

2324

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ
АКАДЕМИЯ

Кафедра «Электрические системы»

В.М.Цыганков

**НАДЕЖНОСТЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И
СЕТЕЙ**

Конспект лекций

для студентов заочного и дневного отделений специальностей
Т.01.01.00 – «Электроэнергетика» и Т.01.03.00 – «Автоматизация
управления энергетическими процессами»

Минск 2001

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ
АКАДЕМИЯ

Кафедра «Электрические системы»

В.М.Цыганков

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

для студентов заочного и дневного отделений специальностей
Т.01.01.00 – «Электроэнергетика» и Т.01.03.00 – «Автоматизация
управления энергетическими процессами»

Минск 2001

УДК 621.311.019.3(075.8)

ББК 31.279я7

Ц 94

Рецензент В.А.Анищенко

Цыганков В.М.

Ц94

Надежность электрических систем и сетей: Конспект лекций для студентов заочного и дневного отделений специальностей Т.01.01.00 – «Электроэнергетика» и Т.01.03.00 – «Автоматизация управления энергетическими процессами». – Мн.: БГПА, 2001. – 152 с.

ISBN 985-6529-31-X

В пособии рассмотрены основные положения, основы анализа и обеспечения надежности работы электрических систем и сетей. Даются определения понятий теории надежности, описываются методы расчетной и статистической оценки показателей надежности, основы обеспечения и расчета структурной и функциональной надежности электрических систем и сетей, а также пути ее повышения.

Издание предназначено для студентов всех форм обучения электроэнергетических специализаций по специальностям Т.01.01 – «Электроэнергетика» и Т.01.03 – «Автоматизация и управление энергетическими процессами» при изучении вопросов надежности электросистем и сетей.

УДК 621.311.019.3(075.8)

ББК 31.279я7

ISBN 985-6529-31-X

© Цыганков В.М., 2001

В в е д е н и е

Концентрация и централизация производства и распределения электроэнергии приводят к созданию крупных энергообъединений, сложность которых возрастает не только в структурном, но и в функциональном отношении. Мощное энергообъединение – характерная, искусственно созданная большая система, организация управления которой является сложнейшей научно-технической проблемой. При этом появляется риск выбора неправильных, неоптимальных решений. Чем больше факторов, не поддающихся количественному анализу, тем больше вероятность неправильных решений и их отрицательных последствий. Среди всех факторов надежность занимает особое место. Практически трудно назвать решение при эксплуатации или проектировании энергосистем и сетей, при принятии которого не требовалось бы учитывать надежность.

Под надежностью энергосистем (энергообъединений) и электрических сетей понимают их способность выполнять основную функцию – бесперебойное электроснабжение электроэнергией требуемого нормативного качества. В настоящее время обеспечение надежности энергосистем и электрических сетей как их части становится одной из острых проблем энергетики как в теоретическом, так и в практическом аспекте. Теория надежности энергосистем имеет ряд специфических особенностей и опирается на многие дисциплины, изучающие энергетические системы, и в первую очередь на такие как “ Математические задачи энергетики ”, “ Электрические сети и системы ”, “ Переходные процессы в электрических системах ” и другие, широко используя результаты решения их основных задач. Пособие является конспектом лекций, читаемых автором на пятом курсе специальности “ Электроэнергетика ” БГПА с 1991 года. В связи с тем что студенты пятого курса уже изучили основные дисциплины по электрическим системам и сетям, автор при изложении курса опирается на эти знания и приводит только основные моменты для некоторых тем (разделы 1, 2).

1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

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

Проблема надежности электрических систем относится 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). Определим понятие объекта, применяемое в определении надежности.

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, распределена между отдельными частями системы, объекта, аппаратуры.

Первые систематические попытки изучения надежности и создания ее теории связаны с техническим прогрессом в 40-50-х годах, когда недостаточная надежность стала тормозом на пути реализации новых идей в авиации, кораблестроении, ракетостроении, радиотехнике, 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», «Релейная защита и автоматика»).

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 приходится 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 необходимого качества и в нужном количестве. На это влияют непредвиденные причины – отказы или аварии в энергосистемах, перебои в топливоснабжающей 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, проводятся 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 способствуют 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 1965 г. в США привела к тому, что на территории с населением 30 млн. человек более 10-ти часов была приостановлена жизнедеятельность, ущерб оценивался приблизительно в 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-ти часов была парализована жизнь одного из крупнейших городов мира. Ущерб составил приблизительно 1 млрд. долларов. Чернобыльская авария на атомной электростанции – самая страшная. Ущерб от нее оценивается сотнями миллиардов долларов.

В энергосистемах последние несколько десятков лет наблюдается тенденция укрупнения всех элементов, увеличение их единичной мощности. Так, например, в энергетике СССР за период с 1970 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 1970 г. – 3000, 575 и 5000 МВт). Технический прогресс в развитии генерирующих мощностей проявился также в увеличении с 1970 по 1985 г. доли конденса-

онных 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, в условиях увеличения числа системных аварий, разрабатываются методы оценки их вероятности, включая каскадное развитие аварий, обусловленное отказами автоматики и коммутационной аппаратуры, возникновением недопустимых режимов работы элементов. Отказ элемента в этих случаях, 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 аварийных режимов энергосистем.

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:

резервирование (повышение надежности путем дублирования элементов и функций, предоставление дополнительного времени для выполнения задачи, использование избыточной информации при управлении);

совершенствование конструкций и материалов, из которых сделаны элементы энергосистемы; повышение их запасов прочности,

долговечности, устойчивости, сопротивления неблагоприятным явлениям внешней и внутренней среды;

совершенствование технического обслуживания, оптимизация периодичности и глубины капитальных и профилактических ремонтов, снижение продолжительности аварийных ремонтов;

совершенствование систем контроля и управления процессами в электрических системах.

Проблема надежности управления энергосистемами (как и другими техническими системами) за последние 2-3 десятилетия резко обострилась. Это вызвано следующими причинами:

резким увеличением сложности энергосистем, включающих миллионы потребителей, тысячи узлов и элементов;

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

повышением требований к качеству работы (эффективность, высокие параметры энергии);

увеличением ответственности функций, выполняемых энергосистемой, высокой экономической и технической ценой отказа;

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 ею 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 включает понятия структурных составляющих электрической системы.

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

Надежность основной электрической сети – способность стабильно 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 электропитание 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 спасения 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 уменьшении 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, ремонтпригодность, 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) – предупреждение 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, не зависящих 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 также 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. В этом случае *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, их считают предметами определенного целевого назначения – объектами. Например, при исследовании надежности электрической станции считаем ее системой, элементы которой генераторы, трансформаторы, выключатели, шины. Если

рассматриваем надежность генератора как системы, 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, масштаба 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 недопуску 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 износозависимые (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 (к.з.)» и «обрыв». Вне-

запные отказы происходят в электрической системе под действием релейной защиты. Различают также *отказы устойчивые* и *неустойчивые*. При устойчивом отказе для восстановления работоспособности требуется вмешательство обслуживающего персонала. Неустойчивый отказ самоустраняется или устраняется автоматически. К последним можно отнести переходящие короткие замыкания 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 . Нарработка до отказа может измеряться временем (в большинстве случаев) или числом включений (срабатываний, циклов).

Например, рассмотрим график эксплуатации системы автоматического управления.

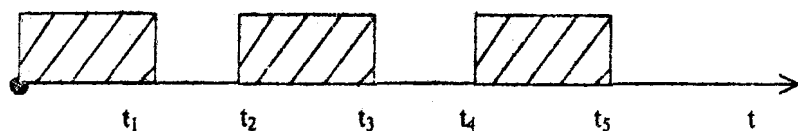


Рис. 1.1. График эксплуатации системы автоматического управления

Здесь имеем

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

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

t_2, t_4 – моменты 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) – те, 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.

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ (ЭС)

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 энерго-

потребляющих 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;

чувствительность ЭС к внезапным отклонениям частоты;

наличие в сетях 110-330 кВ большого количества выключателей, отключающая способность которых не соответствует уровням токов к.з. в ЭС, что 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 выполняются в зависимости от категории электроприемников. Для электроустановок, работающих круглосуточно, не допускающих перерыва в питании, схема электроснабжения должна быть выполнена таким образом, чтобы при выходе из строя 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 дежурным персоналом.

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 на основе технико-экономических расчетов нескольких вариантов схемы ЭС по уровню напряжений в узлах 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 к.з.;

- 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 изменяются 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_n) 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_n) 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, она зависит от жест-

кости других узловых точек. Чем ближе точка к шинам бесконечной мощности, тем она жестче.

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

Наилучшие 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 автоматического ввода резервного питания.

2.3. Надежность работы объединенной ЭС

Повышение надежности работы ЭС достигается также путем их объединения. При этом увеличивается резерв мощности. Для увеличения динамической устойчивости объединенной ЭС при многофазных к.з. желательна двухцепная связь. При однофазном к.з. на линиях связи разрыв ЭС можно предотвратить путем использования быстродействующего однофазного автоматического повторного включения с $t_{вкл} = 0,3 \dots 0,5$ 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 из-за больших колебаний величин тока и мощности (I и S), особенно для электростанций вблизи линий связи ЭС с другими энергообъединениями.

Величина тока при колебаниях в асинхронном режиме является функцией реактивности межсистемных связей, влияющей на величину обменного потока.

Когда асинхронный режим нежелателен, при его появлении в ЭС следует автоматически разрывать линии связи ЭС с другими энергообъединениями.

При увеличении мощности ЭС и количества межсистемных связей растут величины токов к.з., что *понижает надежность*. К.з.

становятся опасными для выключателей и аппаратуры, установленной в первые периоды развития ЭС. Снижается динамическая устойчивость.

Для ограничения токов к.з. в ЭС следует проводить следующие мероприятия:

- 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 к.з. производят токоограничивающими реакторами. Их лучше ставить на низком напряжении силового трансформатора.

Если нет реакторов, делают секционирование сети путем установки автоматических выключателей с автоматическим повторным включением (АПВ), оно снижает несимметричные токи к.з., 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 сети ЭС:

- снижается жесткость системы;

- затрудняются нормальные и утяжеляются послеаварийные режимы;

- усложняются условия регулирования напряжения;

- увеличиваются потери мощности и энергии в сети.

Ввиду перечисленных недостатков 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 к.з.

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 автоматического регулирования частоты (АРЧ) и ограничения перетоков активной мощности по межсистемным и внутренним связям ЭС (АРЧМ);

устройства автоматического регулирования напряжения трансформаторов;

устройства автоматического регулирования возбуждения (АРВ) синхронных машин с форсировкой возбуждения при аварийных отклонениях напряжения;

устройства релейной защиты, отключающие поврежденные элементы ЭС, и устройства автоматического повторного включения, восстанавливающие схему при неустойчивых к.з.;

устройства автоматического ввода резервного питания (АВР);

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 (коэффициент готовности, коэффициент вынужденного простоя, поток отказов (частота)).

Допущения:

1) отказы элементов – независимы, исключаются отказы от общих факторов (ураган, гололед);

2) 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 приближения к аварийному значению. Здесь работа автоматической частотной разгрузки (АЧР) может быть вызвана небольшими дефицитами мощности (аварии, утяжеление условий работы).

Требования к надежности электроснабжения устанавливаются правилами устройства электроустановок (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;
- усложнение схемы основной сети и ее режимов;
- увеличение максимальной мощности, передаваемой по межсистемным линиям энергопередач;
- увеличение обменной мощности и повышение энергетической взаимосвязи параллельных энергосистем;
- усложнение управляемости энергообъектов, ЭС и энергообъединений;
- увеличение «связности» отдельных элементов ЭС, их влияние при авариях 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 объединенной энергосистемы (ОЭС) включает:

обеспечение резерва мощности и пропускной способности электрических сетей;

реализацию требований к надежности схем присоединения электростанций, схем питания узлов нагрузки основных и распределительных сетей, главных схем электрических соединений, схем собственных нужд электростанций 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;

состава работ по оснащению ЭС и энергообъектов средствами оперативного и автоматического управления;

порядка разработки и внедрения режимов ОЭС;

системы 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 и эксплуатации ЭС и оперативному управлению. К этим документам относятся:

руководящие указания по проектированию энергосистем и энергообъектов;

правила технической эксплуатации (ПТЭ) электростанций и сетей;

ПУЭ;

руководящие указания по устойчивости ЭС;

руководящие указания по релейной защите, системной и противоаварийной автоматике;

нормативные показатели использования оборудования электростанций;

ограничения 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, противоаварийной автоматики (ПА) и коммутационных аппаратов;

ввод мощности на электростанции 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, ТЭС с агрегатами менее 100 МВт – 2%; 100-135 МВт – 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%; 1000 МВт – 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), для КЭС и ТЭС с агрегатами менее 100 МВт – 2,5%; с агрегатами 100-135 МВт – 3,5%; с 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 агрегатов электростанций – *среднестатистические значения относительной длительности аварийного простоя к нормальной работе*. Эти показатели: для агрегатов ГЭС – 0,005; для ТЭС – 0,02; для энергоблоков ТЭС 500 МВт – 0,055; для энергоблоков ТЭС 1600 МВт и для АЭС – 2000, 1500 МВт – 0,13-0,14.

Уровни токов к.з. (периодической составляющей) на шинах электростанций, подстанций не должны превышать следующих значений: при U от 110 до 150кВ – 31,5кА; от 220 до 330кВ – 40кА; от 500 до 750кВ – 63кА.

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

Например, для I категории: двухлучевая схема с двухсторонним питанием и АВР на напряжении 0,4кВ двухтрансформаторных подстанций (ТП) 10/0,4 кВ при подключении взаимно резервирующих линий 10 (6) кВ к разным независимым 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);
- автоматическое повторное включение (АПВ);
- автоматический ввод резерва (АВР);
- автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) генераторов;
- автоматическая синхронизация генератора (АС);
- аварийная автоматическая разгрузка ЭС по частоте (ААРЧ);
- автоматическое регулирование по частоте (АРЧ).

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

Наиболее частые повреждения – короткие замыкания, их последствия:

большие понижения напряжения в значительной части ЭС, приводящие к нарушению работы потребителей;

разрушение электрической дугой электроснабжения;

нарушение статической и динамической устойчивости ЭС, при этом парализуется нормальная работа ЭС.

Время отключения при к.з. поврежденного элемента ЭС – доли секунды. Срабатывают реле, выключатели – релейная защита. Отключаемым элементом ЭС при к.з. часто является воздушная линия (ВЛ).

При автоматическом повторном включении (АПВ) воздушных линий удается в 60-90% случаях аварийных отключений сохранить питание потребителей. АПВ выполняются как однократные, дву-

кратные и многократные. Их эффективность сохранения питания нагрузки воздушных линий: второго включения – 15%, третьего – 1,5 – 3%.

На шинах подстанций с помощью АПВ удается в 70% случаев поврежденных шин сохранять подачу электроэнергии.

3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

3.1. Показатели надежности восстанавливаемых 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 – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ ЭС или ее элемента не возникает;

среднее время безотказной работы (средняя наработка до отказа) T – математическое ожидание наработки ЭС или ее элемента до первого отказа;

средняя наработка на отказ τ , τ_{cp} – 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 невозстанавливаемым элементам ЭС.

С учетом материала по математическим основам надежности, изложенного в курсе «Математические основы энергетики», рассмотрим по табл.3.1 функциональную связь между основными показателями надежности: $p(t)$, $F(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$, τ , – т.е. вероятностью безотказной работы; функцией распределения (вероятностью отказа q), плотностью распределения наработки до отказа, интенсивностью отказов и средней наработкой до отказа.

Таблица 3.1

Функциональная связь между показателями надежности

| | $F(t)$ | $p(t)$ | $f(t)$ | $\lambda(t)$ |
|-----------------|------------------------------|----------------------------|--|---|
| $F(t)$ | — | $1-p(t)$ | $\int_0^t f(t)dt$ | $1 - e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$ |
| $p(t)$ | $1-F(t)$ | — | $1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^{\infty} f(t)dt$ | $e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$ |
| $f(t)$ | $\frac{dF(t)}{dt}$ | $-\frac{dp(t)}{dt}$ | — | $\lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$ |
| $\lambda(t)$ | $\frac{dF(t)/dt}{1-F(t)}$ | $-\frac{dp(t)/dt}{1-p(t)}$ | $\frac{f(t)}{p(t)}$ | — |
| $\tau = T_{ср}$ | $\int_0^{\infty} [1-F(t)]dt$ | $\int_0^{\infty} p(t)dt$ | $\int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt$ | $\int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} dt$ |

В табл. 3.2 указанные величины представлены для основных законов распределения случайной величины (СВ).

Здесь:

α – вид плотности распределения;

k – масштаб распределения СВ;

Γ – гамма-функция.

Таблица 3.2

Показатели надежности для основных законов распределения

| | $p(t)$ | $f(t)$ | $\lambda(t)$ | $F(t)$ | τ |
|---------------------------------|--|--|---|--|--|
| Экспоненциальное распределение | $e^{-\lambda t}$ | $\lambda \cdot e^{-\lambda t}$ | λ | $1 - e^{-\lambda t}$ | $\frac{1}{\lambda}$ |
| Нормальное распределение | $1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx$ | $\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}$ | $\frac{e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma} - \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx}$ | $\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx$ | m |
| Распределение Вейбулла-Гнеденко | $e^{-\alpha t^k}$ | $\alpha \cdot k t^{k-1} e^{-\alpha t^k}$ | $k\alpha \cdot t^{k-1}$ | $1 - e^{-\alpha t^k}$ | $\frac{\Gamma(\frac{1}{k} + 1)}{\alpha^{1/k}}$ |

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.

$$p(t) = 1 - q(t); \quad 0 \leq P(t) \leq 1; \quad P(0) = 1; \quad P(\infty) = 0.$$

С другой стороны,

$$p(t) = 1 - F(t),$$

где $F(t) = q(t)$ – вероятность появления отказа в течение времени t ;

$p(t)$ – монотонно убывающая функция;

$F(t)$ – монотонно возрастающая функция.

Статистическая оценка

$$p^*(t) = \frac{N_o - n(t)}{N_o}, \quad (3.1)$$

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.

$$q(t) = 1 - p(t) = F(t), \quad (3.2)$$

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

Подставляя формулу (3.2) в (3.1), имеем

$$1 - q^*(t) = \frac{N_o - n(t)}{N_o},$$

откуда

$$q^*(t) = 1 - \frac{n(t)}{N_o} = \frac{N_o - N_o + n(t)}{N_o} = \frac{n(t)}{N_o}, \quad (3.3)$$

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 $t = \text{var}$ (переменная величина) от 0 до ∞ , то имеем $q(t) = \text{var}$ от 0 до 1.

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

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

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.

$$t_{ai} = -\bar{t}_{ai} = \frac{t_{ai}}{n_i},$$

где n_i – число аварий i -го элемента;

t_{ai} – среднее время аварии.

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

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

$\lambda_i(t)$ – надёжность работы элемента i в часовом пределе (t_1, t_2) .

$$p_i(t) = \exp \left[- \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \right]. \quad (3.6)$$

Интегральная функция распределения вероятностей отказа

$$F(t) = p(t_{omk} \leq t) = \frac{n(t_{omk} \leq t)}{N_0(t=0)} = \begin{cases} 0, & t = 0 \\ 1, & t = \infty \end{cases}. \quad (3.7)$$

Функция (3.7) численно равна доле начального количества объектов $N_0(t=0)$, отказавших до произвольного, но фиксированного момента времени t , что составляет $n(t_{omk} \leq t)$ объектов.

Для этого случая вероятность безотказной работы

$$p(t) = p(t_{omk} > t) = \frac{n(t_{omk} > t)}{N_0(t=0)} = \begin{cases} 0, & t = \infty \\ 1, & t = 0 \end{cases}. \quad (3.8)$$

Таким образом, интегральная функция распределения вероятностей безотказной работы $p(t)$ численно равна доле начального коли-

чества объектов $N_0(t=0)$, не отказавших до произвольного, но фиксированного момента времени t . Это $n(t_{отк} > t)$ объектов.

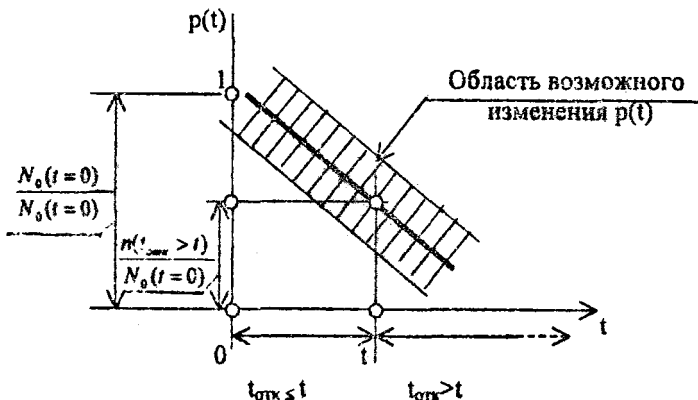


Рис.3.1. Зависимость безотказной работы объекта в функции времени

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

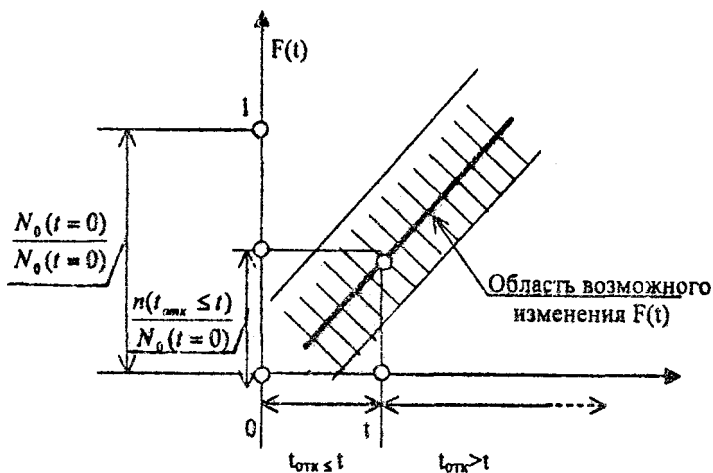


Рис.3.2. Зависимость функции распределения вероятности отказа объекта во времени

Из приведенных формул (3.7) и (3.8) и рис.3.1 и 3.2 видно, что

$$\begin{aligned} n(t_{отк} > t) &= N(t=0) - n(t_{отк} \leq t); \\ n(t_{отк} \leq t) &= N(t=0) - n(t_{отк} > t). \end{aligned} \quad (3.9)$$

Следовательно:

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

Для произвольного момента времени $0 \leq t \leq \infty$. Таким образом, вероятность безотказной работы объекта в течение времени t и вероятность его отказа до момента t образуют полную группу несовместимых событий:

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

3). Среднее время безотказной работы или средняя наработка до отказа (τ , $T_{ср}$, T_0) – математическое ожидание случайной величины времени безотказной работы элемента до первого отказа, т.е. математическое ожидание наработки до первого отказа.

$$\tau = T_{ср} = T_0 = \int_0^{+\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{+\infty} t \cdot q'(t) dt = \int_0^{+\infty} t \cdot a(t) dt, \quad (3.12)$$

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

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

$$\tau = T_0 = \int_0^{\infty} t a(t) dt = - \int_0^{\infty} t p'(t) dt = \left[t p(t) \right]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} p(t) dt. \quad (3.13)$$

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

$$\tau = T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt . \quad (3.14)$$

Для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы имеем

$$T_0 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} . \quad (3.15)$$

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. $\lambda(t) = \text{const}$, то и $T_0 = \text{const}$, 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

$$\tau^* = T_{cp}^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0} , \quad (3.16)$$

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

N_0 – общее число элементов, взятых для испытания.

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

$$T_{cp}^* = \frac{\sum_{i=1}^{n/\Delta t} n_i \bar{t}_a}{N_0} , \quad (3.17)$$

где n_i – число элементов, отказавших в i -м интервале;
 $t_{iк}$ – время, в течение которого отказало N_0 элементов;
 Δt – выбранная величина интервала времени.

$$\bar{t}_\alpha = \frac{t_{i-1} + t_i}{2} - \text{среднее время } i\text{-го интервала,} \quad (3.18)$$

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

t_i – время в конце i -го интервала.

С другой стороны, имеем

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

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 .

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

Понятие интенсивности 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 произошёл (интенсивность появления отказов в единицу времени).

$$\lambda(t) = \frac{\alpha(t)}{p(t)}, \text{ т.к. } p(t) \leq 1, \text{ то } \lambda(t) \geq \alpha(t), \quad (3.21)$$

где $p(t)$ – вероятность безотказной работы элемента ЭС;

$\alpha(t)$ – частота отказов элемента ЭС.

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

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

или

$$\lambda^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \cdot \Delta t}, \quad (3.23)$$

где Δt – интервал времени;

$\Delta n(t)$ – число элементов, отказавших за время Δt ;

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

$N(t)$ – число элементов, исправно работающих к началу некоторого 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 времени Δt .

Покажем справедливость этой оценки. Учитывая, что $N_{cp} = N_0 - n(t)$, получим:

$n(t)$ – число изделий, отказавших в течение времени t ;

$n(\Delta t)$ – число изделий (элементов), отказавших в течение времени Δt ;

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

где $N(t)$ и $N(t + \Delta t)$ – число изделий (элементов), безотказно проработавших в течение времени t и $t + \Delta t$ соответственно.

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

$$N(t) = N_0 \cdot p(t); \quad (3.24)$$

$$N(t + \Delta t) = N_0 \cdot p(t + \Delta t). \quad (3.25)$$

Отсюда

$$\lambda^*(t) = \frac{-N_0 [p(t + \Delta t) - p(t)]}{N_0 [1 - \frac{n(t)}{N_0}] \Delta t}. \quad (3.26)$$

При достаточно большом N_0 можно записать

$$\lambda^*(t) = \frac{-[p(t + \Delta t) - p(t)]}{p(t) \Delta t}. \quad (3.27)$$

При $\Delta t \rightarrow 0$ получим

$$\lambda^*(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p(t + \Delta t) - p(t)}{p(t) \Delta t} = \frac{-p'(t)}{p(t)} = \frac{a(t)}{p(t)}. \quad (3.28)$$

Для высоконадёжных систем, если $p(t) = 0,99$, то, как следует из формулы (3.28), $a(t) \approx \lambda(t)$.

Ошибка не более 1% и не превышает ошибок статистического определения $a(t)$ и $\lambda(t)$.

Следует подчеркнуть разницу между величинами $a(t)$ и $\lambda(t)$. Вероятность $a(t)dt$ характеризует вероятность отказа за интервал времени $(t, t + \Delta t)$ системы (элемента), взятой(го) произвольным образом из группы систем (элементов), причём неизвестно, в каком состоянии (работоспособном или неработоспособном) находится система (элемент). Вероятность $\lambda(t)dt$ характеризует вероятность отказа за интервал времени $(t, t + \Delta t)$ системы (элемента), взятую(го) из

группы систем (элементов), которые остались работоспособными к моменту времени t .

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

$$-\int_0^t \lambda(t) dt = \ln p(t) \quad \text{или} \quad p(t) = \exp \left[-\int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (3.29)$$

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{p(t)}; \Rightarrow a(t) = -p'(t) = -\frac{dp(t)}{dt}; \Rightarrow$$

$$\lambda(t) = -\frac{dp(t)}{dt} \frac{1}{p'(t)}; \Rightarrow \lambda(t) dt = -\frac{dp(t)}{p(t)}; \Rightarrow$$

$$\lambda(t) dt = -d \ln p(t) \Rightarrow \int \lambda(t) dt = -\int d \ln p(t); \Rightarrow$$

$$\int_0^t \lambda(x) dx = -\int_0^t d \ln p(x); \Rightarrow \int_0^t \lambda(x) dx = -\ln p(x) \Big|_0^t; \Rightarrow$$

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

$$-\int_0^t \lambda(x) dx = \ln p(t).$$

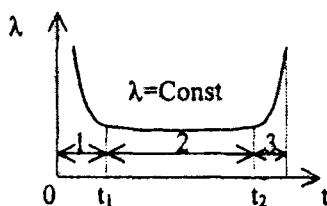


Рис. 3.3. Зависимость интенсивности отказа объекта в функции времени

На рис. 3.3 представлена типичная зависимость $\lambda(t)$, где зона 1 – период приработки элемента ЭС; зона 2 – период нормальной эксплуатации элемента ($\lambda = \text{const}$); зона 3 – период износа элемента ЭС.

Если интенсивность отказов $\lambda = \text{const}$, то имеем экспоненциальное распределение (наиболее часто используемое в энергетике для периода нормальной работы элементов ЭС).

$$p(t) = e^{-\lambda t}; \quad (3.30)$$

$$a(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}; \quad (3.31)$$

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

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

Для электрических сетей и ЛЭП формулы (3.30), (3.31) справедливы после 2-3 лет эксплуатации, но учитывая, что срок службы ЛЭП 50-60 лет, 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

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

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 $\lambda(t)$ – среднее число отказов в единицу времени.

5). Нарботка на отказ T_o – среднее время безотказной работы невозстанавливаемых элементов до отказа или восстанавливаемого элемента между соседними отказами.

$$T_o = \frac{t}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (3.34)$$

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.

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

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

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

$$a^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}, \quad (3.36)$$

где N_0 – общее количество элементов, взятых для испытания или эксплуатируемых;

$n(\Delta t)$ – 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 течение времени Δt :

$$n(\Delta t) = -[N(t + \Delta t) - N(t)], \quad (3.37)$$

где $N(t)$ и $N(t + \Delta t)$ – число изделий, безотказно проработавших в течение времени t и $(\Delta t + t)$ соответственно.

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

$$N(t) = N_0 P(t); \quad (3.38)$$

$$N(t + \Delta t) = N_0 P(t + \Delta t). \quad (3.39)$$

Тогда

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

При $\Delta t \rightarrow 0$ получим

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

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 исходя 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 течение выбранного промежутка времени Δt .

Из теории вероятностей известно, что

$$f(t) = \frac{n(t < t_{омк} \leq t + \Delta t)}{N_0(t = 0) \Delta t} \text{ (ед. времени}^{-1}\text{)}; \quad (3.42)$$

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

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 $\lambda(t)$

$$\lambda(t) = \frac{n(t < t_{омк} \leq t + \Delta t)}{n(t_{омк} > t) \Delta t} \text{ (ед. времени}^{-1}\text{)} \quad (3.44)$$

показывает, что эти величины отличаются только общим количеством объектов в знаменателе, к которым относится количество элементов в числителе $n(t < t_{омк} \leq t + \Delta t)$, отказавших после произволь-

ного, но фиксированного момента времени t в течение выбранного промежутка времени Δt .

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

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

так как

$$p(t) = 1 - q(t) = \int_0^{\infty} a(x) dx - \int_0^t a(x) dx = \left(\int_0^{\infty} \rightarrow \int_t^{\infty} \right) = \int_t^{\infty} a(x) dx.$$

Частота отказов элементов также связана с их интенсивностью отказов

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{p(t)}. \quad (3.46)$$

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

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

7). Дисперсия времени жизни элемента ЭС

$$D(t) = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - T_{cp}^2 = 2 \int_0^{\infty} t p(t) dt - T_{cp}^2. \quad (3.47)$$

Статистическая дисперсия

$$D^* = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2, \quad (3.48)$$

где

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

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

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

где T – время жизни элемента ЭС.

3.2. Достоинства и недостатки основных показателей надёжности

1). Вероятность безотказной работы $p(t)$.

Достоинства:

характеризует изменение надёжности во времени;

даёт возможность наглядно судить о надёжности;

показатель может быть использован для расчёта надёжности новых систем до их реализации;

$p(t)$ характеризует стоимость изготовления и эксплуатации систем;

показатель охватывает большинство факторов, влияющих на надёжность.

Недостатки:

показатель характеризует надёжность восстанавливаемых систем до первого отказа и является достаточно полной характеристикой только систем разового пользования;

показатель не даёт характеристики между временными составляющими цикла эксплуатации;

эта величина не всегда удобна для оценки надёжности простых элементов при отсутствии старения;

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 и математическое ожидание, которому он равен, не полностью характеризует надёжность восстанавливаемых систем, надо ещё знать дисперсию времени отказов. Величина T_{cp} характеризует работу системы до первого отказа.

3). Нарботка 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. С ее помощью довольно просто вычислить количество отказавших систем в интервале Δt , но по её величине нельзя судить о надёжности.

5). Интенсивность отказов λ .

Достоинства:

$\lambda(t)$ – функция времени и позволяет наглядно установить характерные участки работы системы, это даёт возможность наметить пути по повышению надёжности;

по показателю $\lambda(t)$ довольно просто найти другие характеристики надёжности.

Недостаток – показатель используется для невосстанавливаемых систем (элементов).

3.3. Показатели надёжности восстанавливаемых элементов (объектов, систем)

Для оценки надёжности восстанавливаемых, т.е. ремонтнопригодных элементов (объектов, систем), используются следующие показатели надёжности.

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

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

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

$$S^*(t) = \frac{N_a}{N_{ос}}, \quad (3.50)$$

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

N_a – число изделий, время восстановления которых было меньше заданного времени t .

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

Статистическая оценка величины $G(t)$

$$G^*(t) = \frac{N_{ос} - N_a}{N_{ос}}. \quad (3.51)$$

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

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

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

$$a_e(t) = S'(t) = -G'(t). \quad (3.53)$$

Статистическая оценка величины $a_e(t)$

$$a_e^*(t) = \frac{n_e(\Delta t)}{N_{ос} \cdot \Delta t}, \quad (3.54)$$

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

$n_e(\Delta t)$ – число восстановленных элементов в интервале времени $(t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2})$;

Δt – интервал времени.

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

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

Статистическая оценка величины $\mu^*(t)$

$$\mu^*(t) = \frac{n_g(\Delta t)}{N_{g,ср.} \cdot \Delta t}, \quad (3.56)$$

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

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

В отличие от процесса отказов, развивающегося 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 нормы времени на проведение ремонтных работ, то $\mu(t) = \mu = \text{const}$ 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:

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

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

$$T_g = \int_0^{\infty} G(t) dt; \quad T_g = \int_0^{\infty} t a_g(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - S(t)] dt. \quad (3.58)$$

Статистическая оценка времени восстановления находится из выражения

$$T_g^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} t_{gi}}{N_{ог}}, \quad (3.59)$$

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

$N_{ос}$ – количество изделий, поставленных на восстановление.

При $\mu = \text{const}$ имеем

$$T_g = \frac{1}{\mu}. \quad (3.60)$$

Среднее время восстановления включает продолжительность послеаварийного ремонта $T_{ав}$ и продолжительность планового ремонта $T_{пл}$:

$$T_g = T_{ав} + T_{пл}. \quad (3.61)$$

Статистическая оценка этой величины определяется из выражения

$$T_g = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i, \quad (3.62)$$

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 его расчетная формула практически 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

$$a_g(t) = \mu \cdot e^{-\mu t}, \quad (3.63)$$

где $a_g(t)$ – частота восстановления;

μ – интенсивность восстановления, $\mu(t) = \mu = \text{const}$.

Вероятность восстановления

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

Среднее время восстановления

$$T_s = \frac{1}{\mu}. \quad (3.65)$$

б). *Поток отказов* $\omega(t)$ – математическое ожидание числа отказов элементов, произошедшее 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

$$\omega^*(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t} = \frac{n_1(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}, \quad (3.66)$$

где $\Delta n(t, t + \Delta t)$, $n_1(\Delta t)$ – 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.

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

Среднее время наработки на отказ

$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\omega_{\text{год}^{-1}}} = \frac{8760}{\omega_{\text{час}^{-1}}}. \quad (3.67)$$

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

Поток отказов – *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.

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

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

Таким образом, $\omega(t)$ – 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. На рис. 3.4 имеем интервал времени $0 \dots t_1$ – приработочные дефекты изготовления и монтажа элемента ЭС, например, для ЛЭП это время составляет 1-3 года; интервал времени $t_1 \dots t_2$ – нормальная работа элемента ЭС; интервал времени $t_2 \dots t_3$ – износ изделия.

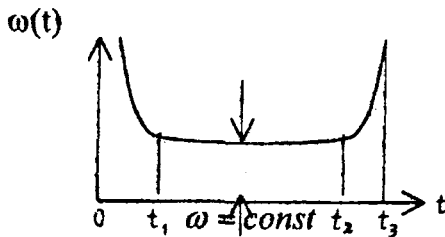


Рис 3.4. Зависимость потока отказов объекта в функции времени

Вероятность возникновения m отказов за время t при частоте отказов ω в пуассоновском потоке событий вычисляется по формуле

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

При длительности периода работы элемента ЭС t , равной одному году:

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

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

Вероятность безотказной работы элемента

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

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:

$$T_{\text{цикла}} = T + T_a, \quad (3.71)$$

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

T_a – среднее время восстановления объекта (элемента).

Частота появления отказов объекта

$$f = \frac{1}{T_{\text{цикла}}}. \quad (3.72)$$

Коэффициент готовности K_r – вероятность того, что объект работоспособен в произвольный момент времени.

$$K_r = \frac{T}{T_{\text{цикла}}} = \frac{T}{T + T_a} = \frac{\mu}{\mu + \lambda}. \quad (3.73)$$

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

Коэффициент K_r 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 K_r

$$K_r^* = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m t_{oi}}, \quad (3.74)$$

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

t_{oi} – время восстановления элемента ЭС;

m – число отказов объекта (элемента) ЭС.

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

$$K_n = 1 - K_r = \frac{T_o}{T + T_o} = \frac{T_o}{T_{цикла}} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}. \quad (3.75)$$

Статистическая оценка коэффициента K_n

$$K_n^* = \frac{\sum_{i=1}^m t_{oi}}{\sum_{i=1}^m t_{oi} + \sum_{i=1}^m t_i}. \quad (3.76)$$

При этом

$$K_r + K_n = 1. \quad (3.77)$$

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

$$p_p(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\lambda + \mu)t}; \quad (3.78)$$

$$p_o(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\mu + \lambda} e^{-(\lambda + \mu)t}, \quad (3.79)$$

где $p_p(t)$ – вероятность работоспособного состояния объекта (элемента);

$p_o(t)$ – вероятность состояния восстановления объекта;

μ – интенсивность восстановления объекта;

λ – интенсивность отказов объекта.

Коэффициенты готовности и неготовности можно рассматривать как предел $p_p(t)$ и $p_o(t)$ при $t \rightarrow \infty$.

Отсюда следует

$$K_r = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{1}{1 + \lambda/\mu}; \quad (3.80)$$

$$K_n = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{(\lambda/\mu)}{(1 + \lambda/\mu)}. \quad (3.81)$$

Величина $\gamma = \lambda/\mu = \lambda \cdot T_a$ 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.

$$K_r = \frac{1}{1 + \gamma}; \quad K_n = \frac{\gamma}{1 + \gamma}; \quad \gamma = \frac{K_n}{K_r}. \quad (3.82)$$

Частота появления отказов

$$f = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} + T} = \frac{\lambda}{1 + \gamma} = \lambda \cdot K_r. \quad (3.83)$$

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

$$K_{ор}(t, \tau) = K_r(t) P(\tau). \quad (3.84)$$

Коэффициент $K_{ор}$ позволяет оценить надежность оборудования в аварийный период.

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

$$K_{ти} = \frac{T_{раб} + T_{рез}}{T_{раб} + T_{рез} + T_{ав} + T_{пр}}, \quad (3.85)$$

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 ремонтпригодностью. В качестве основной характеристики безотказности системы служит *функция надежности*, которая представляет собой вероятность безотказной работы в течение некоторого времени t .

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

$$p(t) = p_1(t) \cdot p_2(t) \cdot \dots \cdot p_n(t). \quad (3.86)$$

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

$$p(t) = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n) \cdot t] = \exp[-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t]. \quad (3.87)$$

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

$$T_c = \int_0^{\infty} p(t) dt = \int_0^{\infty} \exp\left[-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t\right] dt = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n}. \quad (3.88)$$

С другой стороны, среднее время жизни системы или наработка ее на отказ равна

$$T_c = \frac{T}{m}, \quad (3.89)$$

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 ремонтпригодности *служит среднее время восстановления системы*

$$T_a = \int_0^{\infty} [1 - S(t)] dt, \quad (3.90)$$

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

Для случая пуассоновского потока восстановления имеем

$$T_a = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda_a \cdot t)^m}{m!} e^{-\lambda_a t} dt = \frac{1}{\lambda_a}, \quad (3.91)$$

где $\lambda_a = \mu_a$ – интенсивность восстановления;

t – время восстановления.

Среднее время статистической модели восстановления системы по результатам испытания или эксплуатации

$$T_a^* = \sum_{i=1}^n m_i \cdot t_{a_i} / \sum_{i=1}^m m_i, \quad (3.92)$$

где m_i – число отказов i -го элемента;

t_{oi} – время восстановления i -го отказа элемента.

Всякая система характеризуется комплексными показателями надежности, основными из которых являются коэффициенты готовности K_r , технического использования $K_{тн}$, оперативной готовности $K_{ог}$.

Коэффициент K_r характеризует готовность элемента к применению по назначению в произвольный момент времени (кроме планируемых периодов обслуживания). Показатель этот комплексный, т.к. зависит от безотказности и ремонтнопригодности.

$$K_r = \frac{T}{T + T_o}, \quad (3.93)$$

где T – средняя наработка системы (элемента) на отказ;

T_o – среднее время восстановления отказа.

$$T_o = \int_0^{\infty} t \cdot a_o(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - S(t)] dt, \quad (3.94)$$

где $S(t)$ – функция распределения времени восстановления;

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

Статистическая оценка показателей надёжности T_o^* , T^* составляет величину

$$T_o^* = \bar{t}_o = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{oi}, \quad (3.95)$$

где t_{oi} – время восстановления i -го отказа;

m – число отказов в рассматриваемом промежутке времени.

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

где t_i – наработка системы до i -го отказа;

m – число отказов в интервале суммарной наработки.

Коэффициент технического использования $K_{\text{ти}}$ 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 $K_{\text{ти}}$ учитывает затраты времени на плановые и внеплановые ремонты:

$$K_{\text{ти}} = 1 - K_{\rho_{\text{и}}} - K_{\rho} ; \quad (3.97)$$

$$K_{\rho_{\text{и}}} = \frac{1}{T_s} \sum_{i=1}^m t_{\sigma_i} ; \quad K_{\rho} = \frac{T_p}{T_s}, \quad (3.98)$$

где T_s – период эксплуатации;

T_p – суммарное время на все виды обслуживания за период эксплуатации;

t_{σ_i} – время восстановления i -го отказа;

m – число отказов в интервале суммарной наработки.

В формулах для K_r (3.93) и $K_{\text{ти}}$ (3.97) среднее время жизни (наработка системы) и среднее время восстановления элемента системы отражаются выражениями (3.88) и (3.92).

Коэффициент оперативной готовности $K_{\text{ог}}$ 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 .

$$K_{\text{ог}} = K_r \cdot P(t) = P(t) \frac{T}{T + T_g}. \quad (3.99)$$

3.6. Показатели надёжности концентрированной ЭС и методы их определения

3.6.1. Вероятность снижения мощности ЭС

Однородная концентрированная ЭС – система 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 биномиальному распределению

$$q_k^{\text{ЭС}} = C_n^k q^k (1 - q)^{n-k}, \quad (3.100)$$

где $q_k^{\text{ЭС}}$ – вероятность снижения мощности ЭС при выходе из строя k генераторов;

n – общее количество работающих генераторов;

k – количество генераторов, вышедших из строя;

C_n^k – сочетание из n элементов по k ;

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

Интегральный закон распределения снижения мощности ЭС:

$$F_k^{\text{ЭС}} = q_0^{\text{ЭС}} + q_1^{\text{ЭС}} + q_2^{\text{ЭС}} + \dots + q_k^{\text{ЭС}}. \quad (3.101)$$

3.6.2. Частота попадания ЭС в k -е состояние

$$\omega_k^{\text{ЭС}} = \omega_k^{\text{ЭС/}} + \omega_k^{\text{ЭС//}}, \quad (3.102)$$

где $\omega_k^{\text{ЭС/}}$ – частота попадания ЭС в k -е состояние путём "сверху" при переходе в k -е состояние из $(k-1)$ -го состояния;

$\omega_k^{\text{ЭС//}}$ – частота попадания ЭС в k -е состояние путём "снизу" из $(k+1)$ -го состояния ЭС.

Путь "сверху":

$$q_{k-1}^{\text{ЭС}} = C_{n-1}^{k-1} q^{k-1} (1-q)^{n-k}, \quad (3.103)$$

где $q_{k-1}^{\text{ЭС}}$ – вероятность, что $(k-1)$ генераторов простаивает.

Средняя наработка k -го генератора в данном состоянии за время t

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

Количество отказов k -го генератора за время t_n в $(k-1)$ -м состоянии ЭС

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

где ω – частота отказов генератора.

Частота переходов системы в k -е состояние из $(k-1)$ -го из-за отказа k -го генератора

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

Частота рассматриваемых событий, обусловленная отказом любого из n генераторов:

$$\omega_k^{\text{ЭС/}} = n \omega_{k(k)}^{\text{ЭС/}} = n \omega C_{n-1}^{k-1} q^{k-1} (1-q)^{n-k+1}; \quad (3.107)$$

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

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 нижеприведенным выражениям.

1). Параметр потока отказов цепи

$$\omega_{\eta} = \sum_{i=1}^k \omega_i. \quad (3.109)$$

2). Время наработки цепи до отказа

$$T_{\eta} = \frac{1}{\omega_{\eta}}. \quad (3.110)$$

3). Вероятность безотказной работы цепи в течение года

$$p_{\eta}(t) = \prod_{i=1}^k p_i(t) = e^{-\omega_{\eta} t}. \quad (3.111)$$

4). Среднее время восстановления цепи

$$T_{\sigma\eta} = \frac{1}{\omega_{\eta}} \sum_{i=1}^k \omega_i T_{\sigma i}. \quad (3.112)$$

5). Коэффициент неготовности (вынужденного простоя)

$$K_n = K_a = K_{\text{н}} = \omega_{\text{ц}} T_{\text{вы}} = \sum_{i=1}^k \omega_i T_{\sigma_i} = \sum_{i=1}^k K_{\text{н}_i} = \sum_{i=1}^k K_{\sigma_i}. \quad (3.113)$$

Для элемента цепи вероятность безотказной работы за время t при экспоненциальном законе распределения ($\omega = \text{const}$)

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

Вероятность отказа элемента цепи

$$q_i(t) = 1 - p_i(t). \quad (3.115)$$

При малых значениях ωt можно принять $q(t) = \omega t$, тогда вероятность безотказной работы в течение года

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

Средняя наработка до отказа

$$T_n = \frac{1}{\omega}. \quad (3.117)$$

Коэффициент готовности

$$K_r = \frac{T_n}{T_n + T_g}. \quad (3.118)$$

При n параллельных цепях с одинаковыми характеристиками среднее время восстановления системы

$$T_{\text{вс}} = \frac{T_{\text{вы}}}{n}. \quad (3.119)$$

Среднее время работы системы между двумя отказами

$$T_{нс} = \frac{T_{вц}}{n} \left[\left(\frac{T_{вц} + T_{нц}}{T_{вц}} \right)^n - 1 \right]. \quad (3.120)$$

При двух цепях среднее время восстановления

$$T_{вс} = \frac{T_{вц}}{2}. \quad (3.121)$$

Время наработки двух цепей (системы) до отказа

$$T_{нс} = \frac{T_{вц}}{n} \left[\left(\frac{T_{вц} + T_{нц}}{T_{вц}} \right)^2 - 1 \right] = \frac{T_{нц}^2}{2T_{вц}} + T_{нц}. \quad (3.122)$$

3.8. Основные показатели ремонтпригодности элементов ЭС

Ремонтпригодность – 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 теории вероятности, математической статистики и теории массового обслуживания.

Единичные показатели:

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

$$T_a = M[t_a] = \int_0^{\infty} t f_a(t) dt, \quad (3.123)$$

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

По статистическим данным

$$T_o^* = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{oi}, \quad (3.124)$$

где t_{oi} – время устранения i -го отказа ;

m – число отказов в процессе эксплуатации или испытаний.

2). Характеристики рассеяния:

$$D^*(t_o) = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (t_{oi} - T_o^*)^2 ; \quad (3.125)$$

$$\sigma^*(t_o) = \sqrt{D^*(t_o)}. \quad (3.126)$$

3). Вероятность восстановления объекта в заданное время t

$$P_o(t) = P(t_o \leq t) = \int_0^t f_o(t) dt. \quad (3.127)$$

Статистическая оценка показателя

$$P_o^*(t) = 1 - n(t) / N(t), \quad (3.128)$$

где $n(t)$ – число изделий, не восстановленных за промежуток времени t ;

$N(t)$ – число изделий, подлежащих восстановлению за промежуток времени t .

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

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

$$\mu(t) = f_o(t) / (1 - F_o(t)), \quad (3.129)$$

где $F_g(t)$ – функция распределения времени восстановления.
 Статистическая оценка интенсивности восстановления

$$\mu^*(t) = \frac{m_g(t + \Delta t)}{n_g(t)\Delta t}, \quad (3.130)$$

где Δt – рассматриваемый промежуток времени;

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

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

$$\mu(t) = 1 / T_g; \quad \mu^*(t) = 1 / T_g^*. \quad (3.131)$$

Для наиболее распространённого экспоненциального закона

$$P_g(t) = 1 - e^{-\mu t} = 1 - e^{-\frac{t}{T_g}}. \quad (3.132)$$

Число отказов, которые могут быть устранены за время t :

$$m = \lambda T(1 - e^{-\mu t}), \quad (3.133)$$

где λ – интенсивность отказов ;

T – время эксплуатации.

Если

$$k = \mu t \quad (3.134)$$

среднее число восстановлений за заданное время t , то для определения вероятности m восстановлений используем закон Пуассона

$$P_m = \frac{k^m}{m!} e^{-k}. \quad (3.135)$$

При $k < 1$

$$P_m = \frac{k^m}{m!} \left(1 - k + \frac{k^2}{2} \right). \quad (3.136)$$

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

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

Уравнение определяет, какова вероятность общего за время эксплуатации числа отказов, которые могут быть устранены за время t .

Комплексные показатели ремонтпригодности

1). Коэффициент готовности для нерезервированной системы

$$K_r = T_o / (T_o + T_g), \quad (3.138)$$

где T_o – наработка на отказ;

T_g – среднее время восстановления отказа.

$$K_r = \mu / (\lambda + \mu); \quad (3.139)$$

$$\mu = 1 / T_g; \quad \lambda = 1 / T_o. \quad (3.140)$$

2). Коэффициент ремонта (простоя) для нерезервированной системы

$$K_p = T_p / (T + T_p) \quad (3.141)$$

или

$$K_p = \lambda / (\lambda + \mu), \quad (3.142)$$

где T_p – время ремонта;

T – рабочее время (время эксплуатации).

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

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

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

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

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

где n – число резервных элементов.

Когда допускается предельное время обслуживания t :

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

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

4). Коэффициент технического использования

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

3.9. Выбор и перераспределение показателей надёжности проектируемой системы

При проектировании очень важно правильно выбрать показатели надёжности.

При этом учитываются 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 является безопасность, выражаемая в виде наработки на отказ или вероятности безотказной работы.

Если при простое системы после отказа имеем большой ущерб, то необходимы 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 нормальное функционирование в течение заданного срока эксплуатации.

Если p_1, p_2, \dots, p_n – надёжности подсистемы, отказ каждой из которых даёт отказ системы, то надёжность системы

$$p = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n \quad (3.148)$$

При этом требуемая надёжность системы (p^{TP}): $p^{\text{TP}} \geq p$.

При повышении надёжности $p \geq p^{\text{TP}}$ необходимы дополнительные затраты (резервирование или более надёжные элементы).

Методика повышения надёжности p до p^{TP} сводится к следующему:

1). Показатели надёжности подсистем располагают в неубывающей последовательности

$$p_1 \leq p_2 \leq p_3 \leq \dots \leq p_n. \quad (3.149)$$

2). Каждую из надёжностей p_1, p_2, \dots, p_k увеличивают до p_0^{TP} , а надёжности начиная с p_{k+1}, \dots, p_n остаются неизменными. Номер k выбирают из j_{max} :

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

где $p_{n+1} = 1$ по определению.

Значение p_0^{TP}

$$p_0^{\text{TP}} < \left[\frac{p^{\text{TP}}}{\prod_{j=1}^{n+1} p_j} \right]^{k-1}. \quad (3.151)$$

При этом новая надёжность систем

$$(p_0^{\text{TP}})^k p_{k+1} \dots p_n = (p_0^{\text{TP}})^k \prod_{j=k+1}^{n+1} p_j = p^{\text{TP}}. \quad (3.152)$$

3.10. Количественные оценки показателей надёжности

Эти показатели надёжности используются при расчёте необходимого резерва ЭС и других расчётах надёжности. Они базируются на статистических показателях (табл. 3.3-3.10).

Таблица 3.3

Показатели надежности энергоблоков ЭС

| Тип электростанций | $K_в$ (коэффициент 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 100-200 МВт | 0,045 | 1,2 |
| 300 | 0,055 | 1,4 |
| 500 | 0,065 | 1,6 |
| 800 | 0,075 | 1,8 |
| 1200 | 0,085 | 2,0 |

Примечание. Для новых серий турбогенераторов показатели надежности необходимо первые три-четыре года умножать на 1,5.

Таблица 3.4

Показатели надежности трансформаторов, сетей и линий

| Наименование объекта | Частота отключений ω , 1/год на 100 км | Время восстановления $T_в$, ч | Частота плановых ремонтов μ , 1/год | Продолжительность планового ремонта $T_п$, ч |
|--------------------------|---|--------------------------------|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Трансформатор 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, кабельная сеть | 0,005 | 100 | 0,5 | 10 |
| 6-10, воздушная сеть | 0,05 | 100 | 0,5 | 10 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|-----|----|----|---|
| ВЛ с АПВ напряжением 500 кВ на металлических 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 деревянных 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 |

Примечания.

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

2). Для ВЛ на двухцепных опорах или одноцепных по 1-й трассе для кабельных линий в 1-й траншее надо выделять отказы для двух цепей.

3). Доля отказов с простоем двух цепей составляет 10-30 % общего числа отказов одной цепи. Таким образом, для двухцепных ЛЭП:

$$\text{частота отказов каждой из цепей } \omega' = (1 - K_{2л})\omega_{л};$$

$$\text{частота отказов для двух цепей } \omega'' = K_{2л}\omega_{л};$$

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

4). Для трехобмоточных трансформаторов, автотрансформаторов показатель частоты отключений (поток отказов) обычно увеличивается на 20%.

Таблица 3.5

Характеристики надёжности агрегатов электростанций

| 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 | 1 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 6 | 8 | 10 | 5 |
| $T_{\text{в}}$, ч | 40 | 60 | 50 | 70 | 50 | 60 | 90 | 100 | 110 | 200 |
| $\mu_{\text{тек}}$, 1/год | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| $T_{\text{тек}}$, ч | 0 | 0 | 15 | 15 | 20 | 20 | 30 | 50 | 90 | 240 |
| $\mu_{\text{кап}}$, 1/год | 0,2 | 0,2 | 0,25 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1 |
| $T_{\text{кап}}$, ч | 100 | 200 | 700 | 1000 | 700 | 900 | 1100 | 1400 | 2000 | 1100 |

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

Таблица 3.6

Характеристика надёжности трансформаторов и автотрансформаторов

| Номинальное напряжение, кВ | Показатели надёжности | | | | | |
|----------------------------|-----------------------|--------------------|---------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| | ω , 1/год | $T_{\text{в}}$, ч | μ , 1/год | $T_{\text{кап}}$, ч | $\mu_{\text{кап}}$, 1/год | $T_{\text{тек}}$, 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 |

Таблица 3.7

Характеристики надёжности выключателей

| Тип линий | Номинальное напряжение, кВ | Показатели надёжности воздушных и кабельных линий | | | | | | |
|-----------|----------------------------|---|--------------------|--------------|----------------------|----------------|---------------------|---------------|
| | | ω , 1/год | ω_n , 1/год | $T_{от}$, ч | $\mu_{кабл}$, 1/год | $T_{кабл}$, ч | $\mu_{тек}$, 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_n – в цепях ВЛ; ω – в остальных случаях.

Таблица 3.8

Характеристики надёжности воздушных линий

| Тип линий | Номинальное напряжение, кВ | Показатели | | | |
|------------|----------------------------|------------------------------|--------------|---------------------|---------------|
| | | ω , 1/(год на 100 км) | $T_{от}$, ч | $\mu_{тек}$, 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; $\mu_{тек}$ – для средних длин ЛЭП.

Таблица 3.9

Характеристики надёжности отделений и короткозамыкателей

| Номинальное напряжение, кВ | Показатели | | | | | |
|----------------------------|------------------|--------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|
| | ω , 1/год | $T_{вс}$, 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 |

Таблица 3.10

Характеристики надёжности сборных шин (на одно присоединение)

| Номинальное напряжение, кВ | Показатели | | | |
|----------------------------|------------------|--------------|---------------------|---------------|
| | ω , 1/год | $T_{вс}$, 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 |

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 ВЛ 35-750кВ 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 следующие цели:

оценка надёжности схем развития ЭС, электрических 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 рационализация 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 35-750кВ оценивается комплексом показаний из пяти групп:

показатели безотказности;

показатели ремонтпригодности;

показатели долговечности;

комплексные показатели;

экономические показатели.

1). *Под безотказностью ВЛ* понимается её свойство 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 – моменты времени выполнения капитальных ремонтов;

t_0 – окончание приработки (периода освоения);

ω_{cp} – среднее значение параметра потока отказов ВЛ;

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[r(t + \Delta t)] - M[r(t)]}{\Delta t}, \quad (4.1)$$

где M – математическое ожидание отказов ВЛ;

$r(t)$ – число отказов за время t ;

$r(t + \Delta t)$ – число отказов за время $(t + \Delta t)$;

$\omega(t)$ – среднее число отказов, ожидаемых в малом интервале времени.

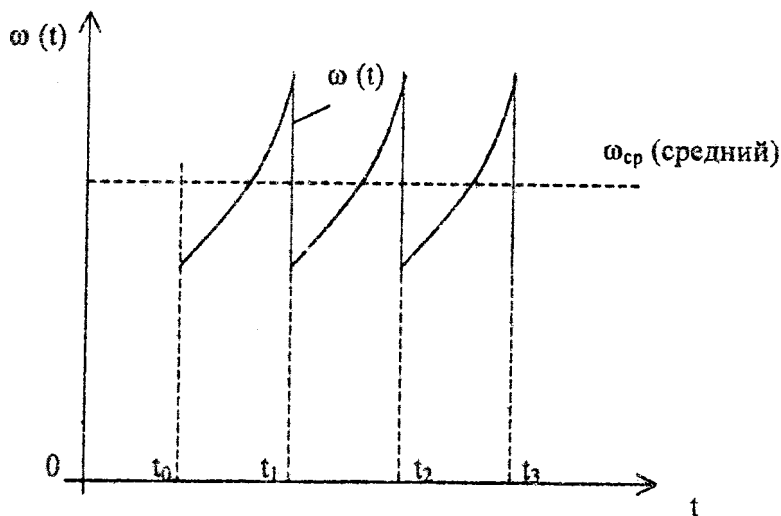


Рис. 4.1. Изменение параметра потока отказов воздушных линий во времени

Из анализа причин отказа ВЛ следует

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

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 голо-

лдно-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 $\omega_{\text{ср}}$, не зависящего от срока службы ВЛ. Периодичность капитальных ремонтов ВЛ принимается 3-6 лет.

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

$$p(t) = 1 - \sum p_i(t)q_i(t), \quad (4.3)$$

где i – возможные состояния ВЛ;

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

q_i – вероятность нарушения надёжности ВЛ в момент времени t в состоянии i .

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

средним временем восстановления линии при отказе (T_0);

средней продолжительностью преднамеренных отключений ВЛ (T_p);

средней периодичностью ремонтов (μ);

средними трудозатратами на капитальный ремонт и техническое обслуживание ВЛ (N_p).

Рассмотрим содержание отдельных показателей.

Величина T_0 – математическое ожидание времени для приведения ВЛ в работоспособное состояние после отказа.

Величина N_p для ВЛ 35-750кВ характеризует их потребность в плановых ремонтах и других видах обслуживания. Средние значения величины N_p для ВЛ представлены в табл. 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 | |
| | | одно-цепных | двух-цепных | одно-цепных | двух-цепных |
| 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* характеризует свойство ВЛ сохранять работоспособность при установленной системе ремонтов и техобслуживании до предельного состояния, при котором дальнейшая эксплуатация невозможна.

Для ВЛ на деревянных опорах долговечность 30 лет, на металлических и железобетонных опорах – 50 лет.

Износ ВЛ имеет 5 форм:

1) экономический или нормальный износ, определяемый внедрением в эксплуатацию более эффективных и надёжных ВЛ либо ВЛ с меньшими затратами на 1кВт передаваемой мощности или 1 кВт/ч переданной электроэнергии;

2) технический износ – неспособность ВЛ соответствовать возросшему уровню требований к качеству электрической энергии;

3) социальный износ, вызванный неспособностью ВЛ отвечать ужесточившимся требованиям социальных стандартов (безопасность персонала, населения или животных, сложность обслуживания и т.д.);

4) экологический износ – когда ВЛ не соответствуют новым нормативам по охране окружающей среды;

5) 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, ремонтпригодность).

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:

$$K_{\text{ти}} = \frac{T_o}{T_o + T_e + T_p} \approx 1 - \omega T_e - \mu T_p, \quad (4.4)$$

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

T_e – среднее время восстановления ВЛ;

T_p – среднее время преднамеренного отключения ВЛ;

ω – параметр потока отказов ВЛ;

μ – средняя периодичность ремонтов.

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

$$K_r = \frac{T_o}{T_o + T_e} \approx 1 - \omega T_e, \quad (4.5)$$

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

T_e – среднее время восстановления ВЛ.

в). Коэффициент простоя ВЛ из-за отказов:

$$K_{\text{по}} = \frac{T_e}{T_o + T_e}. \quad (4.6)$$

г). Коэффициент простоя ВЛ при ремонтах:

$$K_{\text{пр}} = \frac{T_p}{T_o + T_p}, \quad (4.7)$$

где T_p – среднее время ремонта ВЛ.

5). Экономические показатели надёжности ВЛ.

а). Эффективность затрат на повышение надёжности ВЛ

$$\mathcal{E}_n = \frac{\Delta H}{\mathcal{Z}_n}, \quad (4.8)$$

где ΔH – повышение надёжности ВЛ в результате введения резерва;

\mathcal{Z}_n – величина приведенных затрат на образование резерва.

Пример. Если на ВЛ вводится избыточность путём замены провода А на АС, то вероятность обрыва провода уменьшается, также как и вероятность отказа ВЛ, время восстановления остается 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:

1) ущерб энергоснабжающего предприятия (ПЭС, РЭС, электростанции);

2) ущерб потребителей энергии;

3) ущерб смежных звеньев народного хозяйства.

Проанализируем эти составляющие ущерба.

Звено 1:

затраты на восстановление ВЛ;

потери от замены элементов ВЛ (опор, проводов, изоляторов);

потери от увеличения технологического расхода энергии в электросети из-за отклонения 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 обслуживающего персонала, связанного с отказом ВЛ.

Звено 2:

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 3:

Потери, связанные с пожарами в городах, лесном хозяйстве;

затраты от падения опор, проводов на дороги и т.д.

4.2. Надёжность двухцепных ВЛ

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

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 цепей вместе является отказом, что 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 двухцепной ВЛ в зависимости от понятия отказа представлены на рис. 4.2. Здесь приведены схемы замещения ВЛ по вариантам при анализе структурной надёжности.

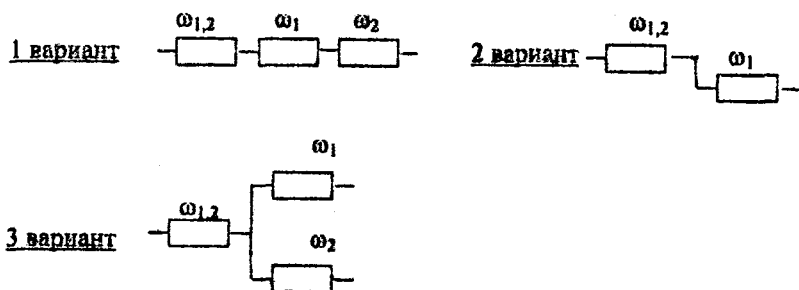


Рис. 4.2. Структурные схемы расчета надежности двухцепной ВЛ

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

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

$$\omega_{1,2}; T_{\sigma 1,2}; \mu_{1,2}; T_{p1,2},$$

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

$T_{\sigma 1,2}$ – 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 двухцепной линии (вторая цепь в работе):

$$\omega_{1-2}; T_{\sigma 1-2}; \mu_{1-2}; T_{p1-2},$$

где ω_{1-2} – параметры потока отказов первой или второй цепи ВЛ;

$T_{\sigma 1-2}$ – среднее время восстановления первой или второй цепи ВЛ;

μ_{1-2} – средний период ремонтов первой или второй цепи ВЛ;

T_{p1-2} – средняя продолжительность преднамеренных отключений первой или второй цепи ВЛ.

В этом случае для первого варианта отказа двухцепной ВЛ имеем следующие значения показателей надёжности:

$$\omega_{ВЛ} = \omega_{1,2} + \omega_{1-2}; \quad (4.9)$$

$$T_{\sigma ВЛ} = \frac{\omega_{1,2} T_{\sigma 1,2} + \omega_{1-2} T_{\sigma 1-2}}{\omega_{1,2} + \omega_{1-2}}; \quad (4.10)$$

$$\mu_{ВЛ} = \mu_{1,2} + \mu_{1-2}; \quad (4.11)$$

$$T_{р ВЛ} = \frac{\mu_{1,2} T_{р 1,2} + \mu_{1-2} T_{р 1-2}}{\mu_{1,2} + \mu_{1-2}}, \quad (4.12)$$

где $\omega_{ВЛ}$ – поток отказов двухцепной линии;

$\mu_{ВЛ}$ – средняя периодичность ремонтов;

$T_{\sigma ВЛ}$ – 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:

$$\omega_1 = \omega_2 = \frac{\omega_{1-2}}{2}; \quad \frac{\mu_{1-2}}{2} = \mu_1 = \mu_2. \quad (4.13)$$

Для двухцепной ВЛ:

$$\omega_{ВЛ} = \omega_{1,2} + \omega_{1-2} / 2; \quad (4.14)$$

$$T_{\sigma ВЛ} = \frac{\omega_{1,2} T_{\sigma 1,2} + \omega_{1-2} T_{\sigma 1,2} / 2}{\omega_{1,2} + \omega_{1-2} / 2}; \quad (4.15)$$

$$\mu_{ВЛ} = \mu_{1,2} + \mu_{1-2} / 2; \quad (4.16)$$

$$T_{p \text{ ВЛ}} = \frac{\mu_{1,2} T_{p1,2} + \mu_{1-2} T_{p1-2} / 2}{\mu_{1,2} + \mu_{1-2} / 2}. \quad (4.17)$$

Рассмотрим более детально третий вариант отказа ВЛ (отказ двух цепей – отказ линии). Здесь (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 и учитывающей наложение отказов одной цепи на отказы (ремонты) другой, составляет величину

$$\omega_{cx} = \omega_1(\omega_2 T_{\sigma 1-2} + \mu_2 T_{p1-2}) + \omega_2(\omega_1 T_{\sigma 1-2} + \mu_1 T_{p1-2}). \quad (4.18)$$

Заменяя составляющие по формуле (4.13), после подстановки имеем

$$\omega_{cx} = \frac{\omega_{1-2}}{2} (\omega_{1-2} T_{\sigma 1-2} + \mu_{1-2} T_{p1-2}). \quad (4.19)$$

Среднее время восстановления для схемы из параллельных блоков

$$T_{cx} = \left\{ \omega_1 T_{\sigma 1-2} \omega_2 T_{\sigma 1-2} + \gamma [\omega_1 T_{\sigma 1-2} \mu_2 T_{p1-2} + \omega_2 T_{\sigma 1-2} \mu_1 T_{p1-2}] \right\} \frac{1}{\omega_{cx}}, \quad (4.20)$$

где γ – коэффициент, учитывающий наложение отказа одной цепи ВЛ на отказ или ремонт второй цепи. Этот коэффициент (γ) определяется в зависимости от соотношения

$$a = \frac{T_{p1-2}}{T_{\sigma 1-2}}. \quad (4.21)$$

Если $a \leq 1$, то $\gamma = 0,5$, а если $a > 1$:

$$\gamma = \frac{T_{p1-2} / T_{\sigma 1-2} - 0,5}{T_{p1-2} / T_{\sigma 1-2}} = \frac{T_{p1-2} - 0,5 T_{\sigma 1-2}}{T_{p1-2}}. \quad (4.22)$$

Исходя из симметрии блоков в схеме их параллельного соединения значение величины T_{cx} после преобразований можно записать в следующем виде:

$$T_{cx} = \frac{\omega_{1-2} T_{\sigma 1-2}^2 + \mu_{1-2} T_{B 1-2} T_{p 1-2}}{2(\omega_{1-2} T_{\sigma 1-2} + \mu_{1-2} T_{p 1-2})}, \quad (4.23)$$

где T_{cx} – 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 двухцепной линии, имеем следующие показатели надёжности:

$$\omega_{ВЛ} = \omega_{1,2} + \omega_{cx} = \omega_{1,2} + \frac{\omega_{1-2}}{2} (\omega_{1-2} T_{\sigma 1-2} + \mu_{1-2} T_{p 1-2}); \quad (4.24)$$

$$T_{\sigma ВЛ} = \frac{\omega_{1,2} T_{\sigma 1,2} + \omega_{1-2}^2 T_{\sigma 1-2}^2 + \omega_{1-2} \mu_{1-2} T_{\sigma 1-2} T_{p 1-2}}{\omega_{1,2} + \frac{\omega_{1-2}}{2} (\omega_{1-2} T_{\sigma 1-2} + \mu_{1-2} T_{p 1-2})}; \quad (4.25)$$

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

$$T_{p ВЛ} = T_{p 1,2}, \quad (4.27)$$

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

Таким образом, оценка показателей надёжности двухцепных 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 одноцепными при тех же напряжении и длине.

Рассматривая эффективность ВЛ как соотношение результатов и затрат на линию, произведём её определение. Расчёт эффективности двухцепной воздушной линии:

$$\mathcal{E}_{ВЛ} = \frac{K_{ТИ} 8760}{K_{ВЛ}}, \quad (4.28)$$

где $K_{ТИ}$ – коэффициент технического использования двухцепной ВЛ, т.е. время нахождения в работоспособном состоянии относительно периода её эксплуатации;

$K_{ВЛ}$ – капитальные вложения в данную линию;

T_r – общее суммарное время работы ВЛ в течение года.

$K_{ТИ} 8760 = T_r$;

$$K_{ТИ} = 1 - \omega_{ВЛ} T_{сВЛ} - \mu_{ВЛ} T_{рВЛ}, \quad (4.29)$$

где $\omega_{ВЛ}$ – параметр потока отказов двухцепной линии;

$\mu_{ВЛ}$ – средняя периодичность преднамеренных отключений ВЛ;

$T_{сВЛ}$ – среднее время восстановления двухцепной ВЛ;

$T_{рВЛ}$ – средняя продолжительность преднамеренных отключений.

В качестве примера приведём показатели надёжности и стоимости ВЛ 110 кВ.

Таблица 4.2

Показатели надёжности и стоимости ВЛ

| Тип ВЛ, U = 110 кВ | | Параметр потока отказов ω , 1/год | $T_{с}$, ч | μ , 1/год | $T_{р}$, ч | $K_{ВЛ}$ (цены 1980г.), 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 |

4.3. 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 :

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

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:

$$q_{\text{посл}}(t) = q_1(t) + q_2(t) - q_1(t)q_2(t) = \quad (4.31)$$

$$1 - p_1(t) + 1 - p_2(t) - [1 - p_1(t)][1 - p_2(t)] = 1 - p_1(t)p_2(t) = 1 - P_{\text{посл}}(t),$$

где q_1, q_2 – вероятность отказов элементов ЛЭП.

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

$$p_{\text{парал}}(t) = p_1(t) + p_2(t) - p_1(t)p_2(t) = \quad (4.32)$$

$$= \exp\left[-\int_0^t \lambda_1 dt\right] + \exp\left[-\int_0^t \lambda_2 dt\right] - \exp\left[-\int_0^t (\lambda_1 + \lambda_2) dt\right].$$

4). Вероятность того, что откажут оба элемента ЛЭП:

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

$$= 1 - p_1(t) - p_2(t) + p_1(t)p_2(t) = 1 - p_{\text{парал}}(t).$$

Случаи 1 и 2 представляют противоположные события, т.е. $p_{\text{посл}} + q_{\text{посл}} = 1$, поскольку противоположные события для безотказ-

ной работы двух элементов осуществляются, когда отказывает один из элементов либо оба вместе. Следовательно, величины $p_{\text{посл}}$ и $q_{\text{посл}}$ 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 отражают противоположные события, т.е. $p_{\text{парал}} + q_{\text{парал}} = 1$, т.к. противоположные события для двух отказавших систем – события, когда один или оба элемента работают безотказно. Величины $p_{\text{парал}}$ и $q_{\text{парал}}$ 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:

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

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

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

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

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 вентиля 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

$$P_{\text{посл}} = p_1 p_2 p_3 \dots p_n = \prod_{i=1}^n p_i = \prod_{i=1}^n (1 - q_i), \quad (4.38)$$

где p_i – надёжность i -го элемента или блока в последовательном соединении.

Выражение (4.38) представляет закон произведения надёжности.

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).

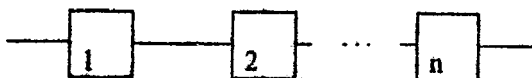


Рис 4.3. Структурная схема надёжности ЛЭП с последовательным соединением элементов

В этом случае, если A – событие, заключающееся в том, что система работает безотказно, а $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$ – события, состоящие в исправной работе элементов системы, то событие A имеет место, если имеют место события A_i . Надёжность системы

$$P(A) = \left[\prod_{i=1}^n P(A_i / A_{i-1} \dots A_1) \right] P(A_n). \quad (4.39)$$

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

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

Так как произведение величин q намного меньше сумм этих величин для отдельных элементов:

$$\sum_{i=1}^{i=n} q_i \gg \prod_{i=1}^{i=n} q_i, \quad (4.41)$$

в упрощённых расчётах для схемы с последовательным соединением элементов можно принять

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

Ошибка при этом упрощении не превышает нескольких процентов. Коэффициент отказа (аварийности) q обычно для ЛЭП имеет величину $q \leq 0,01$.

4.4. 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 ненагруженный (холодный) резервы. В последнем случае, когда работает элемент (цепь), имеется один или более резервных элементов (цепей), которые могут вступать в действие при отказе основного. Рассмотрим надёжность ЛЭП при нагруженном резерве.

Имеем для двух элементов вероятность того, что будут работать один или два элемента:

$$\begin{aligned} p_{\text{парал}}(t) &= p_1(t) + p_2(t) - p_1(t)p_2(t) = \\ &= e^{-\int_0^t \lambda_1} + e^{-\int_0^t \lambda_2} - e^{-\int_0^t (\lambda_1 + \lambda_2)} \end{aligned} \quad (4.43)$$

Вероятность, что откажут два элемента

$$\begin{aligned}
 q_{\text{парал}}(t) &= q_1(t)q_2(t) = [1 - p_1(t)][1 - p_2(t)] = \\
 &= 1 - p_1(t) - p_2(t) + p_1(t)p_2(t) = 1 - p_{\text{парал}}(t).
 \end{aligned}
 \tag{4.44}$$

В экспоненциальном случае

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

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

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

$$\begin{aligned}
 P(A + B + C) &= P(A) + P(B) + P(C) - P(A)P(B) - \\
 &- P(A)P(C) - P(B)P(C) + P(A)P(B)P(C).
 \end{aligned}
 \tag{4.47}$$

Если события имеют одинаковую вероятность

$$P(A) = P(B) = P(C) = P, \tag{4.48}$$

то

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

Аналогично можно получить 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:

$$\begin{aligned}
 p(t) &= e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} + e^{-\lambda_3 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_3)t} - \\
 &- e^{-(\lambda_2 + \lambda_3)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t}.
 \end{aligned}
 \tag{4.50}$$

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 четырех и более параллельных элементов.

Более просто определить величину $q(t)$, а потом значение $p(t) = 1 - q(t)$.

Вероятность отказа двух элементов

$$q = q_1 q_2;$$

трех элементов -

$$q = q_1 q_2 q_3;$$

а n элементов -

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

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

Если работающие параллельно элементы одинаковы по вероятности отказа, то:

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

Для параллельной работы группы элементов

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

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:

$$P_{\text{пар}} = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^m p_i \right)^n \quad (4.56)$$

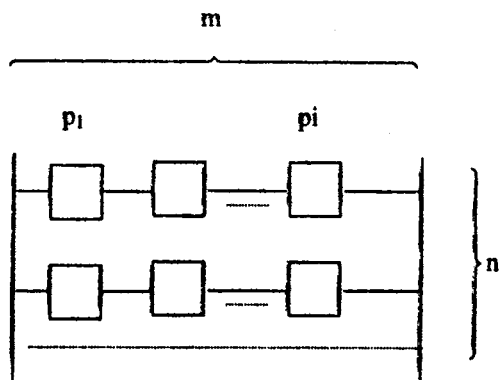


Рис. 4.4. Структурная схема из n параллельных групп элементов, в каждой из которых m элементов работает последовательно

Надёжность одной цепи из m последовательных элементов, из которых v элементов дублированы (рис. 4.5):

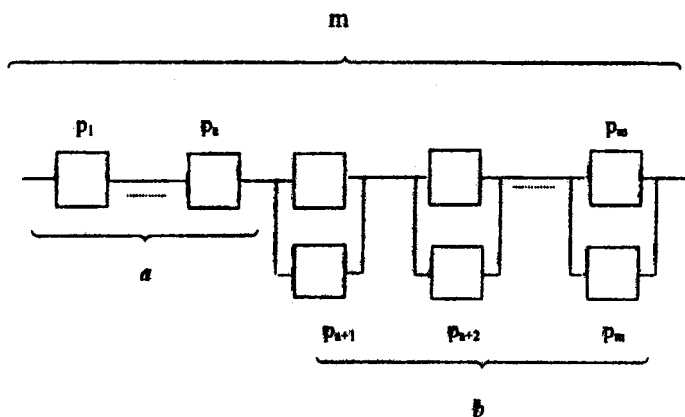


Рис. 4.5. Структурная схема из m последовательных элементов, из которых v элементов дублированы

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

где p_i – надёжность i -го нерезервированного элемента;
 p_j – надёжность j -го резервированного элемента;
 a – число недублированных элементов ($a = m = b$);
 m – число последовательно соединённых элементов;
 b – количество элементов, дублированных из m .

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

$$p_{\text{пар}} = 1 - (1 - p)^2, \quad (4.58)$$

где p – надёжность одной цепи.

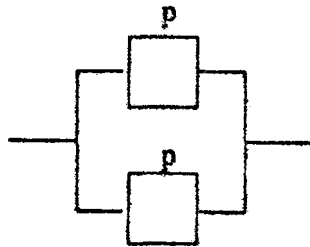


Рис.4.6. Структурная схема надежности двух цепей

4.5. Надёжность ВЛ с параллельным соединением элементов при ненагруженном резерве

Здесь (рис. 4.7) дополнительный элемент вступает в действие при отказе основного. Резервные элементы находятся 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 ненагруженном резерве – и вычислении надёжности системы путём интегрирования этой функции.

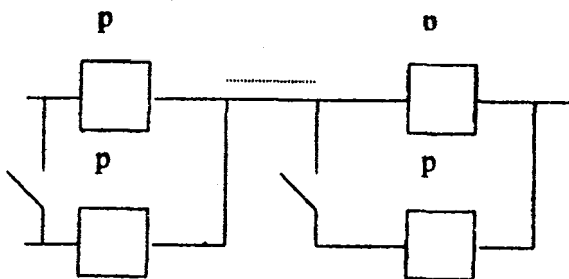


Рис. 4.7. Структурная схема цепей с ненагруженным резервом

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

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

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 , время безотказной работы системы t отсчитывается от момента, когда первый элемент отказал; t_1 и t_2 – переменные величины, тогда:

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

Вывод:

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

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

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

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-й элемент – основной, 2-й – ненагруженный (резервный):

$$\begin{aligned} f(t) &= \int_0^t f_1(t_1) f_2(t_2) dt_1 = \int_0^t f_1(t_1) f_1(t-t_1) dt_1 = \int_0^t \lambda_1 e^{-\lambda_1 t_1} \lambda_2 e^{-\lambda_2(t-t_1)} dt_1 = \\ &= \lambda_1 \lambda_2 \int_0^t e^{-\lambda_1 t_1 - \lambda_2(t-t_1)} dt_1 = \lambda_2 \lambda_1 \int_0^t e^{-\lambda_1 t_1 - \lambda_2 t + \lambda_2 t_1} dt_1 = \lambda_2 \lambda_1 \int_0^t e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t_1 - \lambda_2 t} dt_1 = \quad (4.62) \\ &= \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{-\lambda_2 t}^{-\lambda_1 t} e^x dx = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^x \Big|_{-\lambda_2 t}^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}). \end{aligned}$$

При выводе выражения введена переменная $(\lambda_2 - \lambda_1)t_1 - \lambda_2 t = x$; $d(\lambda_2 t) = d(\text{const}) = 0$, 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 трех элементов (один рабочий, два резервные) аналогично получаем

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

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:

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

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

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

(4.64)

$$= -\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[-\frac{1}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 t} + \frac{1}{\lambda_2} e^{-\lambda_2 t} \right] =$$

$$= -\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 \lambda_1} = \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1}.$$

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

$$\begin{aligned}
 T_{cp}(t) = \tau &= \int_0^{\infty} p(t) dt = \int_0^{\infty} \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} dt = \\
 &= \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t} dt - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_0^{\infty} e^{-\lambda_2 t} dt = \\
 &= \frac{-\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t} d(-\lambda_1 t) + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{\lambda_2} \int_0^{\infty} e^{-\lambda_2 t} d(-\lambda_2 t) = \\
 &= -\frac{\lambda_2}{\lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 t} \Big|_0^{\infty} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_2 t} \Big|_0^{\infty} = \\
 &= -\frac{\lambda_2}{\lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)} (e^{-\infty} - e^0) + \frac{\lambda_1}{\lambda_2(\lambda_2 - \lambda_1)} (e^{-\infty} - e^0) = \\
 &= \frac{\lambda_2}{\lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2(\lambda_2 - \lambda_1)} = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_2 + \lambda_1)}{\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_2 - \lambda_1)} = \frac{\lambda_2 + \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2}.
 \end{aligned} \tag{4.65}$$

4.6. 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. На рис. 4.8 приведен расчёт схемы электроснабжения. Одинаковые цепи AA' , BB' 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 AA' , CA' , CB' , BB' .

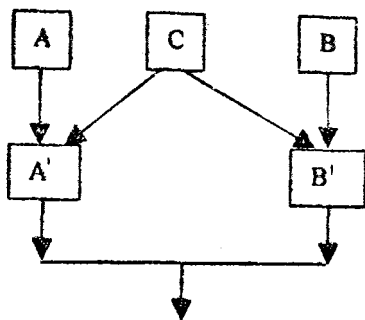


Рис 4.8. Схема электроснабжения

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

если A – событие, зависящее от одного из двух несовместных событий – B_i или B_j , из которых хотя бы одно происходит, то вероятность появления события A равна

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

Переведём это на язык надёжности:

A – отказ системы;

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

Правило. Вероятность отказа системы равна вероятности ее отказа 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.

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

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

где $P_{\text{сист}}$ – надёжность системы, вероятность безотказной работы;

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

В нашем примере X – элемент C, тогда

$$q_{\text{сист}} = q_{\text{сист}} \overbrace{\left(\text{если элемент C исправен} \right)}^{\text{а}} P_c + \quad (4.69)$$

$$+ q_{\text{сист}} \overbrace{\left(\text{если элемент C не исправен} \right)}^{\text{б}} q_c.$$

Для выражения (4.69):

а) отказ системы при одновременном отказе элементов системы A' и B'; так как элементы системы A' и B' параллельны, имеем

$$q_{\text{сист}} (\text{если C исправен}) = (1 - p_{A'}) (1 - p_{B'}); \quad (4.70)$$

б) отказ элемента C имеет место при отказе параллельных цепей (AA' и BB');

$$q_{\text{сист}} (\text{если C не исправен}) = (1 - p_A p_{A'}) (1 - p_B p_{B'}), \quad (4.71)$$

где первый множитель – вероятность отказа цепи ($q_{\text{цепи}}$), где элементы A и A' соединены последовательно;

второй множитель – $q_{\text{цепи}}$, где элементы B и B' соединены последовательно.

Вероятность отказа всей системы ($q_{\text{сист}}$)

$$q_{\text{сист}} = (1 - P_{A'}) (1 - P_{B'}) P_c + (1 - P_A P_{A'}) (1 - P_B P_{B'}) (1 - P_c). \quad (4.72)$$

В более сложных расчётах надёжности правило (4.67) применяется в несколько этапов. Формула (4.67) позволяет выполнить 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 .

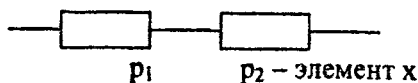


Рис. 4.9. Система из двух элементов, соединенных последовательно

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

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

Если не исправен второй элемент, происходит отказ системы.

$q_{\text{сист}} = 1$; т.к. элемент включён в схему последовательно, то величине $1 - p_2$ соответствует вероятность того, что неисправен 2-й элемент. Таким образом, надёжность системы

$$p_{\text{сист}} = 1 - q_{\text{сист}} = p_1 p_2. \quad (4.74)$$

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:

$$q_{\text{сист}} = 0 p_2 + (1 - p_1) (1 - p_2) = 1 - p_1 - p_2 + p_1 p_2. \quad (4.75)$$

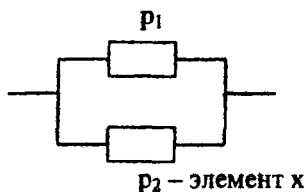


Рис 4.10. Система из двух элементов, соединенных параллельно

Примечание. $q_{\text{сист}} = 0$ при $p_2 = x$; $q_{\text{сист}} = 1 - p_1$ при $q_2 = x$.
Надёжность системы

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

4.7. Методы получения информации о надёжности ВЛ

Для исследования надёжности ВЛ 35-750 кВ требуется целый комплекс первичной информации. Методы её 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, затрудняющее составление программы. Часто этот метод используется для выключателей, разъединителей, отделителей, короткозамыкателей, устройств автоматики и релейной защиты.

Анализ математических и аналоговых моделей используется 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 статистической информации. Опыт её получения накоплен 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 конструк-

тивном 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);
- повреждения оборудования без отказа ВЛ (обнаруживаются при обходах и ревизиях).

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

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

4.8.1. Статистическая 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 статистического материала об отказах. Примем случайную величину (СВ) T за время безотказной работы. За время эксплуатации восстанавливаемых элементов ЭС t величина T принимает n значений. Совокупность этих случайных значений величины – статистическая выборка объёма n . Если значения СВ T расположить в возрастающем (убывающем) порядке и указать относительно каждого, как часто оно встречается, то получится распределение СВ или вариационный ряд, на основании которого можно определить аналитическую форму неизвестной плотности вероятности $f(t) = \varphi(t)$ или функцию распределения $F(t)$.

Для построения вариационного ряда диапазон значений СВ T разбиваем на интервалы. Подсчитываем количество значений m

случайной величины T , приходящееся на каждый интервал, и определяем частоту её попадания в данный интервал:

$$P^* = \frac{m_i}{n}, \quad (4.77)$$

где n – число наблюдений, объём выборки.

Таблица 4.3

Вариационный (статистический) ряд

| | | | | |
|----------|-------------|-------------|-----|-----------------|
| 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, если упростить:

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

Большое значение имеет графический метод изображения вариационного ряда.

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

2). Гистограмма распределения: над каждым отрезком оси абсцисс, изображающим 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 T . Таким образом, при построении гистограммы получаем представление о дифференциальном законе распределения СВ T .

3). Статистическая функция распределения $F^*(t)$ – частота событий за время $T < t$ в данной выборке:

$$F^*(t) = p^*(T < t), \quad (4.81)$$

где t – текущая переменная;

p^* – частота или статистическая вероятность события.

$$F^*(t_i) = n_i / n, \quad (4.82)$$

где n_i – число отказов, при которых $T < t$;

n – число наблюдений.

Если T – непрерывная величина, то при увеличении n (объёма выборки) $F^*(t)$ – интегральная функция распределения величины T .

Таким образом, построение статистической функции распределения $F^*(t)$ решает вопрос об установлении на основе экспериментальных данных закона распределения случайной величины.

4.8.2. Подбор теоретического закона распределения случайных величин отказов

Пользование $F^*(t)$ неудобно, поскольку экспериментальные точки гистограммы колеблются около неизвестной кривой истинного распределения. Для выяснения теоретического закона распределения СВ, заданного $F(t)$ или $f(t) = \varphi(t)$, производится обработка статистических данных. Выбирается аппроксимирующая функция $f(t) = \varphi(t)$, 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 $f(t)$.

Рассмотрим порядок применения критерия согласия. Предположим, что СВ T (наработка до отказа), полученная в виде статистического ряда, подчинена некоторому закону распределения СВ, приписываемому $F(t)$. Для проверки справедливости гипотезы вводится случайная величина Δ – мера расхождений между теоретическим законом и статистическим распределением. Δ может быть: а) максимальное отклонение $F^*(t)$ от $F(t)$; б) сумма квадратов отклонений теоретических вероятностей попадания СВ T в i -й интервал P_i от соответствующих частот P_i^* . Если гипотеза о том, что СВ T подчиняется закону распределения $F(t)$, справедлива, то Δ будет определяться законом распределения СВ T и числом ответов n . Это устанавливает согласие между теоретическим и статистическим распределением, если известен закон распределения Δ .

Пример. Если закон распределения Δ известен и в результате проведения эксперимента расхождения $\Delta = u$, то выясняем $\Delta = u$ случайно за счёт ограничения числа отказов или разницы между $F^*(t)$ и $F(t)$. Для этого вычисляем вероятность получения такого расхождения при заданных $F(t)$ и числе опытов n . Это сводится к определению вероятности

$$F(\Delta) = P(U \leq \Delta). \quad (4.83)$$

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

Критерий χ^2 К.Пирсона. В качестве меры расхождения между опытным и теоретическим распределением здесь берётся величина $\Delta = \chi^2$.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(P_i^* - P_i)^2}{P_i}, \quad (4.84)$$

где k – число интервалов статистического ряда;

$P_i^* = \frac{m_i}{n}$ – частота i -го интервала статистического ряда;

m_i – количество значений СВ T на интервал;

n – объём статистической выборки, общее количество опытов;

P_i – теоретическая вероятность попадания СВ T в i -й интервал.

При увеличении n закон распределения Δ приближается к распределению χ^2 и не зависит от вида $F(i)$ и числа испытаний n , а определяется только числом разрядов k статистического ряда.

Критерий А.Н.Колмогорова. Опытное распределение практически согласуется с выбранным теоретическим, если выполняется условие

$$D\sqrt{n_i} \leq 1, \quad (4.85)$$

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-процентную 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 не “точечными” оценками, а с помощью интервала с заданной *доверительной вероятностью* или коэффициента доверия α . Последний выражает вероятность того, что истинное значение величины – внутри интервала. Границы интервала – доверительные границы. При этом *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 двусторонней оценки параметра надёжности. Доверительные интервалы статистических оценок параметров надёжности имеют нижнюю и верхнюю границы.

Пример 1.

$T_{\text{ср}}, T_{\text{ср}}^*$ – среднее время безотказной работы;

$T_{\text{ср н}}^*$ и $T_{\text{ср в}}^*$ – нижняя и верхняя границы доверительного интервала.

Величина $T_{\text{ср}}^*$ – находится между этими пределами.

Пример 2. Вычислены доверительные границы для вероятности безотказной работы $p(t)$ элемента ЭС. Они составили величину порядка 0,9. Это значит, что в 90% случаев истинное значение надёжности находится в этих пределах, а в 10% – вне этих границ.

4.9. Статистические показатели надёжности совокупности воздушных линий

Важнейший показатель надёжности ВЛ 35-750 кВ – параметр потока отказов, отказ/100 км в год.

$$\omega_i = \frac{P_i 100}{L_i \Gamma_i}, \quad (4.86)$$

где P_i – число отказов i -й ВЛ;

L_i – длина линии, км;

Γ_i – период эксплуатации ВЛ, лет.

Параметр потока отказов (среднее значение) воздушной линии данного типа определяется на основе оценок параметра ω , ВЛ:

$$\omega_i = \frac{\sum_{i=1}^g \omega_i L_i \Gamma_i}{\sum_{i=1}^m L_i \Gamma_i}, \quad (4.87)$$

где g – число отключаемых линий, входящих в совокупность ВЛ данного вида.

Для ориентировочных расчётов надёжности в выборку могут быть объединены воздушные линии одного напряжения из любого материала и любого типа опор.

4.10. Обработка исходных статистических данных воздушных линий по разнородной информации

Цель задачи: определение комплексной величины надёжности. В этом случае сбор и предварительную обработку информации об отказах ВЛ по располагаемым k источникам сводим в систему данных (табл. 4.4).

Таблица 4.4

Система данных по k источникам

| № источника информации | Число ВЛ в k -м источнике | Протяжённость всех ВЛ для k источников | Параметры потока отказов | Среднеквадратичные отклонения |
|------------------------|-----------------------------|--|--------------------------|-------------------------------|
| 1 | m_1 | L_1 | ω_1 | $\sigma[\omega]$ |
| 2 | m_2 | L_2 | ω_2 | $\sigma[\omega]$ |
| | | | | |
| k | m_k | L_k | ω_k | $\sigma[\omega]$ |

Для оценки характера расхождения между математическими ожиданиями параметров потоков отказов ВЛ используем критерий Ван-дер-Вардена

$$|\omega_j - \omega_i| \leq \alpha \sqrt{D[\omega]}, \quad (4.88)$$

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 статистическими характеристиками по каждому источнику информации.

4.11. Анализ отключений ВЛ 35-750 кВ

Анализ отключений ВЛ 35-750 кВ состоит из двух этапов:

- 1) для автоматических устойчивых отключений;
- 2) для преднамеренных отключений.

Проанализируем эти этапы.

Первый этап. Рассматриваются 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 требуются:

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 $\omega_{ВЛ}$ (откл./год), который выражается уравнением регрессии:

$$\omega_{ВЛ} = \omega_0 + \omega_L L,$$

где L – длина ВЛ, км;

ω_0 – составляющая ВЛ, не зависящая от длины ВЛ $L_{ВЛ}$, откл./год;

ω_L – составляющая среднего значения потока отказов ω на единицу длины ВЛ, откл./((год·км).

Для оценки показателей ω_0 и ω_L по статистическим данным используются уравнения

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad \omega_0 = \bar{y} - \omega_L \bar{x}; \quad (4.89)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (4.90)$$

где x_i – длина i -й ВЛ;

y_i – число отказов i -й ВЛ в год;

n – число ВЛ;

\bar{x}, \bar{y} – средние значения длины ВЛ и числа ее отказов в год.

Для планирования ремонтных работ на ВЛ, организации бригад, управления 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_v по сезонам и времени суток можно объяснить на основе анализа его составляющих в процентах:

$$100\% \approx 12\% + 43\% + 39\% + 6\%; \quad (4.91)$$

$$T_v = T_{v,п} + T_{v,д} + T_{v,р} + T_{v,в},$$

где $T_{v,п}$ – время на поиск и локализацию места повреждения ВЛ;

$T_{v,д}$ – время на организацию аварийно-ремонтного персонала, доставку бригады и материалов к месту работы;

$T_{v,р}$ – время на выполнение ремонтно-восстановительных операций;

$T_{v,в}$ – время на включение ВЛ под напряжение.

Коэффициент ремонтпригодности ВЛ, характеризующий уровень организации ремонтно-восстановительных работ в ПЭС:

$$K_{p.p.} = \frac{T_{в,р}}{T_{в,п} + T_{в,д} + T_{в,р} + T_{в,в}} \quad (4.92)$$

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 табл. 4.5 приведена статистика отказов по их распределению между элементами ВЛ для США и ФРГ.

Таблица 4.5

Распределение отказов между элементами ВЛ

| Элементы ВЛ | США, % | ФРГ, % |
|------------------------|--------|--------|
| Опоры | 29 | 16 |
| Провода | 21 | 34 |
| Тросы | 4 | 1 |
| Гирлянды изоляторов | 30 | 37 |
| Арматура и соединители | 8 | 4 |
| Всего: | 100 | 100 |

Второй этап анализа отключений ВЛ 35-750 кВ – анализ преднамеренных отключений. 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 существует 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;
- управление работой ПЭС;
- повышение надёжности электрической сети.

Поток преднамеренных отключений имеет две составляющие – ω плановых отключений и ω 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 двух 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.

$$\mu = \mu_0 + \mu_L L, \quad (4.93)$$

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_p – время ремонта) преднамеренных отключений, которые являются функцией от материала опор, типа опор, видов преднамеренных отключений (табл. 4.6, 4.7).

Таблица 4.6

Показатели средней периодичности отключений и время ремонта ВЛ

| | | | | | |
|--------------------|------|------|------|------|------|
| 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 |

Таблица 4.7

Показатели преднамеренных отключений ВЛ

| 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 | 0,3 | 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 ремонтпригодности ВЛ в расчётах надёжности электрических сетей требует сведений о M (математическом ожидании) и σ (среднеквадратичном отклонении), а также о законах их распределения. Практика показала, что рационально здесь использовать закон Вейбула-Гнеденко

$$M = \frac{\sum_{i=1}^m N_i}{\sum_{i=1}^m K_i \Gamma_i}, \quad (4.94)$$

где m – число ПЭС, по которым собрана информация;

N_i – число преднамеренных отключений ВЛ в ПЭС;

Γ_i – число лет, по которым есть информация о данном ПЭС.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (M - \frac{N_i}{K_i \Gamma_i})}{\sum_{i=1}^m K_i - 1}} \quad (4.95)$$

4.12. Отключения и повреждения ВЛ 35-330 кВ в Минэнерго Республики Беларусь

В табл. 4.8 приводится анализ отключений и повреждений на примере данных Минэнерго РБ в 1995 году.

Таблица 4.8

Количество отключений и повреждений ВЛ 35-330 кВ

| Напряжения ВЛ, кВ | 35 | 110 | 220 | 330 | Итого: |
|---|-------|-------|------|------|--------|
| Показатели анализа надёжности | | | | | |
| Протяжённость ВЛ (км) | 12006 | 15597 | 2280 | 3616 | 36410 |
| Количество автоматических отключений | 293 | 841 | 86 | 42 | 1262 |
| Количество отключений с успешным АПВ | 127 | 672 | 81 | 34 | 944 |
| Отключения с повреждением элементов ВЛ | 47 | 59 | 4 | 1 | 111 |
| Отключения на 100 км | 2,4 | 5,3 | 3,8 | 1,2 | 3,6 |
| Причины отключения: | | | | | |
| Атмосферные воздействия | 138 | 304 | 48 | 5 | 495 |
| Посторонние воздействия | 27 | 128 | 7 | 11 | 173 |
| Изменение материала в процессе эксплуатации | 3 | 5 | 1 | - | 9 |
| Дефект конструкции | 3 | 3 | - | - | 6 |
| Работа оборудования ПС и ложная работа РЗА | 8 | 43 | 3 | 1 | 55 |
| Прочие причины | 15 | 171 | 17 | 9 | 212 |
| Причины не установлены | 74 | 130 | 12 | 16 | 332 |

В статистических данных для анализа надёжности имеются также удельные показатели автоматических отключений и повреждений ВЛ 35-330 кВ энергосистем РБ на 100 км по напряжениям (табл. 4.9, 4.10).

Таблица 4.9

Повреждения ВЛ на 100 км в Минскэнерго (1995 г.)

| Показатели отключений и повреждений ВЛ | Напряжения ВЛ | | | | |
|--|---------------|--------|--------|--------|--------|
| | 35 кВ | 110 кВ | 220 кВ | 330 кВ | 35-330 |
| Всего | 1,93 | 6,95 | 4,1 | 0,84 | 4,12 |
| Устойчивых | 1,58 | 1,09 | 0 | 0 | 0,99 |
| С повреждением элементов | 0,35 | 0,57 | 0 | 0,37 | 0,37 |

Таблица 4.10

Повреждаемость ВЛ на 100 км в Минскэнерго (1995 г.)

| Показатели отключений и повреждений ВЛ | Напряжения ВЛ | | | | |
|--|---------------|--------|--------|--------|--------|
| | 35 кВ | 110 кВ | 220 кВ | 330 кВ | 35-330 |
| Всего | 2,24 | 5,27 | 3,77 | 1,16 | 3,65 |
| Устойчивых | 1,33 | 0,87 | 0,22 | 0,08 | 0,88 |
| С повреждением элементов | 0,35 | 0,4 | 0,17 | 0,03 | 0,32 |

В энергосистемах РБ также ведётся анализ аварийных отключений и повреждений ВЛ 35-330 кВ. В табл. 4.11 приводятся сводные показатели количества отключений ВЛ по Минскэнерго РБ.

Таблица 4.11

Сводные показатели надежности для Минэнерго (1995 г.)

| Напряжения ВЛ, кВ | 35-330 | 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 | - | - |
| | железобетонных | 1 | - | - | 1 | - |
| изоляторов, мест | 29 | 11 | 14 | 3 | 1 | |
| проводов, мест | 66 | 34 | 32 | - | - | |
| грозозащитных тросов, мест | 10 | 1 | 9 | | | |
| линейной арматуры, мест | 5 | 1 | 4 | - | - | |
| 3. Среднее время аварийного отключения, ч | 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. Приведем данные о повреждениях в воздушных РС в год на примере распределительной сети, имеющей хороший уровень эксплуатации, при рассмотрении сети высокого напряжения (ВН) и сети низкого напряжения (НН).

Повреждения в сети ВН за год:

устойчивые повреждения на 100 км линий – 6, в том числе: изоляторов – 1,5; проводов – 0,25; опор – 1,5-2; разъединителей – 1;

повреждения на 100 трансформаторных пунктов (ТП) – 5, в том числе: трансформаторов – 2,25; вентиляных 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; на 100 ТП – 40;

повреждения на 100 км линий опор (в бурю) – 48.

Для ликвидации одного повреждения транспорт проходит в среднем 73 км.

Распределение повреждений в РС выглядит следующим образом (в процентном соотношении):

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:

проводов – 33;

изоляторов – 19;

крюков изоляторов – 8;

опор – 22.

Зависимость относительного числа повреждений (в %) по дням недели представлена на рис. 4.11. В табл. 4.12 приведены зависимости числа повреждений в РС по месяцам и часам суток.

Таблица 4.12

| 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 | | | | |

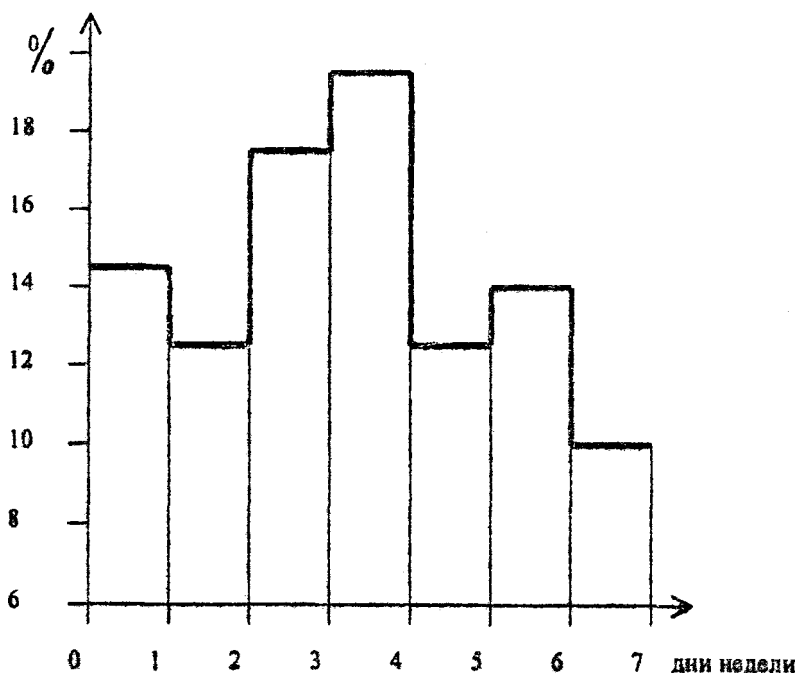


Рис 4.11. Зависимость относительного числа повреждений по дням недели

4.14. Причины отказов основных элементов ЭС

ЛЭП – наиболее часто повреждаемые элементы ЭС из-за территориальной рассредоточенности и подверженности влиянию внешних неблагоприятных условий окружающей среды.

Причины повреждения ЛЭП:

- гололёдно-ветровые нагрузки;
- перекрытие изоляции вследствие грозных 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, несоблюдение сроков ремонта и замены оборудования.

Эти причины приводят:

к ослаблению или нарушению механической прочности опор, проводов, изоляторов;

к поломке деталей опор;

к коррозии и гниению металлических и деревянных частей;

к отключению ЛЭП из-за вибрации, «пляски» и обрыва проводов.

Причины отказов кабельных ЛЭП:

нарушение механической прочности землеройными машинами и механизмами (до 70% всех повреждений);

электрические пробой 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.

Причины отказов коммутационных аппаратов (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.

Причины отказов 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 среднего напряжения (СН)

70% отказов кабельных линий – случайные механические повреждения. Рассмотрим описание времени безотказной работы кабельной линии СН 6-10 кВ. Особенности работы линии: механическая нагрузка – постоянна; отказ рассматривается как следствие внешнего воздействия. Отказы независимы и возникают в случайные моменты времени.

Запишем вероятность превышения максимальной прочности кабельной линии в k -м интервале, при условии деления периода работы кабеля $(0, t)$ на интервалы $(\Delta t, i = 1, 2, \dots, n)$:

$$P'_{A_k} = P(B_1)P(B_2)\dots P(B_{k-1})P(A_k) = \alpha_k \prod_{i=1}^{k-1} (1 - \alpha_i), \quad (4.96)$$

где α_i – вероятность превышения механической нагрузки кабеля в i -м интервале;

α_k – вероятность превышения прочности кабеля в k -м интервале;

B_i – событие неоявления пиковой нагрузки в интервале i ;

A_k – событие появления пиковой нагрузки в интервале k .

При постоянных условиях эксплуатации кабеля $\alpha_i = \alpha_j = \alpha_k = \alpha$; $i = 1, 2, \dots, n$.

Вероятность того, что время безотказной работы кабеля равно ($k = 1$) интервалов:

$$P'_{A_k} = (1 - \alpha)^{k-1} \alpha. \quad (4.97)$$

Для получения функции распределения времени безотказной работы, выраженной в числе интервалов времени, суммируем вероятности появления отказов начиная с первого интервала:

$$P(t < T = K) = \alpha \sum_{i=1}^k (1 - \alpha)^{i-1} = 1 - (1 - \alpha)^k. \quad (4.98)$$

С достаточной точностью можно заменить $(1 - \alpha)^k$ на $e^{-k\alpha}$:

$$P(t < T) = q(t) = 1 - e^{-k\alpha}. \quad (4.99)$$

Переходя к непрерывному аргументу времени, получим

$$q(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (4.100)$$

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 равно

$$\tau = \bar{T} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (4.102)$$

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 (восстановления, средней продолжительности аварийного ремонта), год/отказ;

ω_B – параметр потока вынужденных отказов (средняя частота отказа), отказ/год;

$K_B = \omega_B T_B$ – коэффициент вынужденного простоя (коэффициент восстановления), о.е.;

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 $T_{в}$, $T_{п}$ даются в часах, что понятно, но усложняет расчётные формулы. Для определения ущерба $У$ при сравнении вариантов схемы сети будем учитывать только линии электропередачи как наименее надёжный элемент сети. В табл. 4.13 приводятся значения показателей надёжности и плановых ремонтов ЛЭП.

Таблица 4.13

Показатели надёжности и плановых ремонтов ЛЭП

| 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 воздушные линии (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 табл. 4.13 значения $\omega_{в}$, $\omega_{п}$ даются на 100 км длины линии. Для конкретной длины линии

$$\omega_{в} = \omega_{вl} / 100, \quad \omega_{п0} = \omega_{пl} / 100.$$

Вместо показателя $T_{п}$ (планового 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_{\max} , P_{\max} , взятые для максимального

режима, а также расчётные годовые удельные ущербы от аварийных и плановых ограничений питания.

Для разной структуры нагрузки (табл. 4.14) на рис. 4.12 представлены зависимости удельных ущербов при аварийных и плановых ограничениях питания.

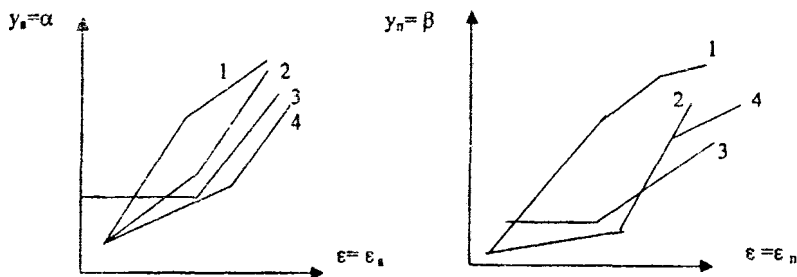


Рис.4.12. Зависимости удельных ущербов при аварийных и плановых ограничениях питания

Для рис. 4.12 имеем по координатам:

$y_a = \alpha$ – удельный ущерб при аварийных ограничениях (индекс v – время вынужденного простоя);

$y_n = \beta$ – удельный ущерб при плановых ограничениях питания (индекс p – время планового простоя);

ϵ_a, ϵ_n – коэффициенты ограничения нагрузки потребителя при аварийном и плановых ремонтах.

Показатель ϵ – степень ограничения потребителей по активной мощности:

$$\epsilon = \frac{P_{отк}}{P_{max}}, \text{ отн.ед.}, \quad (4.104)$$

где $P_{отк}$ – отключаемая мощность при ограничении нагрузки;

P_{max} – максимальная мощность нагрузки.

Таблица 4.14

Варианты структуры нагрузки

| Структура нагрузки (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 относятся:

установленная мощность электростанции;

резерв мощности ЭС, который может быть передан в сеть через районную подстанцию.

Как было отмечено, недоотпуск электроэнергии возникает при ограничениях и перерывах ($\varepsilon = 1$) в электропотреблении. Из всех видов ограничения потребления будем учитывать только ограничения при разделе источников питания. Этот вид ограничений наиболее типичен для разрабатываемых в проекте простой структуры схем сети, запитанных от двух источников.

Перерывы электроснабжения. Рассматривается каждый потребитель по формуле

$$Y_i = Y_{gi} + Y_{ni}, \quad (4.105)$$

где Y_{gi} – ущерб потребителей от простоя в результате аварии;

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

При полном ограничении питания потребителей имеем

$$Y_i = P_{\max}(\alpha_{\varepsilon=1} K_{gi} + \beta_{\varepsilon=1} K_{ni}), \quad (4.106)$$

где K_{gi} – коэффициент вынужденного простоя, $K_{gi} = \omega_g T_g$;

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

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

В случае частичного ограничения питания потребителей ущерб составит величину

$$Y_i = P_{\max}(\alpha \varepsilon_a K_{ai} + \beta \varepsilon_n K_{ni}), \quad (4.107)$$

где $\varepsilon_a = P_{\text{вотк}} / P_{\max}$; $\varepsilon_n = P_{\text{п.отк}} / P_{\max}$;

α – удельный ущерб от аварийных отключений питания потребителя;

β – удельный ущерб от плановых отключений питания;

$P_{a \text{ отк}}, P_{\text{п.отк}}$ – отключаемая часть нагрузки на время восстановления аварийных повреждений или плановых ремонтов сети.

Ущерб от недоотпуска электроэнергии по сети равняется сумме ущербов всех n потребителей:

$$y = \sum_{i=1}^n Y_i. \quad (4.108)$$

Показатели надёжности K_{ai} и K_{ni} рассчитываются на основе преобразования расчётной схемы надёжности i -го потребителя. В схеме надёжности каждая линия отображается блоком и задаётся показателями T_v, K_n, ω_n . Учитываются только те линии, которые связывают данный потребитель с источниками питания. Источники питания считаются бесконечной мощности и закорачиваются в одном узле.

Двухцепные линии 35-220 кВ замешаются тремя блоками. Два параллельных блока учитывают отказы отдельных линий и задаются показателями $T_v, T_n, \omega_v, \omega_n$. Последовательный блок учитывает одновременно отказ двух линий и задаётся показателями ω_v, T_v .

Двухцепные линии 330-750 кВ учитываются двумя независимыми блоками с показателями $T_v, T_n, \omega_v, \omega_n$, 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 учитываться при определении ущерба от недоотпуска энергии.

Пример 1. Составить структурную схему надёжности сети (рис. 4.13) относительно узла П:

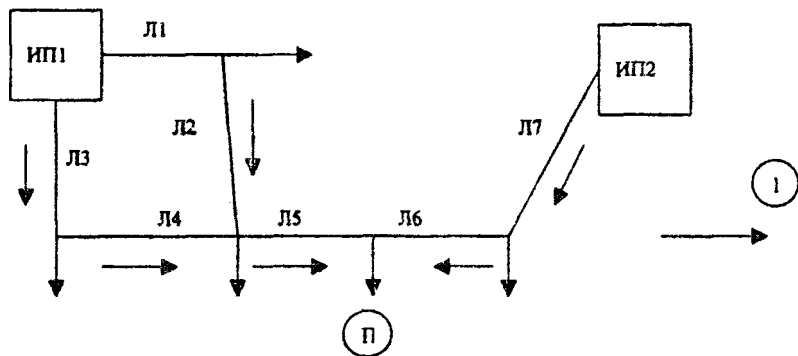


Рис. 4.13. Исходная схема электрической сети:
ИП1, ИП2 – источники питания; Л1...Л7 – линии;
П – узел потребления; ① – этап преобразования схемы

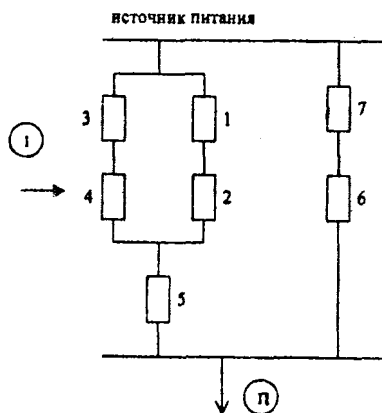


Рис. 4.14. 1-й этап преобразования
схемы

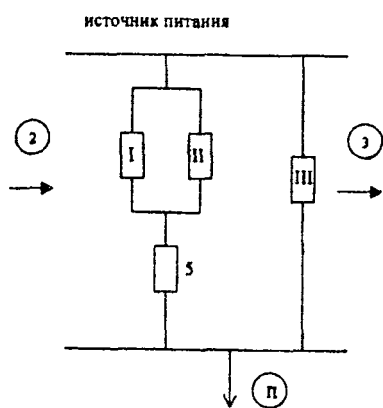


Рис. 4.15. 2-й этап преобразования
схемы

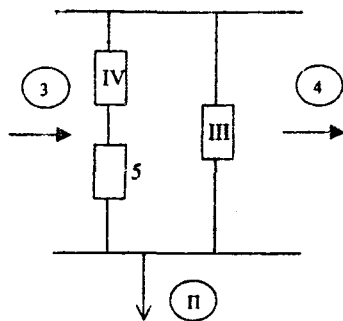


Рис. 4.16. 3-й этап преобразования схемы

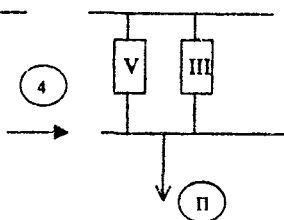


Рис. 4.17. 4-й этап преобразования схемы

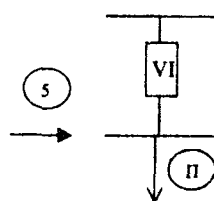


Рис. 4.18. 5-й этап преобразования схемы

Пример 2. Составить структурную схему надёжности относительно узлов П 1 и П 2. Решение задачи представлено на рис. 4.20, 4.21.

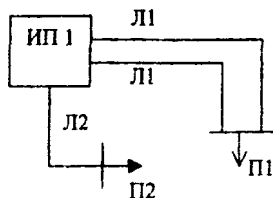


Рис. 4.19. Исходная схема сети

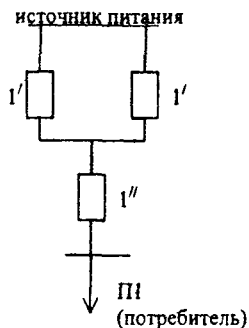


Рис. 4.20. Схема надёжности относительно узла нагрузки П1

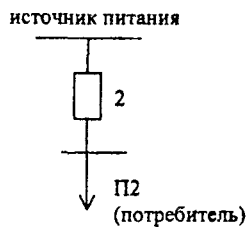


Рис. 4.21. Схема надёжности относительно узла нагрузки П2

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

$$\omega_{\text{бл}} = \sum_{i=1}^n \omega_{\text{эл}i}, \quad (4.109)$$

где $\omega_{\text{эл}i}$ – параметр потока вынужденных отказов (средняя частота отказов) элемента сети, отказ /год.

Согласно выражению (4.109), отказ цепи наступает при отказе одного из элементов. Коэффициент вынужденного простоя (восстановления) эквивалентного блока

$$K_{\text{бл}} = \sum_{i=1}^n K_{\text{эл}i} = \sum_{i=1}^n \omega_{\text{эл}i} T_{\text{эл}i}, \quad (4.110)$$

где $K_{\text{эл}i} = \omega_{\text{эл}i} T_{\text{эл}i}$ – коэффициент вынужденного простоя i -го элемента сети;

$T_{\text{эл}i}$ – среднее время восстановления ($T_{\text{эл}i} 10^{-3}$ лет/отказ) i -го элемента.

Среднее время вынужденного простоя эквивалентного блока

$$T_{\text{бл}} = K_{\text{бл}} / \omega_{\text{бл}}. \quad (4.111)$$

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 $\omega_{\text{пл}}$, коэффициент планового простоя $K_{\text{пл}}$, среднее время планового простоя для эквивалентного блока $T_{\text{пл}}$ определяются из выражений

$$\omega_{\text{пл}} = \sum_{i=1}^n \omega_{\text{пл}i}; \quad (4.112)$$

$$K_{n2} = \sum_{i=1}^n K_{ni} = \sum_{i=1}^n \omega_{ni} T_{ni}; \quad (4.113)$$

$$T_{n2} = K_{n2} / \omega_{n2}, \quad (4.114)$$

где K_{ni} – коэффициент планового простоя i -го элемента сети, $K_n 10^{-3}$, отн. ед., $K_{ni} = \omega_{ni} T_{ni}$;

ω_{ni} – параметр потока отказов (частота) плановых элементов i -го элемента сети, простой/год;

T_{ni} – 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 :

$$\omega_{e2} = \omega_{ei} (K_{ej} + K_{\omega} K_{nj}) + \omega_{ej} (K_{ei} + K_{\omega} K_{ni}); \quad (4.115)$$

$$K_{e2} = K_{ei} K_{ej} + K_{ei, nj} + K_{ej, ni}; \quad (4.116)$$

$$T_{e2} = K_{e2} / \omega_{e2}, \quad (4.117)$$

где K_{ω} – коэффициент, учитывающий снижение вероятности накладки аварийного отказа на плановый ремонт в период сниженной интенсивности отказов, $K_{\omega} = 0,5$;

$K_{ei} K_{ej}$ – произведение коэффициентов, учитывающее наложение отказов i -го и j -го элементов;

$K_{ei, nj}$ – коэффициент, учитывающий наложение отказов i -го элемента на плановый простой j -го элемента:

$$K_{ei, nj} = \begin{cases} 0,5 \omega_{ei} K_{nj} T_{nj} & \text{при } T_{ei} \geq T_{nj}; \\ K_{ei} (K_{nj} - 0,5 T_{ei} \omega_{ni}) & \text{при } T_{ei} \leq T_{nj}; \end{cases} \quad (4.118)$$

K_{nj}, p_j – коэффициент, учитывающий наложение отказов j -го элемента на плановый простой i -го:

$$K_{nj,pi} = \begin{cases} 0,5\omega_{ni}K_{ij}T_{ni} & \text{при } T_{nj} \geq T_{ni}; \\ K_{nj} (K_{ni} - 0,5 T_{nj} \omega_{ij}) & \text{при } T_{nj} \leq T_{ni}. \end{cases} \quad (4.119)$$

При эквивалентировании параллельных блоков показатели плановых ремонтов исключаются, поскольку два блока одновременно в плановый ремонт не выводятся.

Если после нескольких эквивалентирований цепей с последовательными и параллельными элементами расчётная схема сводится к одному результирующему блоку, то его показатели надёжности $\omega_{\Sigma}, K_{\Sigma}, T_{\Sigma}$ и плановых ремонтов $\omega_{\text{п}}, K_{\text{п}}, T_{\text{п}}$ являются показателями надёжности питания потребителя и позволяют рассчитать ущерб по формуле (4.107). Показатели плановых ремонтов будут являться показателями надёжности питания потребителя лишь тогда, когда потребитель связан с сетью одноцепной линией.

5. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЁЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

5.1. Функциональная надёжность в схеме «станция-система»

Функциональная надёжность в схеме достигается при противаварийном управлении отключением генераторов и быстрой разгрузкой паровых турбин. Рассмотрим схему (рис. 5.1).

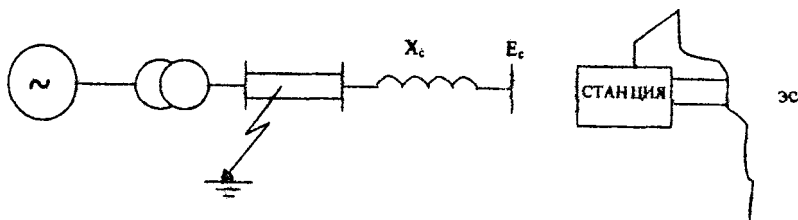


Рис. 5.1. Исходная схема

Здесь при отсутствии средств повышения устойчивости имеем при к.з. её нарушение (рис. 5.2). Если при отключении тока к.з. отключить часть генераторов (рис. 5.3), устойчивость сохранится.

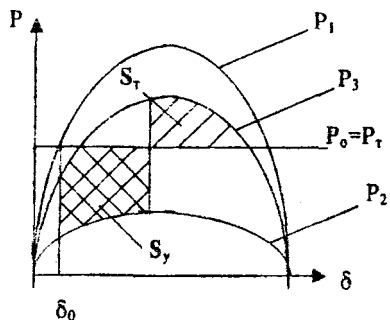


Рис. 5.2. Угловые характеристики мощности

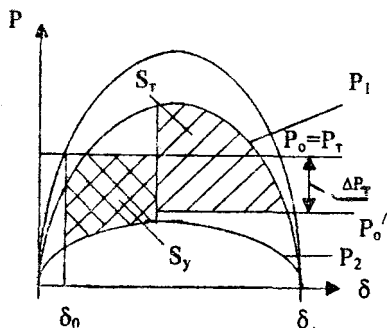


Рис. 5.3. Угловые характеристики мощности после отключения Δn генераторов

На рис. 5.3: S_T , S_Y – площадки торможения и ускорения;

P_1 , P_2 , P_3 – характеристики мощности, выдаваемой в систему при нормальном, аварийном и послеаварийном режимах.

$$P'_0 = P_0 \frac{n - \Delta n}{n}, \quad (5.1)$$

где n – число работающих генераторов станции;

Δn – число отключённых генераторов;

P'_0 – мощность генераторов после отключения Δn .

При этом снижается и характеристика мощности послеаварийного режима:

$$P'_3 = P_3 \frac{\frac{X'_d}{n} + X_T + X_n + X_c}{\frac{X'_d}{n - \Delta n} + X_T + X_n + X_c}, \quad (5.2)$$

где $X'_d, X'_T, X'_\Sigma, X'_c$ – соответственно переходное синхронное сопротивление эквивалентного генератора, сопротивления трансформатора, линии, системы.

На рис. 5.3 видим, что снижение характеристики выдачи мощности в систему меньше уменьшения мощности турбины $P'_2 < \Delta P_T$, 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_y .

$$W_{кин} = S_y \frac{n - \Delta n}{n}.$$

$$\text{Условие правила площадей } S_y \frac{n - \Delta n}{n} < F_T. \quad (5.3)$$

Таким образом, имеем увеличение S_T и уменьшение S_y , то есть отключение генератора является эффективным средством увеличения устойчивости при к.з.

Разгрузка турбины:

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 приводит к увеличению площади торможения и повышению динамической устойчивости.

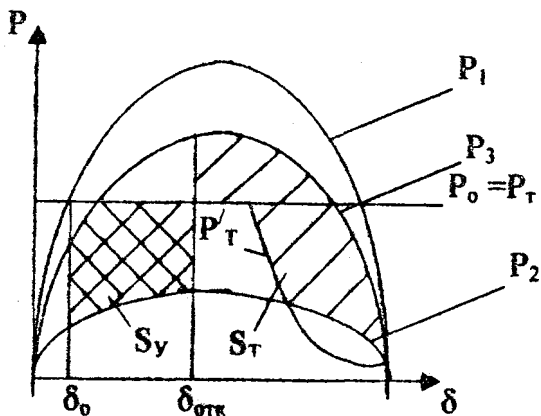


Рис. 5.4. Характеристика мощности турбины

Деление системы используется в отдельных случаях, когда станция выдаёт мощность в ЭС малой мощности и связана с большой системой, а разгрузка станции для устойчивости связи с малой системой неэффективна. Рассмотрим деление системы для схемы «станция – ЭС малой мощности – ОЭС (объединённая мощная энергосистема)» (рис. 5.5).

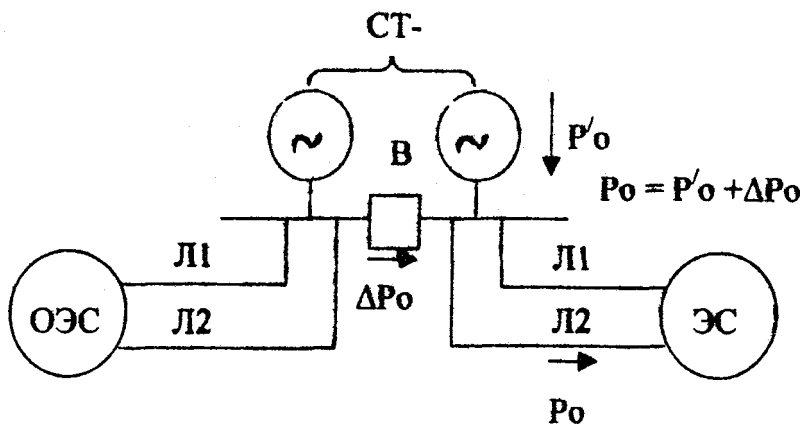


Рис.5.5. Исходная схема соединений

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). Путем разгрузки станции обеспечить сохранение устойчивости невозможно, т.к. при этом уменьшается только мощность, выдаваемая в ОЭС. Уменьшить поток мощности, выдаваемый в ЭС, можно уменьшая $P_{нэс}$ или при делении станции. В этом случае (при делении станции) $P_t = P'_0$ и устойчивость ЛЭП (Л1,Л2) может быть сохранена, $P'_0 \leq P_{3max}$ (после аварийного режима); $P_0 \downarrow$ до P'_0 , имеем дефицит мощности в ЭС и $f \downarrow$. При недостаточном вращающемся резерве в ЭС может действовать автоматическое регулирование частоты. Деление выполняется отключением выключателя «В» при отключении Л1 или Л2 и передаваемой мощности, превышающей пропускную способность в послеаварийном режиме.

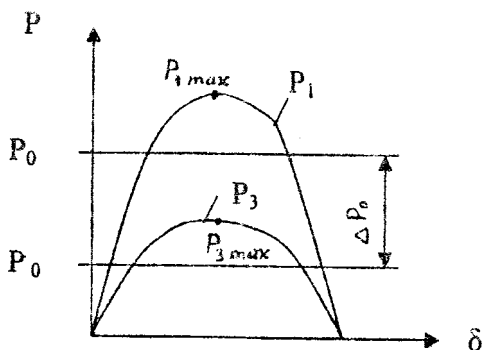


Рис. 5.6. Угловые характеристики мощности при снижении мощности турбины

5.2. Расчёт функциональной надёжности в объединении из двух ЭС со слабой связью

При объединении ЭС основную опасность для надёжности представляет:

- отключение линий связи Л1 или Л2;

- появление аварийного небаланса мощности (потеря генерирующей мощности в ЭС-2, отключение узлов нагрузки в ЭС-1) в объединяемых системах.

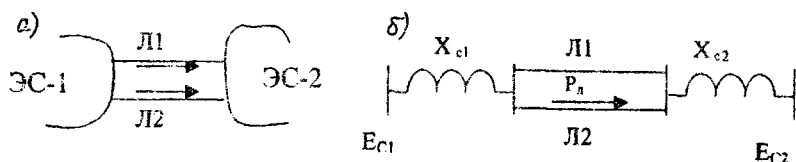


Рис.5.7. Схемы энергообъединения:
а) принципиальная схема; б) схема замещения

На рис. 5.7 x_{c1} и x_{c2} – эквивалентные сопротивления в ЭС-1, ЭС-2.

Обозначим $P_{Г1}$ и $P_{Н1}$, $P_{Г2}$ и $P_{Н2}$ – генерируемые мощности и мощности нагрузок в ЭС-1 и ЭС-2.

Электромеханические переходные процессы в каждой из ЭС

$$\begin{cases} T_{j1} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = P_{Г1} - P_{Н1} - P_n, & (5.4) \\ T_{j2} \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = P_{Г2} - P_{Н2} - P_n, & (5.5) \end{cases}$$

где T_{j1} , T_{j2} – механические постоянные инерции ЭС-1 и ЭС-2.

$$P_n = \frac{E_{c1} E_{c2}}{X_{12}} \sin \delta_{12}; \quad (5.6)$$

$$\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2; \quad (5.7)$$

$$X_{12} = X_{c1} + \frac{X_s}{2} + X_{c2}. \quad (5.8)$$

Для получения уравнения электромеханического переходного процесса в объединении из двух энергосистем используем уравнения (5.4) и (5.5):

$$T_j \frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = P_0 - P_x, \quad (5.9)$$

$$\text{где } P_0 = \frac{T_{j2}}{T_{j1} + T_{j2}} (P_{Г1} - P_{Н1}) - \frac{T_{j1}}{T_{j1} + T_{j2}} (P_{Г2} - P_{Н2}); \quad (5.10)$$

$$T_j = \frac{T_{j1} T_{j2}}{T_{j1} + T_{j2}}, \quad (5.11)$$

Отключение одной цепи межсистемной связи представлено на рис. 5.8.

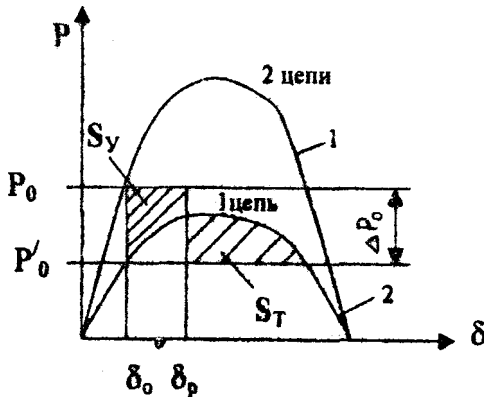


Рис. 5.8. Отключение цепи межсистемной связи

Для двух цепей: $P_0 = P_{л}$ и $\delta_0 = \delta_{12}^0$.

После отключения одной цепи имеем $P_{\max}^{1ч} < P_{\max}^{2ч}$.

Для обеспечения устойчивости необходима разгрузка межсистемной связи до P'_0 , чтобы обеспечить устойчивость динамического перехода и статическую устойчивость нового установившегося режима. Для обеспечения динамической устойчивости должно соблюдаться условие $S_T > S_Y$ (δ_p – угол, при котором происходит раз-

грузки межсистемной передачи, т.е. переход с уровня P_0 на P'_0). Запас статической устойчивости

$$P_{\max}^{14} - P'_0.$$

Снижение P_0 до P_0^1 возможно за счёт уменьшения инерции в ЭС-1 на $\Delta P_{\Gamma 1}^{\text{ЭС1}}$ или уменьшения нагрузки в ЭС-2 на $\Delta P_{H2}^{\text{ЭС}}$.

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_0 = \frac{T_{j2}}{T_{j1} + T_{j2}} [(P_{\Gamma 1} - \Delta P_{\Gamma 1}) - P_{H1}] - \frac{T_{j1}}{T_{j1} + T_{j2}} [P_{\Gamma 2} - (P_{H2} - \Delta P_{H2})], \quad (5.12)$$

откуда разгрузка связи

$$\Delta P_0 = \frac{T_{j2}}{T_{j1} + T_{j2}} \Delta P_{\Gamma 1} + \frac{T_{j1}}{T_{j1} + T_{j2}} \Delta P_{H2}.$$

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 привести потеря части нагрузки $\Delta P_{H1}^{\text{ЭС1}}$ в ЭС-1 (или $\Delta P_{\Gamma}^{\text{ЭС2}}$ в ЭС-2). Это может быть авария, дающая избыток мощности $\Delta P^{\text{ЭС1}}$ или дефицит мощности $\Delta P^{\text{ЭС2}}$.

Изменения мощности ΔP_H и ΔP_{Γ} вызывают отклонение частоты Δf :

$$\Delta P_{\Gamma i} = -P_{\Gamma i} \frac{\Delta f}{f_{\text{ном}}} K_{\Gamma i}; \quad \Delta P_{H,i} = P_{H,i} \frac{\Delta f}{f_{\text{ном}}} K_{H,i}, \quad (5.13)$$

где $K_{\Gamma i}$, $K_{H,i}$ – крутизна частотной характеристики мощности, нагрузки i -й системы.

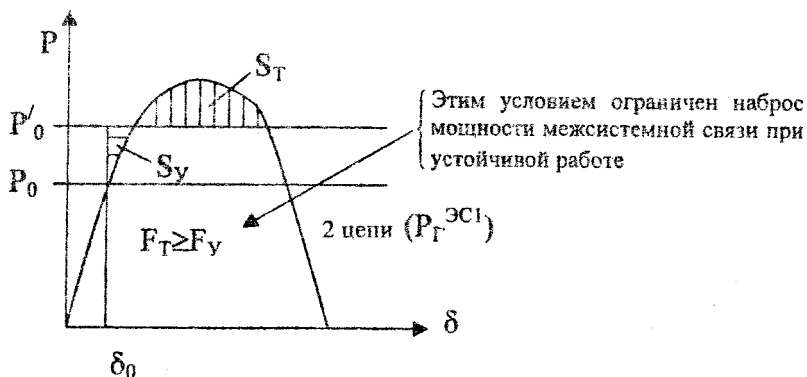


Рис. 5.9. Угловая характеристика мощности

При небалансе мощности ΔP имеем отклонение частоты Δf :

$$\frac{\Delta f}{f_{ном}} = \frac{\Delta P}{\sum_{i=1}^n (P_{Г,i} K_{Г,i} + P_{Н,i} K_{Н,i})}, \quad (5.14)$$

где n – количество систем в объединении.

5.3. Критерии режимной надёжности и их нормирование

Надёжность режима ЭС – это её способность выдерживать возмущения. Этот фактор оценивается устойчивостью ЭС.

Рассмотрим две типичные схемы, приводившиеся в подразд. 5.1, 5.2, результаты анализа которых можно распространить на сложные ЭС.

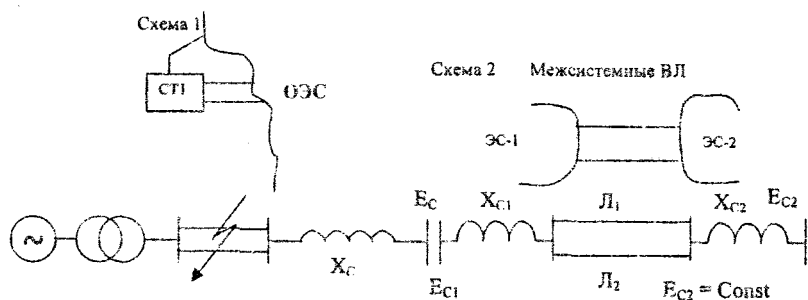


Рис. 5.10. Типичные схемы систем

Надёжность нормируется в виде критериев режимной устойчивости в узловых точках ЭС, отражающих её запас (K_p , K_u), и расчётного возмущения для проверки динамической устойчивости.

Численные значения этих величин определяются соотношениями

$$K_p = \frac{P_{\max} - \Delta P_{\text{нер}} - P}{P} 100; \quad (5.15)$$

$$K_u = \frac{U_n - U_{\text{кр}}}{U_n} 100, \quad (5.16)$$

где $\Delta P_{\text{нер}}$ – увеличение передаваемой мощности нерегулярными колебаниями по межсистемной передаче для схемы «станция – электропередача – система»;

P – передаваемая активная мощность;

$U_{\text{кр}}$ – значение напряжения, при котором нарушается устойчивость.

$$\Delta P_{\text{нер}} \approx \frac{2 \sum P_{\text{ген}}}{100},$$

где $P_{\text{ген}}$ – мощность меньшей из объединяемых электрических систем.

Коэффициенты запаса статической устойчивости нормируются в следующих пределах:

$K_p \geq 20\%$, $K_u \geq 10\%$ – нормальный режим ЭС;

$K_p \geq 8\%$ – аварийный режим.

Для исследования статической устойчивости ЭС составляем схемы замещения.

Схема 1

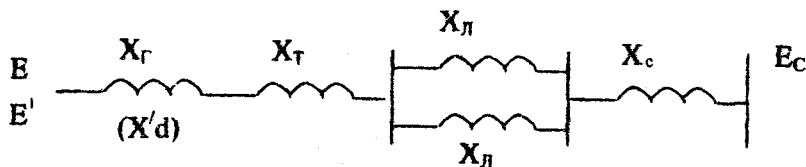


Схема 2

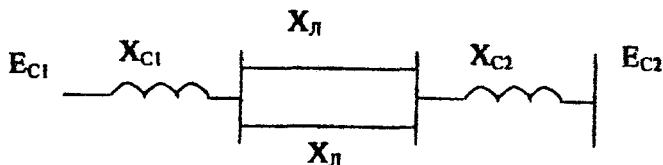


Рис 5.11. Схемы замещения

Для схемы 1 мощность, передаваемая в систему:

$$P = \frac{E'E_c}{X} \sin \delta, \quad (5.17)$$

где $X = X_G + X_T + X_L / 2 + X_C$.

$$P_{\max} = \frac{E'E_c}{X}. \quad (5.18)$$

На рис. 5.12 представлена угловая характеристика мощности станции, передающей мощность в систему.

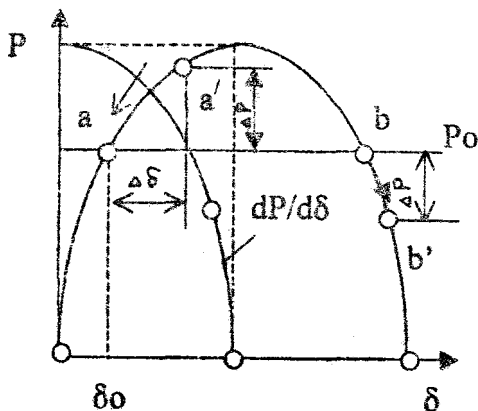


Рис. 5.12. Угловая характеристика мощности

Точка «а» – установившийся 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 $P_{\text{пред}}$ (если используем в схеме замещения X'_d – АРВ пропорционального действия).

Зная P_{max} , по формуле (5.15) при $\Delta P = 0$ находим передаваемую мощность, соответствующую нормативному коэффициенту запаса статической устойчивости:

$$P = \frac{P_{\text{max}}}{1 + K_p / 100} = \frac{P_{\text{max}}}{1,2}. \quad (5.19)$$

Для послеаварийного режима

$$P = \frac{P'_{\text{max}}}{1,08}; \quad X' = X_r + X_t + X_d + X_c; \quad P'_{\text{max}} = \frac{E'E_c}{X}. \quad (5.20)$$

Для схемы 2

$$P_{np} = \frac{E_{c1}E_{c2}}{X}; \quad X = X_{c1} + X_l/2 + X_{c2}. \quad (5.21)$$

Здесь считаемся с неурегулированными колебаниями перетока мощности по межсистемной связи.

В нормальном режиме

$$P = \frac{P_{\max} - \Delta P_{\text{нер}}}{1,2}. \quad (5.22)$$

В аварийном режиме

$$P' = \frac{P'_{\max} - \Delta P_{\text{нер}}}{1,08}. \quad (5.23)$$

Динамическая устойчивость нормируется расчётными условиями – видами и длительностью к.з.:

двухфазные к.з. на землю длительностью 0,18 с для сетей 110-220 кВ;

двухфазные к.з. 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 к.з. с учётом неуспешного АПВ.

5.4. Обеспечение режимной (функциональной) надёжности системообразующих сетей ЭС

Для обеспечения режимной (функциональной) надёжности системообразующих сетей ЭС применяется комплекс средств повышения устойчивости режимов работы ЭС.

1). Улучшение характеристик основных элементов ЭС с помощью конструктивных изменений. В частности, улучшение параметров генераторов, т.е. снижение X_d X'_d , увеличение T_j повышение потолка возбуждения и быстродействия возбудителей, снижение индуктивного сопротивления ЛЭП путём расщепления проводов, уменьшение времени действия релейной защиты и выключателей и т.п.

2). Улучшение характеристик основных элементов ЭС средствами автоматизации. Это достигается путем применения АРВ, в частности АРВ сильного действия с форсировкой возбуждения при глубоких посадках напряжения, АПВ трёхфазного и пофазного, быстродействующих защит, регулирования первичных двигателей и т.п.

3). 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.

4). Мероприятия эксплуатационного характера – выбор схемы соединений, обеспечивающей наибольшую устойчивость; регулирование или ограничение перетока мощности по межсистемным связям; отключение части генераторов или экстренная разгрузка турбин; форсирование продольной ёмкостной компенсации; отключение поперечных реакторов; отключение части нагрузки; деление систем на несинхронно 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 включение (ЧАПВ) потребителей.

АОПМ служит для предотвращения нарушения статической устойчивости при относительно медленном изменении перетока мощности, вызванного ошибкой прогнозирования графиков нагрузки ЭС с небольшими небалансами мощности из-за отключения генера-

торов или нерегулярных колебаний нагрузки. Автоматика контролирует перетоки мощности по отдельным связям. При достижении заданной величины (уставки) увеличивает или уменьшает нагрузки выделенных станций.

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

- контроль доаварийной схемы и режима;

- получение и оценка информации по возмущению на основе расчёта устойчивости;

- выдача управляющих команд АУМСУ воздействует на отключение генераторов, разгрузку турбин, отключение потребителей (САОН), деление ЭС. Сочетание этих средств подбирается с учётом U_{\min} у потребителей от недоотпуска электроэнергии. АУМСУ не рассчитаны на устранение каскадных аварий.

АПХАХ отделяют выпавшие из синхронизма части ЭС, т.е. локализируют аварию. В отделившихся частях имеется дефицит мощности и 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;
технического обслуживания;
защиты и автоматизации;

установки компенсирующих и регулирующих устройств, повышающих качество напряжения, и т.п.

Повышение надёжности распределительных систем направлено:
на создание рациональных схем электрических соединений (схем распределительных устройств подстанций и станций);

на создание оптимального насыщения сети автоматическими устройствами и устройствами АВР;

на насыщение сети неавтоматическими коммутационными аппаратами;

на установку регулирующих и компенсирующих реактивную мощность устройств у потребителей;

на оснащение оборудованием подстанций устройствами телеизмерения и телемеханизации;

на автоматизацию на базе ПЭВМ оперативных переключений в сложных сетях;

на совершенствование релейной защиты и автоматики.

В воздушных и кабельных сетях надёжность повышают путем введения устройств поиска повреждений, сокращения продолжительности аварийных ремонтов, обеспечения ремонтных баз запчастями электроустановок, оптимизации профилактических ремонтов, осмотров, замен износившихся частей.

Перечисленные 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 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 послеаварийном 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.

1-й 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 послеаварийного 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.

2-й этап.

Выявление расчётных ремонтных схем, их частот и длительностей и определение режимов работы для этих схем. Это необходимо 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 послеаварийного режима при отказах.

Расчёт частот, глубин и длительностей перерывов электроснабжения узлов нагрузки для ремонтных режимов.

Литература

1. Фокин Ю. А. Надежность и эффективность сетей электрических систем. – М.: Высш. школа, 1989. – 149 с.
2. Гук Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 206 с.
3. Гук Ю. Б. Анализ надежности электроэнергетических установок. – Л.: 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. школа, 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 энерго-систем. – М.: Высш. школа, 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. Надежность системы электроснабжения // В.В.Зорин, В.В.Тисленко, Ф.Клеппель, Г.Адлер. – 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.: Сов. радио, 1968. – 254 с.

Содержание

| | |
|--|-----|
| Введение | 3 |
| 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ. | 4 |
| 1.1. Развитие науки о надёжности электрических систем. Ее особенности и задачи. | 4 |
| 1.2. Основные понятия, термины и определения надёжности электрических систем. | 8 |
| 1.3. Состояния и события при изучении надёжности электрических систем, типы отказов. | 12 |
| 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ (ЭС). | 14 |
| 2.1. Свойства электрических систем, влияющие на надёжность их работы. | 14 |
| 2.2. Схемы соединения ЭС и их надёжность. | 15 |
| 2.3. Надёжность работы объединённой ЭС. | 17 |
| 2.4. Устройства управления режимом ЭС, влияющие на её надёжность. | 19 |
| 2.5. Понятие о структурной и функциональной надёжности электрических систем. | 19 |
| 2.6. Показатели качества энергии, влияющие на надёжность. | 20 |
| 2.7. Трудности обеспечения надёжности ЭС и ее живучести. | 21 |
| 2.8. Нормативные материалы по надёжному управлению ЭС. | 21 |
| 2.9. Требования к надёжности ЭС при проектировании. | 23 |
| 2.10. Системная автоматика как средство управления ЭС и обеспечения надёжности. | 24 |
| 3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ. | 25 |
| 3.1. Показатели надёжности невосстанавливаемых элементов электрических систем. | 25 |
| 3.2. Достоинства и недостатки основных показателей надёжности | 42 |
| | 149 |

| | |
|--|-----|
| 3.3. Показатели надежности восстанавливаемых элементов (объектов, систем). | 43 |
| 3.4. Комплексные показатели надежности восстанавливаемых элементов электрических систем. . . | 50 |
| 3.5. Показатели надежности системы, состоящей из независимых элементов. | 53 |
| 3.6. Показатели надёжности концентрированной ЭС и методы их определения. | 57 |
| 3.6.1. Вероятность снижения мощности ЭС. | 57 |
| 3.6.2. Частота попадания ЭС в k-е состояние. | 58 |
| 3.7. Показатели надежности распределительных электрических сетей при последовательном и параллельном соединении цепей. | 59 |
| 3.8. Основные показатели ремонтпригодности элементов ЭС. | 61 |
| 3.9. Выбор и перераспределение показателей надёжности проектируемой системы. | 66 |
| 3.10. Количественные оценки показателей надёжности. | 67 |
| 4. СТРУКТУРНАЯ НАДЁЖНОСТЬ РАБОТЫ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭС. | 72 |
| 4.1. Основные понятия и показатели надёжности воздушных линий электропередачи. | 72 |
| 4.2. Надёжность двухцепных ВЛ. | 79 |
| 4.3. Надёжность ЛЭП с последовательно соединёнными элементами. | 85 |
| 4.4. Надёжность ЛЭП с параллельным соединением элементов. | 88 |
| 4.5. Надёжность ВЛ с параллельным соединением элементов при ненагруженном резерве. | 92 |
| 4.6. Надёжность сложных схем электроснабжения. | 96 |
| 4.7. Методы получения информации о надёжности ВЛ. | 100 |
| 4.8. Статистические методы обработки информации о надёжности ВЛ и оборудования ЭС. | 101 |
| 4.8.1. Статистическая оценка законов распределения отказов ВЛ и оборудования ЭС. | 101 |
| 4.8.2. Подбор теоретического закона распределения случайных величин отказов | 103 |

| | |
|---|------------|
| 4.8.3. Критерии согласия для оценки надёжности элементов ЭС. | 104 |
| 4.8.4. Доверительные интервалы при статистической оценке параметров надёжности. | 105 |
| 4.9. Статистические показатели надёжности совокупности воздушных линий. | 106 |
| 4.10. Обработка исходных статистических данных воздушных линий по разнородной информации. | 107 |
| 4.11. Анализ отключений ВЛ 35-750 кВ. | 108 |
| 4.12. Отключения и повреждения ВЛ 35-330 кВ в Минэнерго Республики Беларусь. | 113 |
| 4.13. Статистика повреждений элементов ЭС в распределительных сетях. | 115 |
| 4.14. Причины отказов основных элементов ЭС. | 117 |
| 4.15. Модель внезапного отказа на примере кабельной линии среднего напряжения (СН). | 119 |
| 4.16. Расчёт надёжности электрической сети по недоотпуску электроэнергии. | 121 |
| 4.17. Расчёт эквивалентных характеристик надёжности работы электрических сетей при оценке ущерба. | 128 |
| 5. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЁЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ. | 130 |
| 5.1. Функциональная надёжность в схеме «станция-система». | 130 |
| 5.2. Расчёт функциональной надёжности в объединении из двух ЭС со слабой связью. | 134 |
| 5.3. Критерии режимной надёжности и их нормирование. | 138 |
| 5.4. Обеспечение режимной (функциональной) надёжности системообразующих сетей ЭС. | 142 |
| 5.5. Средства и методы повышения надёжности распределительных сетей. | 144 |
| 5.6. Методика расчёта надёжности системообразующих сетей ЭС. | 145 |
| Л и т е р а т у р а | 147 |

Учебное издание

ЦЫГАНКОВ Валерий Михайлович

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ
КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

для студентов заочного и дневного отделений специальностей
Т.01.01.00 – «Электроэнергетика» и Т.01.03.00 – «Автоматизация
управления энергетическими процессами»

Редактор Г.В.Ширкина. Корректор М.П.Антонова
Компьютерная верстка Л.М.Чернышевич

Подписано в печать 08.11.2001.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура книжно-журнальная.

Усл. печ. л. 8,8. Уч.-изд. л. 6,9. Тираж 200. Заказ 148.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусская государственная политехническая академия.

Лицензия ЛВ №155 от 30.01.98. 220027, Минск, проспект Ф.Скорины. 65.