит к уменьшению пределов передаваемой мощности по электрическим связям;

▪при работе с пониженной частотой из-за общего дефицита мощности в ЭС «резерв по частоте» уменьшается по мере ее приближении к аварийному значению. Здесь работа АЧР может быть вызвана небольшими дефицитами мощности (аварии, утяжеление условий работы);

▪требования к надежности электроснабжения устанавливается ПУЭ в соответствии с категорией приемников, определяемой степенью их ответственности с учетом резервирования;

▪количественными показателями, характеризующими уровень надежности электроснабжения потребителей и узлов нагрузки, могут быть средние и максимальные значения частоты и продолжительность перерыва электроснабжения.

2.7. Трудности обеспечения надежности ЭС и ее живучести

Причины:

▪Увеличение количества взаимосвязанных объектов и размеров территории их размещения;

▪рост мощности электростанции;

▪повышение единичной мощности агрегатов (опасно по устойчивости);

▪ввод АЭС;

▪переход к более высоким ступеням напряжения системообразующей сети;

▪усложнением схемы основной сети и ее режимов;

▪увеличение максимальной мощности, передаваемой по межсистемным ЛЭП;

▪увеличение обменной мощности и повышением энергетической взаимосвязи параллельных энергосистем;

▪усложнение управляемости энергообъектов, ЭС и энергообъединений;

▪увеличение «связности» отдельных элементов ЭС, их влияние при аварии друг на друга;

▪усложнение характера и длительности электромеханических процессов.

2.8. Нормативные материалы по надежному управлению ЭС

На управление ЭС влияет надежность оборудования, аппаратуры, средств автоматизации и управления. При заданных показателях надежности оборудования, качественное управление надежностью ОЭС обеспечивается:

▪Обеспечением резерва мощности и пропускной способностью электрических сетей;

▪реализация требований к надежности схем присоединения электростанций, схем питания узлов нагрузки основных и распределительных сетей, главных схем электрических соединений, схем собственных нужд электростанции и подстанций.

Для обеспечения надежности управления ЭС ***необходимо определение***:

▪Объема оснащения всей системы электроснабжения средствами релейной защиты, линейной и противоаварийной автоматики;

▪принципов организации эксплуатации электростанций и электрических сетей;

- структуры оперативно-диспетчерского управления;
- составы работ по оснащению ЭС и энергообъектов средствами оперативного и автоматического управления;
- порядка разработки и внедрения режимов ОЭС;
- система обучения эксплуатирующего и оперативного персонала методом предотвращения аварий.

В ряде действующих отраслевых директивных документов имеются основные ***нормативные требования*** и ***методические указания*** по обеспечению надежности при проектировании ЭС, ведении эксплуатации и оперативному управлению. К этим документам относятся:

- Руководящие указания по проектированию энергосистем и энергообъектов;
- ПТЭ электростанций и сетей;
- ПУЭ;
- руководящие указания по устойчивости ЭС;
- руководящие указания по релейной защите, системной и противоаварийной автоматике;
- нормативные показатели использования оборудования электростанций;
- ограничение потребления и отключения электроэнергии.

2.9. Требования к надежности ЭС при проектировании

- Баланс мощности составляется для зимнего годового графика нагрузки;
- дается общая оценка достаточности и эффективности средств повышения устойчивости автоматических систем управления, возможные последствия отказа средств релейной защиты, ПА и коммутационных аппаратов;
- ввод мощности на электростанциях определяется условиями покрытия максимальной нагрузки и создания резерва мощности;
- учитываются снижения мощности из-за ограничения при ее выдаче, снижение мощности планируется приблизительно 10 % от установленной.

Размер резерва для КЭС, ТЭЦ с агрегатами менее 100 МВт - 2%; 100-135МВт - 3,5%; 150-200 МВт - 4-4,5%; 250-300 МВт - 5%. Для КЭС с энергоблоками от 500 МВт до 1600 МВт - 5,5-7%; для АЭС с реакторами 210-365 МВт - 3%, 440 МВт - 4%; 1000МВт - 5,5%; 1500 МВт - более 6%.

Капитальные ремонты и средние ремонты проводятся в период ***сезонного спада*** нагрузок. Для ремонтов приняты следующие значения ***среднегодовой длительности простоя*** оборудования электростанций: ГЭС и ГАЭС - 4,1%, календарного времени (год), КЭС и ТЭС с агрегатами менее 100 МВт - 2,5%; 100-135 МВт - 3,5%; энергоблоками 150-200 МВт - 3-3,5%, 250-300 МВт - 5,5%; 500-1600 МВт - 6,8%. АЭС с реакторами 210-365 МВт - 10%; 440 МВт - 11,5%; 1000 МВт - 13-13,5%; до 1500 МВт - 14%.

Рекомендуемые показатели надежности – ***среднестатистические значения относительной длительности к нормальной работе аварийного простоя***; агрегатов ГЭС - 0,005; ТЭС - 0,02; энергоблоков ТЭС 500 МВт - 0,055; энергоблоков ТЭС 1600 МВт, АЭС - 2000, 1500 МВт - 0,13-0,14.

Уровни токов КЗ (периодической составляющей) на шинах электростанций, подстанций не должны превышать при U=110-150кВ - 31,5кА; 220-330кВ - 40кА; 500-750кВ - 63кА.

Рекомендуются принципы построения городской распределительной сети для электроприемников I-III категории.

Например, для I категории: двухлучевая схема с двухсторонним питание и АВР на U=0,4кВ двухтрансформаторных подстанций 10/0,4 при подключении взаимно резервируемых линий 10 (6) кВ к разным источникам питания.

2.10. Системная автоматика как средство управления ЭС и обеспечения надёжности

Быстрое протекание электрических процессов при повреждениях в ЭС требует ***автоматических устройств,*** обеспечивающих быстрое восстановление электроснабжения и локализацию поврежденного участка, оборудования.

К системам автоматики относятся:

- Релейные защитные устройства РЗУ;
- АПВ, АВР, АРВ, АС – автоматическая синхронизация генератора;
- ААРЧ – разгрузка ЭС по частоте;
- АРЧ – автоматическое регулирование по частоте.

При эксплуатации ЭС надо считаться с возможностью возникновения в ней повреждения и аварийных режимов работы.

Наиболее частые повреждения, КЗ, и их последствия:

- Большие понижения напряжения в значительной части ЭС, приводящие к нарушению работы потребителей;
- разрушение электрической дугой электроснабжения с коротким замыканием;
- нарушение статической и динамической устойчивости ЭС, парализуется нормальная работа ЭС.

Время отключения поврежденного элемента доли секунды, срабатывают реле, выключатели – релейная защита.

АПВ – для ВЛ удается в ***60…90 %*** случаях аварийных отключений сохранить питание потребителей; АПВ – однократные, двухкратные и многократные.

Их эффективность: второго включения – 15 %, третьего – 1,5…3 %.

На шинах подстанций с помощью АПВ удается в 70 % при повреждениях шин сохранять подачу электроэнергии. Также важны и другие виды ***автоматики надежности ЭС***.

Глава 3. Технические показатели надежности элементов электрических систем и их определение

3.1. Показатели надежности невосстанавливаемых элементов электрических систем

Показателями надежности называют количественные характеристики одного или нескольких свойств электрической системы (ЭС) составляющих ее надежность.

К таким характеристикам относят, например, временные понятия - наработку элемента электрической системы до отказа, наработку между отказами, срок службы, время восстановления.

Значения этих показателей получают по результатам испытаний или эксплуатации.

По восстанавливаемости элементов ЭС показатели надежности подразделяют на показатели для восстанавливаемых изделий и показатели для невосстанавливаемых изделий. Применяются также комплексные показатели. Надежность элементов электрической системы можно оценивать, используя часть показателей надежности, либо все показатели.

Основные показатели безотказности:

- ***вероятность безотказной работы P(t)*** – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ ЭС или ее элемента не возникают;
- ***среднее время безотказной работы (средняя наработка до отказа) (T)*** – математическое ожидание наработки ЭС или ее элемента до первого отказа;
- ***средняя наработка на отказ (τ, $\tau_{ср}$)*** – отношение суммарной наработки восстанавливаемого элемента ЭС к математическому ожиданию числа его отказов;
- ***интенсивность отказов (λ)*** – условная плотность вероятности возникновения отказа элемента ЭС, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник. Этот показатель относится к невосстанавливаемым элементам ЭС.

Рассмотрим более детально основные показатели (параметры) надежности:

1. ***Вероятность безотказной работы*** P(t) = R(t) – вероятность того, что в заданном интервале времени не произойдет отказ

$$P(t) = 1 - q(t);\ 0 \le P(t) \le 1;\ P(0) = 1;\ P(\infty) = 0;$$

С другой стороны: $P(t) = 1 - F(t)$;

$F(t) = q(t)$ – вероятность появления отказа в течении времени «t»;

P(t) – монотонно убывающая функция;

F(t) – монотонно возрастающая функция;

Статистическая оценка:

$$P^*(t) = \frac{N_O - n(t)}{N_O}; \qquad (3.1)$$

где N_O – общее количество элементов для испытания или эксплуатируемых;

n(t) – число элементов, отказавших за время «t»;

P(t) – вероятность безотказной работы.

Безотказность – свойство системы сохранять работоспособность в течение заданного интервала времени без вынужденных перерывов. Если «t_p» – время

безотказной работы, то $P(t) = P(t_p > t)$ – вероятность того, что время безотказной работы > t. Зависимость P(t) – ***закон распределения надежности***.

2. На практике более удобная характеристика – ***вероятность отказов (вероятность неисправной работы).***

Эта характеристика более удобна, в частности, для сравнения резервируемых и нерезервируемых ЛЭП и т.п.

Исправная работа и отказ – несовместимые и противоположные события.

$$q(t) = 1 - P(t) = F(t). \qquad (3.2)$$

где q(t) – функция распределения времени безотказной работы, представляющая вероятность появления отказа в течении времени ”t”.

Подставляя формулу (3.2) в (3.1) имеем:

$$1 - q^*(t) = \frac{N_O - n(t)}{N_O}, \text{ откуда } q^*(t) = 1 - \frac{n(t)}{N_O} = \frac{N_O - N_O + n(t)}{N_O} = \frac{n(t)}{N_O}. \qquad (3.3)$$

где q(t) – вероятность отказа.

Отказ – нарушение работоспособности (способности системы выполнять заданные функции с требуемыми режимными параметрами). q(t) – вероятность того, что в заданном интервале времени произойдет хотя бы один отказ:

$$q(t) = q(t_p < t),$$

При этом, если t = var (переменная величина) от 0 до ∞, то имеем q(t) = var от 0 до 1.

Для восстанавливаемых (ремонтируемых) элементов представляет интерес ***вероятность отказа за длительный период наблюдения*** $q_{ср}(\infty)$, эту величину называют также коэффициентом ***вынужденного простоя*** ($K_в$) – этот коэффициент характеризует время вынужденных простоев за год, и измеряется в относительных единицах. Одновременно можно записать:

$$q_i = \frac{t_{ai}}{t_{pi} + t_{ai}}; \quad p_i = \frac{t_{pi}}{t_{pi} + t_{ai}}. \qquad (3.4)$$

Эти выражения (3.4) также подходят для восстанавливаемого элемента ЭС. В этом случае:

$T_i = t_{pi} + t_{ai}$ – время наблюдения за элементом «i»;

t_{ai} – время аварий элемента «i»;

t_{pi} – время безотказной работы “i^го“ элемента.

$$t_{ai} = \overline{t_{ai}} - \frac{t_{ai}}{n_i},$$

где n_i – число аварий “i^го” элемента; t_{ai} – среднее время аварии;

$$q_i = \frac{n_i \overline{t_{ai}}}{t_{pi} + t_{ai}}; \quad \lambda_i = \frac{n_i}{t_{pi} + t_{ai}}, \qquad (3.5)$$

где $q_i(t)$ – функция, определяющая распределение вероятности повреждения (отказа) элемента “i” во времени

$\lambda_I(t)$ – надёжность работы “i”элемента в часовом пределе(t_1, t_2):

$$P_i(t) = \text{eõpπ}[-\int_{t1}^{t2} \lambda(t)dt]. \qquad (3.6)$$

<u>Интегральная функция распределения вероятностей отказа:</u>

$$F(t) = P(t_{отк} \le t) = \frac{n(t_{отк} \le t)}{N_0(t=0)} = \begin{Bmatrix} 0, t = 0 \\ 1, t = \infty \end{Bmatrix}. \qquad (3.7)$$

Эта функция (3.7) численно равна доле начального количества объектов $N_0(t = 0)$, отказавших до произвольного, но фиксированного момента времени "t", что составляет $n(t_{отк} \le t)$ объектов.

Для этого случая, вероятность безотказной работы:

$$p(t) = p(t_{отк} > t) = \frac{n(t_{отк} > t)}{N_0(t=0)} = \begin{Bmatrix} 0, t = \infty \\ 1, t = 0 \end{Bmatrix}. \qquad (3.8)$$

Таким образом интегральная функция распределения вероятностей безотказной работы p(t) численно равна доле начального количества объектов $N_0(t = 0)$, не отказавших до произвольного, но фиксированного момента времени "t" это $n(t_{отк} > t)$ объектов.

Графически имеем для "i" объекта (элемента):

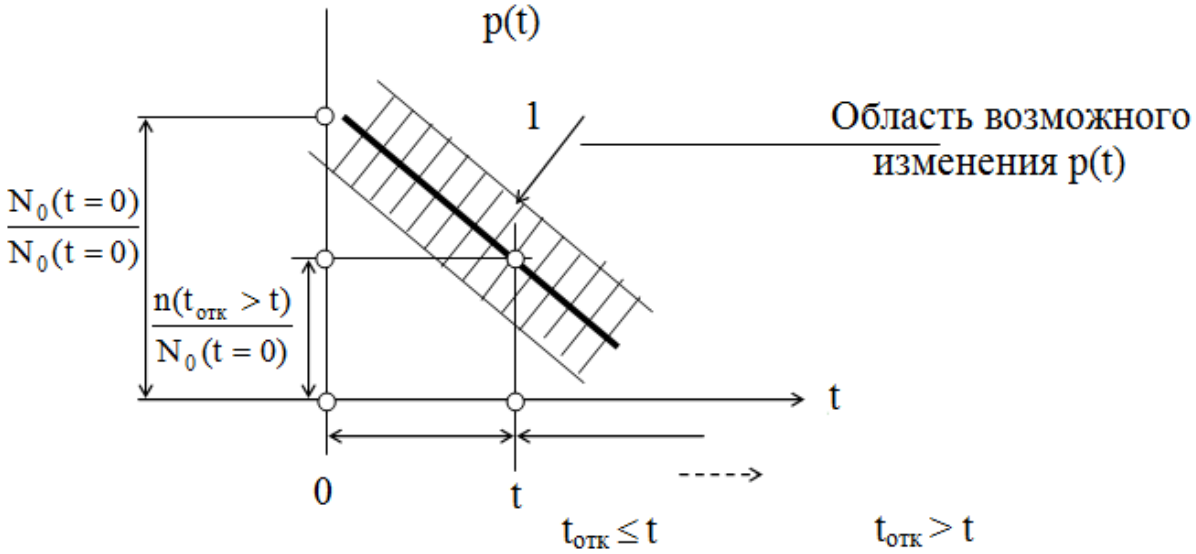


Рис. 3.1

На рис. 3.2 представлена графическая зависимость интегральной функции распределения вероятностей отказа.

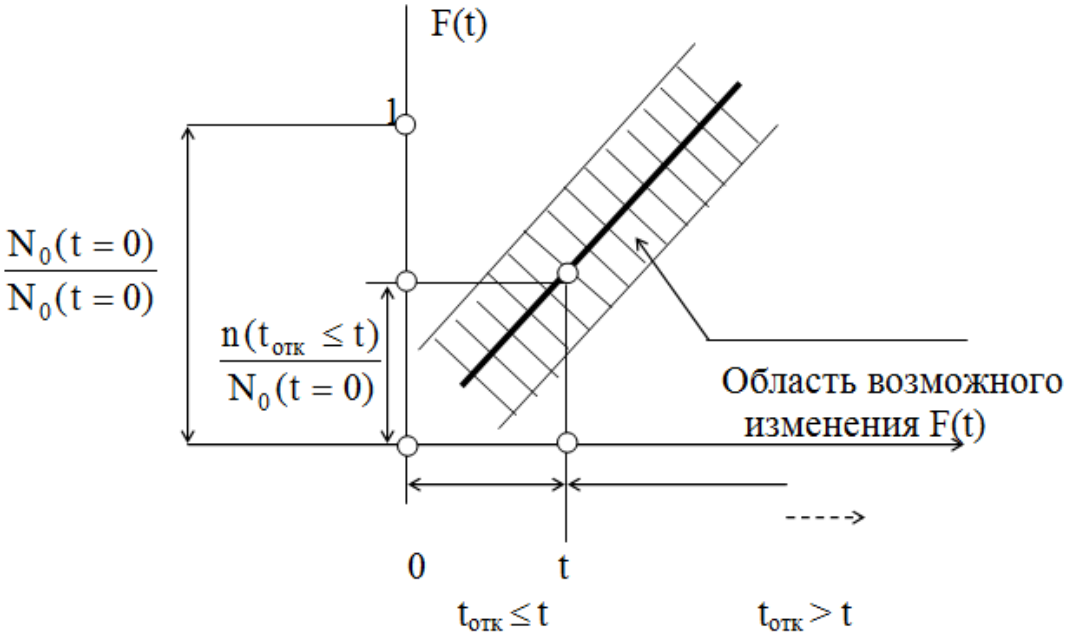


Рис. 3.2

Из приведенных формул (3.7) и (3.8) и рисунков 3.1 и 3.2 видно, что:

$$n(t_{отк} > t) = N(t = 0) - n(t_{отк} \le t); \quad n(t_{отк} \le t) = N(t = 0) - n(t_{отк} > t). \qquad (3.9)$$

Следовательно:

$$p(t) + F(t) = \frac{n(t_{отк} > t)}{N_0(t=0)} + \frac{n(t_{отк} \le t)}{N_0(t=0)} = \frac{N_0(t=0)}{N_0(t=0)} = 1. \qquad (3.10)$$

Для произвольного момента времени $0 \le t \le \infty$, таким образом вероятность безотказной работы объекта в течении времени t и вероятность его отказа до момента t образуют полную группу несовместимых событий

$$p(t) + F(t) = 1, \; p(t) = 1 - F(t), \; F(t) = 1 - p(t). \qquad (3.11)$$

<u>3. Среднее время безотказной работы или средняя наработка до отказа</u> ***(τ, $T_{ср}$,T_o)*** – математическое ожидание случайной. величины времени безотказной работы элемента до первого отказа: т.е. математическое ожидание наработки до первого отказа.

$$T = \tau = T_{ср} = T_o = \int_0^{+\infty} t \cdot f(t)dt = \int_0^{+\infty} t \cdot q'(t)dt = \int_0^{+\infty} t \cdot a(t)dt, \qquad (3.12)$$

где f(t) = a(t) – плотность распределения наработки до отказа, частота отказов.

Это выражение (3.12) путём интегрирования по частям может быть преобразовано следующим образом:

$$T = \int_0^{\infty} ta(t)dt = -\int_0^{\infty} tp'(t)dt = tp(t)\Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} p(t)dt. \qquad (3.13)$$

Учитывая, что $t \ge 0$, $p(0) = 1$ и $p(\infty) = 0$, окончательно получаем:

$$T = \int_0^{\infty} P(t)dt. \qquad (3.14)$$

Для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы имеем:

$$T = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (\lambda = const). \tag{3.15}$$

Таким образом, среднее время наработки элемента (объекта) на отказ численно равно средней, по множеству объектов, продолжительности безотказной работы (между двумя соседними отказами), приходящейся на один элемент (объект). Т.к. ($\lambda(t)$ = const), то и (T = const), т.е. эти величины могут быть вычислены для всех элементов ЭС и сведены в таблицы, остальные показатели надёжности определяются через эти величины.

По статистическим данным среднее время наработки элемента ЭС до отказа определяется из выражения:

$$\tau^* = T_{CP}{}^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_O} t_i}{N_O}. \tag{3.16}$$

где t_i – время безотказной работы i-го элемента ЭС;

N_O – общее число элементов взятых для испытания.

В выражение (3.16) необходимо знать момент выхода из строя каждого элемента. Более удобная форма записи:

$$T_{cp}{}^* = \frac{\sum_{i=1}^{tк/\Delta t} n_i \bar{t}_\alpha}{N_O}, \tag{3.17}$$

где n_i – число элементов, отказавших в i-ом интервале;

$t_к$ – время в течение которого отказало "N_o" элементов;

Δt – выбранная величина интервала времени.

$$\bar{t}_\alpha = \frac{t_{i-1} + t_i}{2} \text{ – среднее время i-го интервала;} \tag{3.18}$$

где t_{i-1} – время в начале i-го интервала; t_i – время в конце i-го интервала.

С другой стороны, имеем:

$$\tau = T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t)dt. \tag{3.19}$$

4. ***Интенсивность отказов (λ).*** Эта величина представляет собой ***вероятность отказа неремонтируемого изделия в единицу времени после данного момента времени при условии, что отказ до этого момента не возник***. Численно она равна среднему числу отказов в единицу времени на один объект из количества объектов $n(t_{отк} > t)$ не отказавших до произвольного, но фиксированного времени "t".

$$\lambda(t) = \frac{n(t_{отк} > t \le t + \Delta t)}{n(t_{отк} > t)\Delta t} (ед.вр^{-1}). \tag{3.20}$$

Понятие интенсивность отказов устройства в единицу времени используется как количественная характеристика для математического определения надёжности. Эта величина измеряется в среднем обычно числом отказов за один час. Обратная величина "λ" – наработка до первого отказа в часах – отношение

общего времени испытания к общему числу отказов. В литературе часто встречается следующее определение интенсивности отказов: это ***условная плотность распределения времени безотказной работы*** для момента времени t при условии, что до этого момент отказа не произошел (интенсивность появления отказов в единицу времени).

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}, \text{ т.к. } P(t) \le 1, \text{ то } \lambda(t) \ge a(t); \qquad (3.21)$$

где P(t) – вероятность безотказной работы элемента ЭС; a(t) – частота отказов элемента ЭС.

Со статистической точки зрения интенсивность отказов λ(t) – отношение числа отказавших элементов ЭС за некоторый промежуток времени к числу работоспособных элементов в начале этого промежутка.

$$\lambda^*(t) \approx \frac{\Delta n(t)}{N(t)\cdot \Delta t} \qquad (3.22)$$

или

$$\lambda^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N - p\cdot \Delta t} \qquad (3.23)$$

где Δt – интервал времени; Δn(t) – число элементов, отказавших за Δt;

n(Δt) – число элементов отказавших в интервале от $\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right)$ до $\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right)$;

N(t) – число элементов, исправно работающих к началу промежутка времени.

$N_{cp} = \frac{1}{2}\left(N_{t-\frac{\Delta t}{2}} + N_{t-\frac{\Delta t}{2}}\right)$. – среднее число исправно работающих элементов в интервале Δt.

Покажем справедливость этой оценки. Учитывая, что $N_{cp} = N_o - n(t)$, получим:

n(t) – число изделий ,отказавших в течении времени "t";

n(Δt) – число изделий (элементов) отказавших в течение времени" Δt"

$$n(\Delta t) = [N(t + \Delta t) - N(t)],$$

где N(t) и N(t + Δt) – число изделий (элементов) безотказно проработавших в течении времени t и t + Δt соответственно.

При достаточно большом числе изделий (элементов), поставленных на испытание (эксплуатации), можно записать:

$$N(t) = N_O P(t); \qquad (3.24)$$

$$N(t + \Delta t) = N_O P(t + \Delta t); \qquad (3.25)$$

Отсюда:

$$\lambda^*(t) = \frac{-N_O[P(t+\Delta t) - P(t)]}{N_O[1 - \frac{n(t)}{N_O}]\Delta t}. \qquad 3.26)$$

При достаточно большом «N_O» можно записать:

$$\lambda^*(t) = \frac{-[P(t+\Delta t) - P(t)]}{P(t)\Delta t} \qquad (3.27)$$

При $\Delta t \to 0$ получим:

$$\lambda^*(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P(t+\Delta t) - P(t)}{P(t)\Delta t} = \frac{-P'(t)}{P(t)} = \frac{a(t)}{P(t)}. \qquad (3.28)$$

Для высоконадёжных систем если P(t) = 0,99; то, как следует из формулы (3.25): $a(t) \approx \lambda(t)$.

Ошибка не более 1 % и не превышает ошибок статистического определения a(t) и λ(t).

Следует подчеркнуть разницу между величинами a(t) и λ(t) .Вероятность a(t)dt характеризует вероятность отказа системы (элемента) за интервал времени ($t_1 + \Delta t$), взятой(го) произвольным образом из группы систем (элементов), причём неизвестно в каком состоянии (работоспособным или неработоспособным) находится система(элемент).Вероятность λ(t)dt характеризует вероятность отказа системы(элемента) за интервал ($t_2 + \Delta t$), взятую(го) из группы систем (элементов), которые остались работоспособными моменту времени “t”.

Интегрируя выражение (3.25) $\lambda(t) = \frac{a(t)}{p(t)}$, имеем:

$$-\int_0^t \lambda(t)dt = \ln P(t) \text{ или } P(t) = \exp[-\int_0^t \lambda(t)dt]. \qquad (3.29)$$

Так как:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}; \Rightarrow a(t) = -P'(t) = -\frac{dP(t)}{dt}; \Rightarrow \lambda(t) = -\frac{dP(t)}{dt}\frac{1}{P'(t)}; \Rightarrow \lambda(t)dt = -\frac{dP(t)}{P(t)}; \Rightarrow$$

$$\lambda(t)dt = 1 - d\ln P(t) \Rightarrow \int \lambda(t)dt = -\int d\ln P(t); \Rightarrow \int_0^t \lambda(x)dx = -\int_0^t d\ln P(x); \Rightarrow \int_0^t \lambda(x)dx = -\ln P(x)\Big|_0^t; \Rightarrow$$

$$-\int_0^t \lambda(x)dx = \ln P(t) - \ln P(0); \Rightarrow P(0) = 1, \ln 1 = 0 \Rightarrow -\int_0^t \lambda(x)dx = \ln P(t).$$

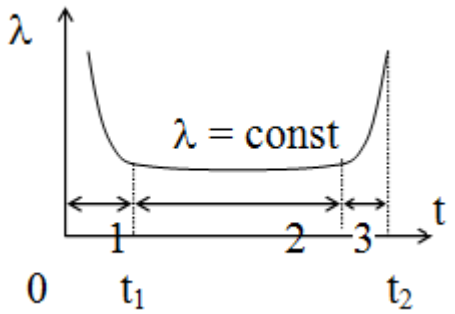


Рис. 3.3

На рис. 3.3 представлена типичная зависимость λ(t), где зона 1 – период приработки элемента ЭС; зона 2 – период нормальной эксплуатации элемента (λ = const); зона 3 - период износа элемента ЭС.

Если λ = const, то имеем – экспоненциальное распределение (наиболее часто используемое в энергетике для периода нормальной работы элементов ЭС).

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \qquad (3.30)$$

$$a(t) = e^{-\lambda t}. \qquad (3.31)$$

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \qquad (3.32)$$

Таким образом, выражения (3.31) и (3.32) справедливы для периода нормальной работы элементов.

Для электрических сетей и ЛЭП формулы (11), (12) справедливы после 2-3 лет, эксплуатации, но учитывая, что срок службы ЛЭП 50…60 лет, то практически можно считать, что эти выражения применяются для оценки надежности ЛЭП и электрических сетей.

Зависимость P(t) – часто также называют ***надежностью*** работы элемента в заданном интервале времени. Так как:

$$p(t) + q(t) = 1, \text{ то } q(t) = 1 - p(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \qquad (3.33)$$

Величину «q(t)» называют ***ненадежностью***, это вероятность того, что за время «t» произойдет хотя бы один отказ.

Таким образом, для характеристики надежности надо знать величину ***λ(t) – среднее число отказов в единицу времени.***

5. ***Наработка на отказ*** ***T_o*** – среднее время безотказной работы невосстанавливаемых элементов до отказа или восстанавливаемого элемента между соседними отказами.

$$T'' = \frac{t}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{h} ti}{n}, \qquad (3.34)$$

где n – число отказов за время испытания (эксплуатации) элемента ЭС;

t – общее время исправной работы элемента ЭС;

t_i – время исправной работы элемента ЭС между (i-1) и i отказами.

6. ***Частота отказов (a) –*** плотность распределения времени безотказной работы или производная от вероятности безотказной работы.

$$a(t) = q'(t) = -p'(t). \qquad (3.35)$$

Для определения величины a(t) используется следующая статистическая оценка:

$$a^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_O \Delta t}. \qquad (3.36)$$

где $n(\Delta t)$ – общее количество элементов взятых для испытания или эксплуатируемых; N_O – число отказавших элементов в интервале времени от $\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right)$ до $\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right)$; Δt – интервал времени.

Покажем справедливость этой оценки. Число изделий, отказавших в течении «Δt»:

$$n(\Delta t) = -\left[N(t + \Delta t) - N(t)\right], \qquad (3.37)$$

где N(t) и N(t + Δt) – число изделий, безотказно проработавших в течении времени “t” и “(Δt + t)” соответственно.

При достаточно большом числе изделий, поставленных на испытание или эксплуатацию, имеем:

$$N(t) = N_0 P(t); \tag{3.38}$$

$$N(t+\Delta t) = N_0 P(t+\Delta t); \tag{3.39}$$

Тогда

$$a^*(t) = -\frac{N_0\left[P(t+\Delta t) - P(t)\right]}{N_0}. \tag{3.40}$$

При $\Delta t \to 0$ получим:

$$a(t) = -\lim_{\Delta t \to 0}\frac{P(t+\Delta t) - P(t)}{\Delta t} = -p'(t) = q'(t). \tag{3.41}$$

Одновременно этот количественный показатель надёжности «a(t)» является дифференциальной функцией распределения вероятностей отказа (плотностью вероятности отказа) численно равной среднему числу отказов в единицу времени на один объект из начального количества объектов $N_0(t = 0)$ или доле начального количества объектов $N_0(t = 0)$, отказавших после произвольного, но фиксированного момента времени t в течении выбранного промежутка времени “Δt”.

Из теории вероятностей известно, что:

$$f(t) = \frac{n(t < t_{отк} \le t + \Delta t)}{N_0(t=0)\Delta t}\,(\text{ед.времени}^{-1}) \tag{3.42}$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt} \quad \text{и} \quad \int_0^\infty f(t)dt = 1 \tag{3.43}$$

Следовательно, график f(t) зависит от графика F(t). Зависимость же $f(\Delta t)$ является пропорциональной, поскольку с ростом промежутка времени “Δt” возрастает и вероятность отказа в течение этого промежутка.

Сравнение формул плотности вероятности f(t) (3.42) и интенсивности отказов $\lambda(t)$ (3.44):

$$\lambda(t) = \frac{n\,(t < t_{отк} \le t + \Delta t)}{n\,(t_{отк} > t\,)\,\Delta t}\ (\text{ед.времени}^{-1}) \tag{3.44}$$

показывает, что эти величины отличаются только общим количеством объектов в знаменателе, к которым относится количество элементов в числителе n ($t < t_{отк} \le t + \Delta t$), отказавших после произвольного, но фиксированного момента времени “t” в течение выбранного промежутка времени “Δt”

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

$$P(t) = \int_t^\infty a(x)dx;\ \ q(t) = \int_0^t a(x)dx;\ \ p(t) = 1 - \int_t^t a(x)dx. \tag{3.45}$$

так как, $p(t) = 1 - q(t) \cdot \int_0^\infty a(x)dx - \int_0^t a(x)dx = \left(0 \xrightarrow[t]{} \infty\right) = \int_t^\infty a(x)dx.$

Частота отказов элементов также связана с их интенсивностью отказов

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}. \tag{3.46}$$

Так как $P(t) \le 1$, то всегда $\lambda(t) \ge a(t)$.

Для высоконадежных систем при $p(t) \ge 0{,}99$ можно принимать $a(t) \approx \lambda(t)$.

7. ***Дисперсия времени жизни элемента ЭС***

$$D(t) = \int_0^\infty t^2 f(t)dt - T_{cp}^2 = 2\int_0^\infty tp(t)dt - T_{cp}^2 \qquad (3.47)$$

Статистическая дисперсия:

$$D^{2*} = \frac{1}{N_0 - 1}\sum_{i=1}^{N}\left(T_i - \overline{T}\right)^2; \qquad (3.48)$$

где

$$\overline{T} = \frac{1}{N_0}\sum_{i=1}^{N} T_i.$$

На практике в качестве оценки надёжности чаще используют ***среднее квадратическое отклонение (σ) :***

$$\sigma(T) = \sqrt{D[T]} \qquad (3.49)$$

где T – время жизни элемента ЭС.

3.2. Достоинства и недостатки показателей надёжности

1) Вероятность безотказной работы p(t),

Достоинства:

1. характеризует изменение надёжности во времени;
2. даёт возможность наглядно судить о надёжности;
3. показатель может быть использован для расчёта надёжности новых систем до их реализации;
4. p(t) характеризует стоимость изготовления и эксплуатации систем;
5. показатель охватывает большинство факторов, влияющих на надёжность.

Недостатки:

1. показатель характеризует надёжность восстанавливаемых систем до первого отказа и является достаточно полной характеристикой только систем разового пользования;
2. показатель не даёт характеристики между временными составляющими цикла эксплуатации;
3. эта величина не всегда удобна для оценки надёжности простых элементов при отсутствии старения;
4. по этому показателю довольно трудно найти другие показатели надёжности.

2) Среднее время безотказной работы (T_{cp}) этот показатель надёжности является одним из более наглядных количественных характеристик надёжности но как математическое ожидание не полностью характеризует надёжность восстанавливаемых систем, надо ещё знать дисперсию времени отказов. Величина T_{cp} характеризует работу системы до первого отказа.

3) Наработка на отказ (T). Этот показатель надёжности характеризует восстанавливаемую систему.

4) Частота отказов"a"или"f" – позволяет судить о количестве элементов, выходящих из строя в промежутке времени для невосстанавливаемой системы и довольно просто вычислить количество отказавших систем в интервале ”Δt” ,но по её величине нельзя судить о надёжности.

5) Интенсивность отказов (λ) .

Достоинства:

а) λ(t) – функция времени и позволяет наглядно установить характерные участки работы системы. Это даёт возможность наметить пути по повышению надёжности;

б) показателю λ(t) – просто довольно найти другие характеристики надёжности

Недостатки: показатель используется для невосстанавливаемых систем (элементов)

3.3. Показатели надежности восстанавливаемых элементов (объектов, систем)

Для оценки надежности восстанавливаемых, т.е. ремонтопригодных элементов (объектов, систем), используются следующие показатели надежности.

1. Вероятность восстановления (функция распределения времени восстановления – $F_в$)S(t) – вероятность того, что отказавшее изделие будет восстановлено в течение заданного времени ”t”, т.е. вероятность своевременного завершения ремонта.

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

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

$$S^*(t) = \frac{N_B}{N_{OB}}; \qquad (3.50)$$

где N_{OB} – число изделий, поставленных на восстановление; N_B – число изделий, время восстановления которых было меньше заданного времени ”t”.

2. Вероятность несвоевременного завершения ремонта (невосстановления) G(t) – вероятность того, что отказавшее изделие не будет восстановлено в течение заданного времени t.

Статистическая оценка величины G(t):

$$G^*(t) = \frac{N_{OB} - N_B}{N_{OB}}; \qquad (3.51)$$

Из анализа выражений (3.50) и (3.51) следует, что:

$$S(t) + G(t) = 1. \qquad (3.52)$$

3. Частота восстановления, $a_B(t)$ – плотность распределения времени восстановления – определяется по формуле:

$$a_B(t) = S'(t) = -G'(t). \qquad (3.53)$$

Статистическая оценка величины $a_B(t)$:

$$a_в^*(t) = \frac{n_B(\Delta t)}{N_{OB} \cdot \Delta t}; \qquad (3.54)$$

где N_{OB} – число изделий, поставленных на восстановление;

$n_B(\Delta t)$ – число восстановленных элементов на интервале времени $(t-\frac{\Delta t}{2}, t+\frac{\Delta t}{2})$.

4. ***Интенсивность восстановления*** $\mu(t)$ – условная плотность распределения времени восстановления для момента времени ”t” при условии, что до этого момента восстановление изделия не произошло:

$$\mu(t)=\frac{a_B(t)}{1-S(t)}=\frac{a_B(t)}{G(t)}. \qquad (3.55)$$

Статистическая оценка величины $\mu(t)$:

$$\mu^*(t)=\frac{n_B(\Delta t)}{N_{B.CP.}\cdot\Delta t}; \qquad (3.56)$$

где $N_{B.CP.}$ – среднее число изделий, которые не были восстановлены в интервале времени (0, t).

$n_B(\Delta t)$ – число восстановленных изделий за интервал t. $\left(t-\frac{\Delta t}{2}, t+\frac{\Delta t}{2}\right)$.

В отличие от процесса отказов, развивающихся во времени естественным образом, процесс восстановления является целиком искусственным и полностью определяется организационно-технической деятельностью эксплуатационно-ремонтного персонала.

Поэтому кривая интенсивности восстановления, аналогичная кривой интенсивности отказов отсутствует. Так как существуют нормативы времени на проведение ремонтных работ, то $\mu(t) = \mu = const$ и численные значения интенсивности восстановления сведены в справочные таблицы по видам оборудования и ремонтов. При постоянстве во времени величины «μ» получаем экспоненциальное распределение для времени восстановления:

$$S(t)=1-e^{-\mu\cdot t}; \quad G(t)=e^{-\mu\cdot t}. \qquad (3.57)$$

5. ***Среднее время восстановления*** (T_B) представляет собой математическое ожидание времени восстановления:

$$T_B=\int_0^\infty G(t)dt; \quad T_B=\int_0^\infty t a_B(t)dt=\int_0^\infty [1-S(t)]dt. \qquad (3.58)$$

Статистическая оценка времени восстановления находится из выражения:

$$T_B^*=\frac{\sum_{i=1}^{No} t_{вi}}{N_{OB}}; \qquad (3.59)$$

где $t_{вi}$ – время восстановления i-го элемента;

N_{OB} – количество изделий, поставленных на восстановление.

При $\mu = const$ имеем:

$$T_B=\frac{1}{\mu}. \qquad (3.60)$$

Среднее время восстановления включает продолжительность послеаварийного ремонта T_{AB} и продолжительность планового ремонта $T_{ПЛ}$:

$$T_B = T_{AB} + T_{ПЛ}\ . \qquad (3.61)$$

Статистическая оценка этой величины определяется из выражения:

$$T_B = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} t_i . \qquad (3.62)$$

где m – количество отказов; t_i – время восстановления одного отказа.

Время восстановления – среднее время вынужденного простоя, необходимое для отыскания и устранения одного отказа.

Время восстановления как правило подчиняется не экспоненциальному закону – чаще это нормальное распределение, распределение Вейбулла или Пуассона. Анализ систем с неэкспоненциальным распределением чрезвычайно сложен и практически его расчетная формула не поддается формализации.

В то же время замена реального закона распределения экспоненциальным с тем же математическим ожиданием мало искажает конечные результаты. Поэтому во многих случаях эта замена обоснована. При этом:

$$a_B(t) = \mu \cdot e^{-\mu \cdot t}; \qquad (3.63)$$

где $a_B(t)$ – частота восстановления; μ – интенсивность восстановления, $\mu(t) = \mu = const$.

Вероятность восстановления:

$$S(t) = 1 - e^{-\mu \cdot t}. \qquad (3.64)$$

Среднее время восстановления:

$$T_B = \frac{1}{\mu}. \qquad (3.65)$$

6. ***Поток отказов*** $\omega(t)$ – математическое ожидание числа отказов элементов, происшедшее за единицу времени, при условии, что отказавшие элементы заменяются новыми, т.е. число испытываемых элементов сохраняется одинаковым в процессе эксплуатации.

Величина $\frac{1}{\omega}$ – средняя наработка на отказ.

Параметр потока отказов восстанавливаемого элемента – $\omega(t)$ – среднее количество отказов элемента в единицу времени, удельная повреждаемость элемента.

По данным эксплуатации из статистической модели имеем:

$$\omega^*(t) = \frac{\Delta n(t_i' + \Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t} = \frac{n_1(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}; \qquad (3.66)$$

где $\Delta n(t_i' + \Delta t)$, $n_1(\Delta t)$ - количество элементов, отказавших за интервал времени Δt или $\left(t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}\right)$ при условии, что отказавшее изделие немедленно заменяется новым;

N_0 – число элементов на испытании, при условии замены отказавших элементов.

$$\omega(t) = \lambda(t) = \omega = \lambda = const.$$

Среднее время наработки на отказ:

$$T' = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\omega} = \frac{8760}{\omega\ год^{-1}}. \qquad (3.67)$$

Если ω(t) – последовательность случайных моментов отказа восстанавливаемой системы, образует поток отказов, то временная последовательность состояний объекта (износ, отказ, восстановление, работа и т.д.) образуют переменный (альтернатирующий) процесс восстановления. Если длительность состояний описывается экспоненциальным законом распределения, то процесс считается простейшим пуассоновским. Для него характерны свойства ***стационарности, ординарности*** и ***отсутствия последействия***.

а) Поток отказав – ***стационарный***, если вероятность появления того или иного числа отказов на заданном отрезке времени зависит только от его длины и не зависит от того, где он находится.

б) Поток отказов – ***ординарный***, если вероятность появления двух и более отказов на малом отрезке времени – пренебрежимо мала по сравнению с появлением одного отказа.

в) Поток отказов – ***поток без последействия***, если вероятность появления числа отказов на некотором отрезке времени не зависит от числа и характера отказов, возникших до этого отрезка времени.

Таким образом ω(t) – последовательность отказов элемента во времени, характеризуемая параметром потока отказов – «ω», который является аналогом «λ».

Для ординарных потоков эти понятия совпадают, но «ω» и «λ» имеют разную природу. Поток отказов (ω) – ***безусловная*** вероятность отказа элемента за единицу времени. Интенсивность отказов (λ) – ***условная*** вероятность отказа элемента за единицу времени, при условии, что он проработал до момента «t».

На рис 3.4 представлена графическая зависимость потока отказов в функции времени.

Из рис 3.4 видно, что: $\omega \approx const$ в период нормальной работы, что говорит о том, что отказы системы возникают примерно через одинаковые промежутки времени, равные ее наработке на отказ (рис. 3.4).

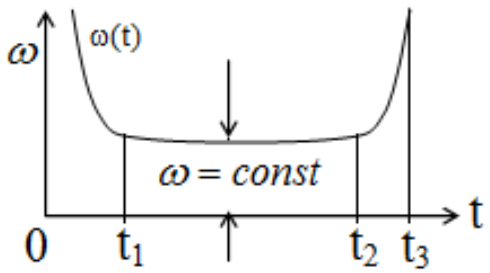


Рис 3.4

На рис. 3.4 имеем:

• интервал времени $0 \div t_1$ – приработочные дефекты изготовления и монтажа элемента ЭС, например, для ЛЭП, это время составляет 1-3 года;

- интервал времени $t_1 \div t_2$ – нормальная работа элемента ЭС;
- интервал времени $t_2 \div t_3$ – износ изделия.

Вероятность возникновения «m» отказов за время «t» при частоте отказов «ω» в пуассоновском потоке событий (отказ, восстановление, т.е. ординарном, стационарном, без последействия) вычисляются по формуле:

$$P_m(t) = \frac{(\omega \cdot t)^m}{m!} e^{-\omega \cdot t}. \quad \frac{\omega^m}{m!} e^{-\omega}. \tag{3.68}$$

При длительности периода работы элемента ЭС t = 1 году.

Или

$$P_m(t) = \frac{\omega^m}{m!} e^{-\omega}. \tag{3.69}$$

где m – число восстановлений (число отказов) в рассматриваемом интервале времени.

Вероятность безотказной работы элемента:

$$p(t) = p_{m=0} = \frac{\omega^0}{0!} e^{-\omega} = e^{-\omega}. \tag{3.70}$$

Это вероятность того, что за год не будет ни одного отказа элемента.

3.4. Комплексные показатели надежности восстанавливаемых элементов электрических систем

Для восстанавливаемой системы наряду с показателями, характеризующими ее отдельные состояния, вводятся комплексные показатели, характеризующие восстанавливаемый объект с двух и более сторон:

- Математическое ожидание длительности цикла работы объекта:

$$T_{цикла} = T + T_в, \tag{3.71}$$

где T – среднее время наработки до отказа объекта (элемента);

$T_в$ – среднее время восстановления объекта (элемента).

- Частота появления отказов объекта

$$f = \frac{1}{T_{цикла}}. \tag{3.72}$$

- Коэффициент готовности «$К_г$» – вероятность того, что объект работоспособен в произвольный момент времени

$$К_г = \frac{T}{T_{цикла}} = \frac{T}{T + T_в} = \frac{\mu}{\mu + \lambda}. \tag{3.73}$$

Коэффициент готовности имеет смысл надежностного коэффициента полезного действия, т.к. числитель представляет полезную составляющую, а знаменатель общие затраты времени.

Коэффициент «$К_Г$» оценивает эксплуатационные качества объекта и квалификацию обслуживающего персонала, характеризует готовность объекта (элемента) к работе. Его недостатком является то, что по нему нельзя судить о времени непрерывной работы объекта без отказов.

Статистическая оценка коэффициента «$К_Г$»:

$$K_Г^* = \frac{\sum_{i=1}^{m} t_i}{\sum_{i=1}^{m} t_i + \sum_{i=1}^{m} t_{вi}}; \qquad (3.74)$$

где t_i – время безотказной работы объекта (элемента) ЭС;

$t_{вi}$ – время восстановления элемента ЭС;

m – число отказов объекта (элемента) ЭС.

- Коэффициент неготовности (вынужденного простоя) – вероятность того, что объект неработоспособен в произвольный момент времени

$$K_н = 1 - K_Г = \frac{T_в}{T + T_в} = \frac{T_в}{T_{цикла}} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}. \qquad (3.75)$$

Статистическая оценка «$K_н$»:

$$K_н^* = \frac{\sum_{i=1}^{m} t_{вi}}{\sum_{i=1}^{m} t_{вi} + \sum_{i=1}^{m} t_i}. \qquad (3.76)$$

При этом:

$$K_Г + K_н = 1. \qquad (3.77)$$

- Вероятности работоспособного состояния объекта и состояния восстановления для переменного (алтернатирующего) процесса восстановления с экспоненциальным распределением длительности состояний определяются из выражений:

$$P_р(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\lambda+\mu)t}. \qquad (3.78)$$

$$P_в(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\mu + \lambda} e^{-(\lambda+\mu)t}. \qquad (3.79)$$

где $P_р(t)$ – вероятность работоспособного состояния объекта (элемента),

$P_в(t)$ – вероятность состояния восстановления объекта,

μ – интенсивность восстановления объекта,

λ – интенсивность отказов объекта.

Коэффициенты готовности и неготовности можно рассматривать как предел $P_р(t)$ и $P_в(t)$ при $t \to \infty$.

Отсюда следует:

$$K_Г = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{1}{1 + \lambda/\mu}. \qquad (3.80)$$

$$K_Н = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{(\lambda/\mu)}{(1 + \lambda/\mu)}. \qquad (3.81)$$

Величина $\gamma = \lambda/\mu = \lambda \cdot T_В$ – скорее математическая, чем физическая, т.к. зависит от математического параметра «λ». Однако принимая во внимание, что $\lambda \approx f$ (частоте появления отказов), можно считать, что «γ» определяет суммарную длительность простоя системы, отнесенную к единице времени (год) или относительную длительность простоя.

$$К_Г = \frac{1}{1+\gamma}; \quad К_н = \frac{\gamma}{1+\gamma}; \ \gamma = \frac{К_н}{К_Г}. \tag{3.82}$$

Частота появления отказов:

$$f = \frac{1}{\frac{1}{\lambda}+T} = \frac{\lambda}{1+\gamma} = \lambda \cdot К_Г. \tag{3.83}$$

- Коэффициент оперативной готовности $К_{ОГ}(t, \tau)$ – вероятность того, что объект (элемент) будет работоспособен в произвольный момент времени ”t” и безотказно проработает заданное время «τ» в аварийных условиях.

$$К_{ОГ}(t,\tau) = К_Г(t)\ P(\tau)\,. \tag{3.84}$$

Коэффициент «$К_{ОГ}$» позволяет оценить надежность оборудования в аварийный период.

- Коэффициент технического использования (элемента, системы), характеризует продолжительность времени работы:

$$К_{ТИ} = \frac{T_{РАБ} + T_{РЕЗ}}{T_{РАБ} + T_{РЕЗ} + T_{АВ} + T_{ПР}}. \tag{3.85}$$

где $T_{РАБ}$ – время нахождения элемента (системы, объекта) в работе;

$T_{РЕЗ}$ – время нахождения элемента (системы, объекта) в резерве;

$T_{АВ}$ – время нахождения элемента (системы, объекта) в аварийном простое;

$T_{ПР}$ – время нахождения элемента (системы, объекта) в плановом ремонте.

3.5. Показатели надежности системы, состоящей из независимых элементов

Всякая система характеризуется безотказностью и ремонтопригодностью. В качестве основной характеристики безотказности системы служит ***функция надежности***, которая представляет собой вероятность безотказной работы в течении некоторого времени «t».

Пусть система состоит из элементов функции надежности которых обозначим через $p_1(t)$, $p_2(t)$, ..., $p_n(t)$. Т.к. эти элементы – ***независимые***, то вероятность безотказной работы системы:

$$p(t) = p_1(t) \cdot p_2(t) K\ p_n(t). \tag{3.86}$$

Если функции надежности элементов имеют экспоненциальное распределение с постоянными интенсивностями отказов, то:

$$p(t) = \exp\left[-(\lambda_1 + \lambda_2 + K + \lambda_n) \cdot t\right] = \exp[-\sum_{i=1}^{n} \lambda i \cdot t]. \tag{3.87}$$

Одной из важнейших характеристик безотказности системы (элемента) является среднее время ее жизни:

$$T_c = \int_0^\infty p(t)dt = \int_0^\infty \exp[-\sum_{i=1}^{n} \lambda i \cdot t]dt = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + K + \lambda_n}. \tag{3.88}$$

Среднее время жизни системы или наработка ее на отказ равна:

$$T_c = \frac{T}{m}, \tag{3.89}$$

где T – суммарная наработка системы, полученная по результатам испытаний или эксплуатации; m – суммарное число отказов, зафиксированное в процессе испытаний или эксплуатации.

В качестве основной характеристики ремонтопригодности ***служит среднее время восстановления системы***:

$$T_в = \int_0^\infty [1 - S(t)]dt. \qquad (3.90)$$

где $S(t) = F_в(t)$ – функция распределения времени восстановления.

Для случая пуассоновского потока восстановления имеем:

$$T_в = \int_0^\infty \frac{(\lambda_в \cdot t)^m}{m!} e^{-\lambda_в \cdot t} dt = \frac{1}{\lambda_в}; \qquad (3.91)$$

где $\lambda_в = \mu_в$ – интенсивность восстановления; t – время восстановления.

Среднее время статистической модели восстановления системы по результатам испытания или эксплуатации:

$$T_B^* = \sum_{i=1}^{n} m_i \cdot t_{Bi} \Big/ \sum_{i=1}^{m} m_i. \qquad (3.92)$$

где m_i – число отказов i-го элемента; $t_{вi}$ – время восстановления i-го отказа элемента.

Всякая система характеризуется комплексными показателями надежности, основными из которых являются коэффициенты готовности ($К_Г$), технического использования ($К_{ТИ}$), оперативной готовности ($К_{ОГ}$).

Коэффициент «$К_Г$» характеризует готовность элемента к применению по назначению в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов обслуживания. Показатель – комплексный, т.к. зависит от безотказности и ремонтопригодности.

$$К_Г = \frac{T}{T + T_B}. \qquad (3.93)$$

где T – средняя наработка системы (элемента) на отказ; $T_в$ – среднее время восстановления отказа.

$$T_B = \int_0^\infty t \cdot a_B(t)dt = \int_0^\infty [1 - S(t)]dt. \qquad (3.94)$$

где S(t) – функция распределения времени восстановления;

$a_B(t)$ – плотность распределения времени восстановления.

Статистическая оценка показателей надёжности ($T_в^*$, T^*) составляет величину:

$$T_в^* = \bar{t}_в = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} t_{вi}. \qquad (3.95)$$

где $t_{вi}$ – время восстановления i-го отказа; m – число отказов в рассматриваемом промежутке времени.

$$T^* = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} t_i. \qquad (3.96)$$

где t_i – наработка системы до i-го отказа; m – число отказов в интервале суммарной наработки.

Коэффициент технического использования, «$К_{ТИ}$», для независимых элементов ЭС, характеризует долю нахождения элемента в работоспособном состоянии относительно рассматриваемой продолжительности эксплуатации. Этот период должен объединять все виды технического обслуживания и ремонтов.

Коэффициент «$К_{ти}$» учитывает затраты времени на плановые и внеплановые ремонты:

$$К_{ТИ} = 1 - К_{РМ} - К_{Р}. \qquad (3.97)$$

$$К_{РМ} = \frac{1}{Т_{Э}} \sum_{i-1}^{m} t_{Bi}; \; К_{Р} = \frac{Т_{Р}}{Т_{Э}}. \qquad (3.98)$$

где $Т_{э}$ – период эксплуатации;

$Т_{р}$ – суммарное время на все виды обслуживания за период эксплуатации;

$t_{вi}$ – время восстановления i-го отказа;

m – число отказов в интервале суммарной наработки.

В формулах для $К_{Г}$ и $К_{ТИ}$ среднее время жизни и среднее время восстановления элемента отражается выражениями (3.88-3.92).

Коэффициент оперативной готовности, «Ког», для независимых элементов ЭС, характеризует надежность системы, необходимость применения которой возникает в произвольный момент времени (кроме планируемых периодов, в течение которых применение системы по назначению не предусматривается), начиная с которого система будет работать безотказно в течение заданного интервала времени «t».

$$К_{ОГ} = К_{Г} \cdot P(t) = P(t) \frac{T}{T + T_{B}}. \qquad (3.99)$$

3.6. Показатели надёжности концентрированной ЭС и методы их определения

а) Вероятность снижения мощности ЭС

Однородная концентрированная ЭС – из одинаковых по всем параметрам генераторов, работающих на общую нагрузку. Показатели надёжности генераторов – q_i, ω_i(вероятность отказа, частота попадания в неё). Число состояний ЭС (без плановых ремонтов) - "2". Если безразлично из-за отказа, каких именно генераторов ЭС находится в том или ином состоянии, а важно, на сколько, снизилась мощность станций ЭС, то количество состояний ЭС изменяется до величины "n + 1". При этом нулевое состояние ЭС – все генераторы в работе, первое состояние ЭС – один генератор не работает, второе – два и т.д.

Попадание ЭС в одно из состояний соответствует схеме Бернулли и отвечает биноминальному распределению:

$$q_k^{эс} = C_n^k q^k (1-q)^{n-k}; \; где \, C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \qquad (3.100)$$

где $q_k^{эс}$ – вероятность снижения мощности ЭС, при выходе из строя "k" генераторов; n – общее количество работающих генераторов.

Интегральный закон распределения снижения мощности ЭС:

$$F_K^{ЭС} = q_0^{ЭС} + q_2^{ЭС} + ... + q_K^{ЭС}. \qquad (3.101)$$

б) Частота попадания ЭС в К-ое состояние:

$$\omega_K^{ЭС} = \omega_K^{ЭС\,/} + \omega_K^{ЭС\,//}. \qquad (3.102)$$

где $\omega_K^{ЭС\,/}$ – частота попадания ЭС в К-ое состояние путём "сверху" при переходе в К-ое состояние из (к – 1) состояние; $\omega_K^{ЭС\,//}$ – частота попадания ЭС в К-ое состояние путём "снизу" из (к + 1) состояния ЭС.

Путь “сверху”:

$$q_{k-1}^{эс} = C_{n-1}^{k-1} q^{k-1} (1-q)^{n-k}. \qquad (3.103)$$

где $q_{k-1}^{эс}$ – вероятность, что (к – 1) генераторов простаивает.

Средняя наработка К-го генератора в данном состоянии за время “t”.

$$t_H = t(1-q)\left[C_{n-1}^{k-1} q^{k-1} (1-q)^{n-k}\right] = tC_{n-1}^{k-1} q^{k-1} (1-q)^{n-k+1}. \qquad (3.104)$$

Количество отказов К-го генератора за время “t” в (к-1)-м состоянии ЭС:

$$\Omega = \omega t_H = \omega t C_{n-1}^{k-1} q^{k-1} (1-q)^{n-k+1}; \qquad (3.105)$$

где ω – частота отказов генератора.

Частота переходов системы в К-ое состояние из (к – 1) из-за отказа К-го генератора:

$$\omega_{K(K)}^{ЭС\,/} = d\Omega / dt = \omega C_{n-1}^{k-1} q^{k-1} (1-q)^{n-k+1}. \qquad (3.106)$$

Частота рассматриваемых событий, обусловленная отказом любого из «n» генераторов:

$$\omega_K^{ЭС\,/} = n\omega_{K(K)}^{ЭС\,/} = n\omega C_{n-1}^{k-1} q^{k-1} (1-q)^{n-k+1}. \qquad (3.107)$$

$$\omega_{K(K)}^{ЭС\,//} = (n-k)\omega C_n^k q^k (1-q)^{n-k}. \qquad (3.108)$$

3.7. Показатели надежности распределительных электрических сетей, при последовательном и параллельном соединении цепей

Для анализа надежности распределительные сети представляются в виде структурной схемы или блок-схемы, в которой реальные связи заменяются условными с учетом влияния каждого элемента на надежность сети в целом. Соединение блоков в схеме может быть последовательным, когда отказ любого элемента приводит к отказу системы и параллельным, когда отказ системы имеет место при отказе хотя бы одного элемента в каждой цепи. Наличие последовательных и параллельных связей в различных сочетаниях определяет многообразие блок-схем, применяемых при расчете надежности электроснабжения.

Для расчета надежности распределительных электрических сетей применяются численные показатели надежности ее отдельных элементов, принимаемые из справочной литературы.

Показатели надежности цепи, состоящей из «k» последовательно соединенных элементов определяются по выражениям:

1. Параметр потока отказов цепи:

$$\omega_Ц = \sum_{i=1}^{k} \omega_i. \qquad (3.109)$$

2. Время наработки цепи до отказа:

$$T_{НЦ} = \frac{1}{\omega_Ц}. \qquad (3.110)$$

3. Вероятность безотказной работы цепи в течение года:

$$p_Ц(t) = \prod_{i=1}^{k} pi(t) = e^{-\omega ц}. \qquad (3.110)$$

4. Среднее время восстановления цепи:

$$T_{ВЦ} = \frac{1}{\omega_Ц}\sum_{i=1}^{k}\omega_i T_{Bi}. \qquad (3.112)$$

5. Коэффициент неготовности (вынужденного простоя):

$$К_{НЕГОТ} = К_{ВЫНУЖД} = К_{ПРОСТОЯ} = \omega_Ц T_{ВЦ} = \sum_{i=1}^{k}\omega_i T_{Bi} = \sum_{i=1}^{k} К_{Hi} = \sum_{i=1}^{k} К_{Bi} \qquad (3.113)$$

Для элемента цепи вероятность безотказной работы за время t при экспоненциальном законе распределения (ω = const)

$$p_i(t) = e^{-\omega_i t}. \qquad (3.114)$$

Вероятность отказа элемента цепи:

$$qi(t) = 1 - p_i(t). \qquad (3.115)$$

При малых значениях «ωt» можно принять q(t) = ωt, тогда вероятность безотказной работы в течение года:

$$p_i(t) = 1 - \omega. \qquad (3.116)$$

Средняя наработка до отказа:

$$T_Н = \frac{1}{\omega}. \qquad (3.117)$$

Коэффициент готовности:

$$К_Г = \frac{T_Н}{T_Н + T_В}. \qquad (3.118)$$

При «n» параллельных цепях с одинаковыми характеристиками среднее время восстановления системы:

$$T_{ВС} = \frac{T_{ВЦ}}{n}. \qquad (3.119)$$

Среднее время работы системы между двумя отказами:

$$T_{НС} = \frac{T_{ВЦ}}{n}\left[\left(\frac{T_{ВЦ} + T_{НЦ}}{T_{ВЦ}}\right)^n - 1\right]. \qquad (3.120)$$

При двух цепях среднее время восстановления:

$$T_{ВС} - = \frac{T_{ВЦ}}{2}. \qquad (3.121)$$

Время наработки двух цепей (системы) до отказа:

$$T_{НС} = \frac{T_{ВЦ}}{n}\left[\left(\frac{T_{ВЦ} + T_{НЦ}}{T_{ВЦ}}\right)^2 - 1\right] = \frac{T^2{}_{НЦ}}{2T_{ВЦ}} + T_{НЦ}. \qquad (3.122)$$

3.8. Основные показатели ремонтопригодности элементов ЭС

Ремонтопригодность – свойство элемента ЭС (объекта), заключающееся в его приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправности путём проведения технического обслуживания и ремонтов. Её ***количественные показатели*** случайные величины, определяемые с помощью математического аппарата ТВ, МС и теории массового обслуживания.

Единичные показатели:

1. Среднее время восстановления – $M[t_в]$ – математическое ожидание времени восстановления работоспособности объекта. При известном законе распределения:

$$T_в = M[t_B] = \int_0^\infty t f_B(t)dt. \qquad (3.123)$$

где $f_в(t)$ – плотность распределения времени восстановления.

По статическим данным:

$$T_B^* = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} t_{Bi}. \qquad (3.124)$$

где $t_{вi}$ – время устранения i-го отказа; m - число отказов в процессе эксплуатации или испытаний.

2. Характеристики рассеяния:

$$D^*(t_B) = \frac{1}{m-1}\sum_{t=1}^{m}(t_{Bi} - T_B^*)^2. \qquad (3.125)$$

$$\sigma^*(t_B) = \sqrt{D^*(t_B)}. \qquad (3.126)$$

3. Вероятность восстановления объекта в заданное время"t":

$$P_B(t) = P(t_B \le t) = \int_0^t f_B(t)dt. \qquad (3.127)$$

Статистическая оценка показателя:

$$P_в^*(t) = 1 - n(t)/N(t), \qquad (3.128)$$

где n(t) – число изделий, не восстановленных за промежуток времени t; (t) – число изделий подлежащих восстановлению за промежуток времени t.

Для определения величины $P_в(t)$ надо знать ***закон распределения времени восстановления.***

4. Интенсивность восстановления – вероятность восстановления работоспособности объекта в единицу времени при условии, что до него восстановления не было.

$$\mu(t) = f_в(t)/(1 - F_B(t)). \qquad (3.129)$$

где $F_в(t)$ – функция распределения времени восстановления.

Статистическая оценка интенсивности восстановления:

$$\mu^*(t) = \frac{m_B(t+\Delta t)}{n_B(t)\Delta t}. \qquad (3.130)$$

где Δt – рассматриваемый промежуток времени;

$m_в(t + \Delta t)$ – число восстановлений в интервале времени от t до $t + \Delta t$;

$n_в(t)$ – число не восстановленных изделий на момент времени t.

$$\mu(t) = 1/T_B; \;\; \mu^*(t) = 1/T^*_B. \qquad (3.131)$$

Для наиболее распространённого ***экспоненциального закона:***

$$P_в(t) = 1 - e^{\mu t} = 1 - e^{-t/T_в};\ \ P_в(t) = 1 - e^{\mu t} = 1 - e^{-1/T_в}. \qquad (3.132)$$

Число отказов, которое может быть устранено за время ”t”:

$$M = \lambda T \cdot (1 - e^{-\mu t}). \qquad (3.133)$$

где λ – интенсивность отказов, T – время эксплуатации.

Если “k” – среднее число восстановлений за заданное время t,

$$K = \mu t, \qquad (3.134)$$

то для определения вероятности “m” восстановлений используем закон Пуассона:

$$Pm = \frac{K^m}{m!} e^{-K}. \qquad (3.135)$$

При к < 1:

$$Pm = \frac{K^m}{m!}(1 - K + \frac{K^2}{2}). \qquad (3.136)$$

5. Улучшение ремонтопригодности зависит от показателей надёжности μ, λ, t, T. При экспоненциальном законе распределения отказов и их восстановления:

$$\Delta P_B(t) = 1 - e^{-\lambda T} - e^{-\mu T}(1 - e^{-\lambda T}). \qquad (3.137)$$

Уравнение определяет, какая вероятность общего ***числа отказов*** за время эксплуатации, которое может быть устранено за время “t”.

Комплексные показатели ремонтопригодности

1) Коэффициент готовности для не резервированной системы:

$$K_г = T_0 / T_0 + T_B. \qquad (3.138)$$

где $T_о$ – наработка на отказ; $T_в$ – среднее время восстановления отказа.

$$K_г = \mu/(\lambda + \mu). \qquad (3.139)$$

$$\mu = 1/T_B;\ \lambda = 1/T_0. \qquad (3.140)$$

2) Коэффициент ремонта (простоя) для не резервированной системы:

$$K_p = T_p/(T + T_p). \qquad (3.141)$$

или

$$K_p = \lambda/(\lambda + \mu). \qquad (3.142)$$

где T_p – время ремонта; T – рабочее время (время эксплуатации).

Эти коэффициенты ($K_г$, K_p) для начального периода эксплуатации, когда вероятность безотказной работы выше, чем в конце, с учётом экспоненциального закона появления и восстановления отказов:

$$K_г = \mu/(\lambda + \mu) + \lambda/T(\lambda + \mu) - \lambda \exp[-(\lambda + \mu)T]/T(\lambda + \mu)^2, \qquad (3.143)$$

$$K_P = \lambda/(\lambda + \mu) - \lambda/T(\lambda + \mu) + \lambda\exp[-(\lambda + \mu)T]/T(\lambda + \mu)^2. \qquad (3.144)$$

3) Для резервированной системы при экспоненциальном законе восстановления отказов и установившемся процессе:

$$K_Г = \exp\left[\frac{-n\lambda^n T}{n(\sum_{i=1}^{n} 1/i)\lambda^{n-1} + \mu^{n-1}}\right]. \qquad (3.145)$$

где n – число резервных элементов.

Когда допускается предельное время обслуживания – “ t”:

$$К_Г = \exp\left[\frac{-n\lambda^n T e^{-n\mu t}}{n(\sum_{i=1}^{n} 1/i)\lambda^{n-1} + \mu^{n-1}}\right]. \qquad (3.146)$$

Таким образом система работоспособна, если один из её элементов может быть восстановлен до нормального режима работы в течении времени “t”.

4) Коэффициент технического использования:

$$К_{ТИ} = 1 - e^{-n\mu t}\left\{1 - \exp\left[\frac{-n\lambda^n T}{n(\sum_{i=1}^{n} 1/i)\lambda^{n-1} + \mu^{n-1}}\right]\right\}. \qquad (3.147)$$

3.9. Выбор, обоснование и перераспределение показатели надёжности проектируемой системы

При проектировании очень важно правильно выбрать показатели надёжности.

При этом учитывается назначение системы (объекта) ,условия и режимы её работы и ремонтоспособность. Назначение системы определяет область и интенсивность её применения. Информацию об условиях и режимах работы системы используют для количественной оценки влияния факторов окружающей среды на её работоспособность, а также действия нагрузок на пропускную (несущую) способность системы и её элементов. При восстанавливаемости (ремонте) системы выбирают ***коэффициент готовности*** и ***технического использования.*** Если отказ системы приводит к невыполнению важной задачи, вызывает угрозу для здоровья и жизни людей, то основным показателем надёжности – ***безопасность,*** выражаемая в виде ***наработки на отказ или вероятности безотказной работы.***

Если при простое системы после отказа имеем большой ***ущерб,*** то необходима хорошая ***ремонтоспособность и высокая безотказность.*** Если система подлежит ***длительному ожиданию работы,*** то она должна иметь высокие ***показатели сохраняемости.***

Показатели надёжности проектируемой системы должны обеспечивать её нормальные функционирование в течение заданного срока эксплуатации.

Если $P_1, P_2, \ldots P_n$ – надёжность подсистемы, отказ каждой из которой даёт отказ системы, то ***надёжность системы равна:***

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot \ldots \cdot P_n. \qquad (3.148)$$

При этом ***требуемая надёжность системы*** ($P^{тр}$): $P^{тр} \geq P$.

При повышении надёжности: $P \geq P^{тр}$, необходимы дополнительные затраты (резервирование или более надёжные элементы).

Методика повышения надёжности P до P ^{тр} сводится к следующему:

1) Надёжности подсистем располагают в неубывающей последовательности

$$P_1 \leq P_2 \leq P_3 \leq \ldots \leq P_n. \qquad (3.149)$$

2) Каждую из надёжностей P_1, P_2, ..., $P_к$ увеличивают до $P_o^{тр}$, а надёжности, начиная с P_{k+1}, ..., P_n остаются неизменными. Номер “k” выбирают из “j_{max}”:

$$P_{i\,max} < \left[\frac{p^{TP}}{\prod_{j=1}^{n+1} p_j} \right]^{j-1} = r_j. \qquad (3.150)$$

где $P_{n+1} = 1$ по определению.

Значение $P_o^{тр}$:

$$P_0^{TP} < \left[\frac{p^{TP}}{\prod_{j=1}^{n+1} p_j} \right]^{k-1}. \qquad (3.151)$$

При этом:

$$(P_0^{TP})^K P_{K+1} ... P_n = (P_0^{TP})^K \prod_{j=K+1}^{n+1} P_j = P^{TP}. \qquad (3.152)$$

3.10. Количественные оценки показателей надёжности

Используются при расчёте необходимого резерва ЭС и других расчётах надёжности, базируются на статических показателях.

Таблица 3.1

Тип электростанции	$K_в$ (вынужденного простоя)	t_n (сумма продолжительности плановых ремонтов за 1 год), мес
ГЭС	0,005	0,5
ТЭС с поперечными связями	0,02	1,0
ТЭС с блоками мощностью, МВт. 100-200	0,045	1,2
300	0,055	1,4
500	0,065	1,6
800	0,075	1,8
1200	0,085	2,0

Таблица 3.2

Наименование объекта	Частота отключений ω, 1/год на 100 км	Время восстановления Тв, ч	Частота плановых ремонтов μ, 1/год	Продолж-сть планового ремонта Тп, ч
Тр-р с ВН 500кВ	0,03	300	1,0	60
330	0,025	300	1,0	50
220	0,02	250	1,0	40
110	0,015	200	1,0	30(25)
35-20	0,02	150	1,0	30(20)
6-10, каб. сеть	0,005	100	0,5	10
6-10, возд. сеть	0,05	100	0,5	10
ВЛ с АПВ напряжением 500 кВ на мет. или ж/б опорах	0,4	20	10	8
330	0,5	18	8	8
220	0,7	16	6	8
110	1,0	14	5	8

35	2,0	12	5	8
110, на дер. опорах	0,5	10	7	8
35	1,2	8	6	8
10	2,0	5	4	8
Кабели 6-10 кВ, в грунте	3,0	40	1	8
6-10 кВ, в блоках	0,5	5	1	8

Для ЛЭП устойчивые отказы (неуспешные АПВ) составляют приблизительно 10…40 %.

Для ВЛ на двух цепных опорах или одно-цепных по 1-ой трассе, для кабельных линии в 1-ой траншее, надо выделять отказы для двух цепей.

Для отказов с простоем 2-х цепей составляет 10…30 % общего числа отказов одной цепи.

Таким образом, для двух цепных ЛЭП:

1. частота отказов каждой из цепей

$$\omega' = (1 - K_{2л})\omega_л;$$

2. частота отказов для двух цепей

$$\omega'' = K_{2л}\omega_л.$$

$K_{2л}$ = 0,1 … 0,3 – доля отказов, приводящих к простою обеих цепей.

Для новых серий турбоагрегатов показатели надёжности (табл.1) необходимо умножать на (1,5) в первые 3…4 года.

Для трехобмоточных трансформаторов, автотрансформаторов показатель частоты отключений (поток отказов0обычно увеличивается по сравнению с табл. 2 на 20 %).

Приведём характеристики основных элементов ЭС:

1. Характеристики надёжности агрегатов электростанций.

Таблица 3.3

Показатели	ГЭС		ГЭС с поперечными связями		КЭС					АЭС
	До 100 мвт	>100 мвт	До 100 мвт	>100 мвт	100 мвт	200 мвт	300 мвт	500 мвт	>550 мвт	1000 мвт
ω,1/год Тв,ч	1 40	1 60	3 50	3 70	4 50	4 60	6 90	8 100	10 110	5 200
$\mu_{тек}$,1/год	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
$T_{тек}$,ч	0	0	15	15	20	20	30	50	90	240
$\mu_{кап}$,1/год	0,2	0,2	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1
$T_{кап}$,ч	100	200	700	1000	700	900	1100	1400	2000	1100

Примечание: $\mu_{тек}$, $\mu_{кап}$, $T_{тек}$, $T_{кап}$ – частота и длительность текущего и капитального ремонтов.

2. Характеристика надёжности трансформаторов и автотрансформаторов.

Таблица 3.4

Номинальное напряжение, кВ	Показатели					
	ω,1/год	$T_в$, ч	μ, 1/год	$T_{кап}$,ч	$μ_{кап}$, 1/год	$T_{тек}$, ч
10	0,005	60	0,17	100	2	6
35	0,01	50	0,17	200	2	10
110	0,02	100	0,17	300	2	12
150	0,02	200	0,17	300	2	12
220	0,02	200	0,17	350	2	14
330	0,04	250	0,17	350	2	15
500	0,03	500	0,1	400	1	60
< 500	0,03	625	0,1	490	1	60

3. Характеристики надёжности выключателей.

Таблица 3.5

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Показатели						
		ω, 1/год	$ω_л$, 1/год	$T_в$, ч	$μ_{кап}$, 1/год	$T_{кап}$, ч	$μ_{тек}$, 1/год	$T_{тек}$, ч
Воздушные	До 20	0,04	0,04	10	0,2	80	2	6
	35	0,04	0,08	12	0,2	100	2	6
	110	0,05	0,1	25	0,2	230	2	10
	150	0,06	0,13	30	0,2	300	2	12
	220	0,06	0,15	40	0,2	500	2	24
	330	0,07	0,2	60	0,2	750	2	36
	500	0,08	0,2	90	0,2	900	1	90
	< 500	0,12	0,3	120	0,12	1200	0,5	325
Масляные	10	0,01	0,01	10	0,17	30	2	6
	35	0,01	0,02	12	0,17	40	2	6
	110	0,01	0,03	25	0,17	160	2	12
	220	0,01	0,07	40	0,17	250	2	24

Примечание: $ω_л$ – в цепях ВЛ; ω – в остальных случаях.

4. Характеристики надёжности воздушных линий.

Таблица 3.6

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Показатели			
		ω,1/(год100 0 км	Тв. ч	$μ_{тек}$,1/год	$T_{тек}$, ч
двухцепные	10	1,6/0,4	7/20	2/4	10/10
	35	1,1/0,3	7/20	3/6	12/12
	110	0,9/0,2	4/27	4/8	12/12
	220	0,5/0,1	2/36	5/10	12/12
Одноцепные	10	2	5	2	10
	35	1.4	9	3	12
	110	1,1	9	4	12
	220	0,6	10	5	12
	330	0,5	12	7	12
	500	0,4	17	9	12
	< 500	0,2 – 0,3	20 – 6	10	12

Примечание: Значения в числителе для одной цепи, в знаменателе – для двух, $μ_{тек}$ – для средних длин ЛЭП.

5. Характеристики надёжности отделений и короткозамыкателей.

Таблица 3.7

Номинальное напряжение, кВ	Показатели					
	ω, 1/год	$T_в$, ч	$\mu_{кап}$, 1/год	$T_{кап}$, ч	$\mu_{тек}$, 1/год	$T_{тек}$, ч
110	0,02	4	0,33	30	2	5
220	0,04	4	0,33	40	2	6

6. Характеристики надёжности сборных шин (на одно присоединение).

Таблица 3.8

Номинальное напряжение, кВ	Показатели			
	ω, 1/год	$T_в$,ч	$\mu_{тек}$, 1/год	$T_{тек}$,ч
10	0,005	2	1	1
35	0,01	2	1	1
110	0,01	2	1	2
220	0,01	4	1	3,5

Глава 4. Структурная надёжность работы основных элементов ЭС

4.1. Основные понятия и показатели надёжности воздушных линий электропередачи

Воздушным линиям (ВЛ) принадлежит важная роль в работе ЭС и надёжном электроснабжении потребителей. На долю воздушных линий ЛЭП 35…750 кВ приходится значительная часть отказов и отключений электрического оборудования (~ 35 … 50 %).

Причины высокой повреждаемости ВЛ:

▪Влияние климатических воздействий (гололёдно-ветровые нагрузки, атмосферные перенапряжения и т. д.);

▪Доступность ВЛ посторонним вмешательствам (наезды на опоры, обрывы проводов, «расстрел» изоляторов);

▪Сложность контроля технического состояния элементов ВЛ.

Изучение надёжности ВЛ имеет цели:

▪Оценку надёжности схем развития ЭС, эл. сетей, систем электроснабжения отдельных потребителей;

▪Анализ конструкций, оборудования, сооружения ВЛ;

▪Технико-экономический анализ вариантов ВЛ сверхвысокого напряжения и выбор конструкций, опор, фундаментов, проводов, уровней изоляции;

▪Анализ и рационализацию системы ремонтов и технического обслуживания ВЛ;

▪Решение задач планирования, управления и производственно-хозяйственной деятельности при эксплуатации ВЛ;

▪Решение задач диспетчерского управления на разных уровнях;

▪Разработка нормативов аварийного запаса оборудования и запасных частей для ВЛ;

▪Разработка рекомендаций и указаний по эксплуатации ВЛ с учётом местных условий;

▪Определение необходимости и степени эффективности мероприятий по повышению надёжности ВЛ.

Надёжность ВЛ 35…750 кВ оценивается комплексом показаний из 5-ти групп:

♦ Показатели безотказности;

♦ Ремонтопригодности;

♦ Долговечности;

♦ Комплексные показатели;

♦ Экономические показатели.

1) Под безотказностью ВЛ понимается её свойства непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки. ВЛ – восстанавливаемый объект и её показатель безотказности – ***параметр потока отказов*** – в общем случае $\omega(t)$ – т.е., функция времени. На величину «ω» влияют: факторы старения и износа элементов, а также плановые ремонты (рис.4.1):

t_1, t_2, t_3, момент времени выполнения капитальных ремонтов;

t_0 – окончание приработки (периода освоения).

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \longrightarrow 0} \frac{M[r(t+\Delta t)] - M[r(t)]}{\Delta t}. \qquad (4.1)$$

где M – математическое ожидание отказов ВЛ;

r(t) – число отказов за время t;

r(t + Δt) – число отказов за время (t + Δt);

ω(t) – среднее число отказов, ожидаемых в малом интервале времени.

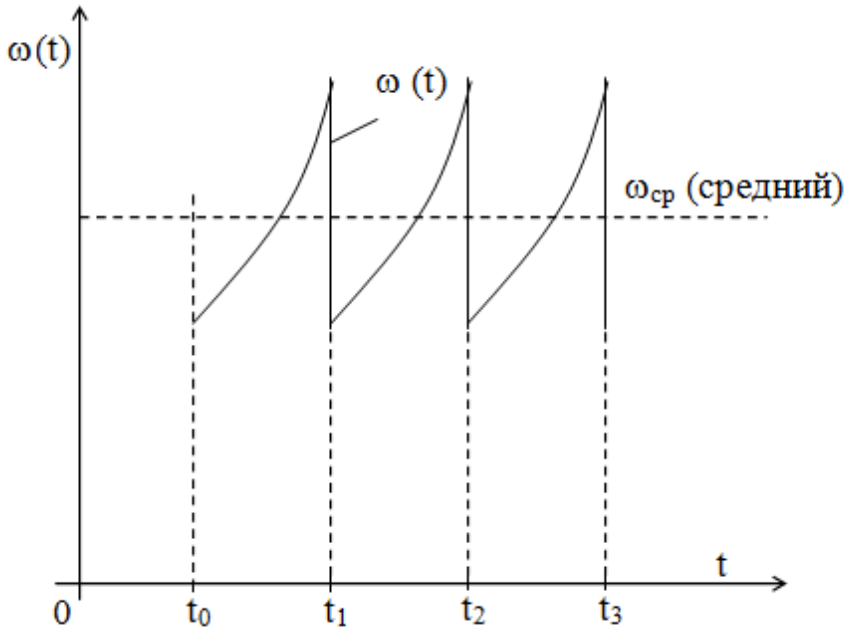


Рис. 4.1

Из анализа причин отказа ВЛ следует:

$$\omega = \omega_1(t) + \omega_2, \qquad (4.2)$$

где ω – поток отказов ВЛ;

$\omega_1(t)$ – связан с износом и старением ВЛ и зависит от срока службы ВЛ;

ω_2 – связан с внешними воздействиями на ВЛ.

Поток отказов $\omega_1(t)$ вызывается загниванием древесины, коррозией металлических опор, износом арматуры, проводов, тросов, разрушением изоляторов, составляющая потока ω_2 связана с гололёдно-ветровыми нагрузками, дефектами монтажа, обрывами проводов, ударами молний, ледоходом, пожарами и т.д.

Величина $\omega_2 = \text{const}$ и не зависит от длительной эксплуатации, капитальных ремонтов, т.е. определяется случайными причинами.

В эксплуатационной и проектной практике ЭС для ВЛ в период нормативного срока службы пользуются значением среднего потока отказов «$\omega_{ср}$» не зависящего от срока службы ВЛ. ***Периодичность капитальных ремонтов*** ВЛ принимается 3-6 лет.

С вероятностью безотказной работы ВЛ связано понятие функции надёжности ВЛ – p(t).

$$p(t) = 1 - \sum p_i(t) q_i(t); \qquad (4.3)$$

где i – возможные состояния ВЛ;

$p_i(t)$ – вероятность нахождения ВЛ в момент времени “t” в состоянии “i”;

$q_i(t)$ – вероятность нарушения надёжности ВЛ в момент времени “t” в состоянии “i”.

2) Ремонтопригодность ВЛ – свойство ВЛ, заключающееся в её приспособленности к обнаружению причин отказов, предупреждению отказов и восстановлению работоспособности путём технического обслуживания и ремонта. Ремонтопригодность ВЛ определяется следующими основными показателями:

- средним временем восстановления линии при отказе ($T_в$);
- средней продолжительностью преднамеренных отключений ВЛ ($T_р$);
- средней периодичностью ремонтов (μ);
- средними трудозатратами на капитальный ремонт и техническое обслуживание ВЛ ($N_р$).

Рассмотрим содержание отдельных показателей:

Величина «$T_в$» – математическое ожидание времени для приведения ВЛ в работоспособное состояние после отказа.

Величина «$N_р$» для ВЛ 35…750 кВ характеризует их потребность в плановых ремонтах и других видах обслуживания. Средние значения величины «$N_р$» для ВЛ представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Средние трудозатраты на капитальный ремонт и техобслуживание

U, кВ	Трудозатраты, чел-ч/км на капремонт ВЛ на опорах				
	деревянных	железобетонных		металлических	
		одноцепных	двухцепных	одноцепных	двухцепных
35	5300	3000	5700	6250	7300
110	6200	3450	5450	5300	6400
220	7600	4250	-	7150	9000
330	-	5120	-	7650	-
750	-	-	-	13600	-

3) Долговечность ВЛ – их свойство сохранять работоспособность при установленной системе ремонтов и техобслуживании до предельного состояния при котором дальнейшая эксплуатация невозможна.

Для ВЛ на деревянных опорах – 30 лет, на металлических и ж/б опорах – 50 лет.

Износ ВЛ имеет 5 форм:

- ***Экономический или нормальный износ,*** определяемый внедрением в эксплуатацию более эффективных и надёжных ВЛ либо ВЛ с меньшими затратами на 1кВт, передаваемый мощности или кВт ч переданной электроэнергии;
- ***Технический износ –*** неспособность ВЛ соответствовать возросшему уровню требований к качеству эл. энергии;
- ***Социальный износ,*** вызванный неспособностью ВЛ отвечать ожесточившимся требованиям социальных стандартов (безопасность персонала, населения или животных, сложность обслуживания и т.д.;
- ***Экологический износ –*** когда ВЛ не соответствуют новым нормативам по охране окружающей среды;

▪ ***Физический износ,*** обусловленный явлениями старения, разрушения, изнашивания, загнивания и т.п. элементов ВЛ.

Таким образом предельное состояние ВЛ определяется не только физическим износом, хотя он в большинстве случаев – основной.

4) Комплексные показатели надёжности ВЛ. Эти показатели характеризуют несколько свойств, составляющих надёжность ВЛ (безотказность, долговечность, ремонтопригодность).

а) Коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения ВЛ в работоспособном состоянии относительно периода эксплуатации учитывает затраты времени на все виды простоя ВЛ в процессе эксплуатации после отказов и в результате преднамеренных отключений:

$$К_{ТИ} = \frac{T_0}{T_0 + T_В + T_Р} \approx 1 - \omega T_В - \mu T_Р. \qquad (4.4)$$

где T_0 – среднее время работы ВЛ между отказами (наработка на отказ);

$T_В$ – среднее время восстановления ВЛ;

$T_Р$ – среднее время преднамеренного отключения ВЛ;

ω – параметр потока отказов ВЛ;

μ – средняя периодичность ремонтов.

б) Коэффициент готовности – вероятность того, что ВЛ окажется работоспособной в производственный момент времени, исключая простой при ремонтах:

$$К_Г = \frac{T_0}{T_0 + T_В} \approx 1 - \omega T_В. \qquad (4.5)$$

где T_0 – среднее время работы ВЛ между отказами (наработка на отказ);

$T_В$ – среднее время восстановления ВЛ.

в) коэффициент простоя ВЛ из-за отказов:

$$К_{ПО} = \frac{T_В}{T_0 + T_В}. \qquad (4.6)$$

г) Коэффициент простоя ВЛ при ремонтах:

$$К_{ПР} = \frac{T_Р}{T_0 + T_Р}. \qquad (4.7)$$

где $T_р$ – среднее время ремонта ВЛ.

5) Экономические показатели надёжности ВЛ.

а) Эффективность затрат на повышение надёжности ВЛ:

$$Э_н = \frac{\Delta Н}{З_Н}, \qquad (4.8)$$

где $\Delta Н$ – повышение надёжности ВЛ в результате введения резерва;

$З_Н$ – величина приведенных затрат на образование резерва.

Пример. Если на ВЛ вводится избыточность путём замены провода А на АС, то вероятность обрыва провода уменьшается и вероятность отказа ВЛ уменьшается, время восстановления – без изменения.

б) Суммарные затраты на проведение техобслуживания или ремонта за определённый срок эксплуатации т.е. математическое ожидание затрат на интервале времени.

в) Ущерб от отказа ВЛ. Этот экономический показатель состоит из трёх звеньев:

- ущерб энергоснабжающего предприятия (ПЭС, РЭС, Э/СТ);
- ущерб потребителей энергии;
- ущерб смежных звеньев народного хозяйства.

Проанализируем эти составляющие ущерба:

Звено I:

- Затраты на восстановление ВЛ;
- Потери от замены элементов ВЛ (опор, проводов, изоляторов);
- Потери от увеличения технологического расхода энергии в электросети из-за отклонения эл. режима от оптимального значения при отказе ВЛ;
- Затраты на топливо, расходуемое на пуски энергоблоков, растопки котлов на резервных станциях, вводимых вследствие отказа ВЛ;
- Затраты на выработку энергии на резервном оборудовании;
- Потери от простоя оборудования и обсуживающего персонала связанного с отказом ВЛ.

Звено II:

- Потери от простоя и снижения производительности технологического оборудования;
- Потери от брака продукции, снижения ее качества;
- Потери от простоя рабочих;
- Затраты на содержание резервов и запасов сырья и т.п.

Звено III:

- Пожары в городах, лесном хозяйстве;
- Затраты от падения опор, проводов на дороги и т.д.

4.2. Надёжность двухцепных ВЛ

Доля двухцепных воздушных линий в ЭС СНГ: 7 % – 35 кВ, 26 % – 110 кВ, 154 кВ; 18 % – 220 кВ; 5 % – 330 кВ.

Преимущество строительства двухцепных ЛЭП – сокращение затрат на строительство и эксплуатацию, уменьшение зоны отчуждения и т.п., что позволяет ожидать увеличения их количества.

«Отказ» для двухцепных ВЛ – понятие неоднозначное: и зависит от схемы электроснабжения и роли ВЛ в схеме. ***Пример:*** отказ первой цепи или двух является отказом, это зависит от требований потребителей.

Здесь могут быть три варианта:

1. Отказ любой одной цепи двухцепной ВЛ - отказ этой линии или отказ двух цепей.
2. Отказ одной определённой цепи – отказ линии, или отказ двух цепей.
3. Отказ двух цепей – отказ линии.

В соответствии с этими вариантами квалифицируются и преднамеренные отключения двух цепей ВЛ.

Структурные схемы расчёта надёжности двух цепной ВЛ в зависимости от понятия отказа.

На рис 4.2 представлены схемы замещения ВЛ по вариантам при анализе структурной надёжности.

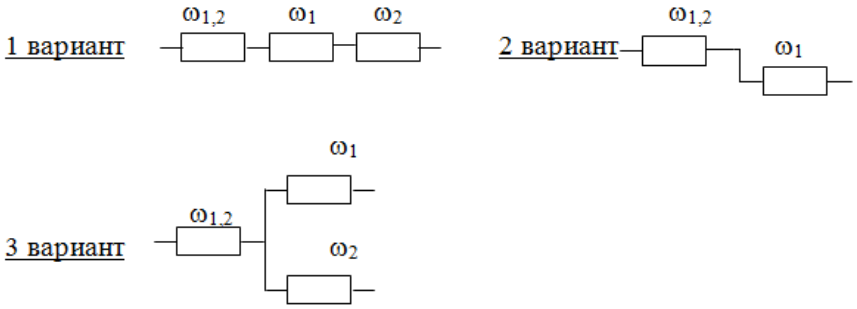


Рис. 4.2

Статистическая информация для анализа надёжности двухцепных ЛЭП состоит из двух групп показателей надёжности:

1. Показатели, характеризующие отказы и преднамеренные отключения двух цепей двух цепной линии ***одновременно*** по одной причине:

$$\omega_{1,2};\ T_{B1,2};\ \mu_{1,2};\ T_{P1,2},$$

где $\omega_{1,2}$ – параметр потока отказов двух цепей ВЛ;

$T_{B1,2}$ – среднее время восстановления двух цепей ВЛ;

$\mu_{1,2}$ – средняя периодичность ремонтов двух цепей ВЛ;

$T_{P1,2}$ – средняя продолжительность преднамеренного отключения двух цепей ВЛ.

2. Показатели, характеризующие отказы и преднамеренные ***отключения любой одной цепи*** двух цепной линии, вторая цепь в работе

$$\omega_{1\text{-}2};\ T_{B1\text{-}2};\ \mu_{1\text{-}2};\ T_{P1\text{-}2},$$

где $\omega_{1\text{-}2}$ – параметры потока отказов первой или второй цепи ВЛ;

$T_{B1\text{-}2}$ – среднее время восстановления первой или второй цепи ВЛ;

$\mu_{1\text{-}2}$ – средний период ремонтов первой или второй цепи ВЛ;

$T_{P1\text{-}2}$ – средняя продолжительность преднамеренных отключений первой или второй цепи ВЛ.

В этом случае ***для первого варианта*** отказа двух цепной ВЛ имеем следующие значения показателей надёжности:

$$\omega_{ВЛ} = \omega_{1,2} + \omega_{1-2}; \tag{4.9}$$

$$T_{вВЛ} = \frac{\omega_{1,2}T_{в1,2} + \omega_{1-2}T_{в1-2}}{\omega_{1,2} + \omega_{1-2}}; \tag{4.10}$$

$$\mu_{вл} = \mu_{1,2} + \mu_{1,2}; \tag{4.11}$$

$$T_{рВЛ} = \frac{\mu_{1,2}T_{р1,2} + \mu_{1-2}T_{р1-2}}{\mu_{1,2} + \mu_{1-2}}. \tag{4.12}$$

где $\omega_{ВЛ}$ – поток отказов двухцепной линии; $\mu_{ВЛ}$ – средняя периодичность ремонтов; $T_{В\ ВЛ}$ – среднее время восстановления ВЛ; $T_{Р\ ВЛ}$ – средняя продолжительность преднамеренных отключений.

Для второго варианта: отказа (отказ определённой цепи – отказ линии или двух цепей):

Для одной цепи:

$$\omega_1 = \omega_2 = \frac{\omega_{1-2}}{2}; \qquad \frac{\mu_{1-2}}{2} = \mu_1 = \mu_2. \tag{4.13}$$

Для двухцепной ВЛ:

$$\omega_{ВЛ} = \omega_{1,2} + \omega_{1-2}/2; \tag{4.14}$$

$$T_{вВЛ} = \frac{\omega_{1,2}T_{в1,2} + \omega_{1-2}T_{в1-2}/2}{\omega_{1,2} + \omega_{1,2}/2}; \tag{4.15}$$

$$\mu_{ВЛ} = \mu_{1,2} + \mu_{1-2}/2; \tag{4.16}$$

$$T_{рВЛ} = \frac{\mu_{1,2}T_{р1,2} + \mu_{1-2}T_{р1-2}/2}{\mu_{1,2} + \mu_{1-2}/2}. \tag{4.17}$$

Рассмотрим более детально ***третий вариант отказа ВЛ*** (отказ двух цепей – отказ линии). Здесь на рис.4.2 параллельно включённые блоки характеризуют возможные явления наложения отказа одной цепи на отказ (ремонт) второй цепи.

Поток отказов для схемы, состоящей из параллельно включённых блоков, учитывающей наложение отказов одной цепи на отказы (ремонты) другой, поток отказов составит величину:

$$\omega_{СХ} = \omega_1(\omega_2 T_{в1-2} + \mu_2 T_{р1-2}) + \omega_2(\omega_1 T_{в1-2} + \mu_1 T_{р1-2}). \tag{4.18}$$

Заменяя составляющие, (см. 4.13) после подстановки имеем:

$$\omega_{СХ} = \frac{\omega_{1-2}}{2}(\omega_{1-2}T_{в1-2} + \mu_{1-2}T_{р1-2}). \tag{4.19}$$

Среднее время восстановления для схемы из параллельных блоков:

$$T_{СХ} = \left\{\omega_1 T_{в1-2}\omega_2 T_{в1-2} + \gamma\left[\omega_1 T_{в1-2}\mu_2 T_{р1-2} + \omega_2 T_{в1-2}\mu_1 T_{р1-2}\right]\right\}\frac{1}{\omega_{СХ}}; \tag{4.20}$$

где γ – коэффициент, учитывающий наложение отказа одной цепи ВЛ на отказ или ремонт второй цепи.

Этот коэффициент (γ) определяется в зависимости от соотношения

$$a = \frac{T_{р\,1-2}}{T_{в1-2}}; \tag{4.21}$$

Если $a \le 1$, то $\gamma = 0{,}5$; а если $a > 1$, то имеем:

$$\gamma = \frac{T_{р1-2}/T_{в1-2} - 0{,}5}{T_{р1-2}/T_{в1-2}} = \frac{T_{р1-2} - 0{,}5T_{в1-2}}{T_{р1-2}}. \tag{4.22}$$

Исходя из симметрии блоков в схеме их параллельного соединения значение величины ($T_{СХ}$) после преобразований можно записать в виде:

$$T_{сх} = \frac{\omega_{1-2}T^2{}_{в1-2} + \mu_{1-2}T_{В1-2}T_{р1-2}}{2(\omega_{1-2}T_{в1-2} + \mu_{1-2}T_{р1-2})}. \tag{4.23}$$

где $T_{СХ}$ – среднее время восстановления для схемы из параллельных блоков.

Окончательно для третьего варианта отказа ВЛ (отказ двух цепей – отказ ВЛ), исходя из структурной схемы расчёта надёжности двух цепной линий, имеем следующие показатели надёжности:

$$\omega_{ВЛ} = \omega_{1,2} + \omega_{сх} = \omega_{1,2} + \frac{\omega_{1-2}}{2}(\omega_{1-2}T_{в1-2} + \mu_{1-2}T_{р1-2}); \quad (4.24)$$

$$T_{вВЛ} = \frac{\omega_{1,2}T_{в1,2} + \omega_{1-2}^2 T_{в1-2}^2 + \omega_{1-2}\mu_{1-2}T_{в1-2}T_{р1-2}}{\omega_{1,2} + \frac{\omega_{1-2}}{2}(\omega_{1-2}T_{в1-2} + \mu_{1-2}T_{р1-2})}; \quad (4.25)$$

$$\mu_{ВЛ} = \mu_{1,2}; \quad (4.26)$$

$$T_{рВЛ} = T_{Р1,2}. \quad (4.27)$$

где $\omega_{1,2}; \mu_{1,2}; T_{р1,2}; T_{в1,2}$ – показатели надёжности блока, эквивалентирующего одновременное отключение обеих цепей по одной причине.

Таким образом, оценка показаний надёжности двух цепных ЛЭП зависит от варианта использования этих линий в схеме электроснабжения потребителей или узла нагрузки и формулировки понятий «отказ двухцепной линии» и «преднамеренное отключение двухцепной линии». При этом меняется численное значение показателей надёжности двухцепной линии в зависимости от варианта её использования и эффективности применения двухцепной линии по сравнению с двумя такими же (U, L) одноцепными.

Рассматривая эффективность ВЛ как соотношение результатов и затрат, произведём её определение:

Расчёт эффективности двух цепной воздушной линии:

$$Э_{ВЛ} = \frac{К_{ТИ}8760}{К_{ВЛ}}. \quad (4.28)$$

где $К_{ТИ}$ – коэффициент технического использования двух цепной ВЛ, т.е. время нахождения в работоспособном состоянии относительно периода её эксплуатации; $К_{ВЛ}$ – капитальные вложения в данную линию ($К_{ТИ}$ 8760 = $Т_г$); $Т_г$ – общее суммарное время работы ВЛ в течение года.

$$К_{ТИ} = 1 - \omega_{ВЛ}T_{вВЛ} - \mu_{ВЛ}T_{рВЛ}. \quad (4.29)$$

где $\omega_{ВЛ}$ – параметр потока отказов двухцепной линии; $\mu_{ВЛ}$ – средняя периодичность преднамеренных отключений ВЛ; $Т_{ВВЛ}$ – среднее время восстановления двухцепной ВЛ; $Т_{РВЛ}$ – средняя продолжительность преднамеренных отключений.

В качестве примера приведём показатели надёжности и стоимости ВЛ 110 кВ, таблица 4.2:

Таблица 4.2

Тип ВЛ U = 110 кВ		Параметр потока отказов	$Т_В$	μ	$Т_Р$	$К_{ВЛ}$ (цены 1980г),
		ω, 1/год	ч	1/год	ч	тыс. руб/100 км
одноцепная ВЛ:		0,27	8,8	1,86	15,4	333
двухцепная ВЛ:	отключена одна цепь	0,35	6,9	3,2	14,8	507
	отключены две цепи	0,04	10,3	0,17	21,8	507

4.2. Надёжность ЛЭП с последовательно соединёнными элементами

Предполагая, что отказы ЛЭП и электрических сетей – независимы, получим основные формулы для расчёта надёжности комбинации двух элементов.

1. Если p_1 – надёжность одного элемента, p_2 – другого, то вероятность того, что оба будут работать безотказно в течение времени “t”:

$$p_{посл}(t) = p_1(t)p_2(t) = \exp[-\int_0^t \lambda_1 dt]\exp[-\int_0^t \lambda_2 dt]. \quad (4.30)$$

где λ_1, λ_2 – интенсивности отказов элементов, которые могут быть постоянными или переменными во времени; p_1, p_2 – вероятность отказов элементов ЛЭП.

2. Вероятность того, что один или оба элемента откажут:

$$q_{посл}(t) = q_1(t) + q_2(t) - q_1(t) + q_2(t) = 1 - P_1(t) + 1 - P_2(t) - [1 - P_1(t)][1 - P_2(t)] =$$
$$= 1 - P_1(t)P_2(t) = 1 - P_{посл}(t), \quad (4.31)$$

где q_1, q_2 – вероятность отказов элементов ЛЭП.

3. Вероятность того, что будут работать один или два элемента:

$$p_{парал}(t) = p_1(t) + p_2(t) - p_1(t)p_2(t) = \exp[-\int_0^t \lambda_1 dt] + \exp[-\int_0^t \lambda_2 dt] - \exp[-\int_0^t (\lambda_1 + \lambda_2)dt]. \quad (4.32)$$

4. Вероятность, что откажут оба элемента ЛЭП:

$$q_{парал}(t) = q_1(t)q_2(t) = [1 - p_1(t)][1 - p_2(t)] = 1 - p_1(t) - p_2(t) + p_1(t)p_2(t) = 1 - p_{парал}(t). \quad (4.33)$$

Случаи 1 и 2 – представляют противоположные события т.е. $p_{посл} + q_{посл} = 1$, поскольку противоположные события для безотказной работы двух элементов осуществляется тремя путями: отказывает один из элементов, либо оба вместе. Следовательно, величины «$p_{посл}$» и «$q_{посл}$» можно соответственно назвать надёжностью и ненадёжностью последовательного соединения элементов или последовательной системы. Это означает, что отказ любого элемента, приводит к отказу системы. Случаи 3 и 4 – противоположные события т.е. $p_{парал} + q_{парал} = 1$, т.к. противоположные события для двух отказавших систем – события, когда один или оба элемента работают безотказно. Величины «$p_{парал}$» и «$q_{парал}$» называются соответственно ***надёжностью и ненадёжностью параллельного соединения элементов или системы с постоянным резервом.*** Это означает, что если один элемент отказал, то существует другой элемент, который выполняет требуемую функцию. Параллельная система из двух элементов не отказывает при отказе одного элемента, если оставшийся удовлетворительно выполняет требуемую функцию.

Приведённые формулы используются при экспоненциальном и неэкспоненциальном распределении отказов элементов. В первом случае они упрощаются.

$$P_{посл}(t) = e^{-\lambda_1 t}e^{-\lambda_2 t} = e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t}; \quad (4.34)$$

$$q_{посл}(t) = 1 - e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t}; \quad (4.35)$$

$$P_{парал}(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t}; \quad (4.36)$$

$$q_{парал}(t) = (1 - e^{-\lambda_1 t})(1 - e^{-\lambda_2 t}). \quad (4.37)$$

ЛЭП и электрические сети обычно состоят из большого числа соединённых последовательно элементов или блоков. В некоторых случаях к заведомо малонадёжным элементам ЛЭП для повышения надёжности подключаются резервные элементы, иногда к целым группам элементов подключаются такие или же подобные группы, включаемые параллельно (например, групповое включение вентилей на подстанции ЛЭП постоянного тока). Такие параллельные соединения можно рассматривать как блоки, соединённые последовательно. Система отказывает, если отказывает такой блок в целом.

Для «n» элементов или блоков, соединённых последовательно, надёжность системы выражается формулой:

$$p_{посл} = p_1 p_2 p_3 ... p_n = \prod_{i=1}^{n} p_i = \prod_{i=1}^{n} (1 - q_i). \qquad (4.38)$$

Выражение (4.38) представляет закон произведения надёжности, где p_i – надёжность i-го элемента или блока в последовательном соединении.

Надёжность ЛЭП с параллельно соединёнными элементами.

Если имеется структурная схема надёжности с последовательным соединением элементов, когда отказ 1-го элемента вызывает отказ 2-го, затем 3-го и т.д., то имеем схему с последовательным соединением зависимых элементов (рис 4.3).

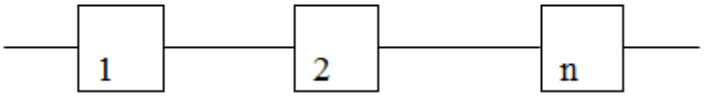


Рис 4.3

В этом случае, если «А»1 – событие, заключающееся в том, что система работает безотказно, а «A_i» (i = 1, 2 … n) – события состоящие в исправной работе элементов системы, то событие «А» имеет место, если имеют место события «A_i». Надёжность системы:

$$P(A) = [\prod_{i=1}^{n} P(A_i / A_{i-1} ... A_n)] P(A_n). \qquad (4.39)$$

Однако на практике отказ любого элемента – отказ системы. Вероятность безотказной работы, в этом случае, произведение вероятностей для независимых событий:

$$P(A) = \prod_{i=1}^{n} P(A_i). \qquad (4.40)$$

Так как произведение величин «q» есть намного меньше от сумм этих величин для отдельных элементов:

$$\sum_{i=1}^{i=n} q_i >> \prod_{i=1}^{i=n} q_i \qquad (4.41)$$

В упрощённых расчётах, для схемы с последовательным соединением элементов, можно принять:

$$q \cong \sum_{i=1}^{i=n} q_i \qquad (4.42)$$

Ошибка при этом упрощении не превышает несколько процентов. Коэффициент отказа (аварийности) «q» обычно для ЛЭП имеет величину: $q \le 0{,}01$.

4.3. Надёжность ЛЭП с параллельным соединением элементов

Для определения оптимальной надёжности ЛЭП и электрических сетей на стадии их проектирования приходится иногда дублировать отдельные элементы или цепи – использовать резервирование. На практике используют нагруженный (постоянно включённый) и не нагруженный (холодный) резервы. В последнем случае, когда работает элемент (цепь) имеется один или более резервных элементов (цепей), которые могут вступать в действия при отказе основного, рассмотрим ***надёжность ЛЭП при нагруженном резерве.***

Имеем для 2-х элементов: вероятность того, что будут работать один или два элемента:

$$p_{парал}(t) = p_1(t) + p_2(t) - p_1(t)p_2(t) = e^{-\int_0^t \lambda t_1} + e^{-\int_0^t \lambda_2 t} - e^{-\int_0^t (\lambda_1+\lambda_2)t}. \quad (4.43)$$

Вероятность, что откажут 2-а элемента:

$$q_{парал}(t) = q_1(t)q_2(t) = [1 - p_1(t)][1 - p_2(t)] = 1 - p_1(t) - p_2(t) + p_1(t)p_2(t) = \\ = 1 - p_{парал}(t). \quad (4.44)$$

Формулы (4.43) и (4.44) – представлены в пункте 4.3 предыдущей темы.

В экспоненциальном случае:

$$p_{парал}(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t}; \quad (4.45)$$

$$q_{парал}(t) = (1 - e^{-\lambda_1 t})(1 - e^{-\lambda_2 t}). \quad (4.46)$$

Обобщим эти формулы для общего случая:

Сформулируем правило для вычисления вероятности того, что из трёх событий A, B, C, имеющих вероятности P(A), P(B), P(C) выполняются либо A, либо B, либо C, либо любая комбинация этих трёх событий. Это правило запишется в виде:

$$P(A + B + C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A)P(B) - P(A)P(C) - P(B)P(C) + \\ + P(A)P(B)P(C). \quad (4.47)$$

Если события имеют одинаковую вероятность:

$$P(A) = P(B) = P(C) = P, \quad (4.48)$$

то

$$P(A + B + C) = 3P - 3P^2 + P^3. \quad (4.49)$$

Аналогично можно иметь формулы для четырёх и более событий.

Используя выражение (4.47) можно определить надёжность для трёх параллельно соединённых элементов, как вероятность того, что хотя бы один из элементов будет исправен:

$$p(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} + e^{-\lambda_3 t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_3)t} - e^{-(\lambda_2+\lambda_3)t} + e^{-(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)t}. \quad (4.50)$$

Если $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$:

$$p(t) = 3e^{-\lambda t} - 3e^{-2\lambda t} + e^{-3\lambda t}. \quad (4.51)$$

Аналогично определяется надёжность работы 4-х и более параллельных элементов.

Более просто определить величину «q(t)», а потом значение p(t) = 1 – q(t).

Вероятность отказа 2-х элементов $q = q_1q_2$; 3-х $q = q_1q_2q_3$, а “n” элементов:

$$q(t) = q_1(t)q_2(t)q_3(t)...q_n(t) = \prod_{i=1}^{n} q_i(t). \quad (4.52)$$

$$p(t) = 1 - q(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} q_i(t). \quad (4.53)$$

Если работающие параллельно элементы одинаковы по вероятности отказа, то:

$$q_{пар} = q^n; \; p_{пар} = 1 - q^n. \quad (4.54)$$

Для параллельной работы группы элементов:

$$p_{пар} = 1 - q_{пар} = 1 - q^n = 1 - (1 - p)^n, \quad (4.55)$$

где p – надёжность 1-го элемента, т.е. вероятность безотказной работы.

Если параллельно соединить “n” групп элементов, в каждой из которых “m” элементов работает последовательно (рис 4.4), то:

$$p_{пар} = 1 - (1 - \prod_{i=1}^{m} p_i)^n. \quad (4.56)$$

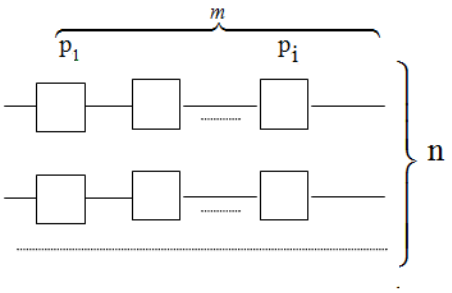


Рис. 4.4

Надёжность одной цепи из m последовательных элементов, из которых “в” элементов дублированы (рис 4.5):

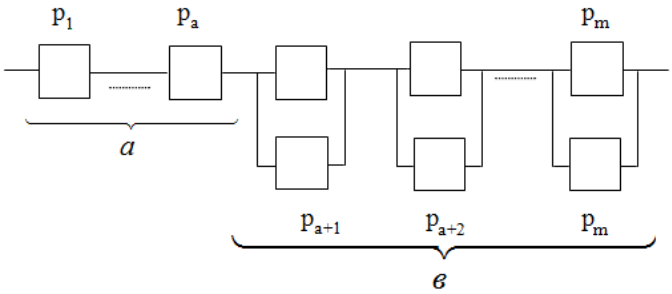


Рис 4.5

$$p = (\prod_{i=1}^{a} p_i) \prod_{j=1}^{b} [1 - (1 - p_j)^2]. \quad (4.57)$$

где P_j – надёжность i-го не резервированного элемента;

P_j – надёжность j-го резервированного элемента;

а – число не дублированных элементов (а = m = в);

m – число последовательно соединённых элементов;

в – количество элементов дублированное из «m».

Надёжность системы из двух параллельных цепей (рис. 4.6):

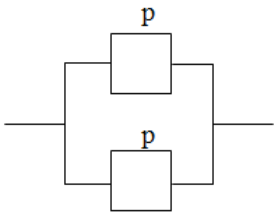


Рис. 4.6

$$p_{пар} = 1 - (1 - p)^2. \qquad (4.58)$$

где p – надёжность одной линии.

4.4. Надёжность ВЛ с параллельным соединением элементов при ненагруженном резерве

Здесь (рис. 4.7) дополнительный элемент вступает в действие при отказе основного. Резервные элементы – в отключённом состоянии. Для включения резервных элементов требуются контрольные приборы, обнаруживающие отказ и переключающие устройства для включения резервных элементов.

Расчёт надёжности в этом случае состоит в определении f(t) – функции плотности распределения отказов данной комбинации элементов в не натруженном резерве и вычислении надёжности системы путём интегрирования этой функции.

Для одного элемента при ненагруженном резерве (н.р.) имеем следующую величину показателя безотказной работы ($P_{нр}$):

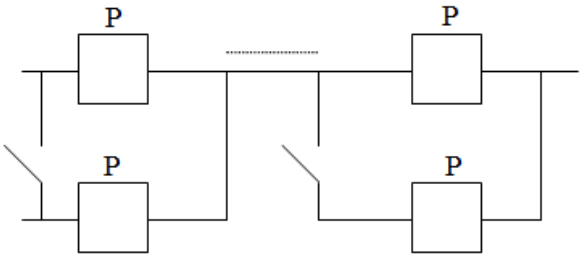


Рис 4.7

$$p_{н.р.} = \int_t^{\infty} f(t)dt. \qquad (4.59)$$

Вывод этого выражения состоит в следующем:

$$p_{н.р.} = \int_0^{\infty} f(t)dt - \int_0^{t} f(t)dt = \int_t^{\infty} f(t)dt);$$

так как $\int_0^{\infty} f(t)dt = 1.$

Определим функцию плотности отказов системы (f), состоящей из двух элементов или цепей с величинами интенсивностей отказа “λ_1” и “λ_2”, из которых ***одна цепь рабочая, одна – резервная.***

Допустим рабочий элемент отказывает во время «t_1», резервный сразу начинает работать. Момент отказа резервного элемента «$t_2 = t - t_1$», если время работы этого элемента «t_2» а «t» – время безотказной работы системы

отсчитывается от момента, когда первый элемент отказал; «t_1» и «t_2» – переменные величины. Тогда:

$$f_1(t_1) = \lambda_1 e^{-\lambda_1 t_1};\ f_2(t_2) = \lambda_2 e^{-\lambda_2 (t-t_1)}. \qquad (4.60)$$

Вывод:

$$p(t) = e^{-\lambda t};\ F(t) = 1 - e^{-\lambda t};\ f(t) = -\lambda(-e^{-\lambda t}) = \lambda e^{-\lambda t}.$$

Для первого элемента вероятность отказа на малом интервале dt есть "$\lambda_1 e^{-\lambda_1 t_1} dt$", для второго "$\lambda_2 e^{-\lambda_2 (t-t_1)} dt$".

Вероятность отказа системы на малом интервале от «t» до «t + dt» для системы с ненагруженным резервом:

$$q_{н.р.} = \lambda_1 \lambda_2 e^{-\lambda_1 t_1} e^{-\lambda_2 (t-t_1)}. \qquad (4.61)$$

Так как общая формула вероятности отказа элемента: $q(t) = F(t) = \int_0^t f(t)dt.$

Определим совместную плотность отказов “f(t)” системы из двух элементов, где 1-ый элемент основной; 2-ой – ненагруженный (резервный):

$$f(t) = \int_0^t f_1(t_1) f_2(t_2) dt_1 = \int_0^t f_1(t_1) f_2(t - t_1) dt_1 = \int_0^t \lambda_1 e^{-\lambda_1 t_1} \lambda_2 e^{-\lambda_2 (t-t_1)} dt_1 =$$

$$= \lambda_1 \lambda_2 \int_0^t e^{-\lambda_1 t_1 - \lambda_2 (t-t_1)} dt_1 = \lambda_2 \lambda_1 \int_0^t e^{-\lambda_1 t_1 - \lambda_2 t + \lambda_2 t_1)} dt_1 = \lambda_2 \lambda_1 \int_0^t e^{(\lambda_2 - \lambda_1) t_1 - \lambda_2 t} dt_1 =$$

$$= \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{-\lambda_2 t}^{-\lambda_1 t} e^x dx = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^x \Big|_{-\lambda_2 t}^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}).$$

(4.62)

Примечание: при выводе выражения введена переменная:

$(\lambda_2 - \lambda_1) t_1 - \lambda_2 t = x$; $d(\lambda_2 t) = d(const) = 0$; Так как время “t” – верхний предел интеграла, т.е. конкретное значение.

Выражение продифференцировано при допущениях: $(\lambda_2 - \lambda_1) dt_1 = dx$, следовательно, $dt_1 = \frac{dx}{\lambda_2 - \lambda_1}$; Пределы для новой переменной (x):

Нижний предел: если $t_1 = 0$, то $x = -\lambda_2 t$;

Верхний предел: если $t_1 = t$, то $x = (\lambda_2 - \lambda_1)t - \lambda_2 t = -\lambda_1 t$.

Для 3-х элементов (один рабочий, 2-а резервные) аналогично получаем:

$$f(t) = \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} f_1(t_1) f_2(t_2) f_3(t_3) dt_1 dt_2. \qquad (4.63)$$

где t_1 – момент отказа рабочего элемента; t_2 – момент отказа 2-го резервного элемента, отказывающего в момент времени $t > t_2$.

Вероятность безотказной работы для двух элементов при ненагруженном резерве составит следующее значение:

$$f(t) = \frac{dp(t)}{dt};\ dp(t) = -f(t)dt;\ \int dp(t) = -\int f(t)dt;\ p(t) = -\int f(t)dt;$$

$$p(t) = -\int \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2\lambda_1}(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})dt = -\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}[\int e^{-\lambda_1 t}dt - \int e^{-\lambda_2 t}dt] =$$

$$= -\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}[-\frac{1}{\lambda_1}\int e^{-\lambda_1 t}d(-\lambda_1 t) + \frac{1}{\lambda_2}\int e^{-\lambda_2 t}d(-\lambda_2 t) = -\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}[-\frac{1}{\lambda_1}e^{-\lambda_1 t} + \frac{1}{\lambda_2}e^{-\lambda_2 t}] =$$

$$= -\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_2\lambda_1} = \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1}. \qquad (4.64)$$

Среднее время безотказной работы системы из двух элементов при ненагруженном резерве:

$$T_{cp}(t) = \tau = \int_0^\infty p(t)dt = \int_0^\infty \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1}dt = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}\int_0^\infty e^{-\lambda_1 t}dt - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}\int_0^\infty e^{-\lambda_2 t}dt =$$

$$= \frac{-\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{\lambda_1}\int_0^\infty e^{-\lambda_1 t}d(-\lambda_1 t) + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{\lambda_2}\int_-^\infty e^{-\lambda_2 t}d(-\lambda_2 t) = -\frac{\lambda_2}{\lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)}e^{-\lambda_1 t}\Big|_0^\infty +$$

$$+ \frac{\lambda_1}{\lambda_2(\lambda_2 - \lambda_1)}e^{-\lambda_2 t}\Big|_0^\infty = -\frac{\lambda_2}{\lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)}(e^{-\infty} - e^0) + \frac{\lambda_1}{\lambda\ (\lambda\ - \lambda_1)}(e^{-\infty} - e^0) =$$

$$= \frac{\lambda_2}{\lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2(\lambda_2 - \lambda_1)} = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_2 + \lambda_1)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_2 - \lambda_1)} = -\frac{\lambda_2 + \lambda_1}{\lambda_1\lambda_2}. \qquad (4.65)$$

4.5. Надёжность сложных схем электроснабжения

Не все задачи сводятся к последовательным и параллельным системам .При проектировании электроснабжения энергетических систем могут быть более сложные комбинации элементов .

Пример: Расчёт схемы электроснабжения (рис. 4.8)

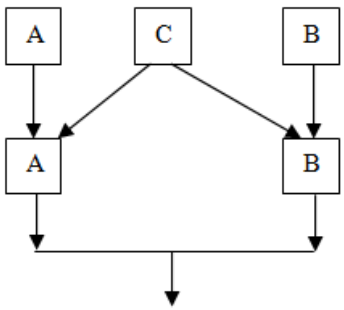


Рис. 4.8

Одинаковые цепи АА’, ВВ’ – включены параллельно. При работе даже одной из них отказов в электроснабжении нет. Если элементы А, В – недостаточно надёжны, вводим элемент С (источник электроснабжения), он снабжает А’ и В’ .Имеем комбинации: АА’, СА’, СВ’, ВВ’.

Для определения надёжности схемы используем ***теорему полной вероятности или теорему Байеса:***

Если А – событие, зависящее от одного из 2-х несовместимых событий – B_i или B_j, из которых хотя бы одно происходит, то вероятность появления события А:

$$P(A) = P(A/B_j)P(B_j) + P(A/B_j)P(B_j). \quad (4.66)$$

Переведём это на язык надёжности:

А – отказ системы; B_i, B_j – безотказная работа и отказ некоторого элемента, от которого зависит надёжность системы.

Правило: Вероятность отказа системы равна вероятности отказа системы при условии, что выделенный элемент исправен, умноженной на вероятность того, что этот элемент исправен плюс вероятность отказа системы при условии, что тот же элемент неисправен, умноженной на вероятность того, что этот элемент неисправен.

$$q_{сист} = q_{сист} \text{ (если «x» исправен) } p_x + q_{сист} \text{ (если «x» не исправен) } q_x; \quad (4.67)$$

$$P_{сист} = 1 - q_{сист}, \quad (4.68)$$

где $p_{сист}$ – надёжность системы, вероятность безотказной работы;

$q_{сист}$ – ненадёжность системы, вероятность отказа.

В нашем примере “x” – элемент С, тогда

6 4 4 4 7 а) 4 4 48 6 4 4 4 7 в) 4 4 48

$$q_{сист} = q_{сист} \text{ (если «C» исправен) } P_c + q_{сист} \text{ (если «C» не исправен) } q_c. \quad (4.69)$$

Для выражения (4.69)

а) отказ системы при одновременном отказе элементов системы $A^/$ и $B^/$, так как элементы системы $A^/$ и $B^/$ – параллельны имеем:

$$q_{сист} \text{ (если «C» исправен)} = (1 - p_A^/)(1 - p_B^/); \quad (4.70)$$

б) отказ элемента «С» имеет место при отказе параллельных цепей ($AA^/$ и $BB^/$):

$$q_{сист} \text{ (если C не исправен)} = (1 - p_A p_A^/)(1 - p_B p_B^/), \quad (4.71)$$

где первый сомножитель – вероятность отказа цепи ($q_{цепи}$), где элементы А и $A^/$ соединены последовательно; второй сомножитель – «$q_{цепи}$», где элементы В и $B^/$ соединены последовательно.

Вероятность отказа всей системы ($q_{сист}$) всей системы:

$$q_{сист} = (1 - P_A^/)(1 - P_B^/)P_C + (1 - P_A P_A^/)(1 - P_B P_B^/)(1 - P_C). \quad (4.72)$$

В более сложных расчётах надёжности правило (4.67) применяется в несколько этапов. Формула (4.67) – позволяет расчёт надёжности любых сложных систем.

Из формулы (4.67) получается правило расчёта надёжности последовательных и параллельных соединений элементов.

Пример 1: элементы с вероятностями безотказной работы p_1 и p_2 – соединены последовательно (рис. 4.9). Определить вероятность отказа системы. В качестве элемента “x” возьмём элемент с вероятностью безотказной работы «p_2»:

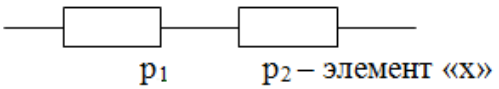


Рис 4.9

Таким образом элемент «x» – элемент с показателем надёжности «p_2». Воспользуемся правилом (4.67) для нашего случая:

$$q_{сист} = (1 - p_1)p_2 + 1(1 - p_2) = p_2 - p_1p_2 + 1 - p_2 = 1 - p_1p_2. \quad (4.73)$$

Примечание: Если не исправен второй элемент, т.е. отказ при этом системы. q = 1, т.к. элемент включён в схему последовательно, величине $1 - p_2$ –

вероятность того, что неисправен 2-ой элемент. Таким образом, надёжность системы:

$$p_{сист} = 1 - q_{сист} = p_1 p_2; \qquad (4.74)$$

Пример 2: Применяя выражение (4.67) для двух параллельных элементов (рис 4.10) определить вероятность отказа системы. В качестве элемента “x” возьмём элемент с вероятностью безотказной работы «p_2». Согласно выражению (4.67) определяем вероятность отказа системы:

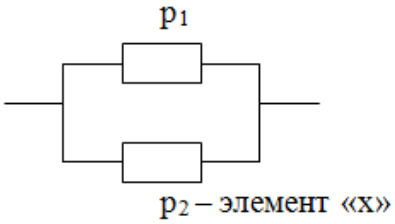


Рис. 4.10

$$q_{сист} = 0;\ P_2 + (1 - P_1)(1 - P_2) = 1 - P_1 - P_2 + P_1 P_2. \qquad (4.75)$$

Примечание: $q_{сист} = 0$, при $p_2 = x$; $q_{сист} = 1 - p_2$; при $q_2 = x$.

Надёжность системы:

$$p_{сист} = p_1 + p_2 - p_1 p_2 . \qquad (4.76)$$

4.7. Методы получения информации о надёжности ВЛ

Для исследования надёжности ВЛ 35…750 кВ требуется целый комплекс первичной информации. Её методы получения следующие:

- Испытание ВЛ на надёжность.
- Анализ математических и аналоговых моделей ВЛ.
- Расчет на основе данных о надёжности элементов ВЛ.
- Сбор и обработка статической информации об эксплуатации ВЛ.

Каждый метод имеет преимущества и недостатки по возможностям реализации и результатам.

- ***Испытания на надёжность*** применяются к энергетическому оборудованию и ВЛ. Имеются стандарты и методики проведения и обработки результатов. Недостатки – высокая стоимость оборудования, разнообразие режимов эксплуатации (трудно программу составить). Часто этот метод используется для выключателей, разъединителей, отделителей, короткозамыкателей, устройств автоматики и релейной защиты.
- ***Анализ математических и аналоговых моделей*** – используются для ВЛ. Преимущества – малые затраты и имитация широкого диапазона условий и режимов.

Расчёт на основе данных о надёжности элементов ВЛ 35…750 кВ – сложен т.к. плохо разработаны структурные модели для расчёта надёжности как системы.

- ***Сбор и обработка статической информации.*** Опыт её получения накоплен в Союзтехэнерго, ВНИИЭ, Энергосетьпроектом и рядом энергосистем. Имеется ряд нормативных и директивных документов по сбору и обработке данных о надёжности ВЛ. Источник информации – эксплуатационная статистика, учитывающая следующие особенности ВЛ:

♦ конструктивное разнообразие линий даже в пределах одного напряжения;

♦ неоднородность природно – климатических воздействий на ВЛ при высокой чувствительности к этим воздействиям;

♦ различия в сроках эксплуатации ВЛ на момент исследования;

♦ различия в методах и характеристиках эксплуатационного обслуживания ВЛ.

Для сбора данных о ВЛ выработаны специальные формы первичной информации, содержащие вопросы о их длине и конструктивном исполнении, введён порядок учёта аварий и отказов с использованием карт отказов, где отражаются:

♦ Режим работы до возникновения отказа;
♦ Обстоятельства и причина отказа;
♦ Работа защит, автоматики, сигнализации;
♦ Отключения других линий, ход восстановления эксплуатации;
♦ Описание повреждения. Причины отказа;
♦ Мероприятия по предотвращению подобных случаев.

Отказы ВЛ делятся на группы:

♦ Отказ ВЛ с повреждением оборудования;

♦ Отказ ВЛ без повреждения оборудования (схлёстывание проводов, перекрытие изоляции, планово – предупредительные ремонты);

♦ Повреждение оборудования без отказа ВЛ (обнаруживаются при обходах и ревизиях).

Карты отказов передаются в “Энергоуправление” в службу надёжности и безопасности.

4.8. Статические методы обработки информации о надёжности ВЛ и оборудования ЭС

4.8.1. Статическая оценка законов распределения отказов ВЛ и оборудования ЭС

Для решения теоретических и практических задач надёжности производственных ЭС и их элементов надо знать законы распределения их отказов. Они получаются посредством обобщения статического материала об отказах. Примем случайную величину (СВ) “Т” за время безотказной работы. За время эксплуатации восстанавливаемых элементов ЭС – «t» величина “Т” принимает “n” значений. Совокупность этих случайных значений величины – статическая выборка объёма “n”. Если значения СВ “Т” расположить в возрастающем (убывающем) порядке и указать относительно каждого как часто оно встречается, то имеем распределение СВ или вариационный ряд на основании которого определяем аналитическую форму неизвестной плотности вероятности $f(t) = \varphi(t)$ или функцию распределения $F(t)$.

Для построения вариационного ряда диапазон значений СВ “Т” разбиваем на интервалы. Подсчитываем количество значений «m» СВ Т, приходящейся на каждый интервал и определяем частоту её попадания в данный интервал:

$$P^* = \frac{m_i}{n}. \qquad (4.77)$$

где n – число наблюдений, объём выборки.

Вариационный (статический) ряд:

Таблица 4.3

Интервал	$t_1 - t_2$	$t_2 - t_3$	…	$t_k - t_{k+1}$
Частота	P_1^*	P_2^*	…	P_k^*

Оптимальная величина интервала:

$$\Delta t = \frac{t_{max} - t_{min}}{1 + 3{,}21 \cdot \lg n}. \quad (4.78)$$

где n – число единиц в совокупности (выборке); ($t_{max} - t_{min}$) – размах вариации СВТ.

Число интервалов:

$$K = \frac{t_{max} - t_{min}}{\Delta t}. \quad (4.79)$$

или проще:

$$\Delta t = \frac{t_{max} - t_{min}}{10}. \quad (4.80)$$

Большое значение имеет графический метод изображения вариационного ряда:

▪ ***Полигон распределения*** (многоугольник): по оси абсцисс откладываем интервалы значений СВ, в их серединах строим ординаты, пропорциональные частотам и концы ординат соединяем.

▪ ***Гистограмма распределения.*** Над каждым отрезком оси абсцисс, изображающем интервал значений СВ, строится прямоугольник, высота которого пропорциональна частотам интервала.

При уменьшении длины каждого интервала гистограмма приближается к некоторой плавной кривой, соответствующей плотности распределения величины “Т”. Таким образом, при построении гистограммы получаем представление о дифференциальном законе распределения СВТ.

▪ ***Статическая функция распределения*** $F^*(t)$ – частота событий $T < t$ в данной выборке:

$$F^*(t) = p^*(T < t). \quad (4.81)$$

где t – текущая переменная; p^* – частота или статическая вероятность события.

$$F^*(t_i) = n_i/n. \quad (4.82)$$

где n_i – число отказов, при которых $T < t$; n – число наблюдений.

Если Т – непрерывная величина, то при увеличении “n” (объёма выборки) $F^*(t)$ – интегральная функция распределения величины Т.

Таким образом, построение статической функции распределения $F^*(t)$ решает вопрос об установлении на основе экспериментальных данных ***закона распределения СВ.***

4.8.2. Подбор теоретического закона распределения СВ об отказах

Пользование $F^*(t)$ неудобно, таким образом, экспериментальные точки гистограммы колеблются около неизвестной кривой истинного распределения.

Для выяснения теоретического закона распределения СВ заданного F(t) или f(t) = φ(t) производится обработка статических данных. Выбирается аппроксимирующая функция f(t) = φ(t), которая согласуется с данными эксперимента $f_0(t) = f(t)$. Для оценки правдоподобия этого приближённого вероятностного равенства разработано несколько критериев согласия проверяемых гипотез относительно вида функции (аппроксимирующей и данных эксперимента) $f_0(t)$ и f(t).

Порядок применения критерия согласия:

▪Предположим, что СВТ (наработка до отказа), полученная в виде статического ряда подчинена некоторому закону распределения СВ, приписываемому F(t).

▪Для проверки справедливости гипотезы вводится случайная величина Δ – мера расхождения между теоретическим законом и статическим распределением.”Δ” может быть: а) максимальное отклонение $F^*(t)$ от F(t); б) сумма квадратов отклонений теоретических вероятностей попадания СВТ в i-ый интервал – P_i от соответствующих частот P_i^*.

▪Если гипотеза о том, что СВТ подчиняется закону распределения «F(t)» справедлива, то “Δ” будет определятся законом распределения СВ Т и числом ответов n. Это устанавливает согласие между теоретическим и статическим распределением, если известен закон распределения “Δ”.

Пример: Закон распределения “Δ” известен.

♦ В результате проведения эксперимента расхождения Δ = u;

♦ Выясняем Δ = u случайно за счётограничения числа отказов или из-за разницы между $F^*(t)$ и F(t). Для этого ***<u>вычисляем вероятность получения такого расхождения</u>*** при заданных F(t) и числе опытов «n». Это сводится к определению вероятности:

$$F(\Delta) = P(U \le \Delta). \tag{4.83}$$

Если вероятность – мала, то теоретическое распределение – неудачно. Если вероятность – значительна, закон распределения выбран удачно.

При некоторых способах выбора “Δ” закон её распределения может быть выбран теоретически, исходя из общих положений ТВ и при достаточно большом «n» не зависит от вида функции «F(t)», что облегчает применение критериев.

4.8.3. Критерии согласия для оценки надёжности элементов ЭС

▪***<u>Критерий “χ^2” К. Пирсона.</u>*** В качестве меры расхождения между опытным и теоретическим распределением берётся величина $\Delta = \chi^2$:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(P_i^* - P_i)^2}{P_i}. \tag{4.84}$$

где к – число интервалов статического ряда; $P_i = \frac{m_i}{n}$ – частота i-го интервала статического ряда; m_i – количество значений СВТ на интервал; n – объём статической выборки, общее количество опытов; P_i – теоретическая вероятность попадания СВТ в i-ый интервал.

При увеличении «n» закон распределения “Δ” приближается к “χ^2” распределению и не зависит от вида «F(t)» и числа испытаний «n», а определяется только числом разрядов “k” статического ряда.

Критерий А.Н. Колмогорова:

Опытное распределение практически согласуется с выбранным теоретическим, если выполняется условие:

$$D\sqrt{n_i} \le 1. \qquad (4.85)$$

где D – наибольшее отклонение экспериментальной кривой распределения от теоретической; n_i – общее число экспериментальных точек.

4.8.4. Доверительные интервалы при статистической оценке параметров надёжности

Статистическая оценка параметров надёжности тем ближе к истине, чем больше объём выборки. Только бесконечно большая выборка может дать 100 % уверенность, что оценка параметра совпадает с истинной. Понятия ”коэффициент доверия“, ”доверительная вероятность – обозначают вероятность, связывающую истинное значение параметра и его оценку. Когда оценка получена для большой выборки, истинное значение – справа от неё или слева. Поэтому лучше выражать статистическую оценку с помощью интервала с указанием вероятности (коэффициент доверия), что истинное значение – внутри его. При анализе статистических данных основные понятия – “доверительный уровень” и “ коэффициент доверия”. Эти истинные данные часто представляют “неточечными” оценками, а с помощью интервала с заданной ***доверительной вероятностью*** или ***коэффициент доверия*** “α”. Последний , выражает вероятность того , что истинное значение величины – внутри интервала. Границы интервала – доверительные границы. ***Уровень значимости*** – вероятность того, что значение искомой величины выйдет из границ интервала: $\beta = 1 - \alpha$. Часто $\alpha = 0{,}9;\ 0{,}95;\ 0{,}99$ и $\beta = 0{,}1;\ 0{,}05;\ 0{,}01$.

Коэффициент “α” характеризует степень достоверности результатов двухсторонней оценки параметра надёжности. Доверительные интервалы статических оценок параметров надёжности имеют нижнюю и верхнюю границы.

Пример: $T_{ср}$, $T^*_{ср}$ – среднее время безотказной работы; $T^*_{ср\ н}$ и $T^*_{ср\ в}$ – нижняя и верхняя границы доверительного интервала.

Величина $T^*_{ср}$ – находится между этими пределами.

Пример. Вычислены доверительные границы для вероятности безотказной работы p(t) элемента ЭС порядка 0,9. Это значит 90 % случаев истинное значение надёжности – в этих пределах, а в 10 % – вне этих границ.

4.9. Статические показатели надёжности совокупности воздушных линий

Важнейшим показателем надёжности ВЛ 35…750 кВ – параметр потока отказов, отказ/100 км год.

$$\omega_i = \frac{P_i 100}{L_i \Gamma_i}; \qquad (4.86)$$

где P_i – число отказов i –ой ВЛ; L_i – длина линии, км; Γ_i – период эксплуатации ВЛ, лет.

Параметр потока отказов (среднее значение) ВЛ данного типа определяется на основе оценок параметра “ω_i” ВЛ, входящих в совокупность:

$$\omega_i = \frac{\sum_{i=1}^{в} \omega_i L_i \Gamma_i}{\sum_{i=1}^{m} L_i \Gamma_i}; \qquad (4.87)$$

где в – число отключаемых линий, входящих в совокупность ВЛ данного вида.

Для ориентировочных расчётов надёжности в выборку могут быть объединены ВЛ одного напряжения любого материала и типа опор.

4.10. Обработка исходных статических данных воздушных линий по разнородной информации

Цель: определение комплексной величины надёжности.

Сбор и предварительную обработку информации от отказа ВЛ по располагаемым “К” источникам сводим в систему данных.

№ источника информации	число ВЛ	протяжённость всех ВЛ	параметры потока отказов	среднеквадратичные отклонения
1	m_1	L_1	ω_1	$\sigma[\omega]$
2	m_2	L_2	ω_2	$\sigma[\omega]$
……..	……..	……..	……	…….
к	m_k	L_k	ω_k	$\sigma[\omega]$

Для оценки характера расхождения между математическими ожиданиями параметров потоков отказов ВЛ используем критерий Ван-дер-Вардена.

$$\left|\omega_j - \omega_i\right| \le \alpha\sqrt{D[\omega]}. \qquad (4.88)$$

где ω_j – параметр потока отказов ВЛ по информации j-го источника; ω_i – параметр потока отказов ВЛ по информации i-го источника; $D[\omega]$ – дисперсия математического ожидания “ω” ВЛ; α – критический коэффициент, определяющий доверительную вероятность оценки характера расхождения между статическими характеристиками по каждому источнику информации.

4.11. Анализ отключений ВЛ 35…750 кВ

Анализ состоит из двух этапов:

1. Для автоматических устойчивых отключений.
2. Для преднамеренных отключений.

Проанализируем эти этапы:

Первый этап вызывают сильные изменения режима ЭС (вплоть до «развала»).

Для его наступления достаточно отказа одного основного элемента ВЛ. Анализ требует оценки характеристик отключений как функции от эксплуатационных факторов ВЛ с учётом их конструктивных особенностей. Как исходная информация для изучения надёжности здесь требуется:

- данные об отключениях (причины, время, длительность)
- паспортные данные ВЛ (конструктивные особенности, год ввода и т.п.)

▪ характеристики ПЭС (объём сетей, количество машин, численность персонала, информация о климатическом районе).

Важнейший показатель для оценки надёжности: средний параметр потока отключений $\omega_{ВЛ}$ (отк/год) выражается уравнением регрессии:

$$\omega_{ВЛ} = \omega_0 + \omega_L L;$$

где ω_0 – составляющая ВЛ, не зависящая от длины ВЛ $L_{ВЛ}$, отк/год;

ω_L – составляющая среднего значения потока отказов «ω» на единицу длинны ВЛ, отк/(год км).

Для оценки показателей «ω_0» и «ω_L» по статистическим данным используются уравнения:

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}; \qquad \omega_0 = \bar{y} - \omega_0; \tag{4.89}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i; \quad \bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i; \tag{4.90}$$

где x_i – длина i-й ВЛ; y_i – число отказов i-й ВЛ в год; n – число ВЛ.

Для планирования ремонтных работ на ВЛ, организация бригад, управление аварийными запасами материалов необходима информация об изменении характеристик автоматического устойчивого отключения ВЛ в зависимости от сезона года и интервала времени суток (0-8, 8-16, 16-24 часов).

Изменение времени восстановления ($T_в$) по сезонам и времени суток можно объяснить на основе анализа его составляющих:

$$100 \sim 12\% \;\; 43\% \; 39\% \; 6\%$$

$$T_в = T_{в,п} + T_{в,д} + T_{в,р} + T_{в,в} \tag{4.91}$$

где $T_{в,п}$ – время на поиск и локализацию места повреждения ВЛ; $T_{в,д}$ – время на организацию аварийно-ремонтного персонала, доставку бригады и материалов к месту работы; $T_{в,р}$ – время на выполнение ремонтно восстановительных операций; $T_{в,в}$ – время на включение ВЛ под напряжение.

Коэффициент ремонтопригодности ВЛ (характеризует уровень организации ремонтно восстановительных работ в ПЭС):

$$К_{Р.П.} = \frac{T_{в,р}}{T_{в,п} + T_{в,д} + T_{в,р} + T_{в,в}}. \tag{4.92}$$

Анализ причин автоматических устойчивых отключений ВЛ:

▪ климатические воздействия – 38% (грозовые перенапряжения, гололёдные и ветровые перенапряжения, наводнения и т.п.);

▪ дефекты эксплуатации – 9%;

▪ посторонние воздействия – 22%;

▪ дефекты монтажа и конструкции – 4%;

▪ невыясненные причины – 2%.

В таблице 4.5 приведена статистика отказов по их распределению между элементами ВЛ (США, ФРГ), %:

Таблица 4.5

		США	ФРГ
1.	Опоры	29	16
2.	Провода	21	34
3.	Тросы	4	1
4.	Гирлянды изоляторов	30	37
5.	Арматура и соединители	8	4
	Всего:	100	100

Второй этап анализа отключений ВЛ 35…750 кВ – преднамеренные отключения. Их число на порядок выше числа отказов ВЛ. Преднамеренные отключения ВЛ применяются в следующих случаях:

- проведение ремонтов и технического обслуживания;
- реконструкции сложного оборудования ЛЭП (шин, трансформаторов, коммутационных аппаратов);
- реконструкции ВЛ (изменение типа опор, марки провода, трассы и т.п.);
- по заявкам организаций (работы в зоне ВЛ).

Во всех случаях имеем интервал времени между решением и моментом отключения. Преднамеренные отключения ВЛ создают большой объём работ и существенно влияют на их надёжность. Их учёт необходим по следующим причинам:

- необходимость повышения надёжности и качества монтажа ВЛ;
- управления работой ПЭС;
- повышения надёжности электрической сети.

Поток преднамеренных отключений имеет две составляющие:

$\omega_п$ – плановых отключений и $\omega_{вп}$ – внеплановых отключений.

Плановые отключения служат для ремонтов и реконструкции ВЛ и смежного оборудования по заявкам организаций. Поток плановых отключений – детерминированный, но поток восстановлений ВЛ – случайный (погодные условия, диспетчерские факторы управления и т.д.). Сумма этих двух потоков представляет новый случайный поток отказов. Параметры потоков отказов ВЛ оцениваем с помощью математической статистики.

Обработка первичной информации методами математической статистики даёт оценку 2-ух основных показателей: среднюю периодичность преднамеренных отключений в год ВЛ определённого типа (μ_0) и среднюю продолжительность преднамеренных отключений ВЛ в год на единицу длины (μ_L), т.е.

$$\mu = \mu_0 + \mu_L L. \qquad (4.93)$$

где L – длина ВЛ.

Практика показала, что величиной «μ_L» на ВЛ 35…750 кВ можно пренебречь. Составлены таблицы средней периодичности (μ) и продолжительности ($T_р$ – время ремонта) преднамеренных отключений, которые являются функцией от материала опор, типа опор, видов преднамеренных отключений. (Таблица 4.6, 4.7).

1) Таблица 4.6

U, кВ	35	110	22	33	500
μ	1,25	2,3	2,31	2,43	1,48
U, кВ	35	110	22	33	500
$T_р$, ч	17,9	14,3	16,8	17,6	19,0

2) Таблица 4.6

U, кВ	Для ремонта смежного оборудования		Для реконструкции		По заявкам организаций	
	μ	$T_{ср}$, ч	μ	$T_{ср}$, ч	μ	$T_{ср}$, ч
35	0,8	8,2	0,2	17,7	0,3	18
110	1,1	11,1	0,3	23,6	0,4	18,4
220	0,8	21	0,2	15,5	03	14,5
330	0,6	17,7	0,1	27,5	0,2	29,5
500	0,6	21,6	0,3	47	0,3	11,3

Использование характеристик ремонтопригодности ВЛ в расчётах надёжности электрических сетей требует сведений о «М» (математическом ожидании) и «σ» (среднеквадратичном отклонении), а также о законах их распределения. Практика показала, что рационально здесь использовать закон Вейбула-Гнеденко:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{m} N_i}{\sum_{i=1}^{m} K_i \Gamma_i}; \qquad (4.94)$$

где m – число ПЭС по которым собрана информация; N_i – число преднамеренных отключений ВЛ в ПЭС; Γ_i – число лет, по которым есть информация по данному ПЭС.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} (M - \frac{N_i}{K_i \Gamma_i})}{\sum_{i=1}^{m} K_i - 1}}. \qquad (4.95)$$

4.12. Отключения и повреждения ВЛ 35…750 кВ в Минэнерго РБ

В таблице 4.7 приводится анализ отключений и повреждений на примере данных Минэнерго РБ в 1995г.

Таблица 4.7

Напряжения ВЛ, кВ / Показатели анализа надёжности	35	110	220	330	Итого:
1. Протяжённость ВЛ (км)	12006	15597	2280	3616	36410
2. Количество автоматических отключений (шт)	293	841	86	42	1262
3. Отключения с успешным АПВ (шт)	127	672	81	34	944
4. Отключение с повреждением элементов ВЛ (шт)	47	59	4	1	111
5. Отключения на 100 км (шт)	2,4	5,3	3,8	1,2	3,6
Причины отключения: 6. Атмосферные воздействия (шт)	138	304	48	5	495
7. Посторонние воздействия (шт)	27	128	7	11	173
8. Изменение материала в процессе эксплуатации	3	5	1	-	9
9. Дефект конструкции	3	3	-	-	6
10. Работа оборудования ПС и ложная работа РЗА	8	43	3	1	55
11. Прочие причины	15	171	17	9	212
12. Причины не установлены	74	130	12	16	332

В статистических данных для анализа надёжности имеются также удельные показатели автоматических отключений и повреждений ВЛ 35…750 кВ энергосистем РБ на 100 км погодам (таблицы 4.8, 4.9)

Таблица 4.8

№	Показатели	Минскэнерго – 1995 г.				
		35 кВ	110 кВ	220 кВ	330 кВ	35…750 кВ
1	Всего	1,93	6,95	4,1	0,84	4,12
2	Устойчивых	1,58	1,09	0	0	0,99
3	С повреждением элементов	0,35	0,57	0	0,37	0,37

Таблица 4.9

№	Показатели	Минскэнерго – 1995 г.				
		35 кВ	110 кВ	220 кВ	330 кВ	35…750 кВ
1	Всего	2,24	5,27	3,77	1,16	3,65
2	Устойчивых	1,33	0,87	0,22	0,08	0,88
3	С повреждением элементов	0,35	0,4	0,17	0,03	0,32

В энергосистемах РБ также ведётся анализ аварийных отключений и повреждений ВЛ 35…750 кВ. В таблице 4.10 приводятся сводные показатели количества отключений ВЛ и их причин по Минэнерго РБ.

Таблица 4.10

Минэнерго – 1995 г.		U, кВ	35…750	35	110	220	330
1. Устойчивых отключений ВЛ			313	166	169	5	3
2. Повреждено элементов ВЛ			111	47	59	4	1
В том числе: опор	металлических		1	-	1	-	-
	ж/б		1	-	-	1	-
Изоляторов, мест			29	11	14	3	1
Проводов, мест			66	34	32	-	-
Грозозащитный трос, мест			10	1	9		
Линейная арматура, мест			5	1	4	-	-
3. Среднее время аварийного отключения, час			5	4-50	4-12	6-10	1-25

4.13. Статистика повреждений элементов ЭС в распределительных сетях

Число повреждений в распределительных сетях (РС) зависит от конструкции линий, срока их службы и уровня эксплуатации. Данные о повреждениях в воздушных РС в год на примере распределительной сети имеющей хороший уровень эксплуатации.

Повреждения в сети ВН за год:

▪Устойчивые повреждения на 100 км линий δ, в том числе: изоляторов – 1,5; проводов 0,25; опор – 1,5 ÷ 2; разъединителей – 1.

▪Повреждения на 100 трансформаторных пунктов – 5, в том числе: трансформаторов – 2,25; вентильных разрядников – 0,8; перегорание фаз предохранителей ВН на 100 км линий – 0,1.

Повреждения в сети НН за год:

▪устойчивые повреждения на 100 км линий – 13;

▪ повреждения на 100 трансформаторных пунктов – 80;
▪ повреждения, устраняемые заменой предохранителей – 40;
▪ повреждения на 100 км линий – 23,1:
♦ опор (в бурю) – 48;
♦ установок НН (на 100 ТП) – 80.

Для ликвидации одного повреждения транспорт проходит в среднем 73 км.

Распределение повреждений в РС.

Повреждения вызванные:

• природными воздействиями 35÷50;
• деятельностью людей – 25 ÷ 35.

Повреждения:

♦ на линиях – 75;
♦ в ТП – 7,4;
♦ у абонентов – 17,6.

Повреждения:

▪ в сильную бурю – 33;
▪ проводов – 22;
▪ изоляторов – 19;
▪ крюков изоляторов – 8.

Зависимость относительного числа повреждений (%) по дням недели представлена на рис. 4.11. В таблице 4.11 приведены зависимости числа повреждений в РС по месяцам и часам суток.

Таблица 4.11

Месяцы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Число повреждений	8,5	4	4	4,5	11,8	12	14,3	14,5	6	7,5	4	8,5
Часы суток	3	6	9	12	15	18	21	24				
Число повреждений	5	2	13	22	18	17,8	11,6	4,5				

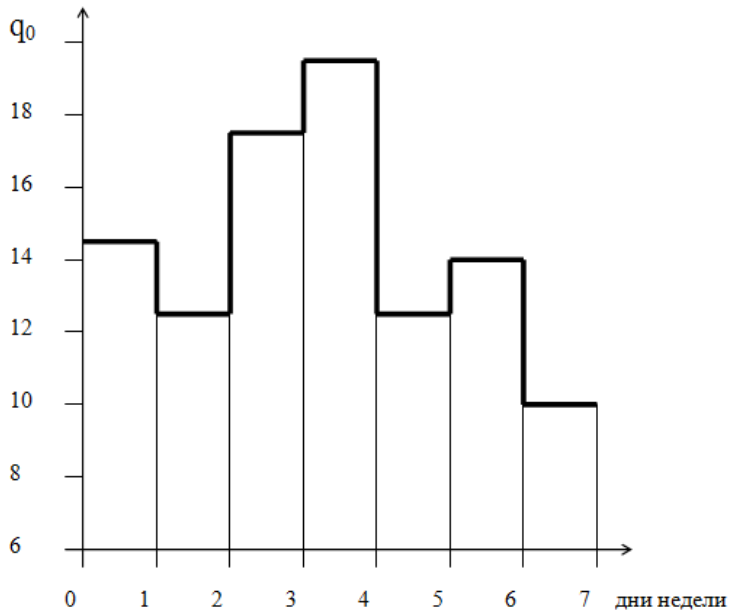


Рис. 4.11

4.14. Причины отказов основных элементов ЭС

ЛЭП наиболее часто повреждаемые ЭС из-за территориальной рассредоточенности и подверженности влиянию внешних неблагоприятных условий окружающей среды.

Причины повреждения ЛЭП:

- гололёдно-ветровые нагрузки;
- перекрытие изоляции вследствие грозовых разрядов;
- повреждение опор и проводов автотранспортом и другими механизмами;
- дефекты изготовления опор, проводов, изоляторов;
- перекрытие изоляции из-за птиц;
- несоответствие опор, проводов, изоляторов климату;
- неправильный монтаж опор и проводов, не соблюдение сроков ремонта и замены оборудования.

Эти причины приводят в основном:

- к ослаблению или нарушению механической прочности опор, проводов, изоляторов;
- поломке деталей опор;
- коррозии и гниению металлических и деревянных частей;
- из ЛЭП из-за вибрации, «пляски» и обрыва проводов.

Причины отказов кабельных ЛЭП:

- нарушение механической прочности землеройными машинами и механизмами (до 70 % всех повреждений);
- электрические пробои в кабельных муфтах и на концевых воронках;
- старение и износ изоляции;
- попадание влаги в кабельную линию;
- коррозия металлических частей.

Причины отказов силовых трансформаторов:

- нарушение изоляции обмоток из-за внешних и внутренних перенапряжений, сквозных токов к.з., дефектов изготовления, старение вследствие перегрузок;
- повреждение устройств, регулирующих напряжение;
- повреждение контактных соединений;
- повреждение вводов трансформаторов из-за перекрытия изоляции;
- понижение уровня масла.

Коммутационные аппараты (выключатели, отделители с короткозамыкателями, автоматы, разъединители, рубильники):

- несрабатывание приводов;
- обгорание контактов;
- износ дугогасительных камер;
- перекрытие изоляции при перенапряжениях;
- отказы из-за повреждения подшипников и подпятников;
- некачественный монтаж и ремонт (например: отказы выключателей из-за плохой регулировки передаточных механизмов и приводов);
- неудовлетворительная эксплуатация (например: плохой уход за контактными соединениями, что приводит к их перегреву, разрыву цепи рабочего тока и к.з.);

- дефекты конструкций и технологии изготовления (заводские дефекты);
- старение и износ изоляции;
- грозовые и коммутационные перенапряжения. При этом повреждается изоляция трансформаторов, выключателей, разъединителей;
- чрезмерное загрязнение и увлажнение изоляции;
- однофазные к.з. на землю в сетях 6…35 кВ сопровождаются горением заземляющих дуг (вследствие недостаточной компенсации ёмкостных токов) и приводят к перенапряжениям пробоям изоляции электрических машин, а воздействие заземляющих дуг к разрушению изоляторов, расплавлению шин, выгоранию цепей вторичной коммутации в ячейках КРУ;
- ошибочные действия персонала при выполнении переключений.

Отказы устройств релейной защиты, автоматики, аппаратуры, вторичной коммуникации:

- неисправность электрических и механических частей реле;
- нарушения контактных соединений;
- обрывы жил контрольных кабелей и цепей управления;
- неправильный выбор или несвоевременное изменение уставок и характеристик реле;
- ошибки монтажа и дефекты в схемах релейной защиты и автоматики;
- неправильные действия персонала при обслуживании устройств релейной защиты и автоматики.

4.15. Модель внезапного отказа на примере кабельной линии с.н.

70 % отказов кабельных линий – случайные механические повреждения. Рассмотрим описание времени безотказной работы кабельной линии. Особенности работы линии:

- механическая нагрузка – постоянна;
- отказ – следствие внешнего воздействия. Эти воздействия независимы, и возникают в случайные моменты времени.

Запишем вероятность превышения максимальной прочности кабельной линии в к-ом интервале, при условии деления периода работы кабеля (0,t) на интервалы (Δt_i, i = 1,2…n):

$$P'_{AK} = P(B_1)P(B_2)...P(B_{K-1})P(A_K) = \alpha_K \prod_{i=1}^{K-1}(1-\alpha_\gamma); \qquad (4.96)$$

где α_γ – вероятность превышения механической нагрузки кабеля в i-м интервале; α_K – вероятность превышения прочности кабеля в «к» интервале; B_i – событие не появления пиковой нагрузки в интервале «i»; A_K – событие появления пиковой нагрузки в интервале «к».

При постоянных условиях эксплуатации кабеля: $\alpha_\gamma = \alpha_j = \alpha_K = \alpha$, $i = 1,2,...n$.

Вероятность того, что время безотказной работы кабеля равно (К = 1) интервалов:

$$P'_{AK} = (1-\alpha)^{K-2}\alpha. \qquad (4.97)$$

Для получения функции распределения времени безотказной работы, выраженной в числе интервалов времени, суммируем вероятности появления отказов, начиная с первого интервала: P(t < T = K)

$$P(t < T = K) = \alpha\sum_{i=1}^{K}(1-\alpha)^{i} = 1-(1-\alpha)^{K}. \quad (4.98)$$

С достаточной точностью можно заметить $(1-\alpha)^{K}$ *на* $e^{-k\alpha}$:

$$P(t < T) = q(t) = 1 - 1^{-K\alpha}. \quad (4.99)$$

Переходя к непрерывному аргументу времени:

$$q(t) = 1 - 1^{-\lambda t}. \quad (4.100)$$

где λ – параметр распределения – среднее число повреждений (отказов) в единицу времени.

Плотность вероятности случайной величины:

$$f(t) = q^{/}(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (4.101)$$

Среднее время безотказной работы при схеме внезапных отказов и показательном времени распределения между отказами:

$$\tau = \bar{T} = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t}dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (4.102)$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-\int_0^t f(t)dt} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{1-\int_0^t \lambda e^{-\lambda t}dt} = \lambda. \quad (4.103)$$

4.16. Расчёт надёжности электрической сети по недоотпуску электроэнергии

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

Исходные данные для анализа надёжности схем электрической сети:

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

При анализе учитываются следующие показатели надёжности и плановых ремонтов:

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

Во многих справочниках $T_В$,$T_п$ – даётся в часах, что понятно, но усложняет расчётные формулы. Для определения ущерба «У» при сравнении вариантов схемы сети будем учитывать только линии электропередачи, которые наименее надёжный элемент сети. В таблице 4.12 приводятся значения показателей надёжности и плановых ремонтов ЛЭП.

Таблица 4.12

Элементы сети	Показатель надёжности	Номинальное напряжение ВЛ, кВ				
		500	330	220	110	35
Одноцепные воздушные линии	$\omega_В$, отказ/год	0,4	0,5	0,6	1,1	1,4
	$T_В$, 10^{-3}, лет/отказ	1,7	1,3	1,1	1,0	1,0
	$\omega_п$, простой/год	10	12	13	15	9
	$K_п$ 10^{-3}, о.е.	12	9	7	5	4
Двухцепные воздушные линии (отказ цепи)	$\omega'_В$, отказ/год	-	-	0,5	0,9	1,1
	$T'_В$, 10^{-3}, лет/отказ	-	-	0,2	0,4	0,8
	$\omega'_п$, простой/год	10	12	13	15	9
	$K'_п$ 10^{-3}, о.е.	12	9	7	5	4
Двухцепные (отказ двух цепей)	$\omega''_В$, отказ/год	-	-	0,1	0,2	0,3
	$T''_В$, 10^{-3}, лет/отказ	-	-	4,0	3,0	2,5

В таблице 4.12 значение “$\omega_в$” даётся на 100 км длины линии. Для конкретной длины линии:

$$\omega_В = \omega_В l /100.$$

Вместо показателя “$T_п$” (план простоя) приводится значение “$K_п$” (коэффициент планового простоя) т.к. последний показатель в расчётных формулах используется чаще. Для двухцепных линий при отказе двух цепей показатели $\omega_п$, $K_п$ не приводятся так как две цепи одновременно не ремонтируются. К характеристикам нагрузки относятся: параметры нагрузки $T_{мах}$, $P_{мах}$, взятые для максимального режима, а также расчётные годовые удельные ущербы от аварийных и плановых ограничений питания.

Для разной структуры нагрузки (таблица 4.12), на рис. 4.12 представлены зависимости удельных ущербов при аварийных и плановых ограничениях питания.

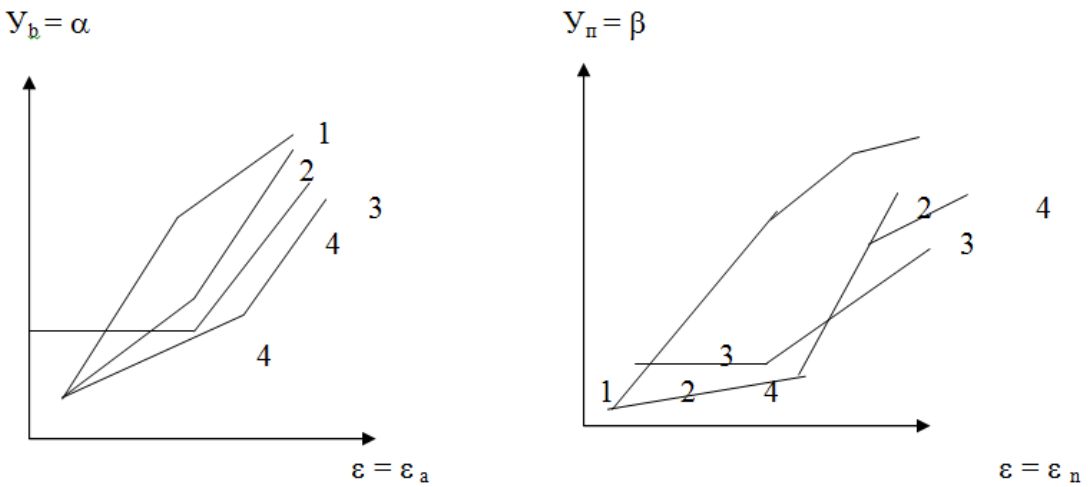


Рис. 4.12

Для рис. 4.12 имеем по координатам:

▪ $У_{b1}$= α – удельный ущерб при аварийных ограничениях (индекс “b” – время вынужденного простоя);

▪ $У_п$= β – удельный ущерб при плановых ограничениях питания (индекс “n” – время планового простоя);

▪ $ε_a$, $ε_n$ – коэффициенты ограничения нагрузки потребителя при аварийном и плановых ремонтах.

Показатель «ε» – степень ограничения потребителей по активной мощности:

$$ε = \frac{P_{отк}}{P_{мах}}. \text{ (о.е.)} \qquad (4.104)$$

где $P_{отк}$ – отключаемая мощность при ограничении нагрузки.

Таблица 4.13

Структура нагрузки (на рис 4.12)	1	2	3	4
промышленность %	15	70	10	35
сельское хозяйство %	5	-	55	30
быт и сфера обслуживания %	50	25	25	25
транспорт и строительство %	20	5	10	10

К характеристикам источников питания принадлежат: установленная мощность электростанции; резерв мощности ЭС, который может быть передан в сеть через районную подстанцию. Как было отмечено, недоотпуск электроэнергии возникает при ограничениях и перерывах (ε = 1) в электропотреблении потребителей. Со всех видов ограничения потребления будем учитывать только ограничения при разделе источников питания. Этот вид ограничений – наиболее типичен для разрабатываемых в проекте простой структуры схем сети, запитанных от двух источников.

Перерывы электроснабжения. Рассматривается каждый потребитель по формуле:

$$У_i = У_{вi} + У_{пi}. \qquad (4.105)$$

где $У_{вi}$ – ущерб потребителей от простоя в результате аварии; $У_{пi}$ – ущерб от простоя при плановых ремонтах.

При полном ограничении питания потребителей имеем:

$$У_i = P_{max}(α_{ε=1} K_{вi} + β_{ε=1} K_{пi}), \qquad (4.106)$$

где $K_{вi}$ – коэффициент вынужденного простоя, $K_{вi} = ω_в T_в$;

$K_{пi}$ – коэффициент планового простоя, $K_{пi} = ω_п T_п$;

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

В случае частичного ограничения питания потребителей ущерб составит величину:

$$У_i = P_{max}(αε_в K_{вi} + βε_п K_{пi}), \qquad (4.107)$$

$ε_в = P_{вотк}/P_{max}$; $ε_п = P_{п.отк}/P_{мах}$;

α – удельный ущерб от аварийных отключений питания потребителя;

β – удельный ущерб от плановых отключений питания;

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

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

$$У = \sum_{i=1}^{n} У_i. \qquad (4.108)$$

Показатели надёжности $К_{вi}$, $К_{пi}$ рассчитываются на основе преобразования расчётной схемы надёжности i-го потребителя. В схеме надёжности каждая линия отображается блоком и задаётся показателями $Т_в$, $К_п$, $\omega_п$. Учитываются только те линии, которые связывают данный потребитель с источниками питания. Источники питания считаются бесконечной мощности и закорачиваются в одном узле.

Двухцепные линии 35…220 кВ замещаются тремя блоками. Два параллельных блока учитывают отказы отдельных линий и задаются показателями $Т_в'$, $Т_п$, $\omega_в'$, $\omega_п$. Последовательный блок учитывает одновременно отказ двух линий и задаётся показателями $\omega_в''$, $Т_в''$.

Двухцепные линии 330…750 кВ учитываются двумя независимыми блоками с показателями $Т_в$, $Т_п$, $\omega_в$, $\omega_п$ значения которых берутся как для одноцепных линий.

Преобразования (упрощения) расчётных схем выполняются на основе эквивалентирования (расчёта эквивалентных показателей надёжности) последовательно и параллельно соединяемых блоков. Процесс преобразований схемы сводится к получению результирующего блока, показатели надёжности и плановых ремонтов которого совпадают с показателями надёжности электроснабжения потребителя, для которого составлялась схема. Эти показатели используются для определения ущербов по формуле (4.107). Параллельно соединённые элементы сети обеспечивают высокую степень надёжности и в ряде случаев могут не учитывать при определении ущерба от недоотпуска энергии.

Пример 1. Составить структурную схему надёжности относительно узла “П”.

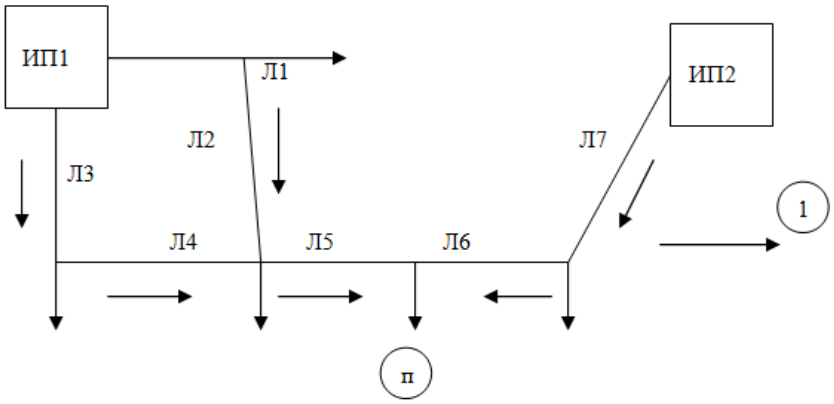


Рис. 4.13

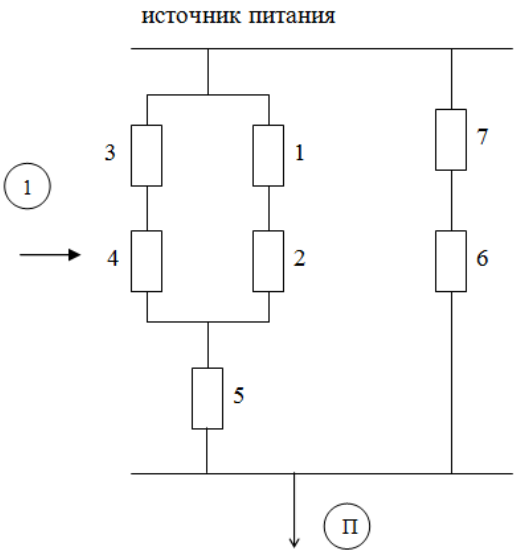


Рис. 4.14

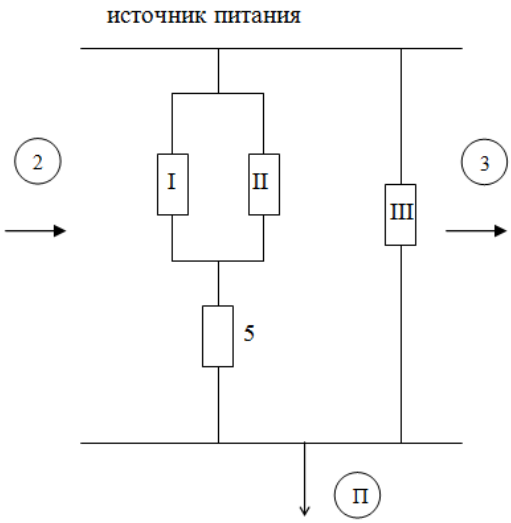


Рис. 4.15

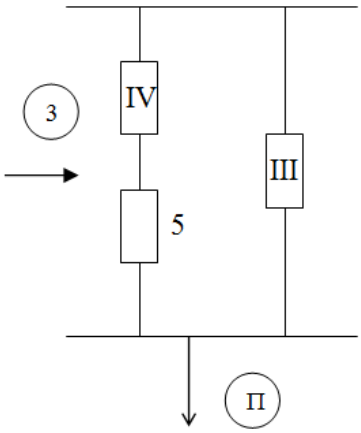


Рис. 4.16

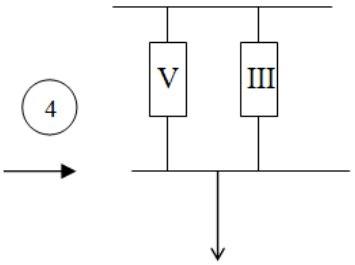


Рис. 4.17

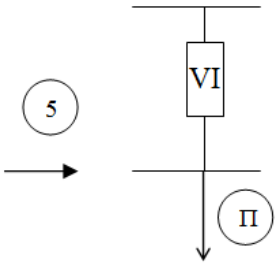


Рис. 4.18

Пример 2. Составить структурную схему надёжности относительно узлов П1 и П2. Решение задачи представлено на рис. 4.20, 4.21.

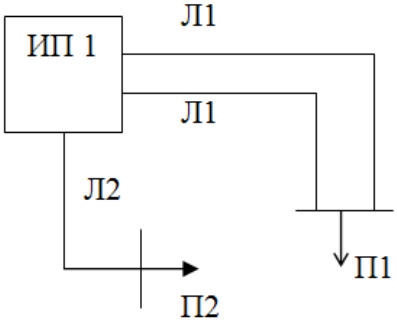


Рис. 4.19

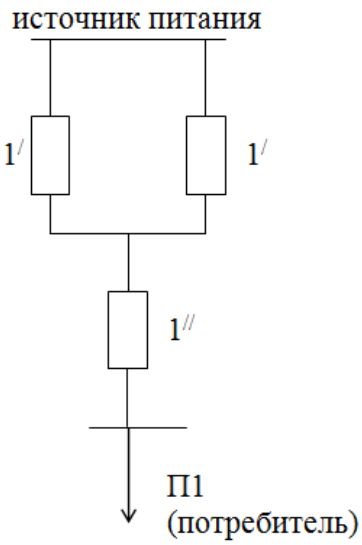


Рис. 4.20

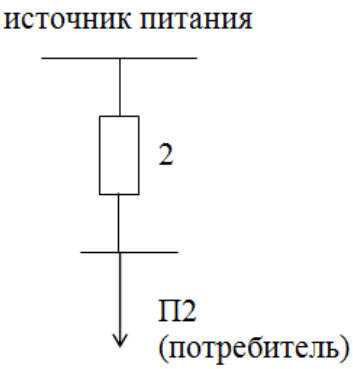


Рис. 4.21

4.17. Расчёт эквивалентных характеристик надёжности работы электрических сетей при оценке ущерба

Последовательное соединение. Параметр потоков отказов блока, эквивалентного “n” последовательно соединённых элементов, рассчитывается по формуле:

$$\omega_{вi} = \sum_{i=1}^{n} \omega_{вi}. \qquad (4.109)$$

где $\omega_в$ – параметр потока отказов (средняя частота отказов), отказ/год.

Согласно выражению (4.109) отказ цепи наступает при отказе одного из элементов. Коэффициент вынужденного простоя (восстановления) эквивалентного блока:

$$К_{вэ} = \sum_{i=1}^{n} К_{вi} = \sum_{i=1}^{n} \omega_{вi} Т_{вi}. \qquad (4.110)$$

где $К_{вi} = \omega_{вi} Т_{вi}$ – коэффициент вынужденного простоя i-го элемента сети;

$Т_{вi}$ – среднее время восстановления, ($Т_{вi} 10^{-3}$лет/отказ) i-го элемента.

Среднее время вынужденного простоя эквивалентного блока

$$Т_{вэ} = К_{вэ} / \omega_{вэ}. \qquad (4.111)$$

Показатели плановых ремонтов для цепи из “n” последовательно включённых элементов определяются на основе графика плановых ремонтов, учитывающего совмещение ремонтов элементов. При этом средняя частота плановых простоев – “$\omega_{пэ}$”, коэффициент планового простоя – $К_{пэ}$, среднее время планового простоя для эквивалентного блока – $Т_{пэ}$, определяются из выражений:

$$\omega_{пэ} = \sum_{i=1}^{n} \omega_{пi}. \qquad (4.112)$$

$$К_{пэ} = \sum_{i=1}^{n} К_{пi} = \sum_{i=1}^{n} \omega_{пi} Т_{пi}. \qquad (4.113)$$

$$Т_{ПЭ} = К_{ПЭ} / \omega_{ПЭ}. \qquad (4.114)$$

где $К_{пi}$ – коэффициент планового простоя i-го элемента сети, $К_п \cdot 10^{-3}$; $К_{пi} = \omega_{пi} Т_{пi}$;

$\omega_{пi}$ – параметр потока отказов (частота) плановых элементов i-го элемента сети, простой/год;

$Т_п$ – средняя длительность планового ремонта (простоя) i-го элемента сети, год/простой.

Параллельное соединение. Эквивалентные показатели надёжности могут быть установлены только для двух параллельно соединённых элементов ЭС “i” и “j”:

$$\omega_{вэ} = \omega_{вi}(К_{вj} + К_{\omega} К_{пj}) + \omega_{вj}(К_{вi} + К_{\omega} К_{пi}); \qquad (4.115)$$

$$К_{вэ} = К_{вi} К_{вj} + К_{вi,пj} + К_{вj,пi}; \qquad (4.116)$$

$$Т_{вэ} = К_{вэ}/\omega_{вэ}. \qquad (4.117)$$

где $К_{\omega}$ – коэффициент учитывающий снижение вероятности накладки аварийного отказа на плановый ремонт в период сниженной интенсивности отказов, $К_{\omega} = 0{,}5$;

$K_{вi}K_{вj}$ – произведение коэффициентов учитывающее наложение отказов i-го и j-го элементов;

K_{bi},n_j – коэффициент учитывающий наложение отказов i-го элемента на плановый простой j-го элемента:

$$K_{вi},n_j = \begin{cases} 0{,}5\omega_{вi}K_{ni}T_{nj}, \text{ при } T_{вi} \geq T_{nj}; \\ K_{вj}\left(K_{nj} - 0{,}5T_{вi}\omega_{ni}\right), \text{ при } T_{вi} \leq T_{nj}. \end{cases} \quad (4.118)$$

$K_{вi},n_j$ – коэффициент учитывающий наложение отказов j-го элемента на плановый простой i-го:

$$K_{вi},n_j = \begin{cases} 0{,}5\omega_{вi}K_{ni}T_{ni}, \text{ при } T_{вi} \geq T_{nj}; \\ K_{вj}\left(K_{ni} - 0{,}5T_{вj}\omega_{nj}\right), \text{ при } T_{вj} \leq T_{ni}. \end{cases} \quad (4.119)$$

При эквивалентировании блоков показатели плановых ремонтов исключаются, поскольку два блока одновременно в плановый ремонт не выводятся.

Если после нескольких эквивалентированных цепей с последовательными и параллельными элементами расчётная схема сводится к одному результирующему блоку, то его показатели надёжности $\omega_{вэ}$, $K_{вэ}$, $T_{вэ}$ и плановых ремонтов $\omega_{nэ}$, $K_{nэ}$, $T_{nэ}$ – показатели надёжности питания потребителя и позволяют рассчитать ущерб по формуле (4.107).Показатели плановых ремонтов будут лишь тогда, когда потребитель связан с сетью одноцепной линией.

Глава 5. Функциональная надёжность электрических систем

5.1. Функциональная надёжность в схеме станция – система

Достигается при противоаварийном управлении отключением генераторов и быстрой разгрузкой паровых турбин. Рассмотрим схему (рис.1).

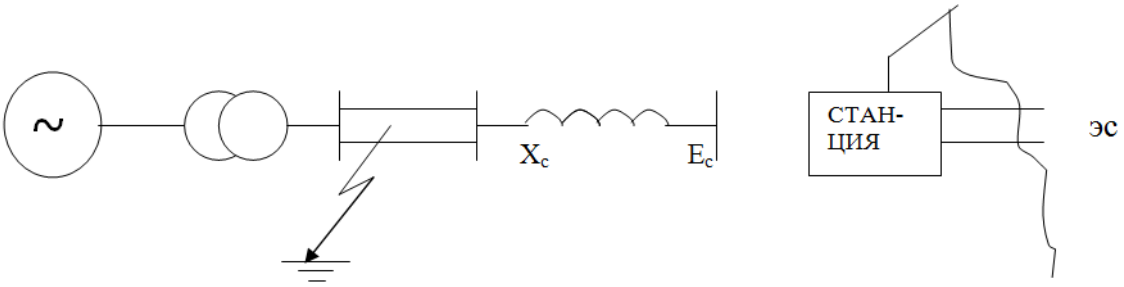


Рис. 5.1

Здесь при отсутствии средств повышения устойчивости имеем при кз её нарушение (рис. 5.2) Отключение генераторов. Если при отключении кз отключить часть генераторов (рис. 5.3) устойчивость сохранится.

S_T, $S_У$ – площадки торможения и ускорения; P_1, P_2, P_3 – характеристики мощности, выдаваемой в систему при нормальном, послеаварийном и аварийном режимах.

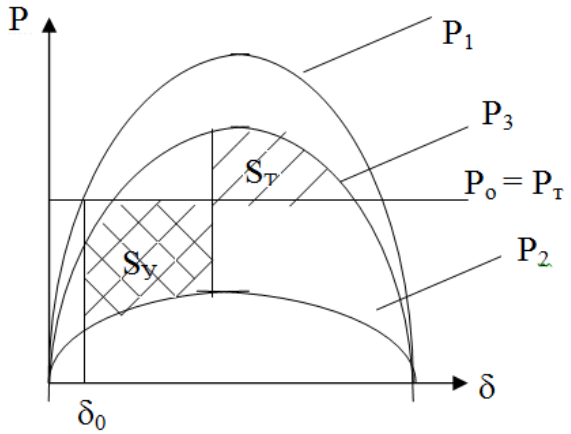


Рис. 5.2

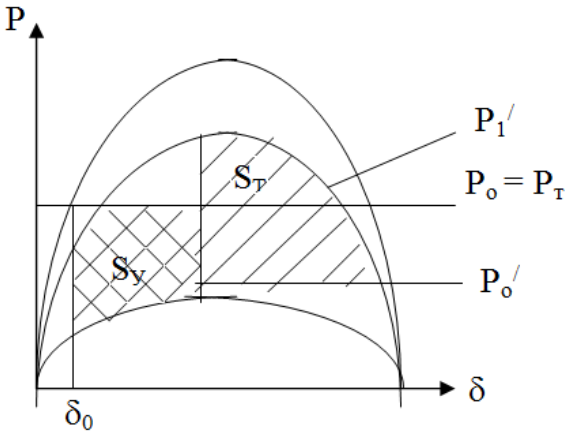


Рис. 5.3

$$p_o' = P_o \frac{n - \Delta n}{n}. \qquad (5.1)$$

где n – число работающих генераторов станции; Δn – число отключённых генераторов; P_o' – мощность генераторов после отключения Δn.

При этом снижается и характеристика мощности послеаварийного режима:

$$P_1' = P_1 \frac{\frac{X_d'}{n} + X_T + X_Л + X_C}{\frac{X_d'}{n - \Delta n} + X_T + X_Л + X_C}. \qquad (5.2)$$

где X'_d, X_T, $X_Л$, X_C – соответственно, переходное синхронное сопротивление эквивалентного генератора, сопротивление трансформатора, линии, системы.

На рис. 5.3 видим, что снижение характеристики выдачи мощности в систему меньше уменьшения мощности турбины $P_1 < \Delta P_T$, при этом происходит увеличение площади торможения (S_T). Кроме этого при отключении части генераторов

теряется и часть $\Delta W_{кин}$ (кинетической энергии запасённой роторами генераторов в процессе ускорения $W_{кин}$ оставшихся генераторов пропорциональна площади ускорения ($S_У$).

$S_у \frac{n-\Delta n}{n}$ и условия правило площадей:

$$S_у \frac{n-\Delta n}{n} < F_Т. \qquad (5.3)$$

Таким образом, имеем $\uparrow S_Т$, $\downarrow S_у$ – то есть отключение генератора является эффективным средством увеличения устойчивости при кз.

Разгрузка турбин:

Для быстрой разгрузки паровых турбин используются электрогидравлические преобразователи и электроприставки (электрическая часть системы регулирования частоты), куда входят усилители и элементы для улучшения регулирования частоты и снижения максимальной частоты вращения турбины после сброса нагрузки. Мощность турбины успевает снизиться во время первого вылета угла генератора (рис.5.4), что приходит к увеличению площади торможения и повышению динамической устойчивости.

Деление системы:

Используются в отдельных случаях, когда станция выдаёт мощность в ЭС малой мощности и связана с большой системой, разгрузка станции для устойчивости связи с малой системой – не эффективна. Применяется деление системы. Рассмотрим деление системы для схемы станция – ЭС малой мощности – ОЭС (объединённая мощная энергосистема) рис. 5.5.

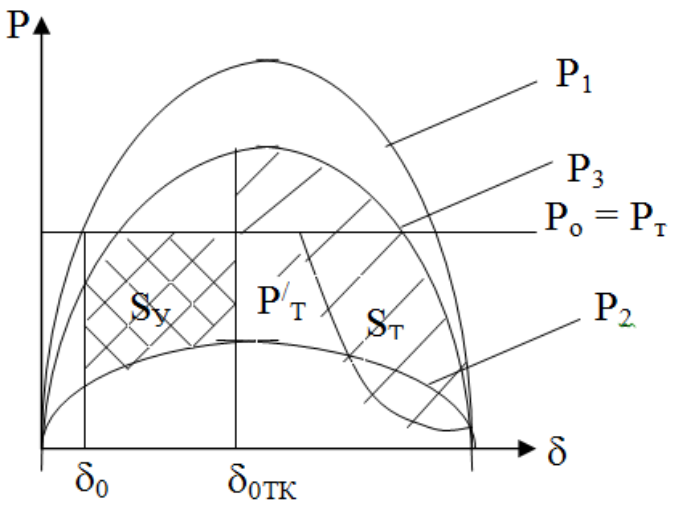


Рис. 5.4. Характеристика мощности турбины.

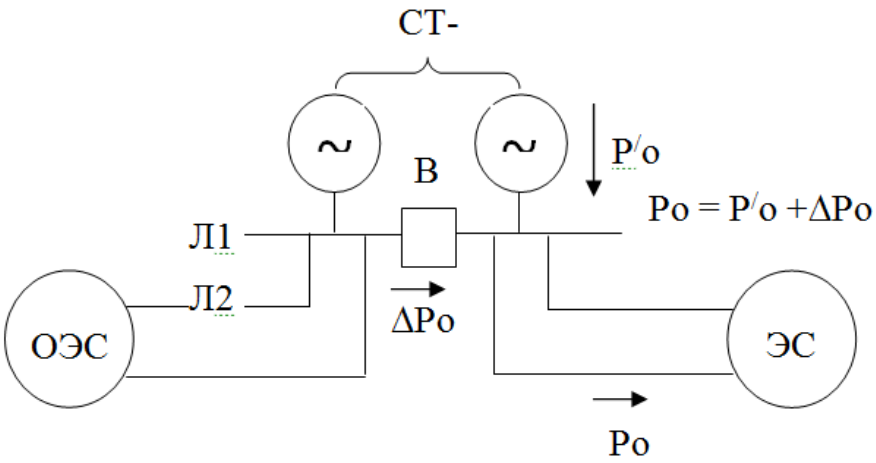


Рис. 5.5

В нормальном режиме нагрузка линий соответствует нормированному запасу статической устойчивости. При отключении Л1 или Л2 $P_{3max} < P_{1max}$ исходного режима, происходит нарушение устойчивости (рис. 5.6). Разгрузкой станции обеспечить сохранение устойчивости невозможно т.к. при этом уменьшается только мощность, выдаваемая в ОЭС. Уменьшить поток мощности, выдаваемый в ЭС можно $\downarrow P_{нэс}$ или при делении станции. В этом случае (деление станции) $P_т = P_0^/$ и устойчивость ЛЭП (Л1, Л2) может быть сохранена, $P_0^/ \le P_{3max}$ (после аварийного режима); $P_0\downarrow$ до $P_0^/$ имеем дефицит мощности в ЭС и f↓. При недостаточном вращающемся резерве в ЭС может действовать АЧР, на мощность отключённых потребителей меньше чем при применении САОН. Деление выполняется отключением выключателя «В» при отключении Л1 или Л2 и передаваемой мощности, превышающей пропускную способность в после аварийном режиме.

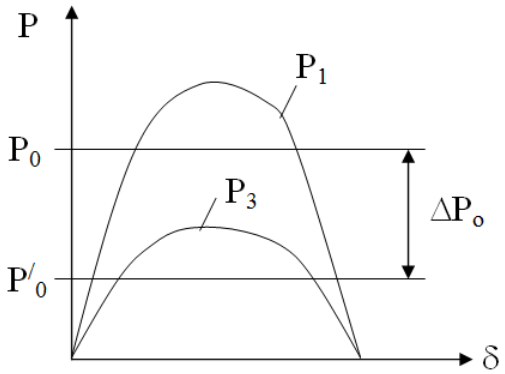


Рис. 5.6

5.2. Расчёт функциональной надёжности в объединении из двух ЭС со слабой связью

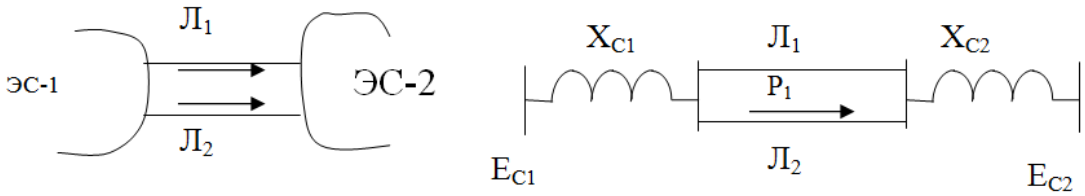


Рис. 5.7

При объединении ЭС (рис.5.7) основную опасность для надёжности представляет:

1) отключение линий связи Л1 или Л2;

2) появление аварийного небаланса мощности (потеря генерирующей мощности в ЭС-2, отключение узлов нагрузки в ЭС-1) в объединяемых системах.

Здесь (рис.5.7) x_{c1} и x_{c2} – эквивалентные сопротивления в ЭС-1, ЭС-2, $x_л$ – сопротивление Л1 или Л2;

$P_{Г1}$ и $P_{Н1}$, $P_{Г2}$ и $P_{Н2}$ – генерируемые мощности и мощности нагрузок в ЭС-1 и ЭС-2;

$P_л$ – мощность, передаваемая по межсистемной связи.

Электромеханические переходные процессы в каждой из ЭС:

$$\left.\begin{aligned} T_{j1}\frac{d^2\delta_1}{dt^2} &= P_{Г1} - P_{Н1} - P_Л; \\ T_{j2}\frac{d^2\delta_1}{dt^2} &= P_{Г2} - P_{Н2} + P_Л; \end{aligned}\right\} \qquad (5.4), (5.5)$$

где T_{j1}, T_{j2} – механические постоянные инерции ЭС-1 и ЭС-2.

$$P_Л = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \sin\delta_{12}. \qquad (5.6)$$

$$\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2. \qquad (5.7)$$

$$X_{12} = X_{C1} + \frac{X_Л}{2} + X_{C2}. \qquad (5.8)$$

Для получения уравнения электромеханического переходного процесса в объединении из двух энергосистем используя уравнения (5.4, 5.5) имеем:

$$T_j \frac{d^2\delta_{12}}{dt^2} = P_0 - P_Л. \qquad (5.9)$$

где $$P_0 = \frac{T_{j2}}{T_{j1}+T_{j2}}(P_{Г1} - P_{Н1}) - \frac{T_{j1}}{T_{j1}+T_{j2}}(P_{Г2} - P_{Н2}); \qquad (5.10)$$

$$T_j = \frac{T_{j1}T_{j2}}{T_{j1}+T_{j2}}. \qquad (5.11)$$

Отключение одной цепи межсистемной связи представлено на рис. 5.8:

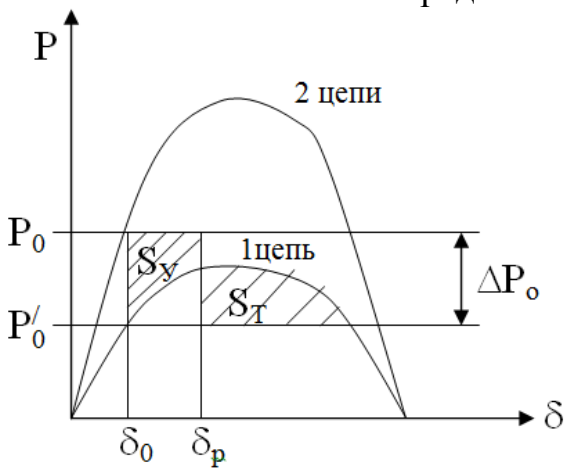


Рис. 5.8

Для двух цепей: $P_0 = P_Л$ и $\delta_0 = \delta_{12}^0$.

После отключения.

Для обеспечения устойчивости надо разгрузка межсистемной связи до момента $P_0^/$, чтобы обеспечить устойчивость динамического перехода и статическую устойчивость нового установившегося режима. Для обеспечения динамической устойчивости должно соблюдаться условие: $S_T > S_У$ ($\delta_р$ – угол, при котором имеем разгрузку межсистемной передачи, т.е. переход с уровня P_0 на $P_0^/$). Запас статической устойчивости: $P_{max}^{1ц} - P_0^/$.

Снижение P_0 до P_0^1 возможно за счёт уменьшения $P_{Г1}^{ЭС1}$ или уменьшения $P_{H2}^{ЭС}$(или уменьшения $P_Г^{ЭС}$или уменьшения $P_{H_2}^{ЭС2}$).

$$P_0^/ = P_0 - \Delta P_0 = \frac{T_{j2}}{T_{j1}+T_{j2}}\left[(P_{Г1} - \Delta P_{Г1}) - P_{H1}\right] - \frac{T_{j1}}{T_{j1}+T_{j2}}\left[P_{Г2} - (P_{H2} - \Delta P_{H2})\right]. \quad (5.12)$$

Откуда разгрузка связи: $\Delta P_0 = \frac{T_{j2}}{T_{j1}+T_{j2}}\Delta P_{Г1} + \frac{T_{j1}}{T_{j1}+T_{j2}}\Delta P_{H2}$.

Причиной нарушения устойчивости может быть и появление небаланса мощности в ЭС-1 или ЭС-2. Из рис. 5.9 видно, что к увеличению перетока мощности может быть потеря части нагрузки ΔP_{H1} в ЭС-1 или $\Delta P_Г^{ЭС2}$. В общем случае это может быть авария дающая $\Delta P^{ЭС1}$ или $\Delta P^{ЭС2}$.

Изменение мощности ΔP_H и $\Delta P_Г$ вызывают отклонение частоты Δf :

$$\Delta P_{Г_1 i} = -P_{Г.i}\frac{\Delta f}{fH}К_{Г_1 i}; \quad Pн_1 i = Pн_1 i\frac{\Delta f}{fн}Кн,i. \quad (5.13)$$

где $К_{Г,i}$, $К_{H,i}$, – крутизна частотной характеристики мощности, нагрузки i-ой системы; n – количество систем в объединении.

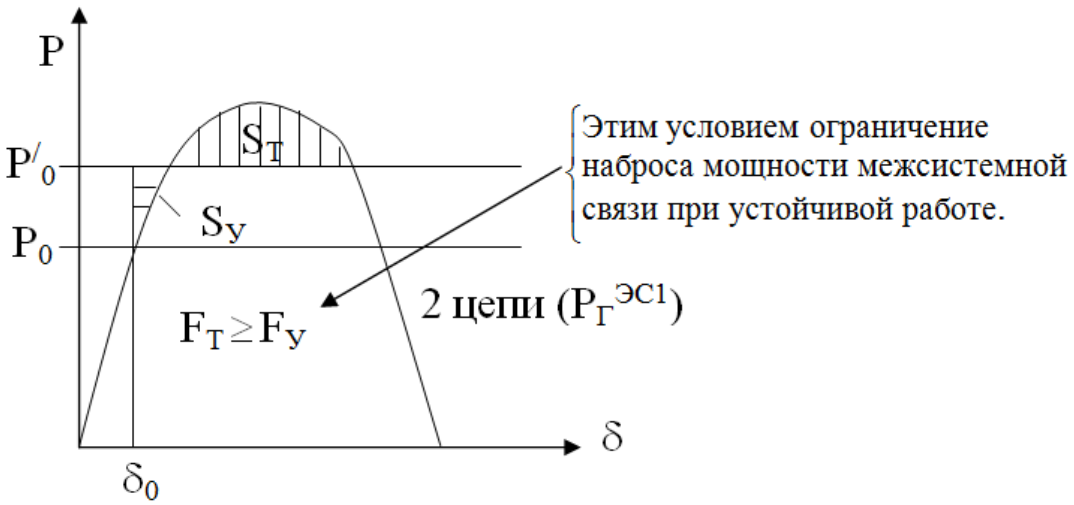


Рис. 5.9

При небалансе мощности «ΔP» имеем отклонение частоты ”Δf”:

$$\frac{\Delta f}{f_н} = \frac{\Delta P}{\sum_{i=1}^{n}(P_{Г,i}K_{Г,i} + P_{Н,i}K_{Н,i})}. \qquad (5.14)$$

5.3. Критерии режимной надёжности и их нормирование

Надёжность режима ЭС – её способность выдерживать возмущения. Этот фактор оценивается устойчивостью ЭС.

Рассмотрим две типичные схемы, приводившиеся в 5.1, 5.2 результаты анализа которых можно распространить на сложные энергосистемы:

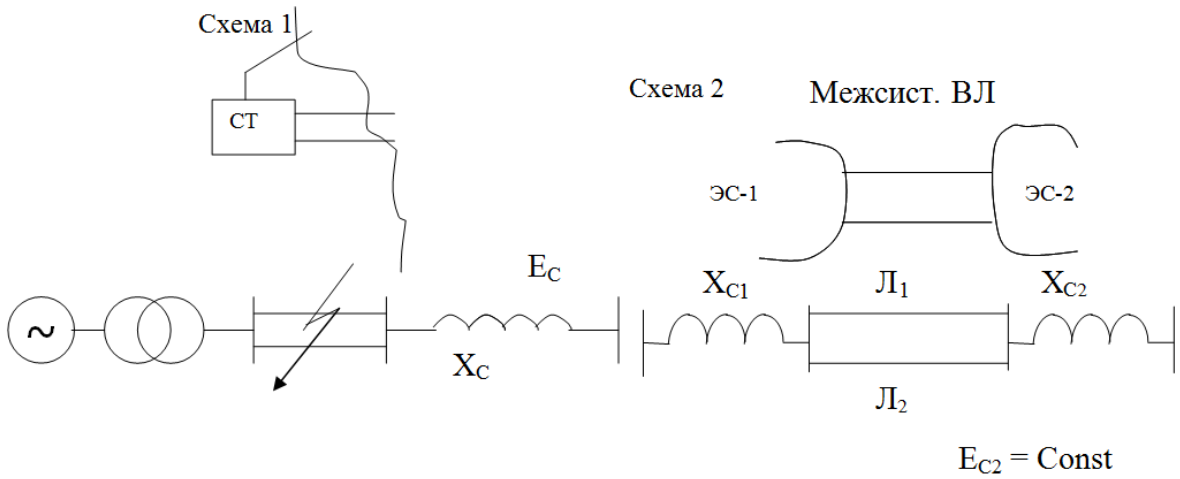


Рис. 5.10

<u>Надёжность нормируется</u> в виде критериев режимной устойчивости в узловых точках ЭС, отражающих её запас ($К_р$, $К_и$) и расчётного возмущения для проверки динамической устойчивости.

Численные значения этих величин определяются соотношениями:

$$К_р = \frac{P_{max} - \Delta P_{нер} - P}{P} \cdot 100; \qquad (5.15)$$

$$К_и = \frac{U_н - U_{кр}}{U_н} \cdot 100. \qquad (5.16)$$

где $\Delta P_{нер}$ – увеличение передаваемой мощности нерегулярными колебаниями по межсистемной передаче для схемы станция – электропередающая система; P – передаваемая активная мощность.

Примечание: $U_{кр}$ – значение напряжения при котором нарушается устойчивость; $\Delta P_{нер} \approx 2 \sum P_{ген}$ меньшей из объединённых электрических систем.

Коэффициенты запаса статической устойчивости нормируются в следующих пределах:

$К_р \geq 20$ %, $К_и \geq 10$ % – нормальный режим ЭС;

$К_р \geq 8$ % – аварийный режим.

Для исследования статической устойчивости ЭС составляем схемы замещения:

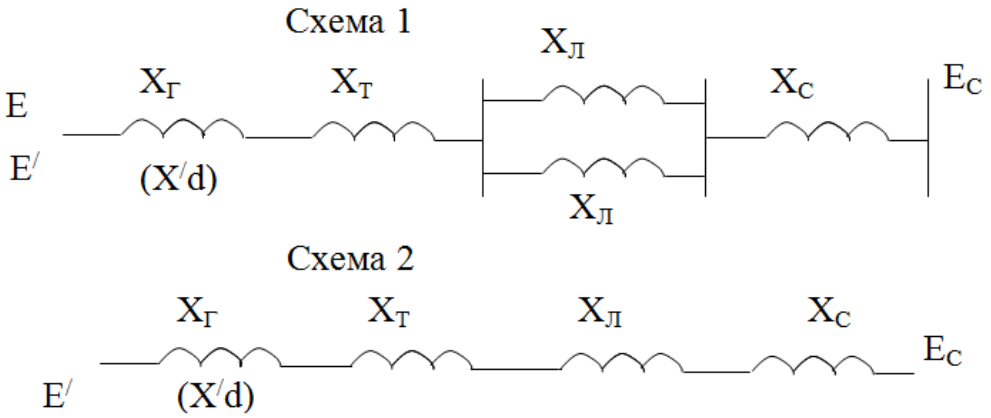


Рис. 5.11

Для первой схемы мощность, передаваемая в систему равна:

$$P = \frac{E \cdot E_c}{X} \cdot \sin\delta. \qquad (5.17)$$

где $X = X_г + X_т + X_л/2 + X_c$;

$$P_{max} = \frac{E \cdot E_c}{X}. \qquad (5.18)$$

На рис. 5.12 представлена угловая характеристика мощности:

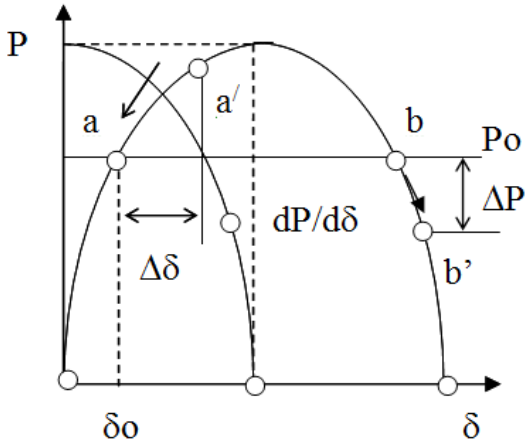


Рис. 5.12

Точка «а» – установившейся режим. Покажем это: $\delta_a + \Delta\delta$, $\Delta P/\Delta\delta > 0$ – положительное значение синхронизирующей мощности ($dP/d\delta$) обеспечивает статическую устойчивость ЭС.

На устойчивость положительно влияет АРВ генераторов, увеличивая предельно передаваемую мощность, $P_{пред}$ (если используем в схеме замещения $X^{/}d$ – АРВ пропорционального действия)

Зная P_{max} по (5.15) при $\Delta P = 0$, находим передаваемую мощность, соответствующую нормативному коэффициенту запаса статическую устойчивость:

$$P = \frac{P_{max}}{1 + K_p/100} = \frac{P_{max}}{1{,}2}. \qquad (5.19)$$

Для послеаварийного режима:

$$P = \frac{P_{max}^{/}}{1{,}08}; \quad X^{/} = X_г + X_т + X_л + X_с. \qquad (5.20)$$

Для схемы 2:

$$\frac{E_{C1} \cdot E_{C2}}{X}; \quad X = X_{C1} + X_л / 2 + X_{C2}. \qquad (5.21)$$

Здесь считаемся с неурегулированными колебаниями перетока по межсистемной связи

В нормальном режиме:

$$P = \frac{P_{max} - \Delta P_{нер}}{1{,}2}. \qquad (5.22)$$

В аварийном режиме:

$$P^{/} = \frac{P_{max}^{/} - \Delta P_{нер}}{1{,}08}. \qquad (5.23)$$

Динамическая устойчивость нормируется расчётными: видами и длительностью кз:

Двухфазные кз на землю длительностью 0,18 с для сетей 110…220 кВ

Двухфазные кз на землю длительностью 0,12 с для сетей 330…750 кВ

Для сетей 500 кВ и выше в отдельных случаях допускается обеспечение динамической устойчивости. При однофазных кз с учётом неуспешного АПВ.

5.4. Обеспечение режимной (функциональной) надёжности системообразующих сетей ЭС

Для этого применяется комплекс средств повышения устойчивости режимов работы ЭС.

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

на не синхронно работающие районы; предотвращение нарушения устойчивости и т.п.

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

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

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

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

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

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

5.5. Средства и методы повышения надёжности распределительных сетей

Надёжность (как свойство технического объекта выполнять заданные функции в заданном объёме при определённых условиях) зависит от большого количества факторов случайного и неслучайного характера. Средства и методы изменения количественных характеристик этого свойства электрических сетей отличаются многообразием. На практике при эксплуатации электрических сетей

как технических систем обычно ставится задача изменения показателей надёжности в сторону повышения её уровня.

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

- Резервирования.
- Совершенствования конструкций и материалов.
- Техническое обслуживание.
- Защиты и автоматизации.
- Установка компенсирующих и регулирующих устройств, повышающих качество напряжения и т.п.

Повышение надёжности распределительных систем направлено на создание:

- рациональных схем электрических соединений (схем распредустройств подстанций и станций);
- оптимальное насыщение сети автоматическими устройствами и устройствами АВР;
- насыщение сети неавтоматическими коммутационными аппаратами;
- установки регулирующих и компенсирующих реактивную мощность устройств у потребителей;
- оборудования подстанций устройствами телеизмерения и телемеханизации;
- автоматизации на базе ЛЭВМ оперативных переключений в сложных сетях;
- совершенствование релейной защиты и автоматики.

В воздушных и кабельных сетях повышают надёжность:

- введение устройств поиска повреждений;
- сокращение продолжительности аварийных ремонтов;
- обеспечением ремонтных баз запчастями электроустановок;
- оптимизаций профилактических ремонтов, осмотров, замен износившихся частей.

Эти мероприятия требуют значительных материальных затрат. Кроме этого, большое значение имеет совершенствование схем распределительных сетей и распределительных устройств подстанций.

5.6. Методика расчёта надёжности системообразующих сетей ЭС

Эти сети связывают электрические станции и узловые подстанции ЭС, от которых через непосредственно или через распределительные сети питаются потребители. Оценка надёжности здесь должна учитывать:

- возможное нарушение устойчивости параллельной работы станций и нагрузки из-за отказов элементов сети и генераторов;
- ограничения по уровню напряжений и токов при отказах элементов ЭС в нормальных и ремонтных схемах и режимах работы сети, т.е. ограничения по пропускной способности элементов сети, уровню напряжения, мощности источников питания в после аварийном режиме;
- отказы элементов распределительных станций и подстанций;
- плановые ремонты элементов ЭС.

Цель расчёта **–** определение частоты и времени перерывов и ограничений электроснабжения узлов нагрузки. Расчёт делится на 2 этапа:

I-ый этап. Расчёт надёжности нормального режима работы сети, который включает:

- выявление нормальных схем и режимов работы сети и их длительностей;
- определение частот и видов расчётных отказов элементов и длительности их восстановления (вынужденного ремонта);
- расчёт устойчивости (статической, динамической) и расчёт после аварийного режима при отказах;
- определение частот, глубин и длительностей перерывов электроснабжения узлов нагрузки во всех нормальных режимах.

При выявлении схем и режимов работы выделяем осенне-зимний и весенне-летний периоды. Для межсистемных ЛЭП учитываем нерегулярные изменения нагрузки. Их мощность задаётся функцией распределения. Учитываем:

- отказы ЛЭП, включая взаимосвязанные (на двухцепных опорах или по одной трассе);
- генерирующих блоков;
- выключателей станций и подстанций.

II-ой этап.

- Выявление расчётных ремонтных схем, их частот и длительностей, и определение режимов работы для этих схем. Это надо для планирования ремонтов элементов электрических сетей ЛЭП и режимной проработки режимных заявок.
- При выявлении ремонтных схем учитываем плановые и аварийные ремонты ЛЭП.
- Расчёт устойчивости (статической, динамической и расчёт после аварийного режима при отказах.
- Расчёт частот, глубин и длительностей перерывов электроснабжения узлов нагрузки для ремонтных режимов.

Глава 6. Теория надежности для электронной аппаратуры

6.1. Общие сведения

Надёжность – свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданном интервале времени, в течение заданной наработки. Надёжность есть одно из свойств качества.

Теория надёжности – наука, которая изучает закономерности влияния отказов на эффективности использования аппаратуры. В связи с тем, что на надёжность аппаратуры влияет масса факторов, необходимо использовать системный подход к проектированию надёжной аппаратуры.

Теория надёжности занимается отказами изделий. На появление отказов влияют разные факторы, поэтому отказ является случайным событием. Время исправной работы является случайной величиной, также как и время восстановления изделия. Показатели надёжности элементов получаются, как правило, путём статистической обработки результатов испытания изделий или эксплуатации. Поэтому математическим аппаратом теории надёжности является теория вероятностей и математическая статистика.

Надёжность можно разделить:

1) теоретическая надёжность;
2) техническая надёжность;
3) эксплуатационная надёжность.

Факторы, влияющие на надёжность, классифицируются:

1) Эксплуатационные:
- Субъективные;
- Объективные;

2) Конструкторские;
3) Производственно-технические.

6.2. Отказы и их классификации

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособности. Отказ изделия – явление случайное, но причины, связанные с выявлением отказов, определяются физическими и физико-химическими процессами, происходящими в конструкции и материалах элементов в условиях эксплуатации и вследствие ошибок производства и проектирования.

Классификация отказов:

1) По характеру проявления:
- Внезапный (случайный);
- Постепенный (износ);

2) По взаимосвязи между собой:
- Независимый (первичный);
- Зависимый (вторичный);

3) По наличию внешних признаков:
- Очевидный (явный);
- Скрытый (неявный);

4) По объёму:
- Полный (авария);
- Частичный.

5) По длительности действия:

- Окончательный (устойчивый);
- Сбой;
- Перемежающийся (временный).

6) По причинам возникновения:

- Конструкционный;
- Производственный;
- Эксплуатационный.

6.2.1. Модели отказов

Схемы возникновения отказов:

- Схема мгновенных повреждений (внезапный отказ);
- Схема накапливающихся повреждений (постепенный отказ);
- Схема релаксаций (накопление → скачок);
- Схема действий нескольких независимых причин.

В соответствии этих схем используются следующие модели отказов:

1) Для внезапных отказов:

- экспоненциальное распределение;
- распределение Вейбулла.

2) Для постепенных отказов:

- Нормальное распределение;
- Логарифмически нормальное;
- γ – распределение;
- Распределение Вейбулла.

6.3. Модели надёжности

Различают модели надёжности элементов (МНЭ) и модели надёжности систем (МНС). МНЭ разрабатываются с целью формализованного описания процессов возникновения отказов элементов во времени. В зависимости от действующих нагрузок и внутренних свойств элементов. МНС разрабатываются для формального описания с позиции надёжности процесса функционирования системы как процесса взаимодействия её элементов при выполнении поставленной задачи.

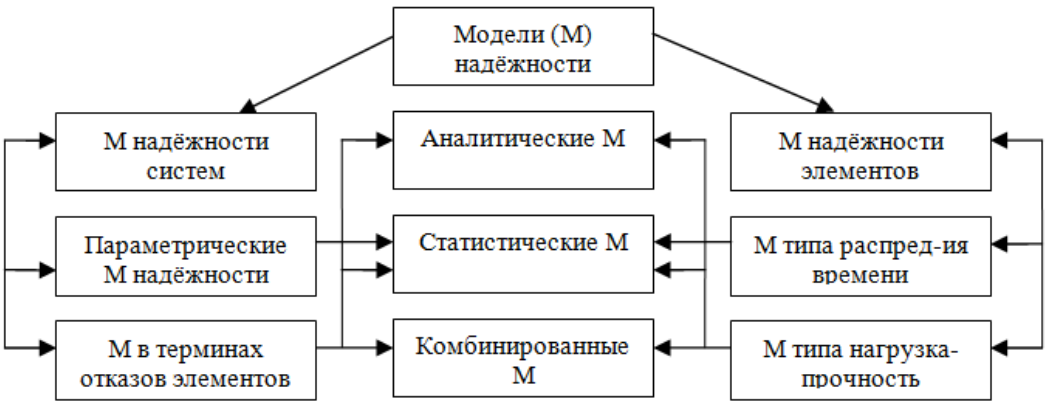


Рис. 6.1

Модели типа нагрузка-прочность рассматриваются как случайное событие, соответствующее определённому превышению нагрузки над прочностью. Модели

типа распределения времени строятся по статистическим данным, по которым определяются вид и параметры закона распределения. Параметрические модели строятся для постепенных отказов. Модели в терминах отказов элементов являются основными.

6.4. Показатели надёжности для неремонтируемых изделий

Надёжность аппаратуры и элементов определяется рядом количественных характеристик:

1. Вероятность безотказной работы

P(t) – вероятность того, что в течение заданной продолжительности работы не возникнет отказ.

$$P(t) = \frac{N_0 - \sum_{i=1}^{t/\Delta t_i} n_i}{N_0}.$$

Статистическая формула, где N_0 – количество изделий в испытании, n_i – количество отказавших изделий за Δt_i, $t/\Delta t_i$ – количество разбиений времени t на промежутки.

Вероятность отказа Q(t) = 1 – P(t).

2. Относительная частота отказов

Или частота отказов f(t) – отношение количества отказавших однотипных изделий в единицу времени к количеству изделий для неремонтируемых изделий.

Статистическая формула $f(t) = \frac{n(t)}{\Delta t \cdot N_0}$, где n(t) – количество изделий, отказавших в интервале времени от $t - \frac{\Delta t}{2}$ до $t + \frac{\Delta t}{2}$, Δt – интервал времени, N_0 – количество установленных изделий.

3. Средняя частота отказов

ω(t) – отношение количества отказавших однотипных изделий в единицу времени к количеству изделий для ремонтируемых (заменяемых) деталей.

Статистическая формула $\omega(t) = \frac{n(t)}{\Delta t \cdot N_0}$, где n(t) – количество изделий, отказавших на интервале времени Δt, N_0 = const – количество испытываемых изделий.

4. Суммарная частота отказов

$\omega_c(t)$ – число отказов аппаратуры в единицу времени, приходится на 1 экземпляр.

Для 1 экземпляра $\omega_c(t) = \frac{n(t)}{1 \cdot \Delta t}$. Для N_0 экземпляров $\omega_c(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} n_i(t)}{N_0 \cdot \Delta t}$, где $n_i(t)$ – число отказов i-го экземпляра за время Δt.

Суммарная частота отказов для m типов изделий со средней частотой отказов $\omega_i(t)$:

$\omega_c(t) = \sum_{i=1}^{m} N_i \cdot \omega_i(t)$, где N_i – количество элементов i-го типа.

5. Интенсивность отказов

$\lambda(t)$ – отношение количества отказавших изделий в единицу времени и количеству изделий, исправно работающих к рассматриваемому моменту времени, для неремонтируемых изделий.

Статистическая формула $\lambda(t) = \frac{n(t)}{\Delta t[N_0 - N(t)]} \cdot |1/\text{час}|$, где $n(t)$ – количество отказавших изделий за период Δt после времени t, N_0 – количество изделий, поставленных на испытание, $N(t)$ – количество изделий, отказавших к моменту t. $\lambda(t)$ показывает какая доля от работающих в момент времени t изделий выходит из строя в единицу времени после t.

$P(t) = e^{-\lambda \cdot t}$, на участке, где λ = const.

$\lambda_c(t) = \frac{n}{\Delta t}$ – интенсивность отказов работы системы; $\lambda_{ср}(t) = \frac{\lambda_c}{N}$ – постоянная для аппаратуры определённого класса.

6. Средне время безотказной работы

Это математическое ожидание времени исправной работы. Эта величина характеризует надёжность однотипных изделий до их первого отказа, после которого они не восстанавливаются.

$T = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0}$, где t_i – время безотказной работы i-го изделия, N_0 – число испытываемых изделий.

$$T = \int_{-\infty}^{+\infty} t \cdot f(t)dt = \int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt = \int_0^{\infty} P(t)dt.$$

7. Средняя наработка на отказ

$T_{ср}$ – среднее значение наработки между двумя соседними отказами изделий данного типа за определённый период эксплуатации.

$T_{ср} = \frac{t_1 + t_2 + ... + t_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n}$, где t_i – время исправной работы между (i-1)-м и i-м отказами изделий, N – число отказов за t.

При λ = const $T_{ср} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda \cdot t} dt = \frac{1}{\lambda} |\text{час}|$, тогда $P(t) = e^{-\lambda \cdot t} = e^{-t/T_{ср}} = e^{-t/T}$.

8. Среднее время восстановления

$T_в$ – математическое ожидание случайной величины времени восстановления.

$T_в = \frac{\sum_{i=1}^{n} \tau_i}{n}$, где τ_i – время, затрачиваемое на обнаружение (t_{oi}) и устранение (t_{yi}) одной неисправности, $\tau_i = t_{oi} + t_{yi}$, n – количество восстановленной аппаратуры.

9. Коэффициент нагрузки элемента

$K_{нагр}$ – отношение величины рабочей нагрузки, действующей на элемент, к её номинальной величине.

Для сопротивлений $К_{нагр} = \frac{P_{раб}}{P_{ном}}$, для конденсаторов $К_{нагр} = \frac{U_{раб}}{U_{ном}}$.

10. Коэффициент готовности

$К_г$ – отношение времени безотказной работы аппаратуры (tp) к сумме времени безотказной работы и времени восстановления, взятые за один и тот же период эксплуатации

$$К_г = \frac{t_р}{t_р + t_в} = \frac{T_{ср}}{T_{ср} + T_в}.$$

6.5. Расчёты надёжности электронной аппаратуры (1 типа)

Цель – определение показателей надёжности.

Расчёты бывают:

- Структурные, когда структура постоянная;
- Алгоритмические, в цифровых устройствах.

При этом математическая модель расчёта надёжности строится в соответствии с алгоритмом функционирования устройства;

- Программное обеспечение.

Структурный расчёт надёжности производится по внезапным и постепенным отказам по нерезервированной и резервированной, неремонтируемой и ремонтируемой аппаратуре. Прежде чем проводить отчёт, необходимо составить структурную модель расчёта надёжности, на которой показывается соединение элементов расчёта надёжности. С точки зрения надёжности имеем 2 вида соединения:

1) Основное; 2) Резервное.

Основное – такое, при котором система выходит из строя при отказе одного любого элемента расчёта надёжности. Событие исправной работы всех элементов $R_c = \mathop{I}^{n} R_i$. ***Резервное соединение*** – такое, при котором система выходит из строя при отказе всех элементов расчёта надёжности $R_c = \mathop{Y}_{j=0}^{m+1} R_j$.

6.5.1. Расчёт надёжности неремонтируемой аппаратуры без резерва

Расчёт вероятности безотказной работы системы при основном соединении элементов проводится на основе теоремы умножения вероятностей, т.е. перемножаются вероятности безотказной работы элементов.

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t) = \prod_{i=1}^{n} e^{-\int_0^t \lambda_i(t)dt} = e^{-\int_0^t \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t)dt} = e^{-\int_0^t \lambda_c(t)dt}; \quad \lambda_c = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t)$$

$$\lambda = const;\ P_c(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t) = \prod_{i=1}^{n} e^{-\lambda_i t} = e^{-t\sum_{i=1}^{n}\lambda_i} = e^{-\lambda_c t}; \quad \lambda_c = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$$

$\lambda_c = \sum_{i=1}^{n} N_i \lambda_i$, где n – количество групп элементов; N_i – количество элементов в группе; λ_i – интенсивность отказа

6.5.2. Методы расчёта надёжности

1) Прикидочный расчёт;
2) Ориентировочные расчёты;
3) Окончательный расчёт.

Эти методы применяются на различных этапах проектирования аппаратуры.

Этапы единой системы контрольной документации (ЕСКД):

- Техническое задание.
- Техническое предложение.
- Техническое проектирование.
- Изготовление рабочих чертежей.

Прикидочный расчёт проводится на этапе технического предложения. Надёжности всех элементов принимаются одинаковыми. Ориентировочные расчёты надёжности проводятся на этапе эскизного проектирования. Окончательные расчёты надёжности проводятся на этапе технического проектирования, когда становятся известны все режимы работы.

6.6. Расчёт надёжности ремонтируемой аппаратуры ответственного назначения (2 типа)

Большая часть аппаратуры в эксплуатации ремонтируется обслуживающим персоналом. Такая аппаратура характеризуется не только безотказностью, но и ремонтопригодностью. Рассматриваемая аппаратура может выполнить поставленную задачу в одной из следующих 2 ситуациях:

1) аппаратура готова к работе и после включения проработает без отказа оперативное время $t_з$, необходимое для выполнения поставленной задачи;

2) аппаратура не готова к работе в требуемый момент времени, но она может быть отремонтирована за некоторое время τ и в оставшееся время $(t_з - \tau)$ выполнит поставленную задачу.

Вероятность выполнения задачи в этом случае простейших потоков отказов и восстановлений может быть определена по полной вероятности сложного события.

$$P_з(t_з) = K_г(t_х)P(t, t_з) + \left[1 - K_г(t_х)\right] \cdot P_{вос}(\tau)P(t_з - \tau).$$

где $K_г(t_х)$ – функция готовности; $P(t_х,t_з)$ – условная вероятность безотказной работы за оперативное время $t_з$ при условии, что в момент $t_х$ аппаратура была работоспособной.

$$P(t_х, t_з) = P(t_х, t_х + t_з) = \frac{P(t_х + t_з)}{P(t_х)}.$$

где $[1 - K_г(t_х)]$ – вероятность неисправного состояния (неготовности) аппаратуры к началу применения в момент времени $t_х$.

$P_{вос}(\tau)$ – вероятность восстановления и проверки аппаратуры за время $\tau < t_з$.

$P(t_з - \tau)$ – условная вероятность безотказной работы аппаратуры за оставшееся время ещё достаточное для выполнения поставленной задачи. Полученное выражение может быть упрощено по следующим соображениям: при достаточно большом времени $t_х$ функция готовности стремится к $K_г$.

$$\underset{t\to\infty}{K_г(t_х)} \to K_г = \frac{T}{T_{ср} + T_{вер}} = \frac{M_с}{\lambda_с + M_с}; \; T_{ср} = \frac{1}{\lambda_с}; \; T_{вос} = \frac{1}{M_с};$$

Для ответственной аппаратуры: $T_{ср} >> T_{в.ср}$; $K_г \approx 1$.

Тогда $[1 - K_г(t_х)] \approx 0$.

Вероятность выполнения задачи $P_з(t_з) = K_г \cdot P(t_х, t_з) = K_{ОГ}(t_з)$.

Коэффициент оперативной готовности есть вероятность того, что аппаратура окажется работоспособной в произвольный момент времени $t_х$ в установившемся режиме эксплуатации, и, что начиная с этого момента, аппаратура будет безотказно работать в течение заданного интервала времени $t_з$. Если распределение времени безотказной работы аппаратуры подчиняется экспоненциальному закону (λ = const), то условная вероятность не зависит от момента времени начала выполнения задачи $t_х$, а зависит от длины промежутка времени $t_з$.

$$P(t_х, t_з) = P(t_х, t_х + t_з) = \frac{e^{-\lambda(t_х + t_з)}}{e^{-\lambda \cdot t_х}} = e^{-\lambda \cdot t_з};$$

$$K_{ОГ}(t_з) = K_г \cdot P(t_х, t_з) = \frac{T_{ср}}{T_{ср} + T_{в.ср}} \cdot e^{-\lambda \cdot t_з};$$

где $T_{в.ср} = \sum_{i=1}^{m} P_i \overline{\tau_i}$; $P_i = \frac{N_i \lambda_i}{\lambda_c}$; $\overline{\tau_i}$ – среднее время восстановления элементов i-го типа.

$\overline{\tau_i} = \overline{t_{опт}} + \overline{t_{устр}}$; $P_i \tau_i$ – доля среднего времени восстановления аппаратуры, связанное с отказом элементов i-го типа или группы.

$$T_{в.ср} = \sum_{i=1}^{m} \frac{N_i \lambda_i}{\lambda_c} \cdot \overline{\tau_i} = \frac{1}{\lambda_c} \cdot \sum_{i=1}^{m} N_i \lambda_i \overline{\tau_i}; \quad K_{ОГ} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{m} N_i \lambda_i \overline{\tau_i}} \cdot e^{-\lambda_c t_з}.$$

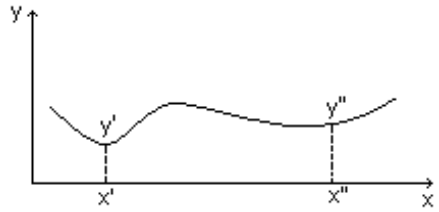
Существует аппаратура 3-го типа – аппаратура, предназначенная для длительной работы, во время которой она может ремонтироваться. К такой аппаратуре не предъявляется требование безотказности в течение заданного времени (измерительная, бытовая). Надёжность такой аппаратуры определяется функцией готовности, а при достаточно большом времени – коэффициентом готовности.

$$P^{III} = K_г = \frac{T_{ср}}{T_{ср} + T_{в.ср}}$$

6.7. Понятие о случайных функциях и процессах

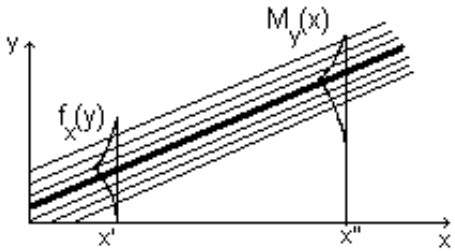
Параметры элементов и систем в связи с влиянием на них большого количества факторов на этапах разработки, производства и эксплуатации имеют случайный характер. Рассматривая эти параметры при конкретных значениях факторов, от которых они зависят, мы будем иметь эти параметры как случайные величины. Для более полного представления о функционировании системы в реальных условиях эксплуатации необходимо знать, как изменяются её параметры при изменении влияющих факторов. Такое представление дают случайные функции.

6.7.1. Случайная функция



Это функция, которая в результате опыта может принять тот или иной конкретный вид, но неизвестно заранее какой именно. Конкретный вид, принимаемый случайной функцией в результате однократного опыта, называется ***реализацией случайной функции***.

Если над случайной функцией провести группу опытов, то получим семейство реализаций этой функции. Это семейство можно рассмотреть при разных факторах *x*, т.е. в сечении семейства. В каждом сечении параметр *y* будет



являться обычной случайной величиной, которая характеризуется законом распределения. Случайную функцию можно также определить, как функцию своего аргумента, значение которого при любом значении её аргумента является случайной величиной. Характеристиками случайных функций, в отличие от числовых характеристик случайной величины, представляющих собой определённые числа, являются в общем случае не числа, а функции (математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратичное отклонение, автокорреляционные функции, взаимные корреляционные функции).

Математическое ожидание M[Y(x)] случайной функции Y(x) есть неслучайная функция $m_y(x)$, которая при каждом значении аргумента x равна математическому ожиданию соответствующего сечения случайной функции.

$$M[Y(x)] = m_y(x) = \int_{-\infty}^{\infty} y \cdot f(y,x)dy.$$ где f(y,x) – одномерная плотность вероятностей семейства реализаций случайных функций.

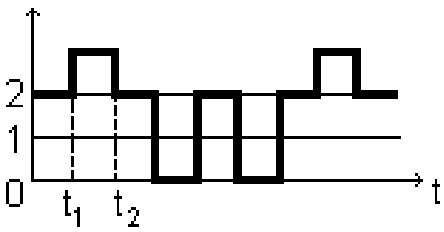
Дисперсия D[Y(x)] случайной функции Y(x) есть неслучайная функция $D_y(x)$, значение которой для каждого *x* равно дисперсии соответствующего сечению случайной функции.

$$D[Y(x)] = D_y(x) = \int_{-\infty}^{\infty} [Y - m_y(x)]^2 \cdot f(Y,x)dy.$$

Дисперсия $D_y(x)$ характеризует разброс реализаций в семействе относительно математического ожидания $m_y(x)$. Равномерная плотность распределения f(Y,x) позволяет найти среднее значение случайной функции, а также её дисперсии, но не содержит никакой информации о поведении случайной функции.

6.7.2. Случайный процесс

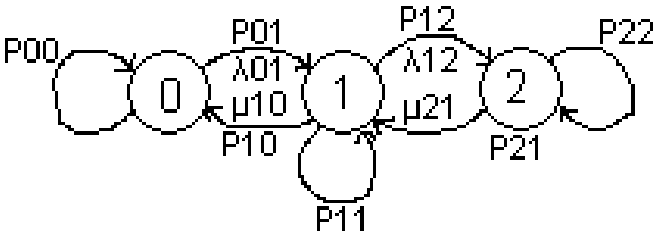
Это случайная функция от независимой переменной t (Y(t)). Реализации случайного процесса называются траекториями. Все характеристики случайных функций аналогичны характеристикам случайной функции.



6.8. Марковские случайные процессы

Являются основным методом анализа надёжности систем: определения характеристик резервированных систем, анализ модели и контроля, поиск неисправностей и т.д. Марковский случайный процесс – это процесс, у которого в каждый момент времени вероятность любого состояния в будущем зависит только от состояния

объекта в настоящий момент времени и не зависит от того, каким образом объект пришёл в это состояние. ***Марковский процесс*** – это случайный процесс без последствий. Момент времени t_1 и t_2 – моменты перехода из одного состояния в другое. Наиболее подходящим способом перехода объекта из одного состояния в другое является граф переходов.



$P_{ij}(\Delta t)$, $P_{ji}(\Delta t)$ – вероятности перехода из одного состояния в другое за некоторый промежуток времени. Важнейшая характеристика Марковского процесса. $P_{ii}(\Delta t)$ – вероятность сохранения состояния в течение некоторого промежутка времени. μ_{ij}, λ_{ij} – постоянные интенсивности прямого и обратного перехода из одного состояния за некоторый промежуток времени. Возможно представление вероятностного процесса матрицей вероятности переходов.

$$\|A\| = \begin{Vmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} \\ P_{20} & P_{21} & P_{22} \end{Vmatrix}; \; P_{02} = P_{20} = 0.$$

Состояние объекта в момент времени t определяется вектором:

$$\overline{P(t)} = \begin{vmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \\ P_2(t) \end{vmatrix}.$$

Для момента времени $t + \Delta t$ вероятность состояния будет определяться:

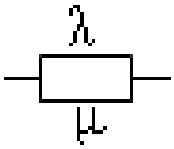
$$\overline{P(t+\Delta t)} = \begin{vmatrix} P_0(t+\Delta t) \\ P_1(t+\Delta t) \\ P_2(t+\Delta t) \end{vmatrix}.$$

Переход объекта из состояния в момент времени t в состояние для момента времени $t+\Delta t$ осуществляется преобразованием вектора $\overline{P(t)}$ в вектор $\overline{P(t+\Delta t)}$ с помощью транспонированной матрицы переходов $\overline{P(t+\Delta t)} = \overline{P(t)} \cdot A^T$.

Марковский однородный процесс – это процесс, закономерность поведения которого на любом интервале времени (t_2 – t_1) не зависит от положения того интервала на оси времени. Дифференциальное уравнение можно составлять непосредственно по графу переходов по следующему правилу: в левой части каждого уравнения записывается $\frac{dP_i(t)}{dt}$, а в правой части записывается столько членов, сколько стрелок связано с этим состоянием. Каждое слагаемое равно произведению интенсивности переходов λ или μ, переводящее систему по данной стрелке на вероятность того состояния, из которого выходит стрелка. Знак перед каждым слагаемым зависит от направления перехода. Если стрелка входит в состояние, то ставится знак «+». Если выходит из состояния, то ставится знак «-». Получается система уравнений нахождения вероятностей состояний $P_0(t)$ и $P_1(t)$ производится с помощью преобразования Лапласа, которое позволяет перейти от дифференциальных уравнений к алгебраическим.

6.9. Расчёт надёжности ремонтируемой нерезервированной аппаратуры

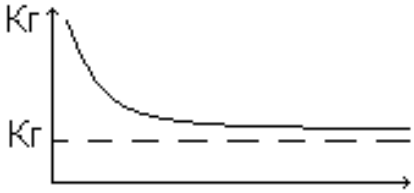
Характеристикой надежности аппаратуры, которая учитывает сочетание свойств безотказности и ремонтопригодности и количественно оценивает готовность системы к работе, является функция готовности. $K_г(t)$ – Функция готовности – есть вероятность застать систему в работоспособном состоянии в произвольный момент времени (t). При определении функции готовности следует учитывать, что на практике имеют место случайные процессы, т.е. процессы перехода изделия из одного состояния в другое в случайный момент времени. Такие процессы встречаются в нерезервируемой ремонтопригодной аппаратуре, резервированной неремонтируемой и ремонтируемой аппаратуре. Рассмотрим ремонтируемую нерезервированную систему.



λ – интенсивность отказов, μ – интенсивность восстановлений.

Эта система может находиться в 2-х состояниях: рабочем и отказа. Переход из рабочего состояния в состояние отказа происходит за счёт отказа системы. Для определения показателей используют граф переходов и дифференциальные уравнения.

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ \dfrac{dP_1(t)}{dt} = \lambda P_0(t) + \mu P_1(t). \end{cases} \qquad (*)$$



$$\frac{dP_i(t)}{dt} \to Z \cdot P_i(z) - P_i(t=0); \; P_i(t) \to P_i(z).$$

$$\begin{cases} ZP_0(z) - P_0(t=0) = -\lambda P_0(z) + \mu P_1(z); \\ ZP_1(z) - P_1(t=0) = -\lambda P_0(z) - \mu P_1(z). \end{cases}$$

Система в нулевой момент времени должна быть работоспособной

$P_0(t = 0) = 1;\; P_1(t = 0) = 1;$

$$\begin{cases} (Z+\lambda)P_0(z) - \mu P_1(z) = 1; \\ -\lambda P_0(z) + (Z+\mu)P_1(z) = 0; \end{cases} \quad (**)$$

$$D = \begin{vmatrix} z+\lambda & -\mu \\ -\lambda & z+\mu \end{vmatrix}; \; P_i(z) = \frac{D_i}{D};$$

$$D_0 = \begin{vmatrix} 1 & -\mu \\ 0 & z+\mu \end{vmatrix}; \; P_0(z) = \frac{D_0}{D} = \frac{z+\mu}{(z+\lambda)(z+\mu) - \lambda \cdot \mu}.$$

$$P_0(z) = \frac{1}{z} \cdot \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \cdot \frac{1}{z+\lambda+\mu}; \; P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu} e^{-(\lambda+\mu)t} = K_г(t);$$

$$P_1(t) = 1 - P_0(t) = 1 - \frac{\mu}{\lambda+\mu} - \frac{\lambda}{\lambda+\mu} e^{-(\lambda+\mu)t} = K_П(t); \; K_г = \frac{\mu}{\lambda+\mu}; \; K_П = \frac{\lambda}{\lambda+\mu}.$$

6.9.1. Расчет в стационарном режиме

Исследование характеристик надёжности, формируемых под воздействием потоков отказов и восстановлений, позволяет сделать вывод о том, что при существующих соотношениях λ и μ наступает сравнительно быстро период

установившегося режима, при котором вероятности состояний изделия становятся постоянными величинами $P_i(t) = P_i = const$.

$\frac{dP_i(t)}{dt} = 0$; Из системы уравнений (*) можно записать $\begin{cases} 0 = -\lambda \cdot P_0 + \mu P_1, \\ 1 = P_0 + P_1; \end{cases}$

$$P_1 = \frac{\lambda}{\mu} P_0;\ P_0 + \frac{\lambda}{\mu} P_0 = 1;\ P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = K_г;\ P_1 = 1 - P_0 = 1 - \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = K_П$$

6.9.2. Определение среднего времени работы системы до отказа

Интегральное преобразование Лапласа для P(t), которое связывает функцию оригинал P(t) действительного переменного t с функцией изображения P(z) комплексного переменного z, имеет вид:

$$T = \int_0^\infty P(t)dt;\ P(z) = \int_0^\infty P(t) \cdot e^{-zt} dt;\ z = 0;\ P(z) = \int_0^\infty P(t)dt.$$

В уравнениях, записанных по преобразованию Лапласа P(z) заменяем через T: P(z) = T. И тогда из системы уравнений (**) можно написать:

$$-1 = -\lambda T_0 + \mu T_1;\ T_1 = 0;\ T_0 = 1/\lambda = T_{ср}.$$

6.10. Методы повышения надёжности радиоэлектронной аппаратуры

Отказоустойчивость системы обеспечивается введением избыточности: параметрической, временной, алгоритмической и структурной.

Параметрическая избыточность выражается в облегчении режимов работы элементов и узлов аппаратуры с целью повышения их надёжности, т.е. уменьшением $K_г$, $t^o_{раб}$ среды…

При этом не удаётся получить существенного повышения надёжности.

Временная избыточность заключается в наличии дополнительного времени для решения задачи с тем, чтобы в случае возникновения сбоев или других ошибок можно было их исправить путём повторения вычислений.

Алгоритмическая избыточность заключается в применении таких алгоритмов, которые обеспечивают удовлетворительные результаты в случае наличия или возникновения ошибок в результате вычисления. Она, как правило, предполагает наличие временной избыточности и является способом её реализации.

Структурная избыточность – наиболее эффективный способ повышения надёжности системы. Она предполагает наличие резервных элементов для замены отказавших.

Методы повышения надёжности классифицируются по этапам жизни аппаратуры:

- Проектирование;
- Производство;
- Эксплуатация.

При проектировании методы делятся на схемные и конструктивные.

1. Упрощение схем.
2. Создание схем с широкими допусками.

6.10.1. Метод резервирования электронной аппаратуры

Резервирование – метод повышения надёжности путём введения резервных вещей, являющихся избыточными по отношению к минимальной функциональной структуре изделия необходимой и достаточной для выполнения им заданной функции. ***Резервирование различают по методам:***

- Общее.
- Раздельное.
- Смешанное.
- Скользящее.
- Мажоритарное.

По способу включения резервов: ***постоянное*** и ***замещение.*** По кратности резервирования: с целой кратностью и с дробной кратностью. При этом резервированные элементы могут находиться в нагруженном, облегчённом и ненагруженном состоянии. Резервирование – единственный способ, который позволяет создавать надёжные системы из относительно ненадёжных элементов.

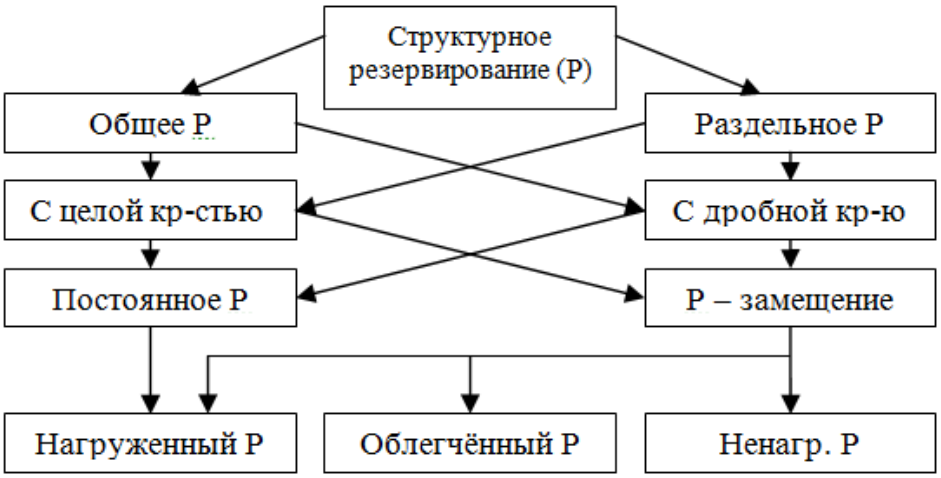


Рис. 6.2

6.10.2. Расчёт надёжности неремонтируемой аппаратуры при резервировании-замещении

При резервировании-замещении используются переключающие устройства, которые отключают отказавшие элементы и включают резервные. Переключающее устройство представляет собой замкнутую систему автоматического управления и состоит из трех элементов: датчика, управляющего устройства и исполнительного устройства.

Надёжность переключателя 1-го типа

$P_п^I = (0{,}75..0{,}8)P_{эл}$; при m = 2.

$P_п^I = (0{,}65..0{,}7)P_{эл}$; при m = 3.

Общая схема расчёта с переключателем 2-го типа. Метод расчёта надёжности с ПУ.

$$P_П = P_{УУ} \cdot P'_{ИУвх} P'_{ИУвых}; \quad P_{uj} = P_j \cdot P''_{ИУвх} P''_{ИУвых};$$

$$P^{II}_{YY}(t) = P_{П}[1 - \prod_{j=1}^{m+1}(1 - P_{uj} \cdot P_j)]; \quad P^{//}_{Пмин} = (0{,}86...1{,}13)P_{узла}.$$

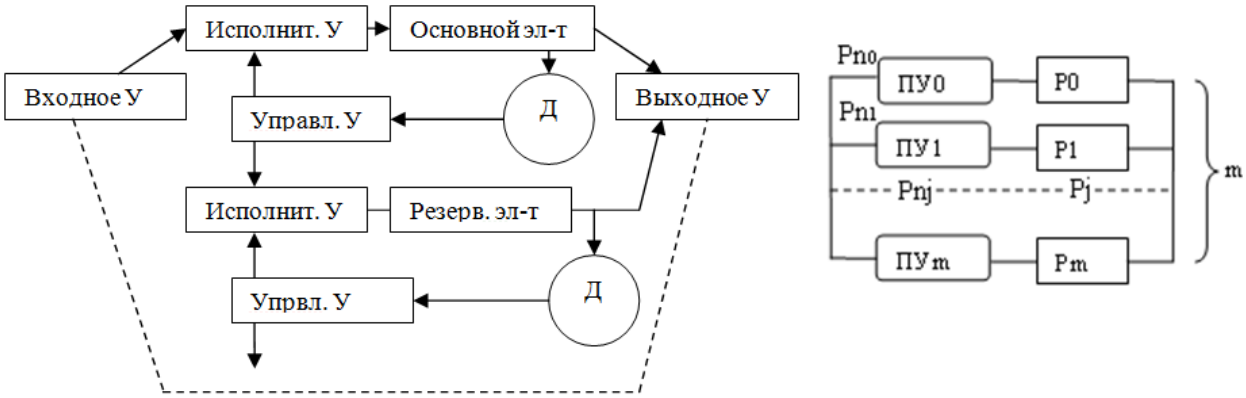


Рис. 6.3

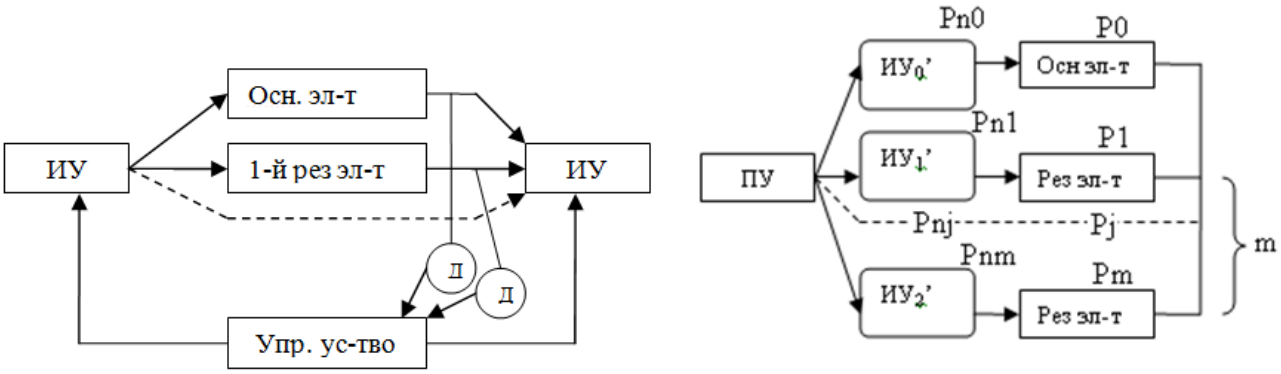


Рис. 6.4

6.10.3. Сравнение общего и раздельного резервирования

Для простоты будем считать, что все элементы в системе равнонадёжны, и отсутствует переключающее устройство, тогда:

$$P_{общ}(t) = 1 - \left(1 - p^n\right)^{m+1}; \qquad P_{разд}(t) = \left[1 - (1 - p)^{m+1}\right]^n.$$

Увеличим сложность системы при количестве резервных систем:

$n \to \infty$ $P_{общ} \to 0$

$P_{разд} \to 0$

Количество элементов конечно

$m \to \infty$ $P_{общ} \to 1$

$P_{разд} \to 1$

$n \to \infty$ $P_{общ} \to 0$

$m \to \infty$ $P_{разд} \to 1$.

Выводы:

1. Общее резервирование целесообразно применять при сравнительно небольшом числе рабочих элементов в исходной системе, т.к. с ростом *n* надёжность систем резко падает;

2. При раздельном резервировании можно получить сколь угодно высокую степень надёжности при любом количестве элементов в исходной системе;

3. При раздельном резервировании можно резервировать только наиболее ненадёжные элементы и получить систему равной надёжности;

4. При общем резервировании меньше количество соединений;

5. При общем резервировании отсутствует большое количество согласующих устройств, которые требуется при постоянном раздельном резервировании.

6.10.4. Аналитическое сравнение общего и раздельного резервирования

$$P_{общ}(t) = 1 - \left(1 - p^n\right)^{m+1}; \qquad P_{разд}(t) = \left[1 - (1-p)^{m+1}\right]^n.$$

Вероятности отказов:

$$Q_{общ}(t) = \left[1 - (1-q)^n\right]^{m+1}; \; Q_{разд}(t) = 1 - \left(1 - q^{m+1}\right)^n.$$

При q << 1 скобку $(1 - q)^n$ можно разложить в ряд 1 – nq, тогда:

$$Q_{общ}(t) = [1 - 1 + nq]^{m+1} = (nq)^{m+1}; \; Q_{разд}(t) = 1 - 1 + nq^{m+1} = nq^{m+1};$$

$$Q_{общ}(t) \big/ Q_{разд}(t) = \frac{(nq)^{m+1}}{nq^{m+1}} = n^m; \; n = 20; \; P_i = 0{,}9; \; m = 2;$$

$$P_{снерез} = P_i^n = 0{,}9^{20} = 0{,}121; \; P_{собщ} = 1 - (1 - P^n)^{m+1} = 1 - (1 - 0{,}9^{20})^3 = 0{,}32;$$

$$P_{сразд} = [1 - (1 - P)^{m+1}]^n = [1 - (1 - 0{,}9)^3]^{20} = 0{,}98;$$

$$P_{сразд} \big/ P_{собщ} = 3 \cdot \frac{Q_{общ}}{Q_{разд}} = \frac{1 - P_{общ}}{1 - P_{разд}} = \frac{1 - 0{,}32}{1 - 0{,}98} = 34 \text{ раза.}$$

6.10.5. Расчёт надёжности при скользящем резервировании

Скользящее резервирование имеет место в том случае, когда система состоит из одинаковых блоков, и для их замены в случае отказа используются аналогичные резервные блоки или элементы.

$m = \frac{M}{N}$. Система считается исправной, если работают все N каналов.

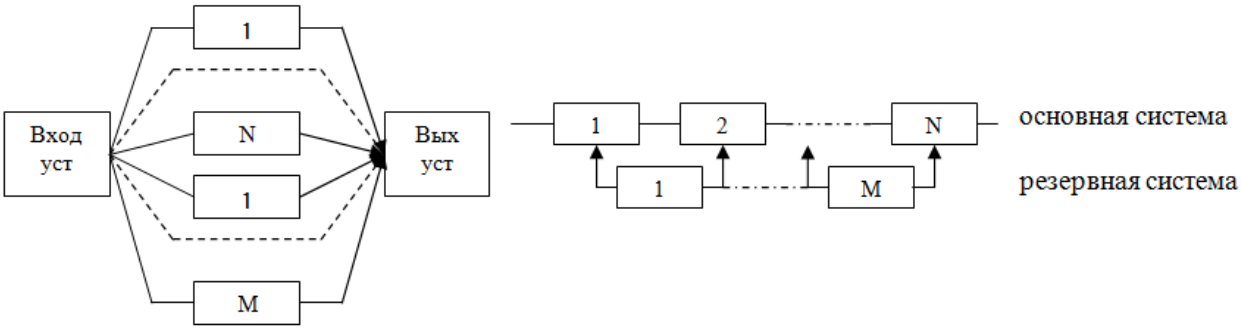


Рис. 6.5

Система откажет, если число отказавших блоков S > M. Для простоты возьмём $P_П = 1$,

тогда:

$P_{ск}(t) = \sum_{i=0}^{M} P(Hi)$. Hi – гипотеза, заключающаяся в том, что система исправно работает при отказе ровно *i* блоков; P(Hi) – вероятность этой гипотезы; M – максимальное число отказавших блоков, не приводящее к отказу системы в целом.

Вероятности гипотез подчиняются биноминальному распределению, если время безотказной работы каждого элемента подчиняется распределению Пуассона.

$$P(Hi) = C_{M+N}^{i} \cdot P^{M+N-i} \cdot q^{i}. \quad \text{(при небольших M и N).}$$

6.10.6. Расчёт показателей надёжности резервированной аппаратуры по графу переходов

Графы переходов иллюстрируют процессы перехода изделия из одного состояния в другое в случайный момент времени. По графу переходов составляется система дифференциальных уравнений Колмогорова. Такой способ решения задачи анализов надёжности является единственным для резервированной ремонтируемой аппаратуры. По графу переходов можно определить все необходимые показатели надёжности системы: вероятность безотказной работы, среднюю наработку на отказ, среднее время восстановления, функцию и коэффициент готовности. Если в графе имеются *n* узлов, то среди них будет d узлов, соответствующих отказовым состояниям системы, и (n-d) узлов, отражающих рабочее состояние. Если рассматривается функционирование системы до некоторого l-того состояния (например, до 1-го отказа) при определении *P* или $T_{ср}$, то l-тое состояние называется поглощающим. Система, попавшая в l-тое состояние, уже не может перейти в другие, и в графе отсутствуют переходы из этого состояния в работающее. Вид графа переходов зависит от структуры системы (схемы расчёта надёжности), числа обслуживающих бега и дисциплины обслуживания – приоритета обслуживания, который может быть прямым, обратным и высшим.

Прямой приоритет – первым ремонтируется первый отказавший элемент;

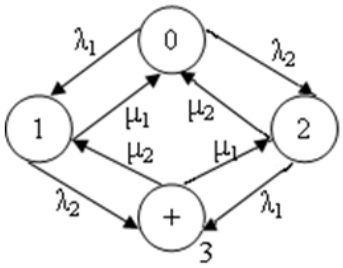
Обратный приоритет – ремонт начинается с последнего отказавшего элемента;

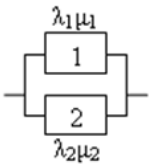
Высший приоритет – указывается элемент, с которого начинается ремонт.

Рассмотрим систему, состоящую из 2-х элементов расчёта надёжности: основного и резервного. Может быть 2 ситуации:

1. Приоритет отказа имеет место.
2. Отсутствует приоритет отказа.

1 случай:





$$\begin{cases} \dfrac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2)\cdot P_0(t) + \mu_1 P_1(t) + \mu_2 P_2(t); \\ \dfrac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_1 P_0 - \lambda_2 P_1 - \mu_1 P_1 + \mu_2 P_3; \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_2 P_0 - \lambda_1 P_2 - \mu_2 P_2 + \mu_1 P_3; \\ \dfrac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_2 P_1(t) + \lambda_1 P_2(t) - (\mu_1 + \mu_2) P_3(t). \end{cases}$$

Решаем с преобразованием Лапласа и находим состояние $P_i(t)$.

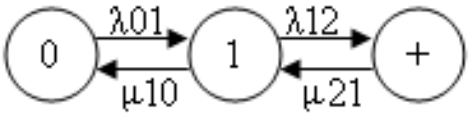
$$К_г = \sum_{i=0}^{k-1} P_i(t).$$

где k – количество работоспособных состояний.

Поскольку сумма вероятностных состояний равна 1, то $\sum_{i=1}^{k} \frac{dP_i}{dt} = 0$. Это значит, что сумма правых частей системы уравнений всегда равна 0. Это свойство полезно иметь в виду при проверке правильности составлений дифференциальных уравнений. Для определения вероятности безотказной работы необходимо вероятность отказа 3-го считать поглощающим, и переход из него в работоспособное состояние запрещается.

$$P_c(t) = \sum_{i=0}^{k-1} P_i(t).$$

2 случай:



$$\lambda_{01} = \lambda_1 + \lambda_2; \ \lambda_{12} = \lambda_1 или \lambda_2;$$

$$\mu_{21} = \mu_1 + \mu_2; \ \mu_{10} = \mu_1 или \mu_2;$$

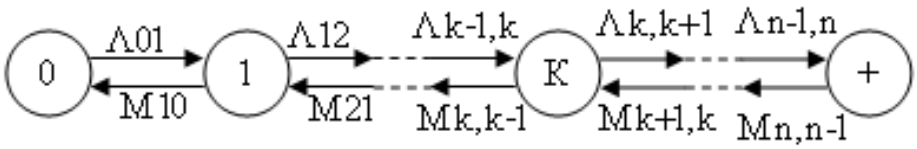
$$\begin{cases} \dfrac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda_{01} P_0(t) + \mu_{10} P_1(t); \\ \dfrac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_{01} P_0(t) - \lambda_{12} P_1(t) + \mu_{21} P_2(t) - \mu_{10} P_1(t); \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{12} P_1(t) - \mu_{21} P_2(t). \end{cases}$$

При расчётах по линейному графу необходимо интенсивности переходов выразить через интенсивности отказов и восстановлений.

В основном составе работают 2 элемента, т.е. переход в первое состояние может произойти за счёт любого из них. Вероятность этого перехода будет больше, чем в случае одного работающего элемента. Аналогично и для процесса восстановления. Но если ремонтная бригада одна, то интенсивности переходов везде будут равны интенсивности восстановления одного элемента.

6.10.7. Расчёт надёжности резервированной аппаратуры в стационарном режиме по линейному графу переходов

При потоках отказов и восстановлений в аппаратуре довольно быстро наступает стационарный режим, при котором вероятности состояний становятся постоянными величинами. В этом случае во всех уравнениях в левой части будут нули.



$$0 = -\lambda_{01}P_0 + \mu_{10}P_1;$$

$$0 = -(\lambda_{12} + \mu_{10})P_1 + \lambda_{01}P_0 + \mu_{210}P_2;$$

$$P_1 = \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \cdot P_0;\ \ P_2 = \frac{\lambda_{01}\lambda_{12}}{\mu_{10}\mu_{21}} \cdot P_0;\ \ P_k = \frac{\lambda_{k-1,k}\ldots\lambda_{12}\lambda_{01}}{\mu_{k,k-1}\ldots\mu_{21}\mu_{10}} \cdot P_0.$$

Вероятность k-го состояния есть произведение некого коэффициента на вероятность основного состояния. Коэффициент равен дроби, числитель которой есть произведение интенсивностей переходов (отказов), стоящих над стрелками, идущими вправо от основного состояния до k-го. Знаменатель есть произведение интенсивностей переходов (восстановлений), стоящих под стрелками, идущими влево от k-го состояния до основного.

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} + \frac{\lambda_{12}\lambda_{01}}{\mu_{21}\mu_{10}} + \ldots + \frac{\lambda_{n-1,n}\lambda_{01}}{\mu_{n,n-1}\mu_{10}}}.$$

6.10.8. Определение среднего времени работы резервированной аппаратуры до отказа

А. аппаратура ремонтируемая

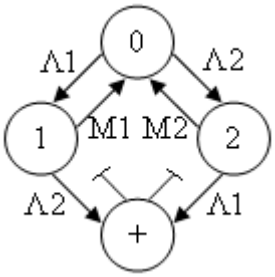
1) Имеется приоритет отказа. Применяем преобразование Лапласа:

$$z \cdot P_0(z) - P_0(t=0) = -(\lambda_1 + \lambda_2)P_0(z) + \mu_1 P_1(z) + \mu_2 P_2(z);$$

$$z \cdot P_1(z) - P_1(t=0) = \lambda_1 P_0(z) - \lambda_2 P_1(z) - \mu_1 P_1(z);$$

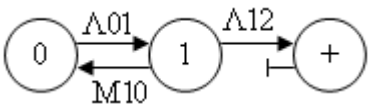
$$z \cdot P_2(z) - P_2(t=0) = \lambda_2 P_0(z) - \lambda_1 P_2(z) - \mu_2 P_2(z);$$

$z = 0;\ T = P(z);$



$$T_c = \sum_{i=0}^{k-1} T_i;\ \begin{cases} 1)\ -1 = (\lambda_1 + \lambda_2)T_0 + \mu_1 T_1 + \mu_2 T_2; \\ 2)\ 0 = \lambda_1 T_1 - (\lambda_2 + \mu_1)T_1; \\ 3)\ 0 = \lambda_2 T_0 - (\lambda_1 + \mu_2)T_2. \end{cases}$$

1) Без приоритета отказа.



$\lambda_{01} = \lambda_1 + \lambda_2;\ \lambda_{12} = \lambda_1$ или $\lambda_2;$

$\mu_{10} = \mu_1$ или $\mu_2;\ \ T_c = T_1 + T_2;$

$$\begin{cases} -1 = -\lambda_{01}T_0 + \mu_{10}T_1; \\ 0 = \lambda_{01}T_0 - (\lambda_{12} + \mu_{10})T_1. \end{cases}$$

Б. аппаратура неремонтируемая.

Расчёт классическим методом.

$$P_c(t) = 1-(1-P_1)(1-P_2) = 1-\prod_{j=1}^{n+1}(1-P_j) = 1-1+P_1+P_2-P_1P_2 =$$

$$= e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t}.$$

Закон изменяется не экспоненциально.

$$T = \int_0^\infty P_c(t)dt = \int_0^\infty (e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t})dt = -\frac{1}{\lambda_1}e^{-\lambda_1 t}\Big|_0^\infty - \frac{1}{\lambda_2}e^{-\lambda_2 t}\Big|_0^\infty + \frac{1}{\lambda_1+\lambda_2}e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t}\Big|_0^\infty =$$

$$= \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1+\lambda_2} = T_1 + T_2 - \frac{T_1T_2}{T_1+T_2}.$$

$$T_c = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{2\lambda} = \frac{3}{2\lambda}. \quad \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda.$$

6.11. Основы теории точности

6.11.1. Расчет электрических допусков

Допуск – разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами.

Размерная цепь – совокупность взаимосвязанных размеров, расположенных в определенной последовательности по замкнутому контуру.

В механике допуски абсолютные, в электронике – относительные. Цели расчета допусков или анализа производственных погрешностей:

1) оценка брака выпускаемой продукции;

2) обеспечение взаимозаменяемости в производстве и эксплуатации;

3) обеспечение экономичности:

а) упрощение производства и обслуживания изделий за счет устранения операций настройки и налаживания;

б) экономия потребляемой мощности, что особенно важно в интегральных микросхемах.

4) обеспечение точности работы изделий;

5) обеспечение параметрической надежности по постепенным отказам;

6) учет влияния факторов производства и эксплуатации.

В задачу разработчиков входит выбор таких размеров и допусков деталей, которые могут быть выполнены экономически целесообразным путем в производстве и в результате приводили бы к заданным средним значениям выходных параметров и их допускаемых отклонений.

6.11.2. Методы расчетов допусков

1) метод максимума – минимума.

Функциональная зависимость выходного параметра изделия является функция параметров элемента. Подставляются сначала все положительные пределы отклонений, а потом все отрицательные

$N = f(q_1, q_2 \ldots q_n)$; $q_i = q_{i0} \pm \Delta q_i$;

$N_{max} = f(q_{10} + \Delta q_1; q_{20} + \Delta q_2 \ldots)$;

$N_{min} = f(q_{10} - \Delta q_1; q_{20} - \Delta q_2 \ldots)$.

Этот метод дает погрешность выходного параметра от 1,5 – 10 раз больше действительной погрешности.

2) метод квадратичного сложения.

$$\Delta N = \sqrt{(\Delta q_1{}^2 + \Delta q_2{}^2 + ...)}.$$

метод дает занижение результата до 6 раз.

3) вероятностный метод расчета допусков. Метод предлагает алгебраическое суммирование средних значений и квадратичное суммирование средних квадратичных отклонений.

11.3. Исходные уравнения для расчета допуск.

Для определения допуска на выходной параметр используем разложение функциональной зависимости в ряд Тейлора.

$$N = f(q_{10} + \Delta q_1; q_{20} + \Delta q_2 ...);$$

$$N_0 + \Delta N = f(q_{10}, q_{20}, ...) + \frac{1}{1!}(\frac{\partial N}{\partial q_1}\Delta q_1 + \frac{\partial N}{\partial q_2}\Delta q_2 + ...) + \frac{1}{2!}(\frac{\partial^2 N}{\partial q^2}\Delta q^2 +$$

$$+ ... + 2\frac{\partial^2 N}{\partial_1 q^2}\Delta q_1 \Delta q_2 + ...) + ... + Rn_1.$$

Расчет допусков имеет смысл при небольших отклонениях.

$$\Delta N = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial N}{\partial q_i} \cdot \Delta q_i = \sum_{i=1}^{n} A_i \cdot \Delta q_i. \quad A_i = \frac{\partial N}{\partial q_i},$$

Первое исходное уравнение для расчета погрешности выходных параметров.

A_i – чувствительность и коэффициент влияния при расчете допусков;

$A_i \cdot \Delta q_i$ – парциальная погрешность.

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial N}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{N} \cdot \frac{\Delta q_i}{q_i} = \sum_{i=1}^{n} B_i \cdot \frac{\Delta q_i}{q_i}.$$

Расчет относительной погрешности выходного параметра.

$$Bi = \frac{\partial N}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{N} = A_i \cdot \frac{q_i}{N}.$$

Коэффициент влияния для относительной погрешности.

Количество таких уравнений для той или иной электронной схемы определяется числом выходных параметров этой схемы, на которой заданы требования по точности. Рассматривая эти уравнения можно сделать выводы относительно увеличения точности работы схемы. Повысить точность работы схемы можно тремя способами:

1) уменьшением величины погрешности элементов схемы;
2) уменьшением количества элементов в схеме;
3) вариацией коэффициентов влияния, то есть схемы необходимо строить таким образом, чтобы перед большими погрешностями параметров элементов были малые коэффициенты влияния.

Указанные уравнения погрешностей применимы только к линейным цепям, в которых активные элементы можно замещать линейными элементами.

6.11.4. Определение коэффициента влияния

1) Аналитический.
2) Экспериментальный.
3) Метод преобразованных цепей.
4) Метод планирования эксперимента.
5) Метод парной корреляции.
6) И др.

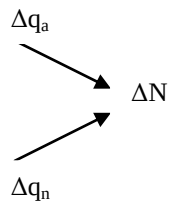
1) ***Аналитический –*** для составления уравнений погрешностей берутся частные производные. При наличии 3-4 параметров взятие производных представляет проблему.

2) ***Экспериментальный –*** используется, когда отсутствует описание схем. Собирается экспериментальная схема, в которой элементы должны иметь параметры соответствующие номиналу. В этом случае погрешность выходного параметра будет равна нулю. Затем задается отклонение первого параметра $\frac{\Delta q_1}{q_1}$.

$$\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = Bi\frac{\Delta q_1}{q_1};\ \ B1 = \frac{\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_1}{\frac{\Delta q_1}{q_1}}.$$

Задаваемое отклонение параметров элемента не должно превышать 5 %. Коэффициент влияния зависит от параметров элементов схемы.

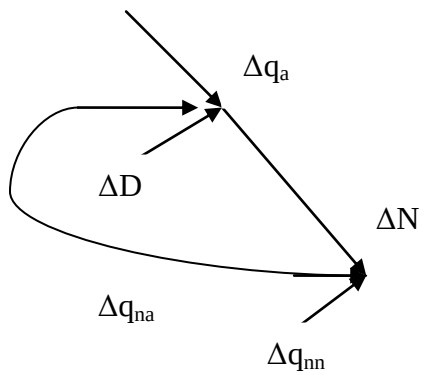
11.5. Учет взаимосвязи между погрешностями пассивных и активных элементов.



Если к схеме предъявляются высокие требования по точности, то необходимо учитывать взаимосвязи между погрешностями пассивных и активных элементов. Изменение погрешности пассивных элементов схемы, которые влияют на режим работы активных элементов, ведут к изменениям параметров и погрешностей этих элементов.

q_{nn} – пассивные элементы не влияющие на работу и погрешность активных элементов.

q_{na} – пассивные элементы влияющие на работу и погрешность активных элементов.

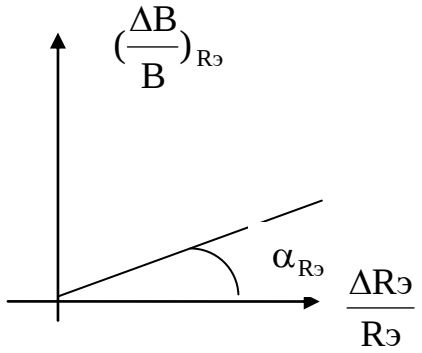


На погрешность влияют: температура, τ (тау), материал, технология изготовления, электронный режим. Погрешность параметра активного элемента будет иметь следующую зависимость от погрешности пассивных элементов:

$$\left(\frac{\Delta B}{B}\right)_{\Sigma} = \left(\frac{\Delta B}{B}\right)_{\text{произведение}} + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)_{R\text{э}} + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)_{Ea} + \ldots$$

$$\left(\frac{\Delta B}{B}\right)_{R\text{э}} = f_1\left(\frac{\Delta R\text{э}}{R\text{э}}\right).\ \ \left(\frac{\Delta B}{B}\right)_{Ea} = f_2\left(\frac{\Delta Ea}{Ea}\right).$$

Поскольку изменения проходят в небольших пределах, то эти зависимости линейные и характеризуются t_q угла наклона прямых линий которые проходят через (0,0).



$$(\frac{\Delta B}{B})Rэ = t_g\alpha_{Rэ}\frac{\Delta Rэ}{Rэ} = K_{Rэ}\frac{\Delta Rэ}{Rэ}.$$

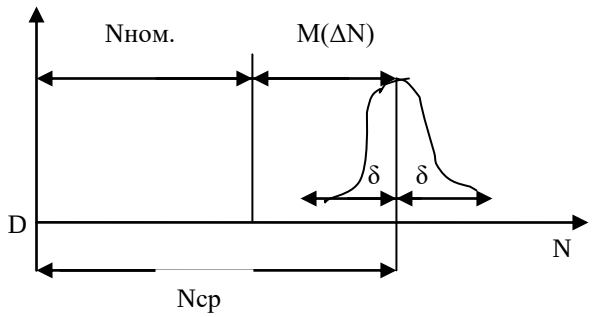
Найденные пропорциональные погрешности подставляются в уровне погрешности выходного параметра, при этом изменяются коэффициенты влияния для пассивных элементов, которые влияют на погрешность активных элементов, и в уравнении появляются дополнительные пропорциональные погрешности.

$$\frac{\Delta Kп}{Kп} = ... + \beta_{Rэ}\frac{\Delta Rэ}{Rэ} + ...$$

$$\frac{\Delta Kп}{Kп} = ... + (\beta_{Rэ} + K_{Rэ})\frac{\Delta Rэ}{Rэ} + ... + K_{Ea}\frac{\Delta Ea}{Ea} + ...$$

6.11.6. Расчет электрических допусков по вероятностным методам.

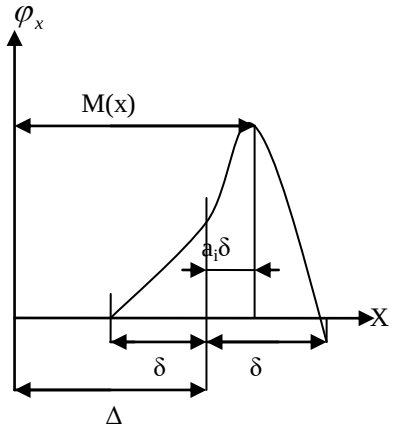
$$N_i = N_{ном} + \mu(\Delta N) \pm \partial(\Delta N).$$



Для расчета скалярных схем без учета взаимосвязи между параметрами элементов получается следующим образом: используется исходное уравнение погрешности и правила суммирования средних значений случайных величин получим формулу для расчета среднего значения выходного параметра или систематической погрешности выходного параметра.

$$M(\frac{\Delta N}{N}) = B_i \cdot \mu(\frac{\Delta q_i}{q_i});$$

$$M(\frac{\Delta N}{N})_\Sigma = \sum_{i=1}^{n}\mu(\frac{\Delta N}{N})i = \sum_{i=1}^{n}B_i \cdot \mu(\frac{\Delta q_i}{q_i}).$$



Устанавливаем связь между математическим ожиданием и характеристикой поля допусков.

a_i – коэффициент относительной симметрии.

$$M(x) - \Delta(x) + a_i\partial(x);$$

$$M(x) - \Delta(\frac{\Delta N}{N})_\Sigma + a_\Sigma\delta(\frac{\Delta N}{N}) = \sum_{i=1}^{n}Bi\left[\Delta(\frac{\Delta q_i}{q_i}) + a_i + \delta(\frac{\Delta q_i}{q_i})\right].$$

Распределение погрешностей выходного параметра представляет собой композицию ***законов распределений погрешности параметров элементов.***

$$\Delta(\frac{\Delta q_i}{q_i}) = 0;\ a_\Sigma = 0;\ \mu(\frac{\Delta N}{N})_\Sigma = \Delta(\frac{\Delta N}{N}) = \sum_{i=1}^{n}B_i \cdot a_i \cdot \delta(\frac{\Delta q_i}{q_i}).$$

Систематическая погрешность выходного параметра получается в том случае если распределение погрешностей параметров элементов ассиметричны. Используя исходные уравнения погрешностей и правила суммирования случайных величин, получим уравнения для расчета допуска на выходной параметр, то есть случайную часть погрешности выходного параметра. Характеристикой рассеивания случайной погрешности является квадратичная величина:

$$\sigma(\frac{\Delta N}{N})_i = B_i\delta(\frac{\Delta q_i}{q_i}); \sigma(\frac{\Delta N}{N})_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\sigma^2(\frac{\Delta N}{N})i} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}B_i^{\,2}\cdot\sigma^2(\frac{\Delta q_i}{q_i})}.$$

$$\delta(\frac{\Delta N}{N})_\Sigma = \frac{1}{в_\Sigma}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}B_i^{\,2}\cdot в_i^{\,2}\cdot\delta^2(\frac{\Delta q_i}{q_i})}.$$

Бородачов предложил сравнить закон распределения с нормальным законом с помощью коэффициента рассеивания.

$$K_i = \frac{в_i}{в_{i-1}}. - \text{коэффициента относительного рассеивания.}$$

$$\delta(\frac{\Delta N}{N})_\Sigma = \frac{1}{K_\Sigma}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}B_i^{\,2}K_i^{\,2}\delta^2(\frac{\Delta q_i}{q_i})}.\ \ K_\Sigma - \text{берется от процентного брака.}$$

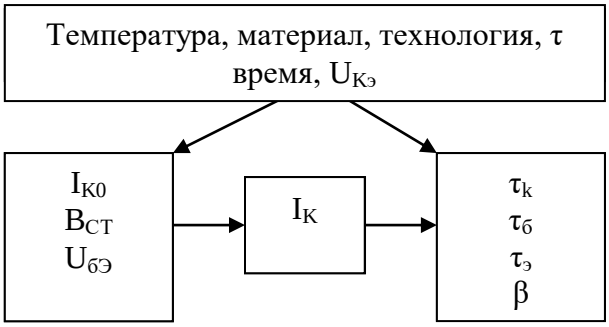
6.11.7. Расчет допусков для электронных скалярных цепей при наличии взаимно связанных погрешностей

Взаимосвязи между погрешностями активных элементов. Взаимосвязаны параметры лампы, транзисторов. Для пассивных элементов оказываются связанны параметры в пленочных микросхемах.

Взаимосвязь между параметрами элементов характеризуется коэффициентом корреляции.

$$Bi = B_{1i} + jB_{2i}.$$

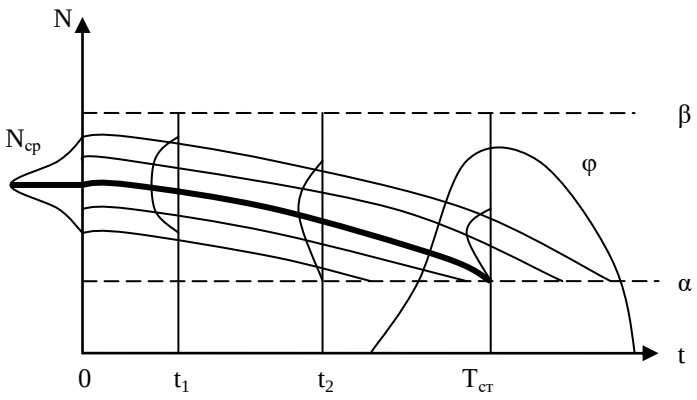
$$\delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \frac{1}{K_\Sigma}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}B_i^{\,2}K_i^{\,2}\delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) + 2\sum_{i=1}^{n}r_{ij}B_jK_iK_j\delta\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)\delta\left(\frac{\Delta q_j}{q_j}\right)}.$$



При проектировании электронных схем необходимо рассчитывать эксплуатационный допуск и этот допуск не должен превышать допуск, заданный по Т.З. При расчете эксплуатационного допуска, обусловленные внешними факторами (температура, влажность, старение и т.д.)

$$\delta(\frac{\Delta N}{N})_{экспл} = \sqrt{(\delta_{пр}^{\,2}(\frac{\Delta N}{N}) + \delta_t^{\,2}(\frac{\Delta N}{N}) + \delta^2{}_{стар}(\frac{\Delta N}{N}) + ...)}.$$

6.11.8. Оценка динамичной точности и параметрической надежности



$$\alpha = N_{ном} - \Delta N;$$

$$\beta = N_{ном} - \Delta N.$$

$D = вер(\alpha < N_i < \beta, t)$ – динамическая точность:

$$D_{Nt} = \frac{1}{\sigma_{Nt}\sqrt{2\pi}} \int_{\alpha}^{\beta} e^{-\frac{(Ni-Ncc)}{2\sigma_{Nt}^2}} dN.$$

Параметрическая надежность – вероятность того, что время работы будет больше заданного, при условии, что выходной параметр элемента будет больше α или меньше β.

$$P_п(t) = вер(T > t_з)_{Ni} \geq \alpha (или \leq \beta).$$

Чтобы подсчитать параметр надежность, необходимо найти законы распределения моментов пересечения траекторий случайной функции границы поля допуска.

$$Pп(t) = 1 - \int_0^t \sigma(t)dt = f(D_{пр}, D_{ст}, D_{экспл}).$$

Порядок расчета параметрической надежности:

1). Проводится расчет допусков для определения $N_{ср,t}$ и $\sigma_{N,t}$.

2). Определяется динамическая точность для момента времени t.

3). После расчета динамической точности определяется параметрическая надежность.

6.11.9. Обобщенный закон распределения времени исправной работы элементов (по внезапным и постепенным отказам)

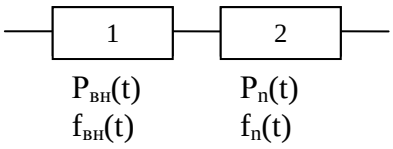
Предположим, что элементы прошли искусственное старение и введем следующие допущения:

1) Будем считать, что распределения не исправностей в результате аварий и поломок описываются экспоненциальным законом распределения с интенсивностью λ.

2) Распределение времени исправной работы описывается нормальным законом с параметрами $T_{ст}$ и $\sigma_{ст}$.

3) События, заключающиеся в выходе из строя элементов по причине старения и по причине аварии совместны и независимы.

На основании этих допущений можно каждый элемент представить в виде суммы двух элементов: один имеет отказы в виде аварий, а второй из-за старения.

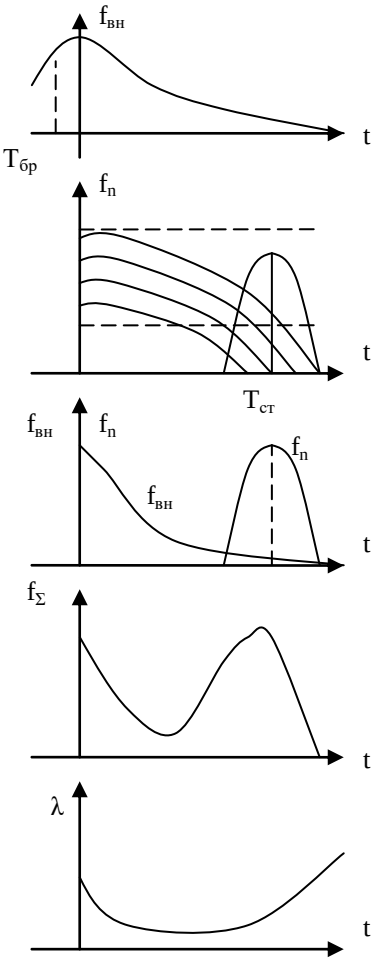


$$f_{вн}(t) = \lambda \cdot P_{вн}(t).$$

$$P_{вн}(t) = \int_t^{\infty} f_{вн}(t)dt = \int_t^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda t}.$$

$$f_n(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ст}} \cdot e^{-\frac{(t_i - T_{ст})^2}{2\sigma^2_{ст}}}.$$

Так как время не имеет значения, а ветвь кривой нормального распределения в пределах (-∞)проходит вблизи оси абсцисс, то можно изменить предел интегрирования, заменив 0 на (-∞).



$$Pn(t)=\int_t^{\infty} fn(t)dt=1-\frac{1}{\sigma_{ст}-\sqrt{2\pi}}\int_0^t e^{-\frac{(t-T_{ст})^2}{2\sigma^2_{ст}}}dt=1-\frac{1}{\sigma_{ст}-\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-T_{ст})^2}{2\sigma^2_{ст}}}dt=$$

$$=1-\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\frac{t-T_{ст}}{\sigma_{ст}}} e^{-\frac{x^2}{2}}dx=1-\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{0} e^{-\frac{x^2}{2}}dx-\frac{1}{-\sqrt{2\pi}}\int_{0}^{\frac{t-T_{ст}}{\sigma_{ст}}} e^{-\frac{x^2}{2}}dx=1-\frac{1}{2}-\Phi(\frac{t-T_{ст}}{\sigma_{ст}})=$$

$$=\frac{1}{2}+\Phi(\frac{t-T_{ст}}{\sigma_{ст}}).$$

$$Q_\Sigma(t)=1-P_\Sigma(t)=1-P_{вн}\cdot Pп=1-(1-Q_{вн})(1-Q_n)=$$

$$=1-1+Q_{вн}(t)+Q_n(t)-Q_{вн}(t)\cdot Q_n(t)=$$

$$Q_{вн}(t)+Q_n(t)-Q_{вн}(t)\cdot Q_n(t)\frac{dQ_\Sigma(t)}{dt}=$$

$$=\frac{dQ_{вн}(t)}{dt}+\frac{dQ_n(t)}{dt}-\frac{dQ_{вн}(t)}{dt}\cdot Q_n(t)-Q_{вн}(t)\cdot\frac{dQ_n(t)}{dt}.$$

$$f_\Sigma(t)=f_{вн}(t)+f_n(t)-f_{вн}(t)Q_n(t)-Q_{вн}(t)\cdot f_n(t)=$$

$$=f_{вн}(t)(1-Q_n(t))+f_n(t)(1-Q_{вн}(t))=f_{вн}(t)\cdot P_n(t)+f_n(t)\cdot P_{вн}(t).$$

$$f_\Sigma(t)=\lambda\cdot e^{-\lambda t}\left[\frac{1}{2}+\Phi(\frac{T_{ст}}{\sigma_{ст}})\right]+\frac{e^{-\lambda t}}{\sigma_{ст}\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(t-T_{ст})^2}{2\sigma_{ст}}}.$$

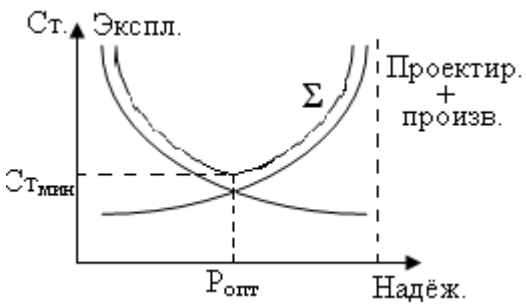
$$P_\Sigma(t)=1-\int_0^t f_2(t)dt=...=e^{-\lambda t}\left[\frac{1}{2}+\Phi(\frac{T_{ст}-t}{\sigma_{ст}})\right]=P_{вн}(t)\cdot P_п(t).$$

Если к изделию по техническим условиям предъявляется требование по параметрической надежности к нескольким выходным параметрам, то общая надежность по внезапным и постепенным отказам будет определяться как:

$$P_\Sigma(t)=P_{вн}(t)\prod_{i=1}^{n}P_{ni}(t).$$

6.12. Оптимальные задачи теории надёжности

При проведении работ по повышению надёжности аппаратуры обычно ставится задача не только обеспечить требуемый показатель надёжности, но и выполнить это как можно более экономично.



В других случаях при проектировании бортовой аппаратуры приходится учитывать не только стоимость, но и ограничения на массу, габариты, потребляемую энергию и т.д. Возникает проблема наиболее целесообразного решения задач надёжности с учётом заданных ограничений (лимитирующий фактор). Такого рода задачи называются оптимальными задачами теории надёжности. Примерами оптимальных задач могут быть:

- Оптимальное резервирование;
- Оптимизация проверок (диагностики);
- Оптимизация профилактических работ;
- Оптимизация ЗИПа.

Показатели надёжности могут быть улучшены только за счёт введения избыточности (схемной, конструктивной, технологической). Но всякая избыточность связана с дополнительными затратами. Экономическая эффективность от введения избыточности определяется следующим образом:

$$Э = \frac{P_{изб}(t) - P_0(t)}{C_{изб} - C_0};$$

где $P_{изб}(t)$ – уровень надёжности изделия после введения избыточности; $P_0(t)$ – исходный уровень надёжности; $C_{изб}$ и C_0 – стоимость избыточного изделия и начальная стоимость изделия.

Уровень роста таких показателей качества систем, как масса, габариты, стоимость, зависит не только от кратности резервирования, но и от выбора единицы резервирования (минимального участка), потому что при резервировании замещением возникают масштабы переключающего устройства или их количества, а при постоянном резервировании увеличивается число элементов связи и сложность компенсирующей схемы. Таким образом, возникают вопросы об оптимальном выборе числа участков резервирования и кратности резервирования для каждого участка проектируемой схемы.

6.12.1. Определение оптимального числа участков резервирования

При раздельном резервировании замещением выбор слишком мелких участков резервирования нецелесообразен в связи с недостаточной надёжностью переключающих устройств и большого их числа. С другой стороны при раздельном резервировании может быть более высокая надёжность. Поэтому, необходимо деление аппаратуры на оптимальное число участков резервирования, которое обеспечит максимальную надёжность при заданной надёжности переключающих устройств и кратности резервирования. Для повышения надёжности используем резервирование-замещение с переключателями 1-го типа и кратностью резервирования m. Определить оптимальное число участков резервирования.

$$P_c(t),\ m,\ n_{опт}.$$

Полагать для простоты все блоки резервирования равнонадёжными.

$$P_c = P_{бл}^n$$

Надёжность резервированной системы с переключателем 1-го типа будет равна:

$$P^I_{разд}(t) = [1-(1-P_n \cdot P_{бл})^{m+1}]^n = [1-(1-P_n \cdot P_c^{1/n})^{m+1}]^n;$$

$$Q^I_{разд}(t) = 1-\{1-[1-(1-q_n)(1-Q)^{1/n}]^{m+1}\}^n = 1-\{1-[1-(1-q_n)(1-\frac{Q_c}{n})]^{m+1}\}^n =$$

$$= 1-\left\{1-\left[1-(1-q_n)\left(1-\frac{Q_c}{n}\right)\right]^{m+1}\right\}^n = 1-\left\{1-\left[1-1+q_n+\frac{Q_c}{n}-q_n\cdot\frac{Q_c}{n}\right]^{m+1}\right\}^n =$$

$$= 1-\left[1-\left(q_n+\frac{Q_c}{n}\right)^{m+1}\right]^n = 1-1+n\left(q_n+\frac{Q_c}{n}\right)^{m+1} = n\left(q_n+\frac{Q_c}{n}\right)^{m+1}.$$

$$\frac{\delta Q_{разд}(t)}{\delta n}=\left(q_n+\frac{Q_c}{n}\right)^{m+1}-\frac{n\cdot Q_c(m+1)}{n^2}\cdot\left(q_n+\frac{Q_c}{n}\right)^m=\left(q_n+\frac{Q_c}{n}\right)^m\left(q_n-m\frac{Q_c}{n}-\frac{Q_c}{n}\right)=$$

$$=\left(q_n+\frac{Q_c}{n}\right)^m\left(q_n-m\frac{Q_c}{n}\right)=0.$$

$$q_n-m\frac{Q_c}{n_{опт}}=0;\qquad n_{опт}=m\frac{Q_c}{q_n}.$$

6.12.2. Прямая задача оптимального резервирования

$P_{зад}(t)$. Требуется найти такое количество резервных элементов m_i для каждого участка, чтобы показатель $P_{зад}$ обеспечивался при минимальной массе системы.

Резервирование с целой кратностью. Полагаем, что надёжность резервированной системы достаточно высока, так что показатель надёжности проектируемой системы.

$$P(M)=1-Q(M)=1-\sum_{i=1}^{n}Q_{уч_i}\geq P_{зад}.$$

$M=<m_1,m_2,...,m_n>-$ вектор состава системы;

$Q_{уч\,i}$ – вероятность отказа i-го участка системы.

При нагруженном резерве $Q_{уч_i}=q_i^{m_i+1}$;

M – число участков резервирования;

m_i – кратность резервирования i-го участка;

q_i – вероятность отказа i-го элемента.

Обозначим массу i-го элемента через G_i.

Тогда масса системы равна: $G_{\sum}(M)=\sum_{i=1}^{n}G_i m_i-$ целевая функция.

Для решения задачи используем метод множителей Лагранджа (метод оптимизации, относится к группе аналитических методов оптимизации). При оптимизации технических участков обязательно накладываются ограничения. В этом случае мы ищем условный экстремум целевой функции. Некоторые задачи поиска безусловного экстремума представляют значительные трудности, тогда такие задачи переводят на определение безусловного экстремума. Один из методов перевода задачи нахождения экстремума на безусловный экстремум – ***метод Лагранджа.*** В нем используется ограничение типа равенство, при чем число ограничений всегда меньше числа неизвестных параметров, содержащихся в целевой функции. Лагранж предложил форму функции Лагранджа, которая состоит из суммы целевой функции и суммы функции ограничений, умноженных на некоторый пока неизвестный параметр λ. λ – это такие числа, при которых функция Лагранджа имеет в точке условного экстремума безусловный экстремум. От функции необходимо брать производные по числу неизвестных параметров целевой функции. Получаем n уравнений. n полученных уравнений + k уравнений ограничений в сумме дают систему из n + k уравнений, решая которую мы

находим n неизвестных параметров, определяющих целевую функцию, и k неизвестных множителей λ.

$$Q(M)=\sum_{i=1}^{n} q_i^{m_i+1} \le Q_{зад};$$

$$F_л(M,\lambda)=G(M)+\lambda\cdot Q(M)=\sum_{i=1}^{n} G_i m_i+\lambda\sum_{i=1}^{n} q_i^{m_i+1}.$$

Для каждого искомого аргумента m_i находим:

$$\frac{\delta F_л}{\delta m_i}=\frac{\delta}{\delta m_i}\left(\sum_{i=1}^{n} G_i m_i+\lambda\sum_{i=1}^{n} q_i^{m_i+1}\right)=G_i+\lambda\cdot\ln q_i\cdot q_i^{m_i+1}=0.$$

$$q_i^{m_i+1}=-\frac{G_i}{\lambda\cdot\ln q_i}=\frac{\alpha_i}{\lambda}. \quad (**)$$

$$\alpha_i=-\frac{G_i}{\ln q_i}; \quad \lambda=\frac{1}{Q_{зад}}\sum_{i=1}^{n}\alpha_i.$$

Неизвестная величина λ оказалась выраженной через известные величины qi и G_i. Логарифмируя уравнение (**) получаем:

$$(m_i+1)\ln q_i=\ln\frac{\alpha_i}{\lambda}; \qquad m_i=\frac{\ln\frac{\alpha_i}{\lambda}}{\ln q_i}-1.$$

При решении могут получиться нецелочисленные значения m_i, которые округляем в сторону ближайшего большего и меньшего значений, производя перебор 2^n число участков резервирования. Часть этих целых значений сразу исключается, так как для них не выполняется требуемое условие $P(M) \ge P_{зад}$. Из числа оставшихся решений выбирается то, которое характеризуется наименьшей суммарной массой резервных элементов.

6.12.3. Основы технического обслуживания электронной аппаратуры

Техническим обслуживанием называют комплекс работ для поддержания исправности или только работоспособности изделия при подготовке и использованию по назначению, при хранении и транспортировании. Показатели технического обслуживания:

а) для однократно обслуживаемых изделий:

- вероятность выполнения операций по ТО. $P_{обсл}(t)$ – вероятность того, что изделие будет обслужено в конкретных условиях за время не более заданного.

$$P_{обсл}(t)=вер(T_{обсл}<T_{обсл\,зад}); \; P_{обсл}(t)=1-e^{-t/T_{обсл}}.$$

- частота выполнения операций по ТО. $a_{обсл}(t)$ – плотность распределения времени обслуживания.

$$a_{обсл}(t)=\frac{h(\Delta t)}{\Delta t\cdot N_{обсл}}.$$

- интенсивность выполнения операций по ТО. $\mu_{обсл}(t)$ – вероятность обслуживания изделия в единицу времени после данного момента времени.

$$\mu_{обсл}(t) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t \cdot N(t)_{необсл}}.$$

- среднее время обслуживания партии изделий. $T_{обсл;}$

б) для многократно обслуживаемых изделий

- параметр потока обслуживания. M(t) – среднее количество обслуживания изделий в единицу времени взятое для рассматриваемого момента времени.
- Среднее время одного цикла обслуживания. $T_{обсл\ ц}$ – среднее время обслуживания, взятое за несколько циклов обслуживания.

Рассматривается следующая составляющая ТО:

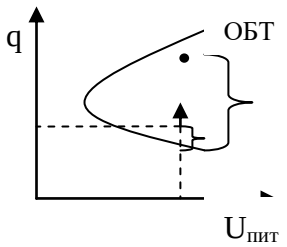
1) контроль технического состояния;
2) профилактическое обслуживание;
3) снабжение;
4) сбор и обработка результатов эксплуатации.

Контроль технического состояния проводится для оценки состояния аппаратуры, то есть её соответствие техническим условиям. Профилактическое обслуживание – главная задача ТО. Оно выполняется в плановом порядке для поддержания аппаратуры в работоспособном состоянии, предупреждении отказов при использовании по назначению или при хранении и продлении её ресурсов. ***Профилактическое обслуживание,*** на выполнение которого установлены сроки и время проведения, называется регламентными работами. ***Снабжение*** предусматривает частичное обновление ЗИПа для проведения профилактического обслуживания. ***Сбор и обработка результатов эксплуатации*** проводится для количественной оценки эксплуатационно-механических показателей за определённый период эксплуатации.

Профилактические работы предусматривают:

1) внешний осмотр и чистка аппаратуры;
2) контрольно регулировочные работы;
3) прогнозирование отказов;
4) сезонные, смазочные и крепёжные работы;
5) технические осмотры;
6) технические проверки.

Внешний осмотр выполняется для: выявления внешних признаков возможных неисправностей, проверки правильности установки органов управления, проверки состояния элементов и их монтажа. ***Чистка аппаратуры*** предусматривает удаление с неё пыли, влаги и коррозии. Наиболее трудоёмкой частью профилактического обслуживания являются ***контрольно регулировочные работы*** и тесно связанные с ними работы по прогнозированию отказов. ***Прогнозирование отказов*** осуществляется для постепенных отказов с целью своевременной замены (ремонта, регулировки) соответствующих элементов и блоков. Для этого используются графики граничных испытаний.



Технические осмотры и технические проверки проводятся для систематического контроля за техническим состоянием аппаратуры. ***Технические осмотры*** осуществляются с целью проверки

правильности содержания и сбережения аппаратуры, проверки аппаратуры, правильности ведения, технической и учётно-отчётной документации, а также укомплектованности ЗИПом. ***Технические проверки*** проводятся для определения технического состояния работоспособности и готовности аппаратуры. Они предусматривают технический осмотр, проверку своевременности регламентных работ, ремонтов и знание обслуживающим персоналом аппаратуры и правил её эксплуатации.

Профилактическое обслуживание включает 3 этапа:

1) Профилактические работы на обесточенной аппаратуре производится при внешнем осмотре и чистке аппаратуры. Они предусматривают осмотр состояния монтажа, гаек, креплений чистку блоков, замену смазок.

2) Профилактические работы под током предусматривают проверку узлов и блоков на соответствие режимам, указанном в ТУ. Проверку работоспособности элементов и устройств, регулировку и подстройку параметров элементов и устройств.

3) Профилактический контроль функционирования аппаратуры предусматривает контроль работоспособности изделия в нормальных и специальных режимах, а также комплексную проверку и отладку основных параметров аппаратуры.

При определении объема и периодичности проведения регламентных работ необходимо учитывать 2 противоречивых требования: с одной стороны профилактические работы повышают надежность, а с другой ведут к простою, отсюда к снижению K_2, а также экономическим затратам, поэтому при ***организации профилактических работ.***

К ним предъявляют следующие требования:

- Обеспечить поддержание показателей надежности на требуемом уровне.
- Предусмотреть минимальную стоимость профилактических работ и их выполнения.
- Спланировать и организовать проведение профилактических работ наиболее простыми методами.

Объем и периодичность регламентируются специальными инструкциями по эксплуатации конкретной аппаратуры. Периодичность регламентируемых работ назначают из времени работы аппаратуры или календарного срока эксплуатации. Регламентируемые работы проводят через определенный календарный срок независимо от того, сколько времени используется аппаратура по назначению в течение этого срока.

Регламентируемые календарные работы бывают:

- Ежедневные.
- Декадные.
- Месячные.
- Полугодовые.
- Годовые.

Каждый последующий вид из перечисленных регламентируемых работ имеет свой соответственно больший объем работ, чем предыдущий, и как правило, включает весь объем работ предыдущего вида.

Профилактические работы позволяют прогнозировать и предотвращать постепенные отказы, но они не могут прогнозировать внезапные отказы. Для предотвращения постепенных отказов требуется выбрать период профилактики с тем, чтобы при последующей профилактике подстроить аппаратуру и предотвратить уход параметров аппаратуры за пределы поля допуска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фокин Ю.А. Надежность и эффективность сетей электрических систем. - М.: Высш. шк., 1989. - 149 с.

2. Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике. - Ленинград.: Энергоатомиздат, 1990. - 206 с.

3. Гук Ю.Б. Анализ надежности электроэнергетических установок. - Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. - 220 с.

4. Надежность систем энергетики. Вып. 95. - М.: Наука, 1980.

5. Фокин Ю.А., Туфанов В.А. Оценка надежности систем электроснабжения, - М.: Энергоиздат, 1981. - 224 с.

6. Руденко Ю.Н., Чельцов М.В. Надежность и резервирование в электроэнергетических системах (методы исследования).- Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1974. - 261 с.

7. Руденко Ю.Н., Ушаков И.А. Надежность систем энергетики. - М.: Наука, 1986.

8. Розанов М.Н. Надежность электроэнергетических систем. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 200 с.

9. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем. - М.: Высш. шк., 1984. - 256 с.

10. Фокин Ю.А. Вероятностно-статистические методы в расчетах надежности систем электроснабжения. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 240 с.

11. Непомнящий В.А. Учет надежности при проектировании энергосистем. - М.: Энергия, 1978. - 200 с.

12. Фокин Ю.А. Вероятностные методы в расчетах надежности систем электроснабжения. - М.: МЭИ, 1977. - 84 с.

13. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем. - М.: Энергия, 1977. - 536 с.

14. Левин Б.Р. Теория надежности радиотехнических систем (математические основы). - М.: Советское радио, 1978. - 264 с.

15. Жуков Л.А., Стратан И.П. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем (методы расчетов). - М.: Энергия, 1979. - 416 с.

16. Автоматизация управления энергообъединениями / Под ред. С.А. Совалова. - М.: Энергия, 1979. - 432 с.

17. Баркан Я.Д., Орехов Л.А. Автоматизация энергосистем. - М.: Высш. шк., 1981. - 271 с.

18. Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах: Пер. с англ. / Под ред. Ю.Н. Руденко. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 336 с.

19. Зорин В.В., Тисленко В.В., Клеппель Ф., Адлер Г. Надежность системы электроснабжения. - Киев: Вища школа, 1984. - 192 с.

20. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. - Л.: Энергия, 1976. - 248 с.

21. Нечипоренко В.И. Структурный анализ и методы построения надежных схем. - М.: Советское радио, 1968. - 254 с.