

В.Г. КИТУШИН
**НАДЕЖНОСТЬ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ**

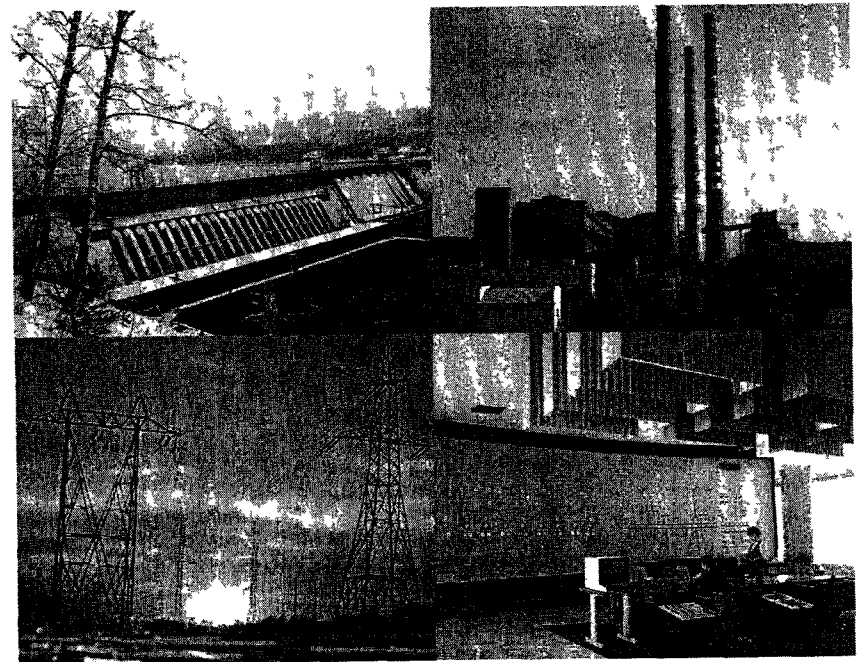
**ЧАСТЬ 1
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ**

Ответственные редакторы серии:

А.С. Востриков
Н.В. Пустовой

Редакционная коллегия:

Ю.А. Афанасьев
А.Г. Вострецов
В.В. Губарев
В.А. Гридчин
В.И. Денисов
К.Т. Джурабаев
В.И. Игнатъев
К.П. Кадомская
В.В. Крюков
Г.Е. Невская
В.В. Покасов
Х.М. Рахимьянов
Ю.Г. Соловейчик
А.А. Спектор
А.И. Шалин
А.Ф. Шевченко
Г.М. Шумский



НОВОСИБИРСК
2 0 0 3

УДК : 621.311.019.3 (075.8)
К 455

Федеральная программа книгоиздания России

Рецензенты:

кафедра «Электрические системы и сети»
С.-Петербургского государственного политехн. ун-та,
зав. каф. д-р *С.В. Смолвик*;
д-р, проф. *Г.А. Евдокунин*;
чл.-корр. РАН д-р техн. наук, проф. *Н.И. Воронай*;
ст. преп. каф. «Электрические станции» С.-Петербургского
государственного политехн. ун-та *В.В. Карпов*

Китушин В.Г.

К 455 Надежность энергетических систем. Часть 1. Теоретические основы: Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2003. – 256 с. – (Серия «Учебники НГТУ»).

ISBN 5-7782-0309-8

Надежность – одно из главных целевых свойств (наряду с экономичностью и экологичностью) искусственных систем, на обеспечение которых направлены все усилия инженерно-управленческого интеллекта, что и делает знания в области надежности базовыми в образовании специалиста.

В книге ставятся и обсуждаются три вопроса: 1) что такое надежность; 2) что такое надежное энергоснабжение; 3) задачи надежности в энергетике и общий подход к их решению.

Книга предназначена для студентов, получающих образование по энергетическим направлениям в рамках бакалавриата. Предполагается, что она будет затем дифференцированно дополняться пособиями по решению типовых задач для различных специальностей и специализаций электроэнергетического и менеджерального направлений (для подготовки дипломированных инженеров, менеджеров).

Издание может быть также полезно специалистам, работающим в энергетической отрасли, магистрантам, аспирантам.

УДК : 621.311.019.3 (075.8)

ISBN 5-7782-0309-8

© В.Г. Китушин, 2003
© Новосибирский государственный
технический университет, 2003



ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая книга является переработанным вариантом ранее вышедшего учебного пособия^{*)}. Изменения, которые произошли в нашей жизни, потребовали коренного пересмотра как структуры, так и содержания упомянутого пособия. Среди этих изменений особенно следует отметить три фактора.

Первый. Существенно изменилась и продолжает меняться организация энергетики, прежде всего в связи с ее приватизацией, дроблением на многие самостоятельно хозяйствующие предприятия, появлением рынка ресурсов, энергии. Надежность – достаточно сложная категория – отражает помимо физико-технических процессов и явлений в оборудовании систем энергетики также и ее организационно-экономические характеристики (восстановление после отказа, качество ремонтного обслуживания и т.д.). Много-субъектность предполагает установление совершенно новых договорных отношений, в том числе и по условию надежности между хозяйствующими организациями, что требует совершенно иной постановки многих задач надежности как критериально, так и по содержанию.

Второй. Существенно изменяются задачи и система обучения в вузе. Сегодня специалисты подготавливаются не для определенных (запланированные, как раньше, Госпланом) мест на производстве, в проектных и научно-исследовательских институтах и т.д., а в экономику страны вообще. Поэтому, где будет работать выпускник вуза, как правило, неизвестно. В этих условиях узкая специализация оправдана только при наличии заказа промышленности на определенные рабочие места. В целом же, востребовано широкое

^{*)} Китушин В.Г. Надежность энергетических систем: Учебное пособие для электроэнергетических спец вузов. – М.: Высшая школа, 1984. – 256 с., ил.

образование, при котором молодой специалист легче сможет адаптироваться на рынке труда, а при необходимости получить более конкретную специализацию. Именно на это ориентирован переход к двухступенчатому высшему образованию: сначала бакалавриат, как высшее образование по широкому направлению знаний, а потом при необходимости – специализация.

Наконец, **третий** фактор. За прошедший период надежность как наука развивалась. Шло дальнейшее осмысление ее как комплексного свойства и его структуризация, количественное описание. Появилось много новых постановок задач и их решений и т.д. Все это настоятельно требует нового подхода к организации учебного процесса и подаче материала дисциплины.

В настоящей книге предлагается один из возможных подходов, который, прежде всего, учитывает отмеченные три фактора. Структурно этот подход соответствует двухступенчатой системе высшего образования. Материал дисциплины «Надежность энергетических систем» разбивается на две части: первая – «Теоретические основы» – преподается на первой ступени обучения (бакалавриате) как базовый, фундаментальный курс, общий для всех специальностей энергетики. Вторая часть рассматривает модели и методы их решения для типовых задач дифференцированно по различным специальностям и специализациям. Эта часть преподается на второй ступени – инженерной, когда обучающийся уже выбрал специальность и специализацию, место будущей работы.

В соответствии с изложенным предполагается, что полное издание учебного пособия должно содержать две части:

Часть I. Теоретические основы.

Часть II. Задачи, модели, методы. Эта часть будет включать в себя несколько томов, а именно:

Том 1. Генерирующие компании.

Том 2. Электрические сети.

Том 3. Энергосбытовые предприятия.

Том 4. Системный оператор.

Внутри каждого тома (сферы деятельности) также могут быть выделены разделы. Например, том 2 «Электрические сети» подразделится на системообразующие и распределительные.

Имеющиеся сегодня издания по надежности как монографии [1 – 3 и др.], достаточно пригодные для использования в учебных целях, так и учебные пособия [5 – 14 и др.] – все носят специализированный характер, решают задачи по различным специальностям и специализациям. При определенном переосмыслении задач в новых

условиях работы энергетики эти издания, а также другие [15 – 19 и др.], могут быть использованы на втором этапе обучения.

К общетеоретическому изданию следует отнести монографию [20], но она имеет в большей степени математический, а не инженерный уклон.

В предлагаемой книге дана только первая часть, тома второй части – предмет последующих этапов издания. Структурно каждая глава заканчивается перечнем вопросов, которые могут оказаться полезными для самопроверки усвоения материала. В конце параграфа предлагается ряд задач, решение части из которых приводится тут же.

В приложении приводятся статистические данные по показателям надежности энергетического оборудования, которые используются в упомянутых выше задачах и которые могут быть более широко использованы в учебных целях (расчетно-графические, курсовые, дипломные работы), а также при отсутствии более реальных данных при решении практических задач. Здесь же в приложении приведена информация по оценке удельных ущербов различных потребителей электроэнергии, а также даны материалы справочного характера по теории вероятности и математической статистике.

Изложение построено таким образом, что позволяет изучать дисциплину как по сокращенной, так и по более углубленной программе. Во втором случае следует обращаться к материалу, напечатанному более мелким шрифтом.

Эта книга, как это обычно бывает, не является исключением и стала возможной в результате усилий многих людей, которым автор выражает свою признательность. Большой труд взял на себя д-р техн. наук, проф. А.И. Шалин, прочитавший рукопись и сделавший много ценных замечаний, которые автор с благодарностью принял.

Хочется выразить признательность преподавательскому коллективу факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета во главе с его деканом профессором Ю.М. Сидоркиным, и прежде всего канд. техн. наук, доц. Н.И. Емельянову, д-р техн. наук, проф. К.П. Кадомской, д-р техн. наук, проф. Г.В. Ноздренко, в обсуждениях с которыми по отдельным вопросам часто «рождалась истина».

Наконец, автор приносит свою благодарность учебно-образовательному центру «Энергетика Сибири» за оказанную ему спонсорскую помощь в технической подготовке рукописи.



ВВЕДЕНИЕ

В практической деятельности специалисту-энергетику приходится постоянно принимать различные решения: выбирать проектный вариант системы или ее части, назначать режимы в функционирующей системе и т.д. В сложных современных системах на выбор решений влияет большое количество факторов. Одни из них поддаются количественному анализу, расчету, в результате чего появляется возможность сузить область вариантов решения; другие не имеют по тем или иным причинам достаточной теоретической ясности для количественного описания. Это создает неопределенность в выборе решений. Тем не менее, специалисты вынуждены их принимать, дополняя практический опыт, интуицию и качественный анализ задачи. 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 принятии которого не требовали бы знания по надежности. Возможные последствия от ненадежности становятся такими существенными, что требуется постоянно совершенствовать методы проектирования, строительства и эксплуатации электроэнергетических систем (ЭЭС), позволяющие полнее учитывать надежность и наиболее экономно расходовать выделяемые на ее обеспечение средства.

Существующие тенденции в развитии энергетики приводят к созданию крупных энергообъединений, обладающих сложной структурой, но позволяющих получить значительные экономические преимущества. Формирование таких энергообъединений, обеспече-

ние работоспособности и выявление всех возможностей представляют собой сложную задачу, решить которую может помочь общая комплексная наука – теория больших систем энергетики. Одним из разделов ее является наука о надежности электроэнергетических систем.

Что же понимается под надежностью энергоснабжения и чем она обуславливается? Не давая пока строгого определения надежности (более подробно см. гл. 1), заметим, что снабжение всех потребителей энергией в нужном количестве и при надлежащем ее качестве не всегда обеспечивается. Ряд случайных, непредвиденных причин может либо прекратить подачу энергии, либо недопустимо снизить ее качество у части или даже у всех потребителей энергосистем. Этими случайными причинами могут быть отказы или аварии в системах. Нарушение энергоснабжения возможно также из-за перебоев в топливоснабжающей системе, нерегулярного поступления топлива, гидроресурсов и т.п.

Проблема надежности всегда занимала центральное место как при эксплуатации, так и при проектировании систем. Известны различные средства, с помощью которых повышается надежность, т.е. ликвидируется авария или предотвращается ее развитие. Так, например, в электроэнергетических системах это – релейная защита от коротких замыканий; автоматическое повторное включение (АПВ); автоматический ввод резерва (АВР); автоматическое регулирование возбуждения (АРВ), способствующее ликвидации таких системных аварий, как лавина напряжения; автоматическая частотная разгрузка (АЧР), предотвращающая аварии с лавиной частоты; автоматическое регулирование частоты и мощности (АРЧМ); автоматическая синхронизация генераторов; автоматическое отключение генераторов на ГЭС и т.д. Хорошо известны и широко применяются специальные схемные, режимные мероприятия, направленные на повышение надежности (неполнофазные режимы, плавка гололеда на проводах воздушных линий и т.п.). Наряду с перечисленными относительно недорогими средствами и мероприятиями повышения надежности электроснабжения в последнее время все большее значение приобретают и такие дорогостоящие мероприятия, как резервирование генерирующей мощности, увеличение пропускной способности линии электропередач (ЛЭП), трансформаторов подстанций и т.п. Объясняется это следующим.

Значительное увеличение объема потребления электроэнергии тесно связано с качественными изменениями потребителей. Последнее обусловлено вводом новых технологий, дальнейшим углублением электрификации производства, сельского хозяйства, быта, приводящей к росту электровооруженности и проникновением электроэнергии во все сферы деятельности. А это увеличивает зависимость нормального функционирования отдельных потребителей (даже районов страны) от надежности энергоснабжения. Зависимость становится настолько сильной, что нарушение энергоснабжения приводит к значительному материальному ущербу, в ряде случаев имеющему масштабы национального бедствия, свидетельством чему служат многочисленные аварии в ряде стран. Например, Нью-Йоркская авария в США привела к тому, что на территории с населением около 30 млн человек более чем на 10 часов практически была приостановлена жизнедеятельность. Ущерб от этой аварии, по осторожным подсчетам, превышал 100 млн долл. Последовавшие после нее еще несколько десятков подобных аварий по стране завершились аварией в Нью-Йорке с еще более тяжелыми последствиями. В течение 25 часов была парализована жизнь одного из крупнейших городов мира. Ущерб от нее составил более 1 млрд долл. К сожалению, счет подобных аварий до сих пор еще не остановлен.

Тенденция укрупнения всех элементов систем, увеличения их единичной мощности, повышения коэффициента использования может вызвать более ощутимые последствия при аварии каждого элемента. Образование крупных энергообъединений приводит к относительному возрастанию доли системных аварий, при которых единичный отказ влечет за собой цепочечное развитие аварии и охватывает энергообъединение (или значительную его часть). Существенно возрастают трудности управления большими системами, а свойство управляемости их становится одной из характеристик надежности. В настоящее время обеспечение надежности становится одной из острых проблем их функционирования и развития. Принятие решения о резервировании или дублировании энергоснабжения большого количества потребителей связано со значительными материальными затратами, которые должны быть надлежащим образом обоснованы. Однако если еще в недалеком прошлом принятие таких решений при проектировании и эксплуата-

ции ЭЭС зависело только от опыта и интуиции проектантов и эксплуатационного персонала, то теперь при возрастании масштабов энергетического строительства, усложнении энергосистем и увеличении взаимозависимости между отдельными их элементами нельзя руководствоваться лишь субъективными взглядами и такими критериями, как «вероятно» или «маловероятно». Возникла потребность в количественной характеристике аварийных ситуаций и их последствий. Для получения таких характеристик требовалась теория, позволяющая прогнозировать и рассчитывать поведение систем при определенных условиях в будущем. Такой теорией явилась теория надежности.

Создание основ теории надежности связано с техническим прогрессом, который наблюдался в конце 40-х – начале 50-х годов прошедшего столетия, когда недостаточная надежность стала препятствием на пути реализации новых идей в авиации, ракетостроении, радиотехнике и т.д. Применительно к ЭЭС основные идеи и принципы расчетов надежности были высказаны еще в 30-х, а затем в конце 40-х годов. Теория надежности энергосистем, включая основные идеи общей теории надежности и являясь ее развитием применительно к ЭЭС, имеет ряд специфических особенностей. При этом она опирается практически на все дисциплины, предназначенные для изучения энергетической системы, и в первую очередь на такие, как «производство, передача, распределение и использование энергии», «экономика и менеджмент в энергетике» и другие, широко используя результаты решения их основных задач. При этом, если все технологические и другие дисциплины в итоге решают задачу определения условий работоспособности систем энергетики, то в дисциплине «надежность» ставится задача получения ответа о «безусловной» работоспособности систем.

Организационное реформирование энергетики, которое происходит сейчас во многих странах мира и в нашей стране, также острит и конкретизирует многие проблемы надежности. Вопросы надежности сейчас становятся предметом особого внимания во всех договорах и все чаще предметом обращения в судебные инстанции. Это, несомненно, повышает требования к образованности современного специалиста в области надежности, ее количественного измерения и экономической оценки.

В итоге можно констатировать, что надежность – одно из главных целевых свойств (наряду с экономичностью, экологичностью), на обеспечение которых направлены все усилия инженерно-управленческого интеллекта практически в любой сфере деятельности, что и делает знания в области надежности базовыми в образовании специалиста.

Задача настоящего пособия – дать ответ на основе современных достижений науки, техники и организации энергетики на три главных вопроса:

- 1) Что такое надежность вообще и в энергетике в частности?
- 2) Что такое надежное энергоснабжение (критерии рациональной надежности)?
- 3) Как можно обеспечивать надежное энергоснабжение?

Именно в такой последовательности излагается материал книги, дающий ответы на эти вопросы (на первый – главы 1 – 3, на второй – глава 4, на третий – глава 5).



ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Термин «надежность» (Reliability) отражает сегодня очень объемное понятие, широко используемое в науке, технике, быту, искусстве, медицине и т.д. Во всех сферах деятельности накоплены определенные знания, опыт в области надежности. Более того, имеются наработки по обобщению этих знаний, которые позволяют делать суждения, справедливые по отношению не только к конкретным, но и к достаточно абстрактным объектам, системам. Поэтому надежность энергетических систем можно либо изучать прямо на конкретных объектах, на конкретном проявлении ее в энергетике, либо начинать с общих, некоторых абстрактных объектов, а затем прикладывать эти общие знания к энергетике. Представляется, что второй путь более эффективен, поскольку позволяет использовать уже накопленные знания, полученные путем абстрагирования их в других системах. Поэтому изложение материала в книге будет начинаться с общих знаний (общей теории надежности), а затем конкретизироваться применительно к энергетическим системам.

Само понятие «надежность» обслуживается большим полем других понятий, или находится в тесной связи с ними, а понимание его сути прошло достаточно большой путь своего развития: от интуитивного и мало определенного, через отождествление надежности и отказа, надежности и вероятности безотказной работы до современного понимания надежности как сложного свойства. Прежде всего «надежность» связана с целенаправленным использованием человеком каких-либо объектов, искусственных или естественных, которые выполняют заданные функции, и, следовательно, связана с определенными процессами.

Поэтому ряд понятий, описывающих процессы, события в объектах, необходим для понимания надежности. Кроме этого, большинство современных наук, особенно инженерных, опирается на системный подход в той или иной его модификации.

Все это предопределило необходимость рассмотрения понятийных полей системного подхода, используемого в данной книге, и процессов в объектах до обращения к самому понятию «надежность».

§ 1.1. ПОНЯТИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Основным здесь является понятие «система». Система (system) – это способ мышления, при котором выделенный субъектом из окружающего мира объект представляется как совокупность:

а) либо связанных между собой его частей – элементов, образующих некоторую целостность (система I);

б) либо процессов и взаимодействующего с ними материала объекта (система II).

Другими словами, выделенный объект в первом варианте (а) мысленно разделяется на части, которые изучаются в их взаимосвязи, а затем снова объединяются в целое, что и обеспечивает движение от незнания к знанию о свойствах объекта. Естественно, что деление объекта на части многовариантно, что и отражает многообразие свойств объекта, и определяется целями (задачами) рассмотрения, изучения объекта.

Во втором варианте (б) объект подразделяется на процессы и материал. Изучаются процессы, которые структурируются, а затем накладываются на материал. Структуры как бы отпечатываются на материале, формируют его. В итоге материал превращается в определенную организованность. Здесь процесс является первой, исходной категорией системы, первым слоем системного представления объекта. В этом слое процесс предстает независимо от материала, на котором он может реализовываться.

Процессы и процессуальная система должны быть отделены от материала, чтобы можно было выявить и фиксировать законы и механизмы этих процессов. Но если процессы уже отделены от материала и противопоставлены ему, то чтобы получить достаточно полное описание объекта, нужно опять собрать, соединить их вместе, наложить процессы на материал. После выполнения этой системной процедуры мы обладаем уже новыми знаниями об объекте.

Понимание системы еще зависит от занимаемой позиции субъекта – исследователя или конструктора. С позиции первого система – совокупность элементов, связи и структура организации которых обуславливает свойства системы. С позиции второго (конструктора) система – совокупность элементов и связей между ними, предназначенная для выполнения заданных функций и достижения поставленных целей. Последние определения были сделаны при трактовке объекта как системы I. Аналогично можно дать определения при представлении объекта как системы II.

Объект (object) – некоторая целостность, отделенная от всего остального, воспринимаемого наблюдателем. Из этого следует, что объект зависит от субъекта в том смысле, что каждый субъект может провести границу объекта, отделяя его от всего остального по-своему, отличным способом от других субъектов, хотя все они

могут называть эти объекты одинаковыми именами. Часто этот факт становится источником бесполезных споров, когда обсуждаются свойства какого-то называемого одинаковым именем объекта, а по существу каждый из спорящих имеет в виду свой объект, отличающийся от объектов других.

Среда (sphere) – все наблюдаемое, находящееся вне объекта, или совокупность всех систем, кроме системы, представляющей рассматриваемый объект; или система, объемлющая рассматриваемую.

Элемент (element) – неделимая при данном рассмотрении объекта часть системы, взаимосвязанная с другими частями объекта и среды. В других задачах элемент может, в свою очередь, рассматриваться как система.

Связь (tie) – сложное понятие, в общем случае отражает присущее материи коренное качество, заключающееся в том, что все предметы, явления объективной действительности находятся в бесконечно многообразной зависимости и в многообразных отношениях друг к другу.

Применительно к более конкретным задачам под связью будем понимать некоторый канал между элементами, объектами, по которому передаются вещество, энергия, информация в любом необходимом их сочетании.

Отношение (relation) – не менее сложное понятие, чем связь. В нашем контексте характеризует некоторую потенциальную возможность между объектами, субъектами. Наличие отношения является необходимым (но недостаточным) условием появления связи. Например, потенциал одного полюса электрогенератора больше (выше) потенциала другого его полюса (здесь «больше», «выше» характеризуют отношение между полюсами). Если же соединить эти два полюса проводом, то по нему потечет ток (энергия) – будет образована связь. Или, например, брат и сестра находятся в родственных отношениях, но могут не иметь каких-либо связей (не обмениваться письмами, телефонными звонками – информацией, не посылать друг другу подарки – вещество и т.д.).

Структура (structure) – схема связей элементов в системе, схема, способ представления процессов объекта. Иногда ошибочно или по незнанию отождествляют понятие «структура» с понятием «система» или даже с понятием «объект».

Вход (input) – изменение среды, которому как следствие может быть поставлено в соответствие некоторое изменение состояния (поведения) объекта.

Выход (output) – изменение среды, которому может быть поставлено в соответствие как причина некоторое изменение состояния (поведения) объекта.

«Вход» и «выход», отражающие взаимосвязанность изменений в объекте и среде, в рамках системного подхода реализуются соответственно через «входные» и «выходные» связи.

Как видно, разделение внешних связей объекта со средой на входные и выходные осуществляется по признаку причинности. При этом круг замыкается: изменения в среде происходят из-за изменения объекта через выходную связь объекта со средой, а изменения в объекте – из-за изменения в среде через входную связь объекта.

Для размыкания в определенном смысле этого круга подразделим поведение объекта (а в общем случае и среды) на активное и пассивное.

При этом под **активным поведением объекта** будем понимать такое изменение состояния, которому не может быть на некотором интервале времени поставлен в соответствие предшествующий вход, истолковываемый как причина рассматриваемого состояния. **Пассивное поведение объекта** – такое его поведение, которое не может быть истолковано как активное.

Заметим, что одно и то же поведение объекта может быть идентифицировано и как активное и как пассивное в зависимости от длительности предшествующего интервала времени, а также один и тот же объект может иметь активное поведение на одном интервале времени и пассивное – на другом.

Свойство (property) – сторона предмета, обуславливающая его различие или сходство с другими предметами и проявляющаяся во взаимодействии с ними.

Функция (function) – прежде всего представляет собой реализованное, использованное свойство объекта в среде, элемента – во взаимодействии с другими элементами системы и средой. Например, построенная линия электропередачи обладает **свойством** передавать электроэнергию, но только будучи подключенной к действующей электрической сети, она выполняет **функцию** передачи энергии.

Функция представляет собой выходное воздействие объекта на среду в зависимости от входного воздействия на объект. Зависимость выхода объекта Y от входа объекта X называют функциональным описанием объекта $Y = Y(X)$. Очевидно, что такое описание может быть только у пассивного объекта. Если у объекта появилась функция, значит, он был использован или специально создан с какой-то целью.

Цель (goal) – то, что представляется в сознании и ожидается в результате определенным способом направленных действий.

Другими словами, цель – это образ, модель желаемого и достижимого состояния, к которому объект намерен двигаться. Из этого определения следует, что цель существует только у человека (имеющего сознание). При этом возникает другой вопрос – «желаемого и достижимого состояния» чего или кого. Строго говоря, конечно, имеется в виду состояние человека, даже если для этого достаточно, чтобы какой-то объект принял определенное состояние. Достижение этого состояния объекта является не целью, а лишь задачей, решение которой обеспечивает желаемое состояние человека.

Замещение цели задачами может приводить к серьезным ошибкам. Например, часто приходится встречать выражение «цель предприятия». Под таким термином могут скрываться и цели собственника, акционеров предприятия, и цели топ-менеджмента предприятия, и цели отдельных работников предприятия и т.д.

В определении цели имеется выражение «в результате определенным образом направленных действий». Это означает, что продуманы и отобраны средства, используя которые, субъект достигнет к этой цели. При этом движении к ней ему приходится решать и он решает необходимые задачи.

Задача (task) – необходимость получения из исходного материала результата при заданном наборе доступных к использованию средств.

Человек, двигаясь к цели, ставит и решает определенные задачи. Если же на этом пути обнаруживается, что какие-либо задачи не решаются из-за недостатка средств, то возникает проблема.

Проблема, проблемная ситуация (problem) – задача, для решения которой недостает необходимых средств. Если выявляется, каких не хватает средств для решения задачи, то проблема переходит в разряд **сформулированной проблемы**.

Из сказанного следует, что суть сформулированной проблемы существенно зависит от того, как она ставится, может появиться или не появиться.

Процесс согласования желания с выбором необходимых для его осуществления средств называют **целеполаганием**. С другой стороны, в процессе согласования может оказаться дефицит средств для достижения желаемого, что потребует корректировки желания или поиска новых средств. Этот процесс называют **проблематизацией**. Вся эта процедура показана на рис. 1.1.

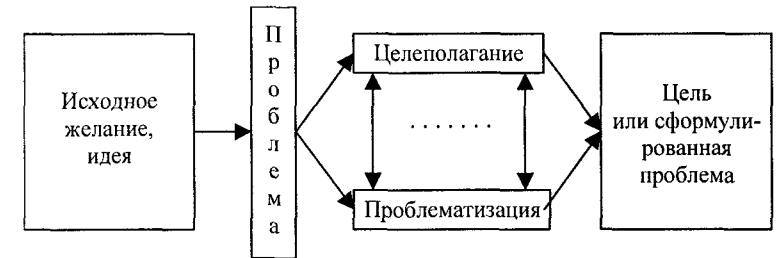


Рис. 1.1

Теперь вернемся к объектам с активным поведением, которое, в свою очередь, можно классифицировать следующим образом: целенаправленное и нецеленаправленное.

Целенаправленное поведение – такое, при котором наблюдатель допускает истолкование действия или поведение объекта как направленное на достижение некоторой цели, целевого состояния, т.е. конечного состояния объекта, когда он вступает в определенную связь в пространстве или во времени с другими объектами.

Нецеленаправленное (или случайное) поведение – поведение объекта, которое нельзя истолковывать как целенаправленное. При этом, конечно, надо иметь в виду относительность последних понятий: один наблюдатель может истолковать поведение объекта как целенаправленное, другой может этого не усмотреть. У объекта с целенаправленным поведением выход определяется не только входом, как у пассивного объекта, но также и целью субъекта.

Таким образом, объект с целенаправленным поведением предполагает наличие в нем субъекта с целью Π (рис. 1.2,а) и $Y = Y(X, \Pi)$. Следовательно, здесь субъект осуществляет такое воздействие на среду Y , которое обеспечивает вход X , необходимый для достижения объектом целевого состояния.

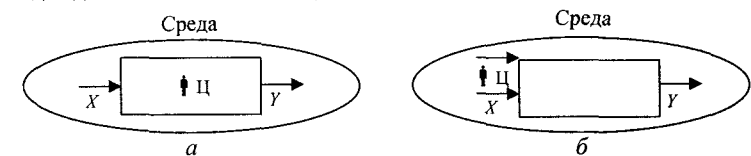


Рис. 1.2

Если субъекта вывести за границу объекта (сделать последний пассивным), то схематично это можно представить так, как показано на рис. 1.2,б. Такой объект становится средством достижения цели.

После введения перечисленных выше понятий можно подойти к рассмотрению самого «системного подхода».

Системный подход (system approach) – средство организации мышления, которое исходит из того, что:

- мир системен;
- любой выделяемый объект является, с одной стороны, элементом этой системы, а с другой – сам может быть представлен как система; поэтому дальнейшее рассмотрение должно идти по двум направлениям – внешнему и внутреннему;
- объект, рассматриваемый во внешней среде, связан с ней, и через эти связи проявляются его свойства или выполняются определенные функции;

- объект, рассматриваемый изнутри, представляется системой, которая обуславливает его свойства или определяет выполняемые функции;
 - при создании объекта (проектировании, конструировании его) ставится цель (задача), определяются функции, которые должен выполнять создаваемый объект для достижения поставленной цели и строится модель этого объекта в виде системы, обеспечивающей выполнение этих функций;
 - при исследовании заданного объекта строится его модель в виде системы, которая позволяет определить свойства объекта и понять его сущность.
- Схематично обе последние процедуры можно представить так, как это показано на рис. 1.3.

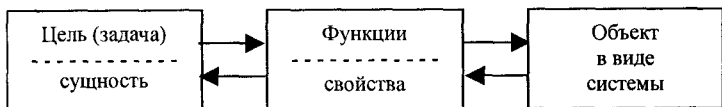


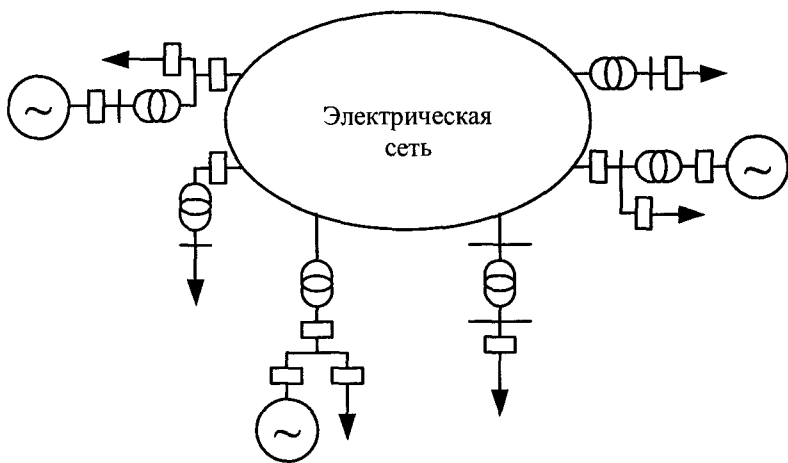
Рис 1.3

ЗАДАЧИ ПО ТЕМЕ ПАРАГРАФА

1. Представить объект – энергетическое предприятие как систему.

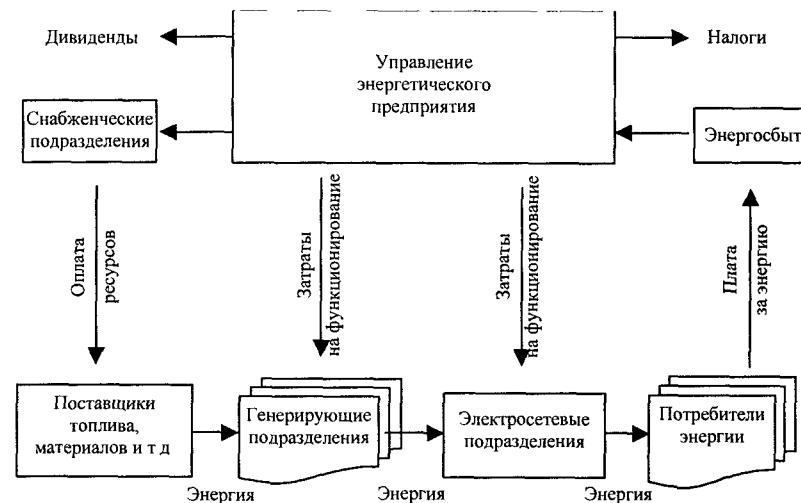
Решение

а) Следует ожидать, что диспетчер (оператор) представит этот объект так, как показано на диспетчерском щите, – мнемосхемой, где будут обозначены электрические генераторы, схема электрических сетей с выделением тех шин, на которых он контролирует напряжение, тех выключателей, которыми он может оперировать, узлов нагрузок и т.п. В итоге схема системы будет иметь вид, подобный показанному на рисунке.



Вход системы – мощность и энергия, вырабатываемая генераторами, выход – мощность, энергия, качество напряжения, поставляемые потребителям.

б) Финансист, скорее всего, представит энергетическое предприятие совокупностью потоков продукции (энергии) и финансов, например, следующим образом:



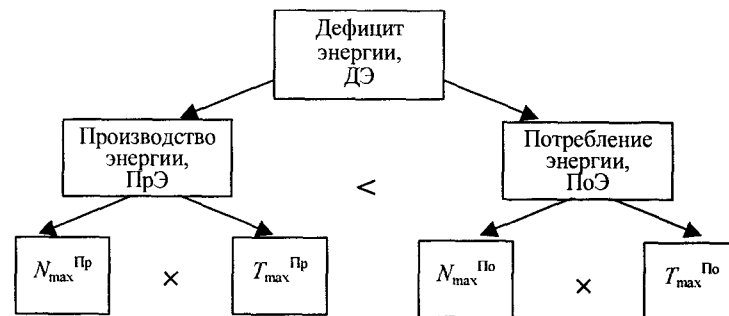
Здесь вход системы – финансы, поступающие от потребителей энергии, а выход – дивиденды, налоги.

в) Другие позиционеры представят предприятия иным образом. Например, бухгалтер, видимо, выделит в первую очередь состав, структуру различных фондов предприятия и т.п.

2. Представить дефицит энергии энергетического предприятия как систему.

Решение

Прежде всего дефицит энергии как систему можно представить в виде отношения между двумя элементами: производством энергии ПрЭ и ее потреблением ПоЭ (находящихся в отношении неравенства), т.е. в следующем виде:



ПрЭ (ПоЭ) можно, в свою очередь, представить как произведение максимально используемой мощности N_{\max} на число часов использования максимума T_{\max}

$$\text{ПрЭ} = N_{\max} T_{\max}$$

и т.д.

Такое двухуровневое системное представление дефицита уже позволяет увидеть пути решения проблемы (ликвидации дефицита), например, за счет увеличения числа часов использования максимума мощности.

3. Представить студенческую группу как систему (с позиций: а) исследователя; б) конструктора).

4. Представить молодую семью как систему (с позиций: а) исследователя; б) конструктора).

5. Представить энергетическую отрасль сегодня (период реформирования) как систему II, т.е. выделить главный процесс, протекающий сейчас в энергетической отрасли, структурировать его и наложить на материал.

6. Описать объекты (выделить и очертить границы): энергетическая компания, электрическая станция, генерирующая компания, электрическая сеть, предприятие электрической сети, энергосбытовая фирма. Сравнить полученное описание с аналогичным описанием других студентов, специалистов.

7. Описать возможные варианты отношений между элементами системы, рассмотренной в задаче 1.

8. Привести примеры объектов с активным целенаправленным поведением.

§ 1.2. ПРОЦЕССЫ В ОБЪЕКТАХ

С позиции надежности наиболее существенными процессами являются: функционирование и целенаправленное изменение объекта, взаимодействие со средой, старение (деградация материала), восстановительные и ремонтные воздействия.

В результате наложения этих процессов друг на друга, их взаимодействия возникают определенные события и объект принимает различные состояния, существенно влияющие на использование его человеком, т.е. на выполняемые им функции. Таковыми являются, прежде всего, события: «отказ» (failure) и «восстановление» (renewal) – и состояния: «работоспособные» (operable states) и «неработоспособные» (non-operable states).

РАБОТОСПОСОБНЫЕ И НЕРАБОТОСПОСОБНЫЕ СОСТОЯНИЯ

Состояние любого объекта можно описать набором, множеством параметров $x = \{x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n\}$, которые могут принимать определенные значения и изменяться во времени – $x_i(t)$. Например, размер, вес, напряжение генератора, давление в котле, расход топлива турбогенератора, его экономичность, амортизированная вели-

чина стоимости оборудования и т.п. Надлежащее выполнение объектом своих функций возможно, при условии, что все описывающие его параметры принимают значения, находящиеся в определенной области. На рис. 1.4 в качестве примера показана область допустимых значений для двумерного случая. В общем случае эта область многомерная, а ее граница, которая может еще изменяться во времени, описывается уравнением

$$D_0(x, t) = 0. \quad (1.1)$$

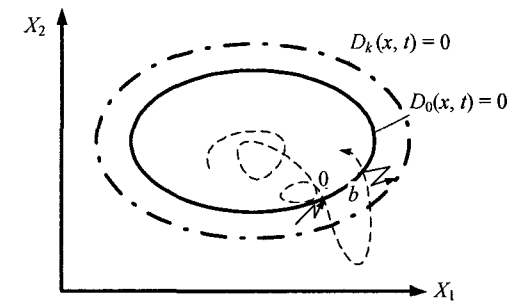


Рис. 1.4

Если значения параметров объекта лежат в этой области, т.е. обеспечивается возможность выполнения им своих функций, то говорят, что объект находится в **работоспособном состоянии**. Работоспособное состояние также обозначается как **работоспособность**. Если же значения параметров оказываются за границей допустимой области, то говорят, что объект находится в **неработоспособном состоянии**. На рис. 1.5 показано изменение во времени одного из главных параметров электрического генератора – напряжения. Здесь же показана область допустимых значений этого параметра. Как видно, до момента t_0 , значение напряжения было в допустимой области. Генератор находился в работоспособном состоянии (конечно, если и другие существенные параметры имели допустимые значения). После момента t_0 значение напряжения вышло за границу допустимых значений и генератор оказался в **неработоспособном состоянии**.

Такое деление множества возможных значений параметров объекта на два подмножества является не единственным. В некоторых случаях это множество разделяется на несколько подмножеств, каждое из которых D_k , характеризует **частично работоспособное состояние** (partial operable state) с определенной степенью работо-

способности или каким-то качеством. Другими словами, объект может выполнять свои функции не полностью, а частично. Так, например, на рис. 1.5 штрихпунктиром показана граница допустимой работы генератора, но с пониженным качеством (обычно на ограниченном интервале времени). При снижении напряжения ниже этой границы происходит полное его отключение.

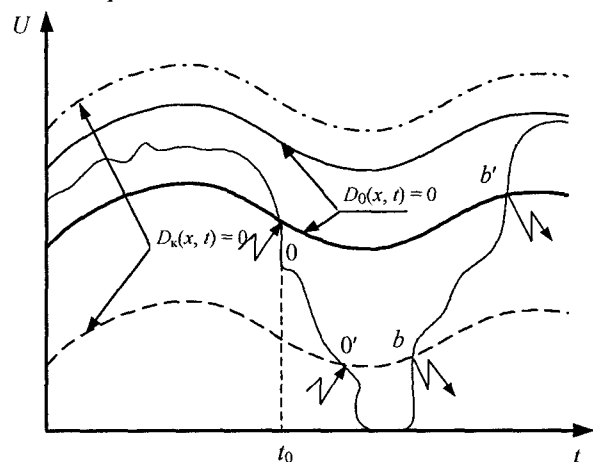


Рис. 1.5

Находясь в работоспособном состоянии, объект может выполнять свои функции, т.е. находиться в **рабочем состоянии** (on-line state). Если же он, находясь в работоспособном состоянии, не выполняет по тем или иным причинам заданные функции, то говорят, что объект в **нерабочем состоянии** (off-line state).

Рабочее состояние объекта также может быть **полным и частичным**. Полное – выполняются все заданные функции в заданном объеме, частичное – часть функций выполняется в полном или частичном объеме, или выполняются все функции, но при этом хотя бы одна из них в частичном объеме.

В зависимости от того, какого вида функции выполняет работоспособный объект, различают еще **резервное состояние** (redundant state), которое, в свою очередь, подразделяют на **состояние нагруженного резерва** (или еще говорят состояние включенного резерва – on-line parallel redundant state) и **состояние ненагруженного резерва**, или состояние невключенного резерва (standby redundant state).

На производственном жаргоне последние два состояния иногда обозначают как состояния в «горячем» и «холодном» резервах.

Неработоспособное состояние также может быть классифицировано на **состояние предупредительного ремонта** (preventive maintenance state) – состояние, когда ведутся работы по выявлению, предупреждению и устранению его неисправностей, которые могут привести к отказу объекта; **состояние аварийного ремонта** (emergency maintenance state) – состояние, когда ведутся работы по восстановлению его работоспособности, нарушенной в результате отказа.

К неработоспособному состоянию следует отнести и так называемое **предельное состояние** (limit tolerance state), при котором дальнейшая эксплуатация объекта должна быть прекращена из-за неустраняемого нарушения требований безопасности, или неустраняемого ухода заданных параметров и характеристик за установленные пределы, или неустраняемого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой, или необходимости проведения капитальных ремонтов.

ОТКАЗ

Событие, заключавшееся в том, что объект перешел границу допустимой области значений его параметров из работоспособного состояния в неработоспособное, квалифицируют как **отказ**. Естественно, что при этом происходит утрата способности объекта выполнять свои функции. На рис. 1.4 и 1.5 показаны траектории изменения значений параметров объектов. В точках «о» происходит «выход» их значений из допустимой области – отказ.

Отказы также могут классифицироваться:

- на полные (complete failure) и частичные (partial failure) – по степени нарушения работоспособности;
- внезапные (catastrophic failure) и постепенные (degradation failure) – по скорости протекания процессов, изменения значений параметров;
- независимые (independent failure) и зависимые (dependent failure) – зависящие от отказов других объектов;
- устойчивые и сбои (самоустраняющиеся отказы, приводящие к кратковременному нарушению работоспособности).

У объектов, функционирующих не постоянно во времени, а по требованию, отказы могут быть следующих видов:

- отказ срабатывания на требование (missing operation);
- ложное срабатывание (mal operation), заключающееся в срабатывании объекта при отсутствии требований;

- излишнее срабатывание (*unnecessary operation*), заключающееся в срабатывании объекта при требовании срабатывания других элементов.

Примерами таких объектов могут служить различные системы релейной защиты, противоаварийной автоматики, в определенной мере – выключатели и т.п.

Представляется важным проанализировать причины отказов. Причины отказов могут быть внешними и внутренними. В общем случае это подразделение условно и зависит от того, где проведена граница объекта, что будет пояснено несколько ниже.

Отказы, обусловливаемые внешними причинами, в свою очередь, можно подразделить на две группы. Первую группу составляют ошибки, допущенные при конструировании, определении условий и режимов эксплуатации, изготовлении, монтаже или ремонтах оборудования. Эти ошибки, скрытые дефекты обычно проявляются в ранний период эксплуатации, вызывая отказы так называемого инфантильного, или «детского», периода. Обычно этот период называется периодом **приработки**. Для него в результате указанных ошибок, а также невозможности учета всех скрытых дефектов из-за их неопределенности (или недостаточности информации) характерен некоторый пик частоты отказов. Например, из практики известно, что такое оборудование, как трансформаторы осваиваемого нового класса напряжения, новые генераторные блоки и другое имеет в начальный период эксплуатации относительно высокую повреждаемость. Вторая группа причин вызвана износом и приводит к постепенному утрачиванию объектом ряда функциональных свойств. Этот процесс закономерен в том отношении, что с увеличением времени жизни, т.е. работы или даже хранения, опасность утраты этих свойств возрастает. Однако результат закономерных в указанном смысле постепенных изменений проявляется внезапно. Таким образом, процесс износа происходит под влиянием постоянно действующих факторов, имеющих и случайный, и детерминированный характер. Однако естественное завершение процесса износа имеет случайный характер. Этот период называется периодом **старения**.

К отказам с внутренними причинами могут быть также отнесены те, которые вызваны ошибочными или вынужденными действиями обслуживающего персонала, если он включен в состав рассматриваемого объекта, находится внутри его границы. В противном случае они будут отнесены к отказам с внешними причинами.

Но независимо от способа их отнесения последние также могут быть подразделены на две группы. Первую группу составляют причины, обусловленные невысокой квалификацией эксплуатационно-

го и ремонтного персонала, недостаточной их натренированностью. Вторую группу – обусловленные громоздкостью и сложностью устройств и схем, с которыми эксплуатационному персоналу приходится работать. Например, большое число разъединителей и выключателей и другой сложно связанной коммутационной аппаратуры на подстанциях повышает вероятность неправильных переключений, способных привести к ложным отключениям и включениям на короткозамкнутые цепи и т.п.

Причины отказов внешнего происхождения также можно подразделить на две группы. К первой отнесем воздействия, поступающие из среды, по своей силе превышающие те, на которые рассчитан объект, так называемые нерасчетные возмущения, и которые приводят к повреждению объекта. Это обычно редкие и плохо предсказуемые воздействия, как правило, физического характера, не связанные с периодом предшествующей работы. Эти внезапные по своей природе воздействия даже при отсутствии у объекта видимых ухудшений функциональных свойств приводят к отказам, которые обычно имеют мгновенный характер. В энергетике в качестве примера причин этой группы можно привести такие, как грозы, автомобильные катастрофы, падение деревьев или попадание животных на электроустановки, нерасчетные порывы ветра и т.д. Эта группа причин приводит к необратимым изменениям свойств объекта.

Ко второй причине можно отнести возмущения, приводящие к изменению значений режимных параметров объекта, в результате чего они выходят из допустимых границ. Однако самого повреждения объекта не происходит. Обычно после снятия такого возмущения значения параметров объекта входят в допустимые границы и он продолжает выполнять свои функции. Такие отказы иногда называют сбоями или неустойчивыми. Например, нерасчетный наброс электрической нагрузки на энергосистему, приводящий к снижению частоты ниже допустимой границы, или быстрое нарастание нагрузки даже в допустимых границах, но со скоростью, превышающей скорость набора нагрузки генерирующим оборудованием, или нарушение устойчивости параллельной работы генераторов системы и т.п.

Аналогичные ситуации возникают и в механических системах. Например, стержень, работающий на сжатие при определенной сжимающей нагрузке также теряет устойчивость (изгибается) и значения его параметров выходят за допустимые пределы, хотя повреждения самого стержня не происходит.

Таким образом, в результате внешних или внутренних воздействий определенный тип объектов может либо отказывать из-за фи-

зического повреждения их материала, либо терять устойчивость (отказывать) без повреждения.

По характеру причин отказов все они в итоге приводят, как правило, к случайности или неопределенности момента наступления отказа, за исключением тех случаев, когда из-за старения производят преднамеренное отключение объекта заранее, не дожидаясь его естественного отказа. Это происходит тогда, когда объект достигает так называемого **предельного состояния**.

Обычно отказы, связанные с достижением предельных состояний, являются постепенными, позволяющими заблаговременно предсказать момент перехода границы области допустимых значений параметров, что и снимает случайность в определении момента наступления этого вида отказа.

В итоге возможность наступления отказов объекта во многом зависит от условий, в которых он находится. С этих позиций сами условия также могут быть подразделены как минимум на два множества: обычные или **ординарные** и необычные или **неординарные, особые**.

В энергетике отказы еще подразделяются по степени потери работоспособности объекта и глубине негативных последствий: на аварии; отказы 1-й степени; отказы 2-й степени.

Так в инструкции по расследованию и учету аварий в работе электростанций к авариям энергоблоков отнесены повреждения его оборудования, требующие восстановительного ремонта в течение 7 суток и более или вызвавшие недоотпуск электроэнергии в размере 20 тыс кВт ч и более, а также пожары, приведшие к простоему основного оборудования на срок 2 суток и более. Кроме того, к авариям отнесены нарушения нормальной работы электростанций, вызвавшие снижение электрической нагрузки на 50 % и более от заданной диспетчерским графиком продолжительностью более 1 часа. К авариям относятся также события, связанные с пожарами, взрывами на энергетических котлах, сопровождающимися обрушениями строительных конструкций зданий котельного отделения, недопустимой деформацией несущих элементов каркаса, барабанов, главных паровых и питательных трубопроводов, повреждением ротора генератора, разрывом главного паропровода и др.

В электрических сетях отказы мощных трансформаторов, связанные со сложными внутренними повреждениями, требующие проведения ремонтных работ в большом объеме, а также полные разрушения трансформаторов мощностью 10000 кВА и более также квалифицируются как аварии.

Отказы 1-й степени – технологические, характеризуются вынужденными отключениями или ограничениями работоспособности оборудования, повреждением зданий и сооружений, приводящим к нарушению технологии и передачи энергии потребителям или в систему.

В электрических сетях отказы 1-й степени связаны с повреждениями трансформаторов, требующими восстановительного ремонта небольшого объема и в сроки менее 7 суток, а также с повреждениями трансформаторов мощностью от 16000 до 125000 кВА.

К отказам 2-й степени относятся те, которые не влияют на технологический процесс производства и передачи энергии, количество и качество отпускаемой энергии. Эта группа часто инициируется неправильными действиями системы защиты и автоматики, ошибками эксплуатационного персонала, а также рядом других причин. В электрических сетях – повреждения трансформаторов мощностью менее 16000 кВА, а также неисправности вспомогательного оборудования, требующие вывода трансформатора из работы и др.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ

После отказа в результате организуемых и протекающих в объекте процессов в общем случае может наступить событие, когда все значения параметров, характеризующие его состояние, снова окажутся в допустимой с позиции дальнейшего функционирования области. Говорят, произошло **восстановление**, которое возможно как за счет определенных управляющих воздействий, так и за счет выполнения ремонтов поврежденного оборудования. Если восстановление объекта по тем или иным причинам не происходит, то говорят, что объект **невосстанавливаем**.

Восстановление также может быть **полным** и **частичным**. На рис. 1.4 и 1.5 события «восстановление» показаны в точках «в», как ввод значений параметров объекта в допустимую область.

ПОТОКИ ОТКАЗОВ И ВОССТАНОВЛЕНИЙ

В итоге функционирование восстанавливаемого объекта может быть представлено потоком отказов и восстановлений (рис. 1.6). При этом поток может быть разложен на потоки полных отказов, частичных (с разной степенью работоспособности), на потоки с полным или частичным восстановлением и т.п.

Степень работоспособности



Рис 1.6

Из этого общего потока можно выделить также только поток отказов, исключив при этом на оси времени все интервалы восстановлений (или неработоспособного состояния). Тогда на этой оси будет откладываться чистое время работоспособного состояния объекта за данное время t , которое называют **наработкой** $t_n(t)$ (operation time).

Аналогично можно из общего потока выделить только поток восстановлений.

В итоге поле понятий, описывающих надежность процессы в объекте, может быть структурировано так, как это показано на рис. 1.7.

Обычно возникает вопрос, в каких координатах следует строить зависимость (1.1) и графики областей допустимых значений параметров объекта (см. рис. 1.4). Строго – во «входных» x (на рис. 1.4 – x_1) и «выходных» y (на рис. 1.4 – x_2) параметрах объекта. В качестве выходных могут фигурировать и различные диагностируемые параметры системы. Практически эти области отражают допустимые отклонения значений входных параметров объекта при заданных и допустимых отклонениях значений выходных параметров.

Иногда область описывается только выходными параметрами объекта, как, например, это показано на рис. 1.5. Строго говоря, если мы определяем работоспособность энергосистемы, то причиной выхода напряжения и частоты за допустимые пределы отклонения может быть много факторов, относящихся к входным, например, прекращение подачи топлива на электростанции. Здесь энергосистема работоспособна, неработоспособной оказалась система топливообеспечения энергосистемы.

Такая трактовка вполне закономерна, если подходить к энергосистеме с чисто технических позиций. Но если подойти к ней и как к хозяйственной системе, включая и ее менеджмент, т.е. как к социотехнической системе, то, очевидно, недостачка топлива на электростанции энергосистемы будет «отказом» ее менеджмента. Но тогда, строго говоря, эта область должна строиться не только в выходных параметрах, но в параметрах договора с «пользователями» объекта, например, в параметрах, оговоренных в договорах с потребителями энергии энергосистемы.

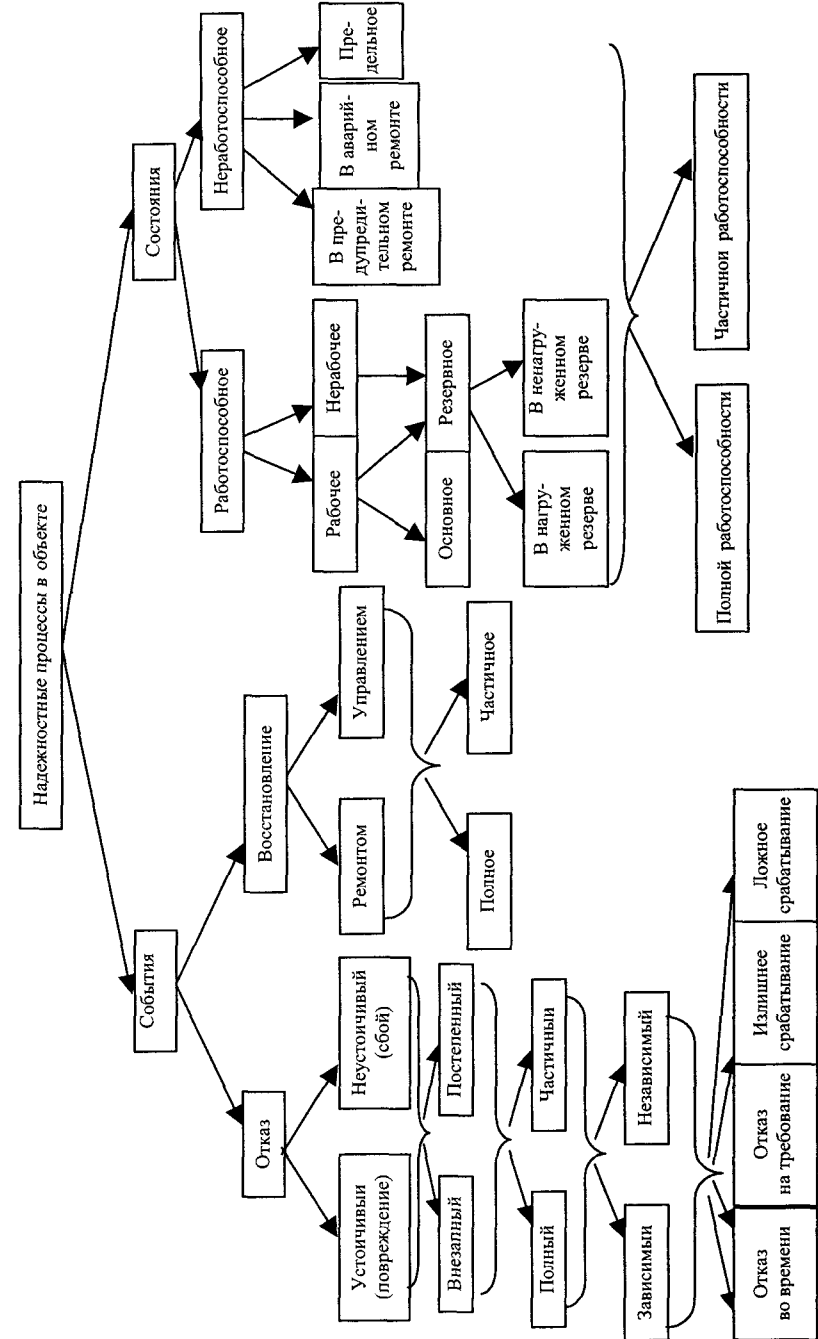
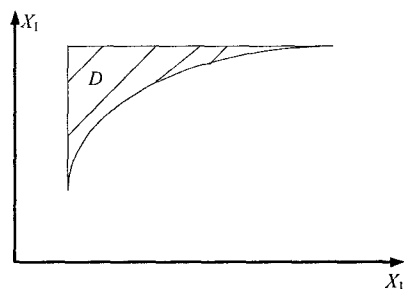


Рис 1.7

ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ ПАРАГРАФА

1. Построить область D для выявления условий получения на экзамене отличной оценки.

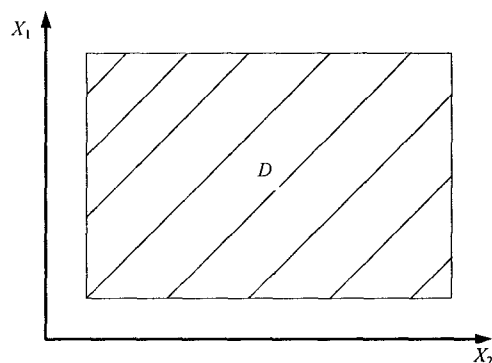
По мнению студентов, эта область должна быть построена как минимум в двух параметрах: x_1 – объем знаний и умений студента и x_2 – количество отличников в группе (потоке) (см. рисунок).



2. Построить область D для выявления условий боеспособности оружия (осечки и т.п.).

Решение

Практика показывает, что боеспособность оружия зависит от эксплуатационного состояния механизмов его x_1 (количество смазки и т.д.) и состояния боеприпасов x_2 (условия хранения – влажность и т.п.) Графически это можно отобразить следующим образом:



Прямоугольная область указывает на независимость факторов между собой.

3. Обычный работающий электрочайник заменили на электрочайник быстрого нагревания. Связано это как-то с надежностью?

Ответ. Да. Обычный электрочайник перешел в **предельное состояние**, когда его скоростные параметры, а возможно и эстетические, оказались неудовлетворительными.

4. Пассажир в аэропорту проходит контроль через металлоискатель, который срабатывает на металлическую булавку галстука. Является ли это событие отказом системы контроля?

Ответ. Да, система контроля отказала – произошло излишнее срабатывание. Если же рассматривать только металлоискатель, то здесь не так все однозначно. Возможно, его техническое совершенство (чувствительность) не позволяет исключать срабатывание на такие элементы, как булавка для галстука.

5. Обычный черно-белый телевизор был вытеснен цветным. Относится ли это событие к надежности?

Ответ. Да, черно-белый телевизор попал в **предельное состояние** по набору характеристик его качества

6. Одна транспортная фирма осуществила перевозки за три дня. Другая – аналогичный груз на то же расстояние перевезла за 5 дней. Характеризуют ли эти события надежность фирм?

Ответ. Если в договоре о перевозках срок доставки не оговорен, то эти события не относятся к надежности. Если же срок был оговорен и не выполнен, то это характеризует событие отказа.

7. В комнате погасла горевшая лампочка. Что можно сказать об этом событии?

Ответ. а) отказала лампочка, если на ее «входе» есть достаточное напряжение.

б) отказала электрическая сеть квартиры, если на ее «входном» щитке есть напряжение.

в) отказала электрическая сеть дома, если на «входном» щитке дома есть напряжение и т.д.

8. Произошел пробой и перекрытие электрической дугой с высоковольтной линии электропередачи на растущие по трассе под линией кустарники. Говорит ли это об отказе воздушной линии электропередачи?

Ответ. Если рассматривать линию как некоторую конструкцию, то все значения ее параметров оставались неизменными и, следовательно, отказа у нее не должно быть. Если же рассматривать линию как обслуживаемое техническое устройство, когда персонал должен регулярно подрезать кустарники на трассе под линией, то, видимо, эти параметры не выдержаны, в результате чего и произошел отказ.

9. На электростанции произошло внезапное отключение одного агрегата. Относится ли это событие к надежности агрегата?

Ответ. Да, если его параметры вышли за допустимые значения. Нет, если отключение произошло из-за небрежности персонала (машиниста, диспетчера и т.п.).

10. Построить область значений параметров, характеризующую работоспособное состояние (область работоспособности) линии электропередачи.

11. Построить область работоспособности высоковольтного выключателя.

12. Построить область работоспособности генераторного блока.

13. Построить область работоспособности человека.

14. Привести примеры объекта, выполняющего резервные функции.

15. Привести примеры отказов каких-либо объектов и объяснить, по каким критериям рассматриваемые события следует классифицировать как отказы.

16. Привести примеры восстановлений каких-либо объектов и объяснить, по каким критериям рассматриваемые события следует считать восстановлениями.

§ 1.3. НАДЕЖНОСТЬ КАК КОМПЛЕКСНОЕ СВОЙСТВО

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ

Как уже отмечалось, термин «надежность» давно и широко применяется человеком, однако научное осмысление его как понятия началось сравнительно недавно, несколько десятилетий тому назад. Связано это с появлением потребности создания не просто машин, техники, а создания **эффективной** техники. С этих позиций выделенный выше существенный процесс в объектах – поток отказов и восстановлений – оказывается недостаточным. Возникла необходимость связать этот процесс с эффективностью работы объекта.

Для этого и потребовалось введение современного понятия «надежность» как элемента более общего понятия – «эффективность». Назначением его стало: связать выделенный поток отказов и восстановлений с выполняемыми функциями объекта с позиции существенности этой связки для эффективности использования объекта. В итоге сегодня:

Надежность – это свойство объекта выполнять заданные функции в заданном объеме при определенных условиях эксплуатации.

В этой формулировке схвачена главная суть понятия «надежность». Во-первых, – это свойство объекта, во-вторых, о надежности можно говорить, если определены или оговорены: 1) функции объекта, 2) объем выполнения этих функций и 3) условия, в которых находится объект. Отсутствие хотя бы одного из этих условий делает неопределенными суждения и какие-либо отношения в области надежности.

Так, например, если руководство электростанции заключило договор с руководством шахты о поставке угля, то это лишь обозначение функции – поставка угля. Она может осуществляться в любом размере, и это будет выполнение заданной функции. Поэтому при поставке меньше необходимого количества (в том числе и нулевого) претензий по ненадежности в данном случае не может быть. Для их появления в договоре необходимо оговорить объем поставляемого угля, график его поступления и т.д.

Но и этого недостаточно для предъявления требований по надежности. Если не указаны условия поставки угля, например, форма и сроки оплаты, отсутствие забастовок шахтеров, отсутствие «рельсовой войны», то и здесь нет возможности предъявить претензии по надежности.

Поскольку все эти и другие факторы имеют особую важность для взаимоотношения людей и организаций, разрабатываются терминологические справочники, а государство даже установило специальные стандарты по терминологии [19 – 23 и др.]. В частности, в ГОСТе [20] надежность определяется, как «Свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования».

Как видно, сформулированное выше определение надежности не противоречит приведенному. Последнее лишь несколько конкретизирует первое.

Изложенное показывает, что:

а) хотя надежность является внутренним свойством объекта, заложенным при его проектировании, изготовлении, она по-разному проявляется при различных внешних условиях, условиях эксплуатации. Нельзя оценить надежность объекта, не уточнив этих условий;

б) надежность проявляется в процессе выполнения заданного объема определенных функций, во времени. Если нет наблюдения за объектом, то нельзя сделать и заключений о фактической его надежности.

Такое понимание надежности показывает, что она является достаточно сложным свойством, которое можно представить в виде системы более простых свойств. Это необходимо и для более конструктивного его изучения, и для обеспечения надежности при создании тех или иных систем.

Надежность как сложное свойство представляется состоящим из сочетаний свойств: безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости [20].

Методически важно не только перечислить и определить отдельные подсвойства надежности, но и структурировать их, установив определенные отношения и связи между ними.

Кроме того, термины и определения ГОСТа относятся к чисто техническим объектам, а ранее использовался даже термин не объект, а «изделие». При решении многих задач в энергетике приходится иметь дело не только с техническими изделиями и объектами, а с более сложными человеко-машинными объектами, системами, обладающими гораздо большим разнообразием существенных свойств, чем просто изделие и даже технический объект. Тем не менее даже при увеличенном составе рассматриваемых свойств (чем это имеет место в ГОСТе [20]) далее будет использоваться термин «объект», лишь иногда расширяющийся до термина «система».

СТРУКТУРИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ

Структуризацию сложного свойства надежности можно провести на основе классификации отдельных более простых свойств. В качестве такой основы целесообразно выбрать надежность процессы в объектах и условия их функционирования.

Рассмотрим сначала классификацию по процессам.

Из рис. 1.6 видно, что общий процесс функционирования объекта характеризуется двумя существенными чередующимися периодами: работоспособным и неработоспособным (периодом восстановления работоспособности). В связи с этим выделим два более простых свойства надежности первого уровня: безотказность и восстанавливаемость.

Безотказность (failure-free operation) – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного времени или заданной наработки.

Восстанавливаемость (renewal ability) – свойство объекта быть приспособленным к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов и их устранения.

В соответствии с рассмотренной выше классификацией отказов и восстановлений эти два свойства можно, в свою очередь, представить еще более простыми.

Если все отказы подразделить на те, которые обусловлены физическими повреждениями оборудования; на отказы, которые связаны со сбоями, нарушениями устойчивости, и на отказы, связанные с переходом объекта в предельное состояние, то свойство безотказности можно представить совокупностью трех: неповреждаемостью, устойчивоспособностью и долговечностью.

Неповреждаемость (undamageability) – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность, не допуская его физического повреждения в течение заданного времени или заданной наработки.

Устойчивоспособность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность (устойчивость к возмущениям) в течение заданного времени или заданной наработки до выхода значений параметров за допустимую область без повреждения объекта.

Долговечность (longevity) – свойство объекта сохранять работоспособность в течение заданного времени или заданной наработки до наступления предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонта.

Долговечность связана, как правило, с постепенными отказами, характеризующими достижение объектом предельного состояния.

Неповреждаемость – с отказами, приводящими к повреждению объекта и необходимостью восстановительного ремонта (если он восстанавливаемый) или замены его (если он не восстанавливаемый).

Устойчивоспособность – с отказами либо проходящего характера (сбои), либо ликвидируемых средствами управления.

Аналогично и свойство «восстанавливаемость» можно представить, как минимум, двумя более простыми: ремонтпригодность и управляемость.

Ремонтпригодность (maintain ability) – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения повреждений и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Управляемость (operate ability) – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению выхода значений параметров за допустимую область и возврату их в эту область средствами управления.

Перейдем теперь к классификации свойств надежности по условиям функционирования объектов. Здесь весь спектр условий можно подразделить как минимум на три части: обычные, или ординарные условия, особые, или неординарные условия и специфические условия хранения, транспортирования объекта.

Первые (обычные, или ординарные), условия определяются ежедневно, еженедельно, ежемесячно, ежегодно повторяющимися климатическими, техногенными и другими воздействиями, на объект, характерными режимами его загрузки.

Вторые (особые, или неординарные) условия появляются значительно реже первых и обуславливаются ураганами, землетрясениями, военными действиями и другими катаклизмами, при которых на объект действуют значительные возмущения и на которые он, как правило, не рассчитывался.

Третьи – специальные – условия хранения, транспортирования создают свою специфику для проявления свойств объекта.

Обычно рассматриваемое свойство надежности в первых условиях называют ординарной надежностью или просто надежностью, во вторых условиях – **живучестью** (survival ability), в третьих – **сохраняемостью** (storage ability).

Такое понимание живучести еще не является общепринятым. В терминологическом сборнике [23] оно трактуется так: «свойство объекта противостоять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей». Там же в приложении отмечается, что имеется и другое толкование термина как свойства надежности, но не вообще, а в особых экстремальных усло-

виях». Такого понимания придерживаются многие специалисты в области надежности: И.А. Рябинин [14], Ю.Н. Руденко, И.А. Ушаков [16, 26] и др.

Представляется, что выделение свойства живучести по признаку каскадности развития отказа не совсем логично, так как каскадность развития отказа характеризует работу системы управления объекта и поэтому этот признак больше относится к управляемости, чем к живучести.

В связи с изложенным далее живучесть – это надежность в особых условиях.

По поводу свойства сохраняемости имеется некоторое разночтение в разных литературных источниках. Например, в ГОСТе [20] сохраняемость – свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и (или) транспортирования.

В таком определении сохраняемости уже заключено некоторое противоречие с исходным. По приведенному определению сохраняемость, с одной стороны, по существу включает все свойства надежности, но проявляемые в специфических условиях, является просто видом надежности. А с другой стороны, утверждается, что сохраняемость входит в надежность наряду с такими свойствами, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность.

Видимо, для исключения этого противоречия в [23] под сохраняемостью сформулировано свойство объекта непрерывно сохранять исправное или только работоспособное состояние в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Как видно, здесь сохраняемость характеризует по существу свойство безотказности, но в специфических условиях, и не претендует на ту всеобъемлемость, которая ему отведена в ГОСТе [20].

Нам представляется, что более логично сохранить широкую трактовку ГОСТа [20], представляя сохраняемость как вид надежности объекта в специфических условиях, т.е.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять свои свойства безотказности и восстанавливаемости в течение и после хранения и (или) транспортирования.

В итоге для достаточно абстрактного объекта структурированное поле свойств, связанных с понятием «надежность» и обслуживающих его, можно представить так, как это показано на рис. 1.8.

Для реальных объектов, систем это поле конкретизируется и расширяется, включая в себя их специфические особенности. Рассмотрим эту специфику для энергетики.

Во-первых, здесь возможно дополнительно подразделение свойства надежности по набору выполняемых энергетикой функций.

Одна из главных функций энергетики – снабжение потребителей энергией. Обычно надежность выполнения этой функции обозначают как «бесперебойность энергоснабжения». Кроме того, одним из существенных требований, предъявляемых сегодня к энергетике, является обеспечение ее безопасности. Это влечет необходимость введения такого свойства надежности, как «безопасность». Не исключено, что у энергетики проявятся еще новые функции или дисфункции, что также потребует введения новых составляющих свойства надежности.

Во-вторых, особенность отказов и восстановлений в энергетике также может потребовать выделения специфических свойств надежности. Например, в условиях изменчивости режимов выработки и передачи мощности появляются отказы, связанные с недостаточной маневренностью оборудования, и соответственно свойство – «маневренность». Другой пример: однофазные, двухфазные, трехфазные повреждения в электрических сетях могут потребовать введения таких свойств, как «однофазная неповреждаемость» и т.д.

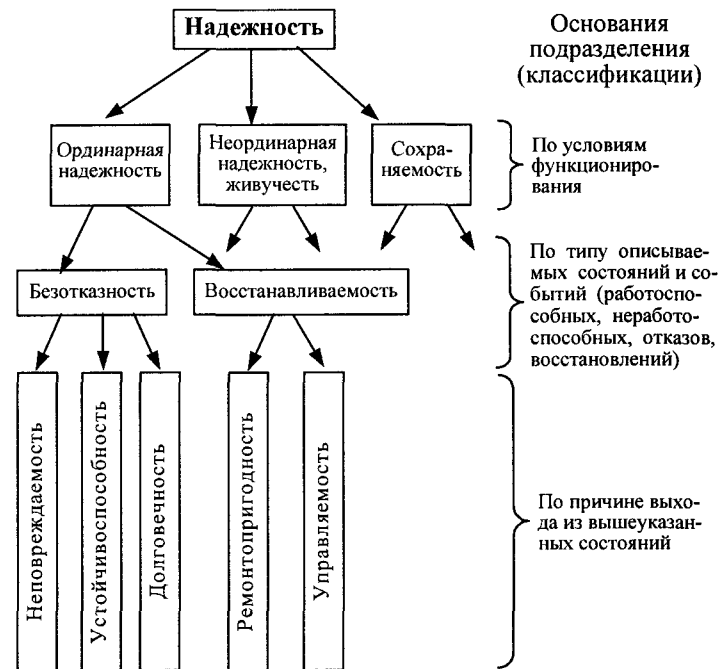


Рис. 1.8

Наконец, у специалистов энергетиков можно иногда услышать и прочитать о «структурной надежности» и «режимной надежности».

По существу, первый термин обозначает надежность в условиях, когда объем функций не важен. Другими словами, здесь область допустимых значений параметров системы не содержит режимные, а содержит только структурные параметры.

Режимная надежность наоборот – рассматривает надежность только в области режимных параметров, а значения структурных считаются заданными и неизменными.

На рис. 1.9 приведена структура поля понятий, отражающих специфику надежности энергетики. При этом дополнительно:

Бесперебойность (*uninterrupted ability, fail-safety*) – свойство надежности объекта энергетики относительно его функции энерго-снабжения в заданном объеме.

Безопасность (*safety*) – свойство объекта не допускать ситуации, опасных для людей и окружающей среды.

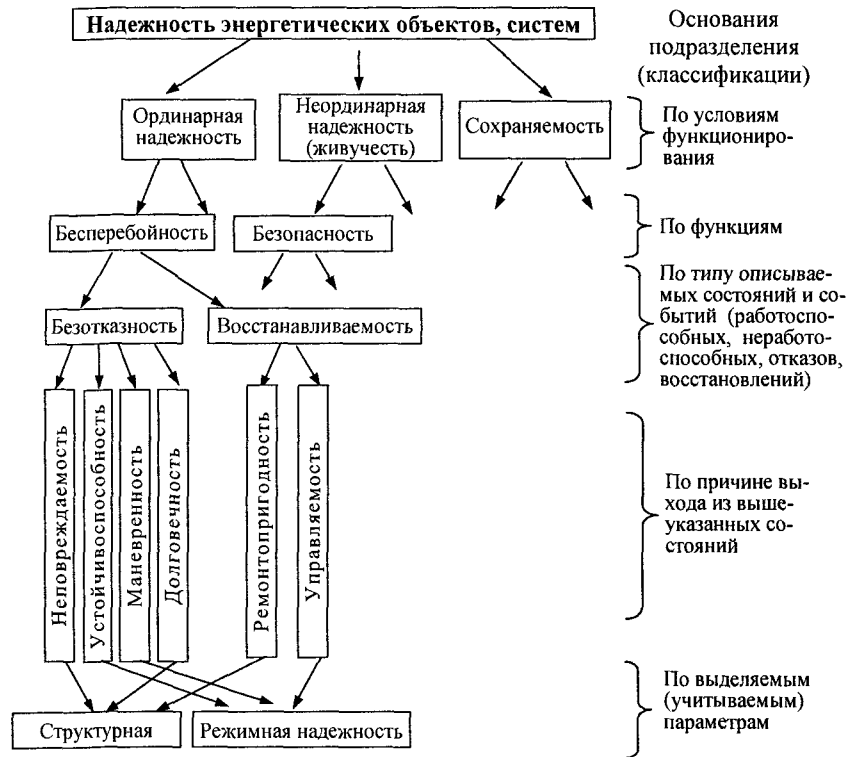


Рис 1.9

Маневренность (*maneuverability*) – свойство объекта изменять значения своих режимных параметров в соответствии с заданной скоростью и в заданном диапазоне при определенных условиях его эксплуатации.

Каждый элемент в этой структуре, в свою очередь, может быть также представлен системой понятий, детализирующих данный.

И наоборот, из приведенных элементов можно компоновать более сложные (составные) свойства в рамках общего свойства надежности, как это на рис. 1.9 показано для структурной и режимной надежности.

Так структурная надежность обуславливается неповреждаемостью, долговечностью и ремонтпригодностью, а режимная надежность – устойчивоспособностью, маневренностью и управляемостью.

Исходя из этого, видимо, эти свойства можно определить следующим образом.

Структурная надежность – свойство объекта сохранять свою структуру в рамках, обеспечивающих выполнение им заданных функций.

Режимная надежность – свойство объекта сохранять работоспособность при определенном множестве режимов его использования в рамках заданной структуры.

Здесь важно заметить, что это одна из возможных структуризаций такого сложного понятия, как «надежность». Видимо, возможны и другие системные представления его. Например, в [24] представлена другая его структуризация. Во многом это зависит от характера решаемых задач. Свойство сохраняемости в последнее время приобретает все большую актуальность в связи с проблемой консервации энергетического оборудования.

ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ ПАРАГРАФА

1. В лифт вошли жильцы дома, нажали на кнопку подъема на этажи, но лифт не тронулся с места. Относится ли это событие к надежности лифта?

Ответ. Функция (подъем жильцов дома на этажи) лифта, казалось бы, не выполнена, но этого недостаточно, важен еще объем выполняемой функции. Выявилось, что в лифт вошло 6 человек, а по условиям работы должно быть не более 5 человек. При превышении этого количества лифт не должен работать. Следовательно, лифт четко выполнил свои функции. Претензий к его работе в смысле надежности не должно быть.

Но после того как из лифта вышел «лишний» человек, он снова не стал поднимать пассажиров. Казалось бы, что лифт теперь не выполняет свои функции. На самом деле, срок очередной проверки работоспособности лифта уже истек. Следовательно, формально претензий к надежности работы лифта, как к техническому устройству, не должно быть. Претензии здесь могут быть лишь к надежности обслуживающего персонала, который не обеспечил заданных условий работы.

2 Шариковая ручка через некоторое время перестала писать. Относится ли это событие к ее надежности?

Ответ. Возможны следующие причины: закончилась паста; паста перестала поступать в шарик (пересохла); испортился шарик.

В первом случае претензий по назначению не может быть при данной конструкции (при данной долговечности).

Во втором и третьем случаях – явные претензии по безотказности.

3. Наручные часы перестали работать. Относится ли это событие к надежности?

Ответ. Причиной того, что часы перестали выполнять свою функцию (указывать время), является отсутствие напряжения на питающей часы батарейке. После

ее замены часы вновь заработали. Ответ зависит от того, где мы проводим границу объекта: включаем ли в объект часы и батарейку или только часы, но без батарейки.

В первом случае, если срок службы батарейки истек, то это событие не относится к надежности. Если же срок еще не истек, то этот отказ характеризует недостаточную безотказность объекта. В то же время возобновление работы часов после замены батарейки частично демонстрирует лишь восстанавливаемость объекта.

Во втором случае мы имеем дело с двумя объектами, и произошедшее событие характеризует лишь надежность (малую безотказность или долговечность) второго объекта – батарейки, если срок ее работы не истек.

4. На скотоводческую ферму упал метеорит, в результате чего пришлось скот эвакуировать из-за разрушения помещения. Относится ли это событие к надежности?

Ответ. Да. Это относится к безотказности в особых условиях (живучесть).

5. Участок линии электропередачи поставили на консервацию. Когда через год ее решили снова использовать для передачи энергии, то оказалось, что злоумышленниками были сняты с линии провода. Характеризуют ли эти события надежность?

Ответ. Да. У этого объекта оказалась низкая сохраняемость в данных криминальных условиях. В более благоприятных условиях сохраняемость линии была бы значительно выше.

6. В поле трактор плугом зацепил и повалил опору линии электропередачи. Нарушилось питание молочной фермы. В результате проведенных оперативно-выездной бригадой переключений в электрических сетях электропитание фермы частично возобновилось. После ремонта поваленной опоры питание фермы восстановилось полностью.

Описать, в каких условиях эти все события относятся к надежности и при каких условиях все это окажется за рамками надежности.

7. Студент-энергетик решил понаблюдать за работой энергопитающей организации. Для этого он включил дома в розетку частотомер и стал регистрировать изменения частоты. Через день он обнаружил, что в определенное время частота снизилась до 49 Гц, а затем в течение минуты-две возросла до 49,9 Гц. Какие выводы может сделать студент по результатам этих наблюдений с позиции надежности?

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 1

1. Как можно охарактеризовать широту понятия «надежность»?
2. Какова суть понятия «система»?
3. В чем различие понятий «Система I» и «Система II»?
4. В чем различие между понятиями «состав» и «система»?
5. В чем различие между понятиями «часть» и «элемент»?
6. В чем различие между понятиями «связь» и «отношение»?
7. В чем различие между понятиями «система» и «структура»?
8. Что отражают понятия «вход» и «выход»?
9. Для чего вводятся понятия «активное» и «пассивное» поведение объекта?
10. Как соотносятся между собой «свойство» и «функция»?
11. Приведите примеры функционального описания объектов.
12. В чем заключается различие между понятиями «цель» и «задача»?

13. Приведите примеры проблем и сформулированных проблем. Кому (какому субъекту) они принадлежат?

14. Приведите примеры объектов с целенаправленным поведением. На основе чего выявляется целенаправленность поведения ваших объектов?

15. Какова может быть схема анализа изучаемого объекта при системном подходе?

16. Какова может быть схема, последовательность действий, при проектировании (создании) объекта на основе системного подхода?

17. Приведите примеры объектов и параметры, которые описывают их различное состояние.

18. Какими критериями разграничиваются значения параметров в приведенных выше примерах подмножества работоспособных и неработоспособных состояний?

19. Какие наиболее характерные состояния выделяют в области работоспособных состояний?

20. Какие наиболее характерные состояния выделяют в области неработоспособных состояний?

21. Что является критерием отказа?

22. Как можно классифицировать отказы?

23. Как классифицируются отказы по причинам их возникновения?

24. Восстановление как событие. Что является критерием восстановления?

25. Как можно классифицировать восстановление работоспособности объекта?

26. Как понимается сегодня «надежность»?

27. Элементом какого более общего понятия (системы) является «надежность»?

28. Зачем устанавливаются государственные стандарты на терминологию в области надежности?

29. На основании чего можно классифицировать (структурировать) более простые свойства «надежности»?

30. Какие свойства надежности можно выделить по критерию: состояния, процессы, протекающие в объекте?

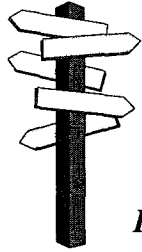
31. Какие виды надежности можно выделить по критерию: условия функционирования объекта?

32. Какие свойства надежности можно выделить по критерию: виды отказов?

33. Какие свойства надежности можно выделить по критерию: виды восстановлений?

34. Какие свойства надежности энергетических объектов можно выделить по критерию: выполняемые функции?

35. Какие специфические свойства характерны для энергетических объектов?



ГЛАВА 2

ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Любой объект и его свойства могут описываться различными системами показателей. Выбор системы является задачей, решение которой существенным образом зависит от характера объекта, его назначения, общих требований к процессу и результатам его функционирования, используемых критериев эффективности.

Наряду с этим теория и практика решения самых разных задач для разнообразных объектов позволили выделить систему показателей надежности (reliability index), которая является достаточно общей и универсальной. Как правило, эти показатели – базовые, на основе которых далее можно формировать более конкретные показатели реальных объектов, систем. Ниже сначала рассматриваются показатели абстрактного объекта, которые далее дополняются показателями, наиболее характерными для энергетической системы.

Подразделением надежности в предыдущей главе на более простые ее свойства с их иерархической увязкой, по сути, было положено начало измерению надежности в номинальных (классификационных) и ранговых шкалах. В настоящей главе мы продолжим решение задачи измерения надежности в более сильных шкалах. При этом методически удобно начать эти измерения с простых свойств, вводя те или иные показатели, а на их основе далее формировать показатели более сложных свойств надежности.

На уровне абстрактных объектов, если исходить из феноменологического представления надежности в виде потока отказов и восстановлений, целесообразно начать рассмотрение измерений со свойств безотказности и восстанавливаемости. Обычно показатели этих свойств называют единичными. А показатели, построенные на основе этих единичных, – комплексными.

Кроме того, определять показатели целесообразно в два этапа: на первом определяются условные, на втором – безусловные. На первом описываются интересующие нас состояния (работоспособные, неработоспособные) и события (отказы, восстановления) объекта в зависимости от его параметров, уровня выполняемых функций. Поэтому назовем их структурно-функциональными. На втором этапе эти условия связываются с некоторыми закономерностями их появления, например с вероятностями их наступления. Поскольку в настоящей книге рассматриваются именно эти закономерности, безусловные показатели будем называть вероятностными, хотя могут и иметься другие невероятностные закономерности появления событий (отказа, восстановления), например, при анализе живучести. Но эти вопросы еще сегодня недостаточно изучены. Кроме того, это свойство в значительной степени описывается уже на структурно-функциональном, условном уровне.

§ 2.1. БЕЗОТКАЗНОСТЬ

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ (УСЛОВНЫЕ) ПОКАЗАТЕЛИ

Выше отмечалось, что объект находится в работоспособном состоянии, если значения его параметров $x(t)$ лежат внутри области допустимых значений, граница которой пусть описывается уравнением $D(x) = 0$.

Для характеристики состояния объекта введем величину $Z(t)$. В целях лучшего понимания дальнейшей сути рассмотрим сначала объект, имеющий два состояния. Пусть при нахождении объекта в работоспособном состоянии в момент t величина $Z(t)$ принимает значение 1, а при нахождении объекта не в работоспособном состоянии 0, т. е.

$$\left. \begin{aligned} Z(t) = Z\{x(t)\} = 1, & \text{ если } D\{x(t)\} < 0, \\ Z(t) = Z\{x(t)\} = 0, & \text{ если } D\{x(t)\} \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Кроме того, объект может находиться в том или ином состоянии на протяжении некоторого интервала времени (t_1, t_2) , т. е.

$$Z(t) = 1 \text{ при } t_1 \leq t \leq t_2, \quad (2.2)$$

или

$$Z(t) = 0 \text{ при } t_1 < t < t_2 \quad (2.3)$$

и др.

Таким образом, показателем безотказности будет условие

$$Z(t) = 1 \text{ при } 0 \leq t \leq t_0. \quad (2.4)$$

Условия (2.1) – (2.4) определяются обычно при проектировании и изготовлении объекта. Они выражаются в виде различных требований: внешних (климатических и т.п.), режима использования, хранения, транспортировки, периодичности объема ремонтов и т.п. При выполнении всех этих требований гарантируется обеспечение (2.1) – (2.4).

В общем случае объекты могут иметь несколько (ν) различных уровней качества функционирования, ν уровней работоспособности. Величина Z будет принимать ν значений. Значение $Z = 0$ – состояние полного отказа, остальные состояния обычно нумеруются так, что большему значению Z соответствуют более высокое качество функционирования, более высокий уровень работоспособности. В этом случае нахождение объекта в работоспособном состоянии l , или условие работоспособности объекта на l -м уровне будет

$$Z(t) = l. \quad (2.1a)$$

Показателем безотказности систем на уровне работоспособности не ниже l будет условие сохранения работоспособного состояния объекта на l -м уровне и выше ($1 \leq l \leq \nu$) на интервале времени $[0, t]$

$$Z_l(t) \geq l \text{ при } 0 \leq t \leq t_0; \quad (2.4a) \\ 1 \leq l \leq \nu.$$

БЕЗУСЛОВНЫЕ (ВЕРОЯТНОСТНЫЕ) ПОКАЗАТЕЛИ

Отмеченная выше гарантия выполнения условий (2.4) обычно не является абсолютной. Во многих случаях в силу большого количества влияющих факторов она носит вероятностный характер при нормальных (ординарных) условиях эксплуатации объекта. Это и предопределило использование вероятностных методов описания надежностного феномена.

В условиях же, удаляющихся от ординарных, вырождается и вероятностная природа причины отказа, тем в большей степени, чем больше эта удаленность. Поэтому в неординарных (особых) условиях вероятностное описание безотказности становится, как правило, неприемлемым. Здесь безусловный показатель безотказности представляет собой совокупность показателя (2.4) и описания усло-

вий, в которых (2.4) выполняется или не выполняется. Обычно это описание задается в виде сценариев, минимаксных условий и т.п.

В ординарных же условиях, как правило, удается описать их вероятностными законами, которые и рассматриваются ниже. При этом методически удобно начать изучение с показателей невосстанавливаемых объектов, которые могут находиться в двух состояниях.

Невосстанавливаемый объект. Наиболее полная характеристика этого объекта – вероятность того, что время работы объекта до отказа t_0 будет не меньше заданного времени t , или вероятность *безотказной работы* (probability of failure – free operation) за время t

$$P\{Z(t) = 1 \text{ при } 0 \leq t \leq t_0\} = P(t_0 \geq t) = P_0(t). \quad (2.5)$$

Вероятность того, что за время t объект откажет, определится как

$$Q(t) = 1 - P_0(t). \quad (2.6)$$

Характерные зависимости $P_0(t)$ и $Q(t)$ представлены на рис. 2.1, а и б соответственно.

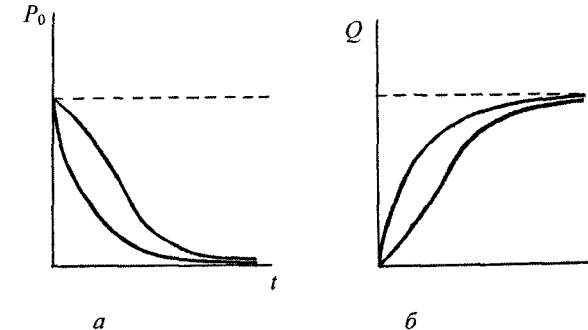


Рис 2.1

Наряду с этими показателями часто используют еще другой – *интенсивность отказа* (failure rate) $\lambda(t)$, который по информативности эквивалентен предыдущим и представляет собой условную плотность вероятности возникновения отказа, определяемую для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник:

$$\lambda(t) = \frac{1}{P_0(t)} \frac{dQ(t)}{dt}. \quad (2.7)$$

График зависимости интенсивности отказа $\lambda(t)$ от времени называют обычно *характеристикой жизни объекта* (рис. 2.2). На характеристике явно выделяются три периода, соответствующие влиянию различных причин, рассмотренных в предыдущей главе. На этом же рисунке произведено расслоение этой характеристики на три слагаемые (тонкие линии), каждая из которых определяется своей группой причин. Первая (λ_1) определяется повышенной интенсивностью отказов объекта на начальном этапе его функционирования, когда происходит «выжигание» дефектов, имеющихся в объекте, обусловленных качеством его проектирования, изготовления, монтажа и т.п. Вторая (λ_2) обусловлена процессом старения объекта, его износом. Третья (λ_3) – случайными причинами, обычно внешнего характера и не зависящими от предыдущего срока работы объекта. Третья составляющая может быть как постоянной во времени, если внешние условия неизменны, так и переменной, если условия меняются, например сезонное изменение грозовой интенсивности, влияющей на электросетевое оборудование (на рис. 2.2 дополнительно показано пунктиром). Три интервала на графике (рис. 2.2) соответствуют преимущественному влиянию этих трех причин отказов.

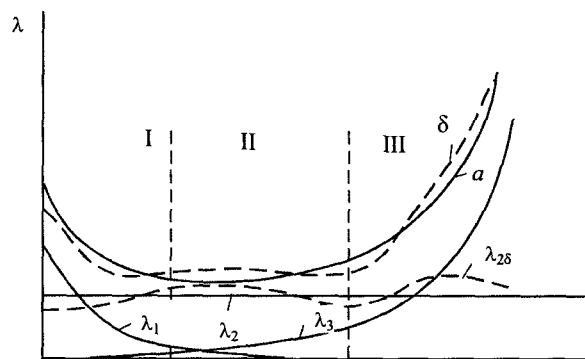


Рис 2.2

Между показателями $P_0(t)$ и $\lambda(t)$, как следует из (2.7), имеется зависимость, которую можно выявить из преобразования (2.7) относительно $P_0(t)$ с учетом (2.6)

$$P_0(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (2.8)$$

На основе показателя $P_0(t)$ можно получить ряд вторичных показателей

Вероятность безотказной работы объекта на интервале $[t_1, t_2]$, если он проработал исправно на интервале $[0, t_1]$ – $P_0(t_2/t_1)$. Эту вероятность можно найти исходя из условия, что объект не откажет на интервале $[0, t_2]$ только в том случае, если он не откажет на интервале $[0, t_1]$, а затем и на интервале $[t_1, t_2]$. Другими словами, первое событие есть произведение двух других. Тогда на основании теоремы умножения вероятностей имеем

$$P_0(t_2) = P_0(t_1)P_0(t_2/t_1),$$

откуда

$$P_0(t_2/t_1) = P_0(t_2)/P_0(t_1) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt} \quad (2.8a)$$

Средняя наработка до отказа (mean time to failure), представляющая собой математическое ожидание наработки объекта до отказа:

$$\bar{t}_0 = \int_0^{\infty} t \frac{dQ}{dt} dt = \int_0^{\infty} t dQ(t) \quad (2.9)$$

В результате небольших преобразований (интегрирования по частям) выражение (2.9) переходит в

$$\bar{t}_0 = \int_0^{\infty} P_0(t) dt \quad (2.9a)$$

Последнее выражение показывает, что средняя наработка до отказа графически пропорциональна площади, лежащей под графиком функции $P_0(t)$.

Средняя продолжительность безотказной работы объекта, проработавшего исправно срок t_1 , $\bar{t}_0(t_1)$:

$$\bar{t}_0(t_1) = M[t_0 - t_1] = \int_{t_1}^{\infty} (t - t_1) \frac{dQ(t/t_1)}{dt} dt.$$

После небольших преобразований с учетом (2.8) и (2.6) получаем:

$$\bar{t}_0(t_1) = \frac{1}{P_0(t_1)} \int_{t_1}^{\infty} P_0(t) dt \quad (2.10)$$

Часто большой практический интерес представляет случай, когда интенсивность отказа может считаться постоянной величиной $\lambda = \text{const}$. Это характерно для уже освоенного оборудования, когда можно полагать $\lambda_1 \approx 0$ (рис. 2.2), при рассмотрении его работы на интервале, еще далеком от начала интенсивного старения. В этом случае все показатели существенно упрощаются и принимают вид

$$\left. \begin{aligned} P_0(t) &= e^{-\lambda t}, \quad Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \\ P_0(t_2/t_1) &= e^{-\lambda(t_2-t_1)} = e^{-\lambda \Delta t} = P_0(\Delta t), \\ \bar{t}_0 &= \bar{t}(t_1) = \frac{1}{\lambda}. \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Восстанавливаемый объект. Для представления его показателей выделим из общего потока отказов и восстановлений поток отказов (рис. 2.3). При этом на оси времени будем откладывать только

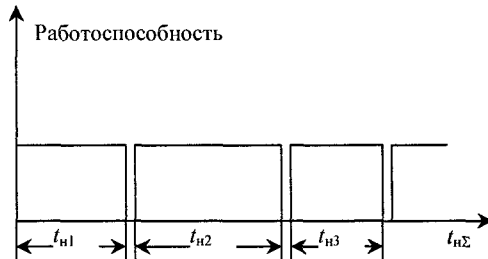


Рис 2 3

суммарное время работоспособного состояния объекта $t_{нΣ}$ — суммарную наработку. Для такого объекта на каждом k -м цикле его работы после восстановления будут справедливы рассмотренные выше показатели восстанавливаемого объекта, которые в общем случае будут различными для каждого цикла

$$P_0(t_k), Q(t_k), \lambda(t_k), \bar{t}_{нк}, \dots,$$

где t_k — время от начала k -го цикла. Часто в практических задачах полагают, что эти показатели идентичны для каждого цикла.

Кроме этих показателей для восстанавливаемого объекта интерес представляют и более общие показатели, характеризующие количество отказов

Количество отказов $\Omega(t_{нΣ})$ за суммарную наработку $t_{нΣ}$ является величиной случайной. Для характеристики этой случайной величины введем показатель

$Q_k(t_{нΣ})$ — вероятность того, что за время $t_{нΣ}$ произойдет отказов $\Omega(t_{нΣ})$ — большее или равное заданному числу K

$$Q_k(t_{нΣ}) = P\{\Omega(t) \geq K\}. \quad (2.12)$$

Если функции вероятности отказа на каждом цикле $Q(t_k)$ одинаковы, то $Q_k(t_{нΣ})$ может быть определена как K -кратная свертка функции $Q(t)$

$$Q_k(t_{нΣ}) = \int_0^{t_{нΣ}} Q_{k-1}(t-t_k) dQ(t_k) \quad \text{при} \quad Q_1(t) = Q(t) \quad (2.13)$$

Вероятность того, что за время $t_{нΣ}$ произойдет ровно K отказов, определяется как

$$P_k(t_{нΣ}) = Q_k(t_{нΣ}) - Q_{k+1}(t_{нΣ}). \quad (2.14)$$

Важнейшим показателем потока отказов является *ведущая функция* $\bar{\Omega}(t_{нΣ})$ или *функция отказов*, представляющая собой математическое ожидание числа отказов за время $t_{нΣ}$

$$\bar{\Omega}(t_{нΣ}) = M\Omega(t_{нΣ}) = \sum_{k=1}^{\infty} k P_k(t_{нΣ}), \quad (2.15)$$

которую с учетом (2.14) можно привести к виду

$$\bar{\Omega}(t_{нΣ}) = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k(t_{нΣ}) \quad (2.15a)$$

Если функция отказов — интегральная характеристика, то в качестве точечной используется *параметр потока отказов* $\tilde{\omega}(t_{нΣ})$

$$\tilde{\omega}(t_{нΣ}) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1 - P_0(t_{нΣ}, t_{нΣ} + \Delta t)}{\Delta t}, \quad (2.16)$$

где $P_0(t_{нΣ}, t_{нΣ} + \Delta t)$ — вероятность безотказной работы на интервале времени Δt после $t_{нΣ}$

В практике часто используется показатель *частота отказов* (mean failure stream intensity) на интервале $t_{нΣ1}, t_{нΣ2}$

$$\omega(t_{нΣ1}, t_{нΣ2}) = \left\{ \bar{\Omega}(t_{нΣ2}) - \bar{\Omega}(t_{нΣ1}) \right\} / (t_{нΣ2} - t_{нΣ1}). \quad (2.17)$$

Другой важнейший практический показатель — *средняя наработка на отказ* (mean time between failure)

$$\bar{t}_{0н} = \frac{t_{нΣ}}{\Omega(t_{нΣ})}. \quad (2.18)$$

Определение всех приведенных показателей существенно зависит от характера потока отказов. Различают потоки:

▪ *ординарные*, если вероятность появления двух и более отказов за промежуток времени стремится к нулю, когда длительность этого промежутка времени стремится к нулю;

▪ *стационарные*, если вероятность появления K отказов на отрезке времени $(t, t + \Delta t)$ зависит только от Δt и не зависит от t (не зависит от предыстории);

▪ *без последствия*, если на любых непересекающихся интервалах времени число событий, появляющихся в одном из них, не зависит от числа событий, появляющихся в других.

Ординарные потоки без последствия называются *пуассоновскими*. Они могут быть как *стационарными*, так и *нестационарными*. Стационарный пуассоновский поток является *простейшим*.

Поток отказов восстанавливаемого объекта является ординарным, так как второй отказ может произойти только после восстановления. Часто он может полагаться потоком и без последствия, т.е. пуассоновским. Если же он еще и стационарный, т.е. простейший, то для него можно получить:

$$\left. \begin{aligned} P_0(t_k) &= P_0(t) = e^{-\lambda t}; \\ Q(t_k) &= Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}; \\ \bar{\Omega}(t) &= \lambda t; \quad \omega(t, t_2) = \bar{\omega}(t) = \lambda; \quad \bar{t}_{0\Sigma} = \bar{t}_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

В соответствии с классификацией свойств надежности, проведенной в предыдущей главе, одним из составляющих свойств безотказности является долговечность. Ввиду особой важности и специфичности этого свойства многие из рассмотренных выше показателей для него имеют свои названия. Для долговечности потоком отказов является поток вывода объекта в различного рода предупредительные ремонты (средние, капитальные) и последний отказ – достижение конечного предельного состояния. Для этого свойства все показатели, характеризующие различные наработки, обозначаются термином «ресурс», с соответствующим конкретизирующим его определением.

Технический ресурс (life length) – наработка объекта от начала его эксплуатации до достижения предельного состояния или до начала капитального (среднего) ремонта, или от начала эксплуатации после ремонта (среднего, капитального) до следующего ремонта,

или достижения предельного состояния. Обычно указывается, какой именно технический ресурс имеется в виду: до среднего, капитального, от капитального до ближайшего среднего ремонта и т.п.

Гамма-процентный ресурс ($L_{(100-\gamma)}$ – life length) – наработка, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ .

Средний ресурс (mean operation life length) – математическое ожидание технического ресурса.

Назначенный ресурс (intended operating life length) – суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его состояния.

Заканчивая рассмотрение показателей безотказности, важно отметить, что по сути она характеризуется либо частотой наступления тех или иных отказов (т.е. фиксируется: как часто), либо эквивалентным этой частоте интервалом времени до отказа (или от восстановления до отказа).

ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ ПАРАГРАФА

1. В программный расчетный пакет (на ПЭВМ) был занесен вирус, в результате чего расчет иногда не выполнялся, следовало начинать его заново. В среднем отказ происходил через 2,5 часа. Для выполнения расчета требуется 4 часа. Определить вероятность того, что при запуске программы расчет будет закончен.

Решение

Полагая, что закон безотказной работы экспоненциальный, можно оценить интенсивность $\lambda = \frac{1}{2,5} = 0,4$. Тогда

$$P_0 = e^{-\lambda t} = e^{-0,4 \cdot 4} = e^{-1,6} = 0,203.$$

2. Время работы t_0 системы до отказа подчинено экспоненциальному закону с постоянной интенсивностью λ . Как определяются вероятность безотказной работы, функция распределения, плотность вероятности безотказной работы, математическое ожидание и дисперсия величины t_0 ?

3. Время работы системы до отказа описывается экспоненциальным законом с интенсивностью $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-3}$ 1/ч. Определить:

1) среднюю наработку до отказа и дисперсию наработки;

2) вероятность безотказной работы в течение $t = 300$ ч.

4. Интенсивность отказов генераторов одного типа в течение периода нормальной эксплуатации практически является постоянной величиной и равна $0,02 \cdot 10^{-3}$, 1/ч. Вычислить вероятность безотказной работы, вероятность отказа, плотность вероятности отказов для $t = 720$ ч и среднее время безотказной работы.

5. Интенсивность отказов стареющего элемента $\lambda(t) = \alpha t$, где α – постоянная величина. Определить:

- плотность вероятности отказов;
- вероятность безотказной работы элемента в течение средней наработки до отказа.

Решение

Определим вероятность безотказной работы

$$P_0(t) = e^{-\int_0^t \alpha t dt} = e^{-\frac{\alpha t^2}{2}};$$

- плотность вероятности отказа

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d[1 - P_0(t)]}{dt} = e^{-\frac{\alpha t^2}{2}} \frac{d(-\frac{\alpha t^2}{2})}{dt} = \alpha t e^{-\frac{\alpha t^2}{2}};$$

- средняя наработка на отказ

$$\begin{aligned} \bar{t}_n &= \int_0^{\infty} P_0(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\frac{\alpha t^2}{2}} dt = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(\sqrt{\alpha}t)^2}{2}} d\sqrt{\alpha}t = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \\ &= \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{\alpha}} \left(\frac{-1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right) = \frac{\sqrt{2\pi}}{2\sqrt{\alpha}} = \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} \end{aligned}$$

(полученный интеграл в скобках описывает нормальный закон распределения и в этих условиях равен 0,5).

Вероятность безотказной работы элемента в течение средней наработки

$$P_0(\bar{t}_n) = e^{-\frac{\alpha \bar{t}_n^2}{2}} = e^{-\frac{\alpha}{2} \left(\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} \right)^2} = e^{-\frac{\pi}{4}}.$$

Объясните, почему полученная вероятность не зависит от параметра интенсивности отказа α .

- Интенсивность отказа подсистемы управления ракеты-носителя имеет вид

$$\lambda(t) = \frac{1}{T_p - t}, \quad 0 < t \leq T_p,$$

где T_p – ресурс подсистемы.

Определить при $T_p = 100$ ч:

- вероятность безотказной работы подсистемы на интервале времени 0...4 ч;
- среднее время безотказной работы подсистемы;
- плотность вероятности отказа.

7. Элемент проработал исправно в течение 400 ч. Определить, какова вероятность его безотказной работы на промежутке от 400 до 800 ч, если $\lambda = \alpha t$, при $\alpha = 1/(4 \cdot 10^6)$ ч⁻².

Решение

Вспользуемся формулой (2.8а)

$$P_0(t_2/t_1) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \alpha t dt} = e^{-\frac{\alpha t^2}{2} \Big|_{t_1}^{t_2}} = e^{-\frac{\alpha}{2}(t_2^2 - t_1^2)} = e^{-\frac{1}{2 \cdot 4 \cdot 10^6} (800^2 - 400^2)} = 0,942.$$

8. Подсистема управления (см. пример 6) проработала без отказа 2 ч. Найти вероятность, что она проработает без отказа еще 2 ч.

9. Подшипники турбины при ее работе изнашиваются с интенсивностью $\lambda = \alpha t^2$. Турбину останавливают на ремонт и заменяют подшипник, когда вероятность его отказа становится равной 0,001. Определить время до ремонта, если $\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ 1/год³.

Решение

Вероятность отказа

$$Q(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda dt} = 1 - e^{-\int_0^t \alpha t^2 dt} = 1 - e^{-\frac{\alpha t^3}{3}} = 0,001,$$

откуда

$$e^{-\frac{\alpha t^3}{3}} = 0,999, \quad \text{или} \quad -\frac{\alpha t^3}{3} = \ln 0,999 = -0,001,$$

$$t^3 = \frac{0,003}{\alpha} = 1, \quad t = 1 \text{ год.}$$

Если такой износ подшипника (через год) полагать предельным состоянием, то эта наработка и будет техническим ресурсом подшипника.

10. Используя данные по надежности оборудования энергетических систем, приведенные в приложении, определить частоту отказов воздушной одноцепной линии электропередачи 110 кВ длиной 70 км. Полагая поток отказов линии простейшим, определить:

- вероятность безотказной работы в течение месяца;
- вероятность пяти отказов этой линии в течение месяца, полугодия.

11. Используя данные по надежности оборудования, приведенные в приложении, определить:

- вероятность безотказной работы энергоблока 800 МВт в течение месяца;
- вероятность 10 отказов в течение года, месяца.

12. Используя данные по надежности оборудования энергетических систем, приведенные в приложении, определить:

а) вероятность безотказной работы трансформатора 110 кВ мощностью 25 МВА в течение года;

б) вероятность пяти отказов в течение месяца.

13. Используя данные по надежности оборудования энергетических систем, приведенные в приложении, определить:

а) вероятность отказа воздушного выключателя 110 кВ при выполнении им оперативных переключений в течение года (когда было осуществлено 15 переключений),

б) вероятность 10 отказов за этот же период.

14. Та же задача, что и в пункте 13, но при отключении коротких замыканий.

§ 2.2. ВОССТАНАВЛИВАЕМОСТЬ

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ (УСЛОВНЫЕ) ПОКАЗАТЕЛИ

Очевидно, что это свойство присуще только восстанавливаемым объектам и определяется временем восстановления его после отказа t_b . Для двухуровневого случая условие восстанавливаемости (точнее, невозстанавливаемости) можно записать как условие того, что за время t , не большее времени t_b , не произойдет восстановления объекта

$$Z(t) = 0, \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_b. \quad (2.20)$$

В случае, если объект имеет много уровней работоспособности, степеней выполнения функций (v), условие невозстанавливаемости объекта с уровня l за заданное время t , не большего времени восстановления t_b :

$$Z(t) \leq l, \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_b. \quad (2.20a)$$

БЕЗУСЛОВНЫЕ (ВЕРоятНОСТНЫЕ) ПОКАЗАТЕЛИ

В обычных (ординарных) условиях время восстановления t_b , как правило, является случайной величиной и поэтому достаточно полно характеризуется законами распределения вероятностей времени восстановления после каждого k -го отказа

$$P(t_{bk} < t_k) = G_k(t_k), \quad (2.21)$$

где t_k – заданное время, отсчитываемое с момента k -го отказа.

Аналогично безотказности это свойство можно характеризовать *интенсивностью восстановления*

$$\mu_k(t_k) = \frac{1}{1 - G_k(t_k)} \frac{dG_k(t_k)}{dt_k}. \quad (2.22)$$

Также может быть записана связь

$$G_k(t_k) = 1 - e^{-\int_0^{t_k} \mu_k(t_k) dt_k}. \quad (2.23)$$

Интегральный показатель – среднее время восстановления после k -го отказа

$$\bar{t}_{bk} = \int_0^{\infty} t_k \frac{dG_k(t_k)}{dt} dt = \int_0^{\infty} t_k dG_k(t). \quad (2.24)$$

Приведенные показатели записаны в достаточно общем виде и могут характеризовать любые виды восстановления. Вместе с тем для энергетических объектов (да и для многих других) следует более подробно рассмотреть наиболее характерные виды восстановлений: ремонты и управления. При этом класс ремонтов также подразделяется как минимум на два довольно различающихся подкласса: аварийные (или внеплановые) и предупредительные (плановые). Время аварийного восстановления работоспособности складывается из времени обнаружения места повреждения и времени устранения неисправности, ремонта, а также, возможно, из времени вероятного ожидания готовности ремонтной бригады к выполнению данной работы. Обе эти составляющие зависят от многих случайных факторов. Например, время обнаружения повреждения воздушной линии электропередачи и доставки на место повреждения ремонтной бригады определяется характером повреждения, его местом на линии, временем суток и состоянием погоды, укомплектованностью в данный момент бригады и т.д. Время ремонта – «глубиной» повреждения. Все эти случайные факторы и определяют вероятностный характер величины t_{bk} . Теория и опыт показывают, что распределение вероятности времени аварийного восстановления достаточно хорошо описывается экспоненциальным законом, т.е. в (2.22) и (2.23) $\mu_k = \text{const}$ и

$$G_{авк}(t_k) = 1 - e^{-\mu_k(t_k)}, \quad (2.23a)$$

$$\bar{t}_{bk} = \frac{1}{\mu_k}. \quad (2.24a)$$

Более того, часто допустимо принимать одинаковые законы после каждого повреждения, т.е. $\mu_k = \mu = \text{const}$.

На рис. 2.4 приведен закон $G_{ав}(t)$ для реальной линии 500 кВ (показан крестиками), определенный опытным путем, и построен теоретический экспоненциальный закон с тем же средним временем ремонта. Как видно, совпадение очень хорошее.

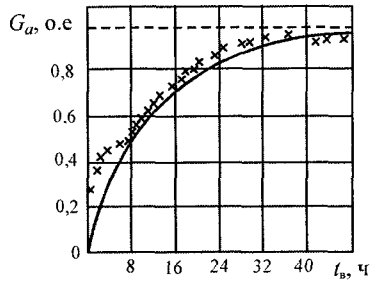


Рис. 2.4

Предупредительные (плановые) ремонты, в свою очередь, имеют разновидности: текущие, капитальные и различные ремонты, занимающие промежуточные положения между этими двумя (такие, как расширенные, средние и др.). Отличительная особенность всех их состоит в том, что момент наступления таких ремонтов не случайный, а намечается с заданной заблаговременностью; длительность же ремонтно-

го состояния определяется также вполне известным перечнем работ. Тем не менее считать характеристики предупредительных ремонтов строго детерминированными нельзя. Обычно момент вывода в ремонт может изменяться в зависимости от многих факторов. Например, вывод в предупредительный ремонт одной из двух питающих ЛЭП будет отложен, если вторая линия оказалась в это время в аварийном ремонте. В то же время длительность предупредительных ремонтов величина непостоянная. Действие таких факторов, как совершенствование техники проведения ремонтов, укомплектованность ремонтным персоналом и его квалификация, предшествующий режим работы оборудования и ряд других, в итоге приводит к тому, что время предупредительного ремонта приходится рассматривать тоже как случайную величину. Множество перечисленных факторов предопределяет на основе предельной теоремы Ляпунова нормальный закон распределения этого времени, что хорошо подтверждается и статистикой (рис. 2.5).

Таким образом, для характеристики длительности предупредительных ремонтов может быть введена

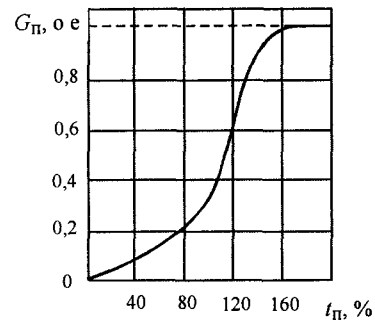


Рис. 2.5

величина $G_{пл}(t)$, аналогичная $G_{ав}(t)$, представляющая собой вероятность того, что время предупредительного ремонта $t_{пл}$ окажется меньше заданного t :

$$G_{пл}(t) = P(t_{пл} < t). \quad (2.25)$$

Практически часто используется среднее значение времени предупредительного ремонта

$$\bar{t}_{пл} = \int_0^{\infty} t \frac{dG_{пл}(t)}{dt} dt = \int_0^{\infty} t dG(t). \quad (2.26)$$

Аналогичны показатели и восстановления путем управления — управляемости.

Рассмотренные выше показатели восстанавливаемости относились к так называемым обычным, ординарным условиям.

В неординарных (особых) условиях следует ожидать, что время восстановления тоже будет иметь случайный характер. Однако в отличие от ординарных условий среднее время восстановления здесь может существенно зависеть от вида отказа, глубины повреждения.

ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ ПАРАГРАФА

1. Определить вероятность того, что восстановительный ремонт энергоблока 200 МВт после отказа будет выполнен: а) за 24 ч; б) 48 ч; в) 120 ч. Воспользоваться данными приложения, полагая, что время ремонта после отказа распределено по экспоненциальному закону.

Решение

В соответствии с табл. П.1.3 среднее время восстановления после отказа энергоблока 200 МВт составляет 45 часов, тогда:

- а) $G_{ав}(24 \text{ ч}) = 1 - e^{-0,022 \cdot 24} = 1 - e^{-0,533} = 1 - 0,587 = 0,413$;
- б) $G_{ав}(48 \text{ ч}) = 1 - e^{-0,022 \cdot 48} = 1 - e^{-1,067} = 1 - 0,344 = 0,656$;
- в) $G_{ав}(120 \text{ ч}) = 1 - e^{-0,022 \cdot 120} = 1 - e^{-2,64} = 1 - 0,071 = 0,929$.

2. Определить вероятность того, что плановый ремонт энергоблока 200 МВт будет выполнен: а) за один день; б) неделю; в) месяц, если среднеквадратичное отклонение времени планового ремонта от среднего составляет 10 % (от среднего)

Решение

Воспользуемся данными приложения Среднее время планового ремонта энергоблока 200 МВт составляет 155 ч. Тогда $\sigma_{пл} = 0,1 \cdot 155 = 15,5 \text{ ч}$ и

$$\text{а) } G_{пл} = \Phi\left(\frac{t - \bar{t}_{пл}}{\sigma_{пл}}\right) = \Phi\left(\frac{24 \cdot 1 - 155}{15,5}\right) = \Phi(-8,45) \approx 0;$$

$$б) G_n = \Phi\left(\frac{168-155}{15,5}\right) = \Phi(0,838) = 0,799;$$

$$в) G_n = \Phi\left(\frac{720-155}{15,5}\right) = \Phi(36,45) \cong 1.$$

3. Определить вероятность того, что поврежденный трансформатор 110 кВ мощностью 63 МВт будет восстановлен в течение: а) 5 ч; б) 70 ч; в) месяца.

4. Определить вероятность того, что длительность текущего ремонта трансформатора (по п. 3) окажется не более: а) 8 ч; б) 28 ч; в) месяца (принять, что среднеквадратичное отклонение времени текущего ремонта составляет 25 % от среднего).

5. Определить вероятность того, что воздушная двухцепная линия электропередачи 110 кВ на железобетонных опорах после повреждения обеих цепей будет восстановлена через: а) 5 ч; б) 14,8 ч; в) неделю.

6. Определить вероятность того, что воздушный выключатель 500 кВ после отказа будет восстановлен через: а) 5 ч; б) 60 ч; в) неделю.

7. Определить вероятность того, что длительность планового ремонта линии (см. п. 5) окажется не более чем: а) 8 ч; б) 13 ч; в) месяц (принять, что среднеквадратичное отклонение времени планового ремонта составляет 30 % от среднего).

8. Определить вероятность того, что длительность планового ремонта воздушного выключателя 500 кВ не превысит: а) 6 ч; б) 120 ч; в) недели (принять, что среднеквадратичное отклонение времени планового ремонта составляет 15 % от среднего).

§ 2.3. КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

АБСТРАКТНЫЙ ОБЪЕКТ

Рассматриваемые ниже показатели разработаны преимущественно для обычных ординарных условий, т.е. при вероятностном описании времен до отказов и восстановлений.

Если при рассмотрении безотказности и восстанавливаемости мы выделяли из общего потока отдельно потоки отказов и восстановлений соответственно, то теперь необходимо описать совместный поток отказов и восстановлений. Но и здесь целесообразно рассматривать сразу не весь поток всех отказов и восстановлений, а его составляющих.

Выделим сначала поток непредусмотренных отключений (отказов) и восстановлений. Для такого потока наиболее употребительными показателями являются нестационарный, стационарный и средний коэффициенты готовности.

Нестационарный коэффициент готовности – вероятность того, что объект окажется работоспособным в заданный момент вре-

мени t , отсчитываемый от начала работы, для которого известно начальное состояние этого объекта $Z_{нач}$:

$$K_r(t) = P(Z(t) = 1) \quad \text{при} \quad Z(0) = Z_{нач}. \quad (2.27)$$

Коэффициент готовности (стационарный) – вероятность того, что восстанавливаемый объект окажется работоспособным в произвольно выбранный момент времени в установившемся процессе эксплуатации

$$K_r = \lim_{t \rightarrow \infty} K_r(t). \quad (2.28)$$

Средний коэффициент готовности – усредненное на заданном интервале времени $[t_1, t_2]$ значение нестационарного коэффициента готовности

$$\bar{K}_r(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} K_r(x) dx. \quad (2.29)$$

Величины, дополняющие все рассмотренные коэффициенты готовности до единицы, обычно называют соответствующими коэффициентами неготовности (q).

Иногда применяют для рассматриваемого потока такие показатели, как нестационарный, стационарный и средний коэффициенты оперативной готовности.

Нестационарный коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что объект, находясь в режиме ожидания, окажется работоспособным в заданный момент времени t , отсчитываемый от начала работы, и начиная с этого момента времени будет работать безотказно в течение заданного интервала времени Δt :

$$K_{ог}(t, \Delta t) = K_r(t) P_0(t, \Delta t).$$

Коэффициент оперативной готовности (стационарный) – вероятность того, что восстанавливаемый объект окажется работоспособным в произвольный удаленный момент времени и с этого момента времени будет работать безотказно в течение заданного интервала времени Δt :

$$K_{ог} = K_r P_0(t, \Delta t). \quad (2.30)$$

Средний коэффициент оперативной готовности – усредненное на заданном интервале времени $[t_1, t_2]$ значение нестационарного коэффициента оперативной готовности

$$K_{ог}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} K_{ог}(t, x) dx. \quad (2.31)$$

Естественно, что все эти показатели связаны с единичными показателями (свойств безотказности и восстанавливаемости) и могут быть определены через них. Однако эти связывающие выражения в общем виде получаются крайне сложными и громоздкими. Но для случая простейшего потока (ординарного, стационарного и без последствия) они достаточно простые, что и показано ниже.

Начнем с нестационарного коэффициента готовности. При данном потоке объект в каждый момент времени может находиться в двух состояниях: работоспособном и неработоспособном (аварийном). Если в момент t он находится в работоспособном состоянии, то через небольшой интервал времени Δt он может остаться в этом же состоянии или в результате отказа перейти в неработоспособное состояние. Если же в момент t объект находится в неработоспособном состоянии, то при условии его восстановления за промежуток Δt он перейдет в работоспособное состояние. В противном случае он останется в неработоспособном состоянии. На рис. 2.6 показаны возможные состояния объекта и переходы между ними.

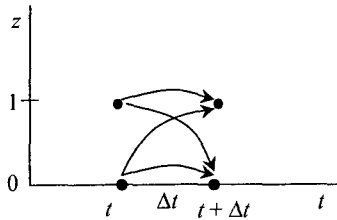


Рис 2.6

Нестационарный коэффициент готовности в момент времени $t + \Delta t$ на основании теоремы полной вероятности и рис. 2.6 можно записать как

$$K_r(t + \Delta t) = K_r(t) P_0(\Delta t) + [1 - K_r(t)] G(\Delta t),$$

где $P_0(\Delta t)$ – вероятность безотказной работы объекта за время Δt .

При стационарном ординарном потоке отказов (интенсивность отказа $\lambda = \text{const}$) в соответствии с (2.8) и (2.11)

$$P_0(\Delta t) = e^{-\lambda \Delta t},$$

$G(\Delta t)$ – вероятность восстановления объекта за время Δt . Аналогично в соответствии с (2.23) и (2.23а) при $\mu = \text{const}$

$$G(\Delta t) = 1 - e^{-\mu \Delta t}.$$

Разложив два последних выражения в ряд по малой величине Δt и пренебрегая малыми величинами второго и выше порядков

$$P_0(\Delta t) = 1 - \lambda \Delta t + \dots,$$

$$G(\Delta t) = 1 - 1 + \mu \Delta t + \dots = \mu \Delta t \dots,$$

можно записать

$$K_r(t + \Delta t) = K_r(t) (1 - \lambda \Delta t) + [1 - K_r(t)] \mu \Delta t,$$

или

$$K_r(t + \Delta t) - K_r(t) = -(\lambda + \mu) K_r(t) \Delta t + \mu \Delta t.$$

Если разделить обе части равенства на Δt и перейти к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, получим уравнение

$$\frac{dK_r(t)}{dt} + (\lambda + \mu) K_r(t) = \mu,$$

решение которого при $K_r(0) = 1$ имеет вид

$$K_r(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t}. \quad (2.27a)$$

Нестационарный коэффициент неготовности определяется как

$$q(t) = 1 - K_r(t) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} (1 - e^{-(\mu + \lambda)t}). \quad (2.32)$$

Графически эти зависимости имеют вид, представленный на рис. 2.7.

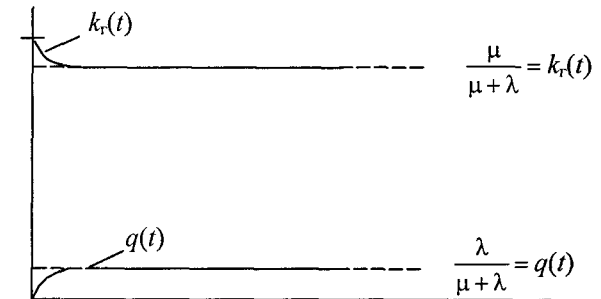


Рис 2.7

Коэффициент готовности (стационарный) в соответствии с (2.28) найдем как

$$K_r = \lim_{t \rightarrow \infty} K_r(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} = \frac{\bar{t}_0}{\bar{t}_0 + \bar{t}_B}, \quad (2.28a)$$

а коэффициент неготовности

$$q = 1 - K_r = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} = \frac{\bar{t}_B}{\bar{t}_0 + \bar{t}_B}. \quad (2.32a)$$

Средний коэффициент готовности на интервале $[0, t]$ в соответствии с (2.29)

$$\bar{K}_r(0, t) = \frac{1}{t} \int_0^t K_r(t) dt = \left[1 + \frac{\lambda}{(\mu + \lambda)\mu t} (1 - e^{-(\mu + \lambda)t}) \right] K_r. \quad (2.29a)$$

Соответственно средний коэффициент неготовности

$$q(0, t) = \left[1 - \frac{1}{(\mu + \lambda)t} (1 - e^{-(\mu + \lambda)t}) \right] q = \alpha q. \quad (2.33)$$

Коэффициент $\alpha \leq 1$ может быть аппроксимирован выражением

$$\alpha \approx \frac{\mu t}{1,7 + \mu t} = \frac{1}{1 + 1,7 \frac{t_b}{t}}. \quad (2.34)$$

Как видно, средний коэффициент неготовности существенно отличается от стационарного коэффициента неготовности только на интервалах меньших среднего времени восстановления объекта и близких к нему. При больших временах осреднения он быстро приближается к стационарному коэффициенту.

Выражения (2.28a) и (2.32a) показывают, что стационарные коэффициенты готовности и неготовности представляют собой относительные времена нахождения объекта соответственно в работоспособном и неработоспособном состояниях. Это значительно упрощает практическое определение их для реальных объектов из опыта эксплуатации.

Можно строго доказать, что выражение (2.28a) для коэффициента готовности через среднюю наработку на отказ и среднее время ремонта справедливо не только для простейшего потока, но и для любого другого.

Нестационарный коэффициент оперативной готовности

$$K_{ог}(t, \Delta t) = \left[\frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t} \right] e^{-\lambda \Delta t}. \quad (2.35)$$

Коэффициент оперативной готовности

$$K_{ог} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} e^{-\lambda \Delta t}. \quad (2.36)$$

Реальные потоки отказов (отключений) и восстановлений сложнее рассмотренного двухуровневого потока. Как минимум в него вклинивается еще поток плановых (преднамеренных) отключений объекта и проведение плановых ремонтов.

Основным используемым показателем при таком потоке является коэффициент технического использования – отношение средней наработки объекта за некоторый период эксплуатации $\bar{t}_{н\Sigma}$ к сумме средних значений наработки, времени простоя, обусловленного техническим обслуживанием, и времени ремонтов за тот же период эксплуатации (плановых $\bar{t}_{п\Sigma}$ и аварийных $\bar{t}_{ав\Sigma}$)

$$K_{тн} = \frac{\bar{t}_{н\Sigma}}{\bar{t}_{н\Sigma} + \bar{t}_{п\Sigma} + \bar{t}_{ав\Sigma}}. \quad (2.37)$$

В практике часто используется также показатель, аналогичный стационарному коэффициенту готовности, но отражающий относительное время нахождения объекта не в состоянии аварийного ремонта, а в состоянии планового ремонта

$$K_{пл} = \frac{\bar{t}_{п\Sigma}}{\bar{t}_{н\Sigma} + \bar{t}_{п\Sigma} + \bar{t}_{ав\Sigma}}. \quad (2.38)$$

Этот показатель пока не получил какого-либо узаконенного названия-термина. Поэтому в дальнейшем будем его обозначать как **коэффициент плановых простоев**.

Оба последних показателя характеризуют относительную длительность соответствующих состояний. Но при определенных условиях они могут трактоваться и как вероятности нахождения объекта в этих состояниях.

Все рассмотренные выше показатели выявлялись на основе анализа потока отказов и восстановлений, развернутого на оси времени. Реально могут иметь место случаи, когда тот или иной поток разворачивается и на другой оси (не временной). Так, например, отказы коммутационной аппаратуры, релейной защиты и автоматики часто удобно рассматривать на оси «требований к срабатыванию». Тогда такой показатель, как средняя частота отказов, переходит в вероятность отказа на требование (отказ/требование). Нарботка будет измеряться количеством правильных срабатываний до отказа и т.д.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ

Переход от абстрактных объектов вообще к анализу энергетической системы расширяет круг показателей надежности, форма и содержание которых определяются решаемыми задачами и используемыми критериями эффективности. Однако, как правило, все они могут быть сформированы на основе рассматриваемых выше общих показателей с дополнением специфики энергетики. Поскольку множество энергетических задач достаточно велико и открыто, вряд ли можно задать все возможное здесь количество показателей. Исключение могут составить лишь три наиболее часто используемых показателя бесперебойности энергоснабжения: дефицит мощности, недоотпуск энергии и ущерб.

Оценка недоотпуска энергии. При этом могут возникнуть два случая: 1) при эксплуатации энергетической системы, когда происходит отказ работающей системы; 2) при отказе, который еще не наступил, но имеется определенная вероятность появления его как в функционирующей системе, так и в проектируемой.

В первом случае предполагается известным график нагрузки электропотребителя в день его аварийного отключения $W_H(t)$. Обычно он строится на основе графиков аналогичных дней предыдущего периода (рис. 2.8). Если отказ произошел в момент t_0 , а восстановление длилось t_B , то возникает дефицит мощности $D(t)$.

$$D(t) = W_H(t) - W_R,$$

где W_R – сохраненная (резервирующая) мощность.

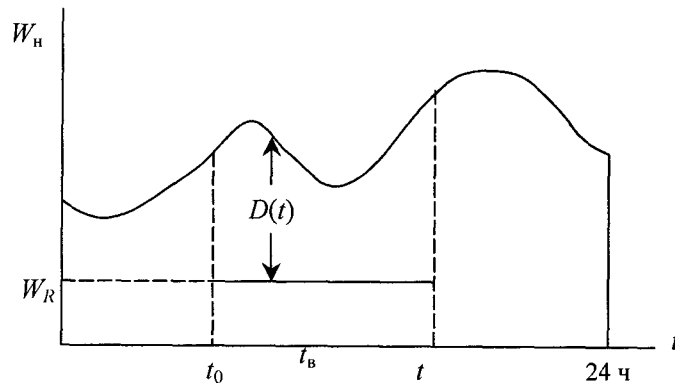


Рис. 2.8

Недоотпуск энергии определится как

$$\Delta \mathcal{E} = \int_{t_0}^{t_0+t_B} D(t) dt, \quad (2.39)$$

при $W_H(t) \geq W_R$, а при $W_H(t) < W_R$ $D(t) = 0$.

Если график нагрузки задан ступенчатой аппроксимацией с часовыми интервалами, то

$$\Delta \mathcal{E} = \sum_{t=t_0}^{t_0+t_B} D_i. \quad (2.39a)$$

Во втором случае время возможного наступления отказа не известно. В этих условиях предполагается, что его появление равновероятно в любой момент времени рассматриваемого периода работы системы. Если это не так, тогда период разбивается на более мелкие периоды, в пределах которых допущение о равновероятности отказа становится приемлемым.

Случайный характер отказа во времени и случайное время восстановления делают случайными величинами возникающий дефицит мощности и недоотпуск энергии

$$\tilde{D}(t) = \begin{cases} W_H(t) - W_R(t) & \text{при } W_H(t) \geq W_R(t) \\ 0 & \text{при } W_H(t) < W_R(t) \end{cases} = \tilde{D}(t_0, t). \quad (2.40)$$

$$\tilde{\mathcal{E}}_{\text{ед}} = \int_{t_0}^{t_0+t_B} \tilde{D}(t) dt = \Delta \tilde{\mathcal{E}}_{\text{ед}}(t_0, t_B), \quad (2.41)$$

где t_0, t_B – случайные величины, а индекс «ед» означает недоотпуск энергии при данном, единичном отказе.

В практике обычно используется среднее значение недоотпуска энергии, возникающее при отказе на интервале от 0 до T , среднее и максимальное значения дефицита мощности

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ед}} = M \left[\Delta \tilde{\mathcal{E}}_{\text{ед}} \right] = \int_{t_0=0}^T \int_{t_B=0}^T \Delta \tilde{\mathcal{E}}_{\text{ед}}(t_0, t_B) f(t_0) g(t_B) dt_0 dt_B, \quad (2.42)$$

где $g(t_B) = \frac{dG(t)}{dt}$ и $f(t_0) = \frac{1}{T}$ – соответственно плотность распределения вероятности времени восстановления и плотность равномерного распределения времени наступления отказа t_0 .

Если средняя частота таких отказов составляет ω , то за период T средний недоотпуск энергии определится как

$$\Delta \mathcal{E}_T = \Delta \mathcal{E}_{\text{ед}} \omega T K_T. \quad (2.43)$$

Для возможности расчетов всех этих величин необходимо описание графиков (режимов) нагрузки потребителей.

В зависимости от решаемых задач имеются различные способы их представления. Один из самых распространенных способов – календарные графики: суточные, недельные, годовые.

Суточные – зависимость нагрузки от времени суток (рис. 2.9) – обычно представляются в виде суммы двух составляющих: регулярной (средней) и нерегулярной слагаемых.

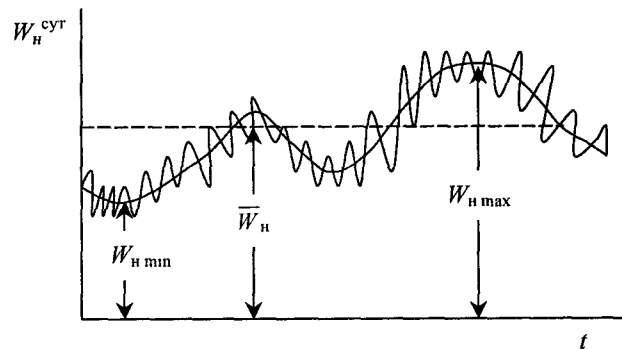


Рис. 2.9

Наиболее часто используемыми показателями таких графиков являются:

- регулярный максимум $W_{n \max}^{\text{сут}}$;
- регулярный минимум $W_{n \min}^{\text{сут}}$;
- суточная энергия $\mathcal{E}_{\text{сут}}$ или суточная плотность графика

$$\beta^{\text{сут}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{сут}}}{W_{n \max} \cdot 24};$$

- средняя мощность $\overline{W}_n^{\text{сут}}$

$$\overline{W}_n^{\text{сут}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{сут}}}{24};$$

- среднее квадратичное отклонение нерегулярной составляющей σ_n , которая на основе экспериментальных данных может быть оценена как $\sigma_n = 0,005 W_n + 0,63 W_n^{1/2}$, где σ_n, W_n измеряются в мегаваттах (МВт).

Недельные графики нагрузки – зависимость максимальных (или средних) нагрузок суток от дней недели (рис. 2.10).

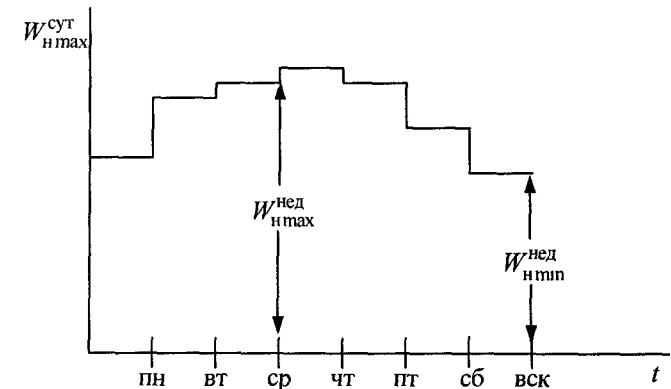


Рис. 2.10

Наиболее часто используемые показатели:

- наибольшая максимальная (средняя) нагрузка недели (рабочего дня) $W_{n \max}^{\text{нед}}$;
- наименьшая максимальная (средняя) нагрузка недели (выходного дня) $W_{n \min}^{\text{нед}}$;
- недельная энергия $\mathcal{E}_{\text{нед}}$.

Годовые графики нагрузки – зависимость максимальных (или средних) недельных или месячных максимумов от недели или месяца года (рис. 2.11).

Наиболее часто используемые показатели:

- максимальная регулярная нагрузка года $W_{n \max}^{\text{год}}$;
- годовое потребление энергии $\mathcal{E}_{\text{год}}$;
- число часов использования максимума T_m

$$T_m = \frac{\mathcal{E}_{\text{год}}}{W_{n \max}^{\text{год}}}.$$

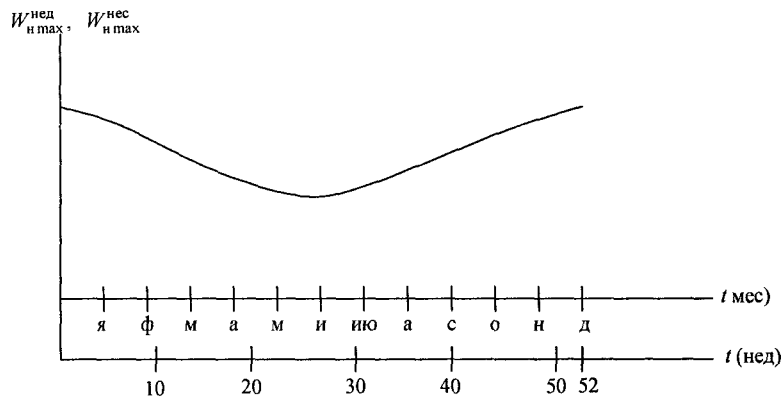


Рис. 2.11

Во многих задачах удобно использовать графики не календарные, а графики по продолжительности, представляющие собой зависимость нагрузки больше заданной от ее суммарной длительности (рис. 2.12).

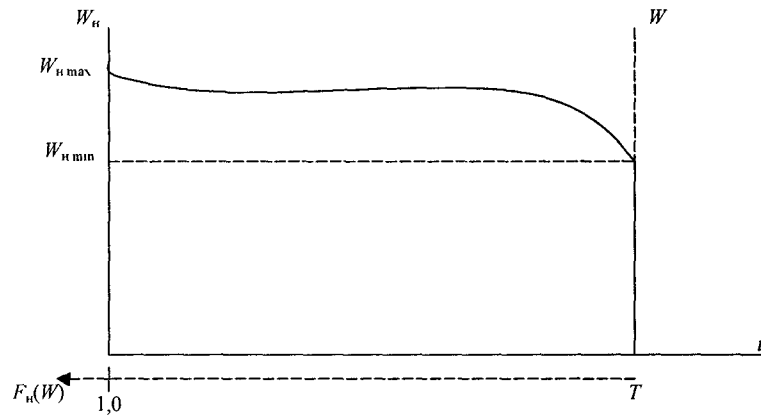


Рис. 2.12

Для этих графиков используются те же показатели, что и для календарных графиков в зависимости от рассматриваемого периода T (сутки, неделя, год).

График по продолжительности интересен еще и тем, что он может рассматриваться как вероятностное описание нагрузки. Действительно, если на рис. 2.12 ввести новую систему координат, по-

казанную пунктиром, по одной оси которой откладывается время, но в относительных единицах (весь период T принимается за единицу), а по другой оси – текущая нагрузка W_n , то мы получим интегральную характеристику распределения вероятностей нагрузки, т.е. вероятность того, что нагрузка W_n окажется не больше заданной W

$$F_n(W) = P(W_n \leq W). \quad (2.44)$$

Здесь относительная длительность той или иной нагрузки может рассматриваться как вероятность, а величина нагрузки как случайная величина, если нас не интересует момент наступления этой нагрузки и последовательность разных значений ее.

При таком описании режима потребления мощности средний дефицит мощности, возникающий при отказе с резервированием мощностью W_R , можно определить как

$$\bar{D} = \int_{W_R}^{W_{n\max}} W_n dF_n(W_n), \quad (2.45)$$

а средний недоотпуск энергии

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ед}} = \bar{D} \bar{t}_B. \quad (2.46)$$

Для использования полученных выражений (2.40) – (2.46) необходимо располагать количественными характеристиками режима потребления мощности. Но, как правило, информация о предстоящих перспективных режимах потребителей имеется очень скудная. Обычно это данные о максимальной годовой заявленной мощности $W_{n\max}$ и годовом энергопотреблении $\mathcal{E}_{\text{год}}$. В такой ситуации целесообразно аппроксимировать характеристики режима мощностей некоторыми теоретическими законами. Так, часто закон распределения вероятностей $F_n(W)$ очень близок к нормальному или усеченно-нормальному. Для такого закона достаточно располагать всего лишь двумя параметрами: средним значением мощности \bar{W}_n и среднеквадратичным отклонением σ_n . Первый можно определить как

$$\bar{W}_n = \frac{\mathcal{E}_{\text{год}}}{8760} = \frac{T_m}{8760} W_{n\max} = \beta W_{n\max}, \quad (2.47)$$

где $\beta = \frac{T_m}{8760}$ – плотность годового графика.

Второй параметр σ_n можно определить для нормального закона по правилу трех сигм:

$$\sigma_n = \frac{1-\beta}{3} W_{n\max}. \quad (2.48)$$

Для усеченных нормальных законов σ_n уже будет иной, как правило, большей величиной. Исследования показывают, что обычно

$$\sigma_n = (0,33 - 0,55)(1 - \beta)W_{n\max} \quad (2.49)$$

При аппроксимации закона (2.44) нормальным

$$\bar{D} = \sigma_n h, \quad (2.50)$$

где

$$h = \varphi(\eta) + \eta\Phi(\eta), \quad (2.51)$$

$$\eta = \frac{\bar{W}_n - W_R}{\sigma_n}, \quad (2.52)$$

а $\varphi(x)$ и $\Phi(x)$ – дифференциальная и интегральная функции Лапласа, значения которых приведены в приложении 3 при $m = 0$ и $\sigma = 1$,

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

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_0^x e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx$$

Зависимость (2.51) показана на рис. 2.13. Недоотпуск энергии определится как

$$\Delta\mathcal{E}_{\text{ед}} = \bar{D}_v \bar{t}_v = \sigma_n h \bar{t}_v, \quad (2.53)$$

а за период T

$$\Delta\mathcal{E}_I = \sigma_n h \bar{t}_v \omega TK_r = \sigma_n h q T \quad (2.54)$$

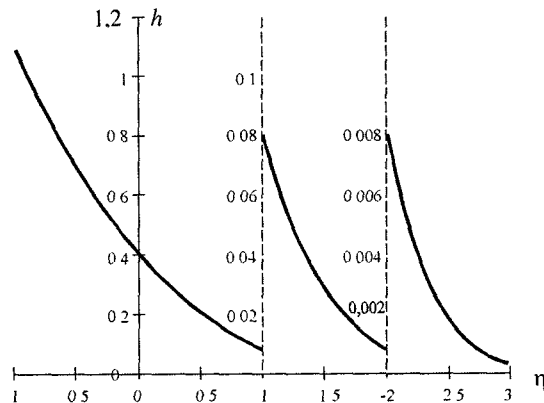


Рис. 2.13

Оценка ущерба от ненадежности. Этот показатель является наиболее комплексным показателем бесперебойности электроснабжения. Он характеризует интегрально все свойства объекта, включая режим его загрузки и значимость потребителя энергии. Обычно важность каждого потребителя характеризуется величиной удельного ущерба, возникающего при ограничении (отключении) его в мощности и энергии, который в общем случае можно представить в виде двух составляющих: ущерб из-за внезапного отключения мощности ($y_{\text{вн}}$, руб/кВт·ч) и из-за недоотпуска энергии (y_0 , руб/кВт). Более подробно см. ниже, в гл. 4.

В конечном счете возникающий ущерб определяется как

$$Y_{\text{ед}} = y_{\text{вн}} \bar{D} + y_0 \Delta\mathcal{E}_{\text{ед}}, \quad (2.55)$$

$$Y_r = y_{\text{вн}} \bar{D} \omega TK_r + y_0 \Delta\mathcal{E}_T. \quad (2.56)$$

В рассмотренных выше способах оценки комплексных показателей (D , $\Delta\mathcal{E}$, Y) принималось, что величина W_R детерминированная. Во многих задачах в действительности она может носить вероятностный характер, что усложнит расчетные формулы. Но это уже предмет решения конкретных задач.

В заключение этой главы следует еще раз отметить, что рассмотрены основные, наиболее часто используемые показатели надежности. Возможно, что решение каких-то специфических задач потребует введения и других показателей. Выбор показателей во многом зависит от назначения объекта, системы, от функций, выполняемых ими, степени важности или ответственности этих функций и других факторов.

Тем не менее, выбирая показатели, следует иметь в виду некоторые простые и очевидные рекомендации:

- общее число показателей надежности должно быть по возможности минимальным;
- следует избегать сложных комплексных показателей;
- выбранные показатели надежности должны иметь простой физический смысл;
- выбранные показатели надежности должны допускать возможность проведения подтверждающих (поверочных) оценок на этапе проектирования (аналитических расчетов, имитационного моделирования и т. п.) и допускать возможность опытной оценки при проведении специальных испытаний или по результатам эксплуатации;

• выбранные показатели должны позволять включать их в критерии эффективности, по которым принимаются решения об уровне надежности, допускать задания норм надежности в количественной форме.

ЗАДАЧИ ПО ТЕМЕ ПАРАГРАФА

1. Система имеет среднюю наработку между отказами, равную 300 ч, и среднее время восстановления 9 ч. Чему равны значения коэффициента готовности и относительной длительности аварийного простоя?

2. Элемент системы имеет экспоненциальные законы распределения времени работы и времени восстановления с интенсивностями $0,3 \cdot 10^{-3}$ 1/ч и $1,2 \cdot 10^{-2}$ 1/ч соответственно. Найти:

- 1) вероятность безотказной работы и вероятность отказа за время $t = 100$, 500, 1000 ч;
- 2) среднее время безотказной работы и среднее время восстановления;
- 3) частоту (плотность вероятности) отказов;
- 4) коэффициент готовности и неготовности.

3. Система управления имеет среднюю наработку между отказами около 800 ч, а среднее время восстановления 8 ч. В результате улучшения контроля и диагностики системы удалось увеличить среднее время между отказами на 250 ч, а время восстановления сократить вдвое. Определить изменение в коэффициенте неготовности, вызванное этими мероприятиями.

Решение

Коэффициент неготовности до улучшения контроля и диагностики –

$$q_0 = \frac{\bar{t}_B}{\bar{t}_B + \bar{t}_0} = \frac{8}{8 + 800} = 0,0099;$$

коэффициент неготовности после указанных мероприятий

$$q_0 = \frac{\bar{t}_B \cdot 0,5}{\bar{t}_B \cdot 0,5 + \bar{t}_0 + 250} = \frac{8 \cdot 0,5}{8 \cdot 0,5 + 800 + 250} = 0,00380.$$

Как видно, коэффициент неготовности уменьшился более чем в два раза.

4. Определить нестационарные коэффициенты готовности и неготовности линии электропередачи 500 кВ длиной 250 км на металлических опорах, значения этих коэффициентов в первый момент после включения отремонтированной линии в работу и установившиеся значения, а также определить время, в течение которого коэффициент неготовности достигнет 95 % от установившегося.

Решение

В соответствии с данными, приведенными в приложении, удельная частота отказов линии 500 кВ на металлических опорах (на 100 км) составляет $\omega_0 = 0,2$ отказ/год, а среднее время восстановления 14,0 ч.

На основании (2.27а)

$$K_{\Gamma}(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t};$$

$$K_{\Gamma} = \frac{1}{\omega} = \frac{8760}{14,0} = 612,6, \quad \lambda = \omega_0 \frac{l}{100} = 0,2 \frac{250}{100} = 0,5;$$

$$K_{\Gamma}(t) = \frac{612,6}{612,6 + 0,5} + \frac{0,5}{612,6 + 0,5} e^{-(612,6 + 0,5)t} = 0,9991 + 0,0009 e^{-613,1t};$$

$$K_{\Gamma}(0) = 1, \quad K_{\Gamma}(\infty) = 0,9991;$$

$$q(t) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} (1 - e^{-(\mu + \lambda)t}) = 0,0009 (1 - e^{-613,1t});$$

$$q(0) = 0 \quad q(\infty) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} = 0,0009;$$

$$q(t_x) = 0,95 q(\infty) = 0,95 \cdot 0,0009 = 0,00085 \rightarrow t_x \approx 0,005 \text{ года} \approx 44 \text{ ч.}$$

Как видно, почти установившееся значение коэффициента неготовности ВЛ-500 кВ достигается достаточно быстро, через 44 ч при среднем времени до

отказа $\bar{t}_0 = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{0,5} = 2,0$ года = 17520 ч.

5. Решить задачу, аналогичную предыдущей, но для такого объекта, как трехфазный трансформатор 500 кВ мощностью 250 МВА.

6. Решить задачу, аналогичную предыдущим, но для энергоблока 200 МВт.

7. Коэффициент готовности объекта составляет 0,95, времена до отказа и восстановления распределены по экспоненциальным законам. Среднее время восстановления объекта 48 ч. Определить вероятность того, что объект проработает без отказа в течение: а) месяца, б) полугода, в) года (до текущего ремонта), г) четырех лет (до капитального ремонта).

Решение

Согласно (2.28а)

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

откуда среднее время до отказа

$$\bar{t}_0 = \frac{K_{\Gamma} \bar{t}_B}{1 - K_{\Gamma}} = \frac{0,95}{1 - 0,95} \cdot 48 = 912 \text{ ч.}$$

Интенсивность отказа

$$\lambda = \frac{1}{\bar{t}_0} = \frac{1}{912} = 0,0011 \frac{\text{отказ}}{\text{ч}} = \frac{8760}{912} = 9,6 \frac{\text{отказ}}{\text{год}},$$

$$P_0(t) = e^{-\lambda t} = e^{-9,6t};$$

- а) $P_0(\text{месяца}) = e^{-9,6 \frac{1}{12}} = e^{-0,8} = 0,45$;
 б) $P_0(0,5 \text{ года}) = e^{-9,6 \cdot 0,5} = e^{-4,8} = 0,0082$;
 в) $P_0(1) = e^{-9,6 \cdot 1} = e^{-9,6} = 0,000068$;
 г) $P_0(4) = e^{-9,6 \cdot 4} = e^{-38,4} = 2 \cdot 10^{-17}$.

Как видно, объект практически не сможет проработать без отказа в течение года.

8 Вы сдали на хранение в банк свои сбережения. Какова вероятность того, что, придя в любой необходимый вам день в банк за деньгами, вы не сможете их сразу получить, если вам требуется. а) 1000 руб., б) 10000 руб., в) 100000 руб.? Какова вероятность их получения через день? Известно, что среднее время заблаговременности (дни) заявки на получение денег в банке D (тыс. руб.) может быть представлена зависимостью $\bar{t} = 0,05D$, а коэффициент готовности обслужить клиента (выдать деньги) сразу же по его запросу

$$K_r = e^{-0,03D} .$$

Решение

Время \bar{t} является по существу средним временем восстановления. Будем полагать, что оно – случайная величина, распределенная по экспоненциальному закону.

- а) Вероятность получения сразу вклада в 1000 руб.

$$K_r = e^{-0,03 \cdot 1} = 0,97 .$$

С вероятностью $1 - 0,97 = 0,03$ его можно не получить, а вероятность получения через день будет

$$G(t) = 1 - e^{-\mu t} ,$$

где $\mu = \frac{1}{\bar{t}} = \frac{1}{0,05 \cdot 1} = 20$ и $G(1) = 1 - e^{-20 \cdot 1} = 0,999999998$, т.е. практически гарантировано.

- б) $K_r = e^{-0,03 \cdot 10} = e^{-0,3} = 0,74$,

$$\mu = \frac{1}{\bar{t}} = \frac{1}{0,05 \cdot 10} = 2 \text{ и } G(1) = 1 - e^{-2 \cdot 1} = 0,8646 ;$$

- в) $K_r = e^{-0,03 \cdot 100} = e^{-3} = 0,0498$,

$$\mu = \frac{1}{\bar{t}} = \frac{1}{0,05 \cdot 100} = 0,2 \text{ и } G(1) = 1 - e^{-0,2 \cdot 1} = 0,1813 .$$

9. Энергоагрегат на электростанции работает уже несколько месяцев без отказов. Частота отказов его $\omega = 6$ /год (6 раз в год), а среднее время восстановления 50 ч. Определить вероятность того, что начальник смены, выйдя на работу, не будет заниматься ремонтом этого агрегата.

Решение

Вероятность искомого события определяется вероятностью застать в начале смены агрегат работающим и вероятностью, что в течение смены отказа не произойдет, т.е. коэффициентом оперативной готовности (2.36)

$$K_{ог} = K_r P_0(t_{\text{смен}}) = K_r e^{-\omega t_{\text{смен}}} ;$$

$$K_r = \frac{\mu}{\omega + \mu} \quad \mu = \frac{1}{\bar{t}_R} = \frac{8760}{50} = 175,2 ;$$

$$K_r = \frac{175,2}{6 + 175,2} = 0,967 ;$$

$$K_{ог} = 0,967 e^{-6 \frac{8}{8760}} = 0,967 e^{-0,0055} = 0,967 \cdot 0,9945 = 0,9617 .$$

10. Какова вероятность того, что начальник района электрических сетей 220 кВ общей протяженностью 1400 км, придя на работу, не будет заниматься аварийными ремонтами в течение всего своего рабочего дня (по причине отсутствия отказавших линий).

11. Определить коэффициент технического использования энергоблока ТЭС мощностью: а) 800 МВт, б) 500 МВт.

Решение

Вспользуемся данными приложения:

- а) Известно, что для блока 800 МВт $\omega = 15,6 \frac{1}{\text{год}}$, $\bar{t}_B = 74$ ч, среднее время

планового простоя 277 ч, а частота – $5,1 \frac{1}{\text{год}}$.

Согласно (2.37)

$$K_{тн} = \frac{\bar{t}_H \Sigma}{\bar{t}_H \Sigma + \bar{t}_N \Sigma + \bar{t}_{ав} \Sigma} .$$

За год $\bar{t}_{ав} \Sigma = \omega \bar{t}_B = 15,6 \frac{74}{8760} = 0,132$ года,

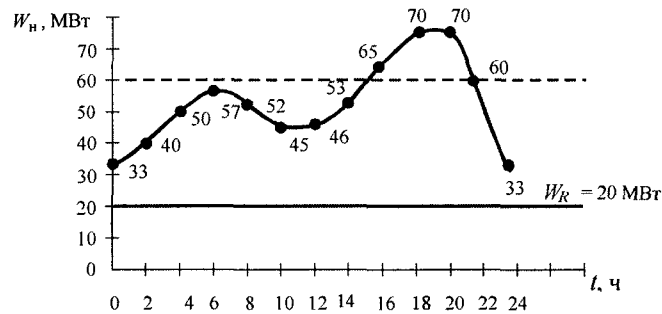
$$\bar{t}_N \Sigma = \omega_{пл} \bar{t}_{пл} = 5,1 \frac{277}{8760} = 0,161 ,$$

$$\bar{t}_H \Sigma = 1 - \bar{t}_{ав} \Sigma - \bar{t}_N \Sigma = 1 - 0,132 - 0,161 = 0,707 .$$

Итого $K_{тн} = 0,707$.

12. Определить коэффициент готовности и коэффициент технического использования трансформатора мощностью 60 МВА подстанции 110 кВ.

13. Определить недоотпуск электроэнергии на предприятии, суточный график которого показан на рисунке.



Предприятие ограничено по мощности с 12 до 16 ч; ограничение было неполным, обеспечивалось 20 МВт. Ожидаемые среднечасовые нагрузки показаны на графике.

14. Для условий предыдущей задачи (п. 13) определить недоотпуск электроэнергии, если:

- ограничение мощности происходило с 22 до 2 ч ночи (минимально возможный недоотпуск);
- ограничение мощности произошло с 17 по 21 ч вечера (максимально возможный недоотпуск);
- ограничение мощности происходило при средней нагрузке потребителя (среднее значение недоотпуска энергии).

Решение

Для случая «в» определим среднюю нагрузку потребителя (осредняя двухчасовые интервалы):

$$\bar{W}_n = \frac{2}{24}(37,5 + 45 + 53,5 + 54,5 + 48,5 + 45,5 + 49,5 + 58 + 61,5 + 70 + 65 + 46,5) = \frac{2}{24}641 = 53,4.$$

Средний недоотпуск энергии (при $W_R < W_{n \min}$)

$$\Delta \mathcal{E} = (\bar{W}_n - W_R)t_B = (53,4 - 20)4 = 133,6 \text{ МВт}\cdot\text{ч}.$$

Для случаев «а» и «б» были получены цифры:

а) $\Delta \mathcal{E}_{\min} = 88 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$ и б) $\Delta \mathcal{E}_{\max} = 190 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$.

Как видно, среднее значение лежит посередине между этими крайними значениями.

15. Для условий предыдущих задач оценить ожидаемый недоотпуск энергии упрощенным способом (аппроксимируя график нагрузки по продолжительности нормальным законом), если момент наступления отказа не известен.

Решение

Используя (2.53), (2.51), (2.52), (2.49), получаем

$$\Delta \mathcal{E} = \sigma_n h t_B = 5,5 \cdot 6,07 \cdot 4 \cdot 9,1 \cdot 3,67 \cdot 4 = 133,5 \dots 133,6 ;$$

$$h = \varphi(\eta) + \eta \varphi(\eta) = 6,07 \dots 3,67 \quad (\text{при } \eta > 1, h = \eta) ;$$

$$\eta = \frac{\bar{W}_n - W_R}{\sigma_n} = \frac{53,4 - 20}{5,5 \dots 9,1} = 6,07 \dots 3,67 ;$$

$$\begin{aligned} \sigma_n &= (0,33 \dots 0,55)(1 - \beta)W_{n \max} = (0,33 \dots 0,55)\left(1 - \frac{\bar{W}_n}{W_{n \max}}\right)W_{n \max} = \\ &= (0,33 \dots 0,55)\left(1 - \frac{53,4}{70}\right)70 = 5,5 \dots 9,1 \text{ МВт}. \end{aligned}$$

Как видно, упрощенный способ дал практически совпадающие результаты (со значением среднего недоотпуска в задаче 14).

При больших значениях резервной мощности, близких к максимальной нагрузке, погрешность может существенно возрасти (см. ниже).

16. Для условий предыдущей задачи оценить недоотпуск энергии, если величина резервной мощности станет равной $W_R = 60 \text{ МВт}$.

Решение

Здесь сразу будем определять по графику среднее значение дефицита за сутки с 2-часовым осреднением графика:

$$\bar{D}_{\text{ед}} = \frac{1}{24}[(70 - 60)2 + (70 - 60)2 + (65 - 60)2] = 2,08 \text{ МВт}.$$

Недоотпуск энергии составит

$$\Delta \mathcal{E} = \bar{D} t_B = 2,08 \cdot 4 = 8,32 \text{ МВт}\cdot\text{ч}.$$

Оценим эту же величину по упрощенному выражению (2.53):

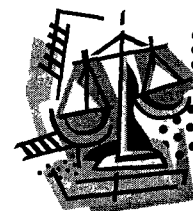
$$\Delta \mathcal{E} = \sigma_n h t_B = (5,5 \dots 9,1)(0,055 \dots 0,13)4 = 1,21 \dots 4,73 \text{ МВт}\cdot\text{ч},$$

$$\eta = \frac{\bar{W}_n - W_R}{\sigma_n} = \frac{53,4 - 60}{5,5 \dots 9,1} = -(1,2 \dots 0,73).$$

Как видно, погрешность существенно возросла, поскольку здесь сильное влияние оказывает конфигурация графика. Однако если информация о графике нагрузки неопределенная, такая оценка вполне приемлема.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 2

- 1 В чем различие между показателем и критерием надежности, эффективности?
- 2 Какие показатели называют единичными, а какие – комплексными?
- 3 В чем различие между структурно-функциональными и вероятностными показателями надежности?
- 4 Нарисуйте примерный вид «вероятности безотказной работы»
- 5 Как связаны между собой показатели «вероятность безотказной работы» и «интенсивность отказа»?
- 6 Что называют характеристикой жизни объекта и какой вид она имеет?
- 7 Что представляет собой показатель «средняя наработка до отказа» и как она определяется?
- 8 Что представляют собой показатели «частота отказов» и «средняя наработка на отказ» и какая связь существует между ними?
- 9 Как связаны между собой показатели «интенсивность отказа», «вероятность безотказной работы», «средняя наработка до отказа», «вероятность k отказов за время t » при простейшем потоке отказов и восстановлений?
- 10 Что представляют собой показатели «технический ресурс» и «средний ресурс»?
- 11 Какими показателями можно характеризовать свойство «восстанавливаемость»?
- 12 Какие вероятностные законы более близки для распределения времени аварийного восстановления и для распределения времени планового восстановления?
- 13 Что представляет собой «коэффициент готовности»?
- 14 Как связан «коэффициент готовности» с единичными показателями?
- 15 Что представляет собой «коэффициент технического использования»?
- 16 Какие специфические показатели надежности используются для характеристики «бесперебойность»?



ГЛАВА 3

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Под определением надежности здесь понимается нахождение показателей надежности объекта, системы по отношению к выполняемой (или выполняемым) ими функции (функциям), которые позволяют в практической деятельности принимать рациональные решения.

§3.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ

Обычно определение показателей надежности формулируется как задача анализа, т.е. нахождение показателей для заданного объекта, хотя, в конечном итоге, как правило, решается задача синтеза. В этом случае определение надежности рассматривается при решении конкретных задач, когда сформулированы критерии, заданы средства, ресурсы. Множество таких задач велико, практически не ограничено. В общем виде решение не найдено, что и предопределило в общетеоретической части настоящей книги рассмотрение методов определения надежности как задачи анализа.

Но и здесь имеется достаточно большое множество методов, которые также разрабатывались под различные задачи. Обобщение их на абстрактный объект позволило сократить это множество. Рассмотрение его целесообразно начать с классификации методов. При этом классификация возможна на различных основаниях. Многие авторы используют такие основания, как:

- восстанавливаемость объекта [1, 16 и др.];
- структура системы (последовательное, параллельное, смешанное соединение элементов в системе и т.п.) [1, 2, 3, 16 и др.];
- используемый математический аппарат (аналитический, графоаналитический, имитационный и т.д.) [3, 16 и др.];
- характер исходной информации и возможность ее получения и др.

Без сомнения, все перечисленные аспекты являются важными. Но не менее важны их структуризация и классификация. Представляется, что психологически важно начать классификацию всех методов по характеру используемой информации, возможностям ее получения. Тогда все методы определения надежности можно подразделить на методы *прогнозирования, экспериментальные и расчетные*.

Под *прогнозированием* надежности понимается предсказание значений показателей надежности в условиях неполноты информации о составе объекта, характеристиках его составляющих, о предполагающихся условиях его функционирования и т.п.

Под *экспериментальным* методом понимается метод опытного определения надежности реальных объектов, когда объект и условия, в которых он функционирует, известны исследователям с достаточной полнотой и при необходимости могут целенаправленно изменяться.

Под *расчетом надежности* понимается метод получения численных показателей надежности объекта по известным характеристикам надежности его элементов, по известному их структурному и функциональному взаимодействию.

Хотя все три группы методов имеют принципиально различную основу, но, в конечном счете, они все применяются в совокупности, дополняя друг друга. Например, пусть поставлена задача определить надежность энергосистемы, которая будет формироваться из существующей путем добавления каких-то элементов (новых электростанций, линий электропередачи, подстанций и т.п.). С одной стороны, раз имеется действующая энергосистема, можно было бы применить экспериментальный метод. Но, во-первых, энергосистема постоянно изменяется (наращивается, развивается), а во-вторых, надежность энергосистем обычно весьма высокая. Поэтому для получения необходимой информации потребуется очень большой период. Так что в прямом виде экспериментальный метод неприменим.

Но если энергосистему представить как систему, состоящую из групп однотипных элементов (линий электропередач, трансформаторов, коммутационной аппаратуры, генераторов и т.п.), то, поскольку таких элементов много, надежность их ниже, чем надежность энергосистемы целиком, здесь уже применим экспериментальный метод по отношению к элементам системы.

Таким образом, используя экспериментальный метод к элементам энергосистемы, мы можем определить их фактическую надежность. Далее, если в перспективе эти элементы как-то будут изменяться (совершенствоваться, модернизироваться), будут меняться условия их работы или появляться новые, то здесь могут быть успешно применены методы прогнозирования. В итоге мы будем располагать информацией об элементах будущей системы, их связях, о структуре системы. В этих условиях наиболее эффективен для использования становится расчетный метод.

Следовательно, поставленная задача, по существу, может быть решена только на основе совместного использования всех трех групп методов определения надежности.

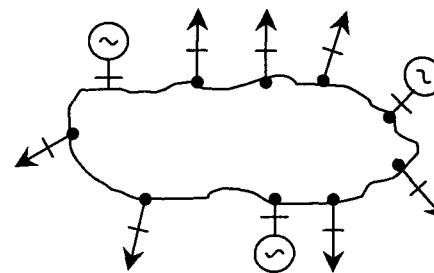
Переходя к рассмотрению этих групп, необходимо отметить, что методы прогнозирования надежности базируются на достаточно хорошо разработанной общеметодологической основе прогнозирования вообще и каких-либо существенных специфических особенностей применительно к задаче надежности энергосистем не имеют.

По уровню информационной обеспеченности метод прогнозирования также может быть подразделен на экспертные, экстраполяции, моделирования. В каждом из них имеется также ряд методов, способов их реализации (например, метод комиссий, анкет и т.д.). Более подробно с ними можно познакомиться в [28].

В связи с изложенным далее рассматриваются лишь экспериментальные и расчетные методы.

ЗАДАЧИ ПО ТЕМЕ ПАРАГРАФА

1 На рисунке представлена упрощенно электрическая сеть, которая передает мощность и энергию от генерирующих компаний к потребителям, показанным выходящими из сети стрелками. Сколько функций у электрической сети?



Ответ. Как минимум столько, сколько узлов потребления. Каждый узел потребления характеризуется своими показателями надежности.

Почему «как минимум»? Это зависит от того, как определены в договоре функции электрической сети. «Как минимум» будет в том случае, когда электросетевое предприятие обязуется снабжать электроэнергией своих потребителей, т.е. закупать ее у электростанций и транспортировать до потребителей. Если же функции электрической сети определены только как транспортировка электрической энергии от электростанций до потребителей, то количество функций возрастает (кратно количеству электростанций). Ведь теперь надо различать функцию транспорта электроэнергии от каждой электростанции к каждому потребительскому узлу сети и соответственно для каждого такого канала определять показатели надежности.

2. Вы приобрели дорогие и модные наручные часы. Сколько функций у этого объекта? Можно предположить, что их как минимум две: одна – показывать текущее время, другая – демонстрировать Вашу состоятельность и современность (говорят современный человек, следит за модой...).

Часы могут быть еще более многофункциональными (будильник, калькулятор, фонарик...). По каждой из функций имеются свои показатели надежности (по первой функции – вероятность того, что часы не идут или идут с недопустимой погрешностью, не ремонтируются или плохо ремонтируются вне заводских условий и т.д.; по второй функции – вероятность того, что мода на такие часы уже начинает проходить, стали появляться в продаже новые и т.д.).

3. Какие функции выполняют ваши руки? Какими показателями надежности, по вашему мнению, удобно или целесообразно характеризовать эти функции?

4. Сколько функций у Центробанка РФ? Какими показателями надежности целесообразно характеризовать эти функции?

5. Вы проектируете электрическую сеть с новым элементом (например, с новой линией, представляющей собой линию постоянного тока при условии, что до этого сеть состояла только из трехфазных линий переменного тока). Какими методами вы будете находить показатели надежности проектируемой сети?

6. Проектируется батарея конденсаторов для установки ее в электрической сети из совершенно новых (не имеющих аналогов) конденсаторных «банок». Какие функции может выполнять такая батарея? Определите возможный объем выполнения этих функций. Какими методами вы бы определяли показатели надежности этой батареи?

§ 3.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Показатели надежности этими методами могут быть получены по результатам либо испытаний – специальных или совмещенных, либо наблюдением за функционированием объекта в условиях эксплуатации, т.е. методы подразделяются на *методы испытаний* на надежность (специальные, совмещенные) и на *методы наблюдения*.

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Эти методы организуются специально с целью определения показателей надежности, объем их обычно заранее планируется, условия функционирования объектов устанавливаются исходя из требований оценки конкретных показателей. Такие испытания, как

правило, применяются для изделий, выпускаемых в достаточно большом количестве. Проводить специальные испытания для сложных объектов, систем во многих случаях не представляется возможным, так как объем выпуска обычно ограничен единицами экземпляров, а процесс изготовления, отладки, проверки функционирования и доводки занимает слишком много времени и дорогостоящий. Показатели надежности таких объектов оцениваются в основном либо по результатам совмещенных испытаний, при которых определение показателей согласовывается с экспериментальным исследованием других параметров объекта, либо по наблюдениям на этапе эксплуатации.

Методы испытаний, в свою очередь, подразделяются на *исследовательские* (*определятельные*) и *контрольные*. Исследовательские испытания на надежность проводятся для выявления фактических значений показателей надежности. Контрольные испытания – для проверки соответствия показателей надежности объектов требованиям (стандарта, технического задания, технических условий).

Исследовательские и контрольные методы имеют существенные отличия. При сопоставимых требованиях к точности и достоверности необходимый объем испытаний при контрольной постановке может быть значительно меньше, чем при определятельной, в случае, если истинное значение показателя надежности объекта мало отличается от необходимого уровня. Кроме того, у этих методов заметно различаются этапы планирования эксперимента.

Планирование при контрольных испытаниях опирается на требуемое значение показателя надежности. В результате планирования определяют необходимый объем испытаний и оценочный норматив – решающее правило, по которому принимается решение о соответствии или несоответствии объекта заданному требованию. Следовательно, ошибка в планировании контрольной процедуры в принципе не может быть выявлена в результате испытаний, и, таким образом, корректность планирования непосредственно определяет достоверность искомого заключения.

При планировании определятельной (исследовательской) процедуры принципиально невозможно однозначно указать необходимый объем испытаний, так как точность оценок показателей надежности при заданной достоверности зависит не от объема испытаний, а от объема получаемой при испытании информации. Исходя из требуемых точности и достоверности оценок, в результате планирования исследовательской процедуры получают не объем испытаний, а минимально необходимое число информативных реализаций.

Требуемый объем испытаний – число изделий (или число опытов) и продолжительность испытаний – зависит от фактической надежности объекта, которая до испытания не известна. Следовательно, необходимый объем испытаний при планировании исследовательской процедуры может быть определен лишь ориентировочно, исходя из предполагаемого уровня надежности объекта. Однако ошибки в планировании объема испытаний выявляются в процессе испытаний при обработке их результатов и могут быть скорректированы.

Экспериментальные методы требуют значительных затрат времени. Сокращение времени (ускорение) может быть достигнуто применением либо специальных методов планирования и обработки, либо форсированных режимов испытаний. При форсированных режимах испытаний ускорение достигается ужесточением режимов с целью набора необходимого количества статистической информации за более короткое время. Применение форсированных испытаний требует большой подготовительной работы: выбора эффективных ускоряющих факторов, исследования степени их влияния и т.п. Кроме того, остается задача «обратного» пересчета полученной информации к «нормальным условиям». Испытания в форсированных режимах целесообразны, прежде всего, для контроля надежности серийных изделий, выпускаемых по неизменной технологии длительное время.

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Иногда эти методы еще называют ретроспективными. Они представляют собой извлечение и обработку информации из анализа работы действующих объектов. Стоимость работ, связанных с оценкой надежности эксплуатируемого оборудования этими методами, в отличие от стоимости испытаний на надежность минимальна. В основном это затраты на сбор и обработку статистических данных.

Длительность наблюдения и массив статистических данных определяются продолжительностью всего процесса эксплуатации и общим количеством действующих объектов. Основные трудности этого метода получения показателей надежности состоят в том, что процесс функционирования объектов не зависит от наблюдателя, который должен суметь извлечь объективную информацию о надежности объектов по записям, выполненным большим числом разных наблюдателей.

В общем случае при эксплуатации объектов могут изменяться условия работы, режимы загрузки и т.п. Поэтому возникает задача не просто оценить фиксированные значения показателей надежности, а установить зависимость этих показателей от условий и параметров работы объекта. При формировании такого рода зависимостей влияющие факторы должны быть представлены какими-либо укрупненными, но достаточно представительными показателями. Количество показателей зависит в первую очередь от сложности объекта. Например, для воздушной ЛЭП заданного класса напряжения при получении ее характерных показателей надежности ω и \bar{t}_B достаточно учесть материал опор и географическое расположение; для ЭЭС при характеристике надежности интегральным показателем в виде аварийного недоотпуска энергии или ущерба достаточно учесть плотность графика нагрузки, величину резерва генерирующей мощности и его включенную составляющую, загрузку слабых межсистемных связей и т.п.

Для получения этих зависимостей наиболее эффективно использование математических методов регрессионного и дисперсионного анализа [29 и др.].

Одной из главных задач, возникающих при использовании ретроспективных методов, наряду с рассмотренной (оценкой погрешности показателей надежности) является связанная с ней задача проверки однородности различных выборок и их объединения. Суть последней состоит в следующем. Если из собранной информации (выборок) о надежности однотипных объектов, работающих в разных частях системы (в общем случае в разных условиях), следует, что они имеют различные точечные статистические оценки показателей надежности, то возникает вопрос, можно ли эти расхождения считать существенными, значимыми, или их следует приписать случайностям выборок. Ответ на этот вопрос очень важен. Действительно, если эти расхождения случайные, то выборки однородные, принадлежат одной генеральной совокупности, и информацию можно объединить, в результате повысится точность оценки показателей надежности. В теории вероятностей и математической статистике разработаны методы (метод статистических гипотез) и критерии, которые позволяют решить эту задачу [30 и др.].

При обработке экспериментальных данных отмеченные различия методов испытания и наблюдения несущественны, поэтому рассматриваемые ниже подходы и методы обработки данных относятся ко всем экспериментальным методам.

ТИПЫ ОЦЕНИВАЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ХАРАКТЕР АПРИОРНЫХ СВЕДЕНИЙ

Результаты испытаний (наблюдений), «очищенные» предварительным анализом, подлежат статистической обработке. Последняя сводится к оценке параметров функций распределения случайных величин, определяющих искомые показатели надежности, т.е. к традиционной задаче математической статистики.

Возможность и целесообразность использования того или иного метода обработки, ее трудоемкость и качество получаемых оценок существенно зависят от типа оцениваемого показателя надежности, объема априорных сведений о наблюдаемой величине, характера статистического материала, которым располагает исследователь.

При экспериментальной оценке показателей надежности многие задачи независимо от конкретного содержания имеют одинаковый алгоритм решения, так как для этапа статистической обработки не существенно:

- какое из свойств исследуется – безотказность, долговечность, ремонтпригодность или другие;
- обрабатываются ли результаты испытаний (специальных или совмещенных) или результаты наблюдений в процессе эксплуатации;
- производится восстановление отказавших изделий или их замена новыми;
- какими единицами измеряется наработка – количеством часов, циклов работы, срабатываний, банок, отливок, отпечатанных знаков и т.п., мерами длины (провода, пряжи, пробега автомобиля) или мерами объема (жидкости, раствора, грунта).

Наиболее существенными для этапа статистической обработки факторами являются:

- типы оцениваемых показателей надежности;
- характер априорных сведений о наблюдаемой случайной величине;
- характер статистического материала при различных стратегиях испытаний.

При экспериментальных оценках надежности независимо от того, какое свойство исследуется, все многообразие оцениваемых показателей сводится к показателям двух типов:

- показатели типа наработки – средняя, или γ -процентная (наработка до отказа, между отказами, до предельного состояния, срок хранения, время восстановления и т.п.);

- показатели типа вероятности (безотказной работы, исправного состояния в произвольный момент, восстановления за заданное время и т.д.).

При определении показателей типа наработки непосредственно наблюдаемыми величинами являются случайные интервалы: наработки до отказа, между отказами, до предельного состояния, времени восстановления, времени хранения до отказа и т.п.

При определении показателей типа вероятности непосредственно наблюдаемыми случайными величинами являются числа событий в испытаниях: число отказов, число восстановлений, число предельных состояний и т.д.

С точки зрения характера априорных сведений о функции распределения все многообразие практических задач сводится, по существу, к следующим двум вариантам.

1. Вид функции распределения наблюдаемой случайной величины известен априори. Задача статистической обработки – получить оценки для показателей надежности с учетом вида функции распределения и характера имеющегося статистического материала.

2. Вид функции распределения наблюдаемой случайной величины неизвестен или известен лишь предположительно. В этом случае на основании анализа процессов, приводящих к отказам, опыта эксплуатации аналогичных изделий и предварительного анализа полученной при испытаниях информации (например, по виду гистограммы) принимается некоторая гипотеза о виде функции распределения. Задача обработки – проверить, не противоречат ли экспериментальные данные принятой гипотезе, и оценить параметры этой функции распределения.

В такой постановке необходима подробная информация о наблюдаемой случайной величине, а процесс статистической обработки в качестве обязательных должен включать следующие этапы:

- построение вариационного ряда;
- построение гистограммы;
- принятие гипотезы о виде функции распределения;
- оценку точечных значений параметров (для функции распределения предполагаемого типа);
- проверку непротиворечивости экспериментальных данных принятой гипотезе о функции распределения.

В случае положительных результатов предыдущего этапа может быть проведена оценка интервальных значений параметров функции распределения (показателей надежности); в случае отрицательных результатов процедуры проверки гипотезы процесс статистической обработки повторяется, начиная с этапа принятия гипотезы при другом предположении о виде функции распределения.

Если вид функции распределения не отвергнут результатами проверки, то в остальной процедуры определения точечных и интервальных оценок параметров в обоих вариантах постановок задач практически совпадают.

Особым является случай, когда оценка параметров распределения не производится – требуется оценить непосредственно значение функции распределения в некоторой фиксированной точке, т.е. оценить показатель типа вероятности. Например: вероятность отказа или безотказной работы для фиксированной наработки; вероятность восстановления или невозможности восстановления за фиксированное время; вероятность наступления предельного состояния при заданной наработке; вероятность сохранения или несохранения определенных показателей качества при хранении объекта в течение заданного времени. Задача такого типа в математической статистике носит название непараметрической.

Этот случай является наиболее простым с точки зрения организации испытаний (наблюдений), трудоемкости сбора и статистической обработки информации. Здесь испытания каждого изделия проводятся в течение фиксированного времени (наработки) не обязательно по всем изделиям одновременно. Контроль функционирования может быть осуществлен только перед началом и по окончании испытаний. Подлежащие статистической обработке результаты испытаний при этом представляют собой только два числа – общее число испытаний фиксированной длительности (число опытов) и число успешных или неуспешных опытов. Естественно, что при этом получаемая в результате статистической обработки оценка несет лишь минимальную информацию – значение функции распределения в единственной точке, соответствующей фиксированной наработке при испытаниях (наблюдениях). За исключением полученного значения функции, в этой точке мы не имеем никакой другой информации и не должны экстраполировать оценку для других значений наработки.

СТРАТЕГИИ ИСПЫТАНИЙ

На практике в большинстве случаев нет возможности так организовать испытания, чтобы получить экспериментальные данные по надежности необходимого вида и в достаточном объеме. Обычно задача заключается в том, чтобы оценить показатели надежности по тому статистическому материалу, который имеется. На характер статистического материала существенное влияние оказывает стратегия испытаний (или режим эксплуатации):

- число изделий, подвергаемых испытаниям;
 - порядок контроля функционирования в процессе испытаний (наблюдений);
 - порядок восстановления (замены) изделий;
 - порядок поступления изделий на испытания;
 - критерий окончания испытаний (наблюдений).
- Реально перечисленные факторы можно существенно варьировать в зависимости от конкретных условий, например:
- испытания одного изделия или группы изделий;
 - контроль непрерывный или периодический либо только перед началом и по окончании испытаний;
 - испытания с восстановлением (заменой) отказавших изделий либо без восстановления (замены);
 - одновременное испытание всех изделий либо неодновременное;
 - испытания до отказа всех изделий либо до фиксированного числа отказов, либо до истечения фиксированного времени (наработки).

На практике различные сочетания этих факторов являются причиной большого разнообразия реальных стратегий испытаний.

В настоящее время общеприняты следующие условные обозначения основных факторов испытаний: N – число изделий; U – отсутствие замены или восстановления; R – замена отказавших изделий; M – восстановление отказавших изделий; T – испытания (наблюдения) оканчиваются по истечении фиксированного отрезка времени (наработки); g – испытания (наблюдения) оканчиваются по достижении фиксированного числа реализаций (отказов, восстановлений).

В этих обозначениях конкретная стратегия испытаний обычно записывается сочетанием трех соответствующих символов, например $[NUT]$, $[NRT]$ и т.д. При этом предполагается, что изделия подвергаются испытаниям одновременно и контроль осуществляется непрерывно. Поскольку на практике эти условия зачастую не выполняются, ниже используются дополнительно следующие обозначения для реальных стратегий испытаний.

Если изделия поступают на испытания одновременно или снимаются с испытаний в произвольные моменты по каким-либо посторонним причинам, то такие нежесткие стратегии обозначают так же, но заключают не в квадратные, а в круглые скобки. Если при испытаниях контроль производится периодически, через определенные интервалы времени (наработки), то соответствующее условное обозначение заключают в двойные скобки (круглые или

квадратные), например ((NUT)) – испытываются N изделий, отказавшие изделия не заменяются и не восстанавливаются, контроль производится периодически, испытания оканчиваются по истечении фиксированного отрезка времени (наработки), изделия могут поступать на испытания или сниматься с испытаний по каким-то причинам в произвольные моменты времени.

Наконец, испытания по так называемой непараметрической схеме, когда каждое из N изделий испытывается в течение фиксированной наработки T , а контроль производится только перед началом и по окончании испытаний, обозначают фигурными скобками: {NUT}. Эта схема испытаний является предельным случаем периодического контроля. При таком контроле отказавшие изделия выявляются только после окончания испытаний, следовательно, вопрос о замене или восстановлении отказавших изделий в процессе испытаний не возникает.

Перечисленные выше факторы испытаний и соответствующие условные обозначения сведены в табл. 3.1. Классификация стратегий испытаний в условных обозначениях табл. 3.1, с точки зрения организационного аспекта испытаний (наблюдений), не отражает однозначно характер получаемого статистического материала. Между тем при некоторых формально различных стратегиях испытаний характер статистического материала получается одинаковым, и, следовательно, количество типов выборок в действительности значительно меньше количества стратегий испытаний.

Таблица 3.1

Факторы, характеризующие стратегию испытаний, и их условные обозначения

Фактор, характеризующий стратегию испытаний	Условное обозначение	
Число испытываемых изделий	Одно	1
	Более одного	N
Возможность восстановления (замены) изделий при испытаниях	Не восстанавливаются и не заменяются	U
	Не восстанавливаются, но заменяются	R
	Восстанавливаются	M
Критерий прекращения испытаний	Нарботка	T
	Число отказов	r
	Нарботка или число отказов	r, T
Порядок поступления изделий на испытания	Одновременно	[]
	Неодновременно	()
Режим контроля функционирования изделий при испытаниях	Непрерывно	[] или ()
	Периодически	[] или (())
	Только перед началом и по окончании испытаний	{ }

С точки зрения характера статистического материала при любых стратегиях испытаний получают только три типа случайных величин (реализаций), составляющих выборку:

- 1) наработки до отказа (или наработки между отказами, или наработки до предельного состояния), и время от начала до окончания восстановления или время хранения до отказа;
- 2) безотказные наработки,
- 3) наработки к моменту контроля, при котором обнаружен отказ (в случае отсутствия непрерывного контроля).

С учетом реального смысла этих величин ниже они называются соответственно: полные реализации, неполные реализации, условные реализации – и имеют следующие графические обозначения: —X— полная реализация; —●— неполная реализация; —|— условная реализация.

Если испытания (наблюдения) ведутся до фиксированного числа отказов, то отказ, совпадающий с моментом окончания испытаний, отмечается дополнительно кружком и соответствующая полная реализация обозначается —⊗—. В этих обозначениях результат любого испытания на надежность (выборка) может быть представлен графически соответствующим набором реализаций – диаграммой реализации. Такая диаграмма наглядно и однозначно отражает специфику получаемого статистического материала (тип выборки). При этом появляется возможность выявить ряд типовых диаграмм реализаций, к которым сводятся результаты многих реальных стратегий испытаний.

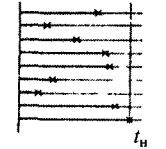
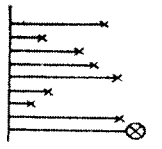
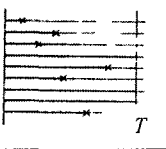
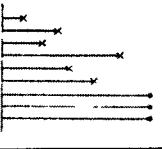
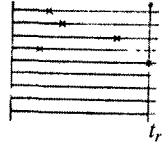
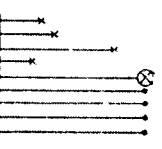
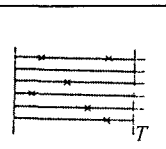
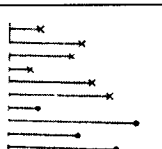
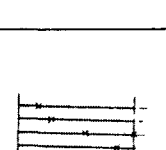
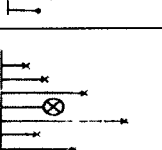
В крупном плане экспериментальные данные разделяются на два типа: тип 1 – экспериментальные данные, получаемые при стратегиях с непрерывным контролем; тип 2 – экспериментальные данные, получаемые при стратегиях с периодическим контролем.

Диаграммы реализаций для испытаний (наблюдений) с непрерывным контролем приведены в табл. 3.2 В частности, при стратегии [NUN] результаты испытаний содержат только полные реализации, причем момент последнего отказа является моментом окончания испытаний. Получаемая при этом выборка (тип 1А) служит примером экспериментальных данных классического типа – «полная выборка». Неодновременное поступление изделий на испытания (эксплуатацию) в данном случае не вносит принципиальных изменений в характер получаемой информации, так как при данной стратегии «по определению» каждое изделие, будучи поставлено на испытания, испытывается (или наблюдается) до отказа. Аналогичные по характеру результаты (r полных реализаций) получают и при стратегии [1Rr] – испытания одного изделия с восстановлением до фиксированного числа отказов r.

При стратегии [NUT], если, например, N_1 изделий отказали, то результаты испытаний содержат N_1 полных реализаций, значения которых не превышают длительности испытаний T и $N - N_1$ одинаковых неполных реализаций (выборка типа 1Б). Такой же характер имеет выборка типа 1В, с той лишь разницей, что в этом случае момент окончания испытаний совпадает с моментом отказа. Выборки типов 1Б и 1В служат примерами так называемой усеченной выборки, или, точнее, однократно усеченной сверху. Как видно из табл. 3.2, наиболее общим случаем для испытаний с непрерывным контролем являются выборки типов 1Г и 1Д – многократно усеченные выборки

Таблица 3.2

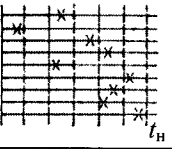
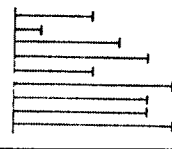
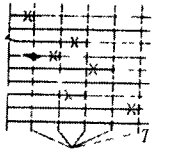
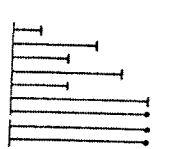
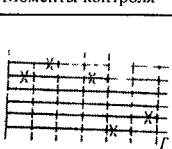
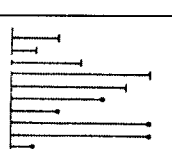
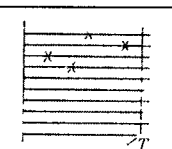
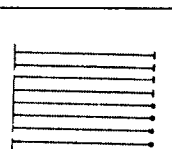
**Типы экспериментальных данных
при непрерывном контроле функционирования**

Условное обозначение стратегии испытаний	Схема процесса испытаний	Диаграмма реализаций	Условное обозначение типа диаграммы (тип выборки)	Стратегии, дающие аналогичные диаграммы
[NUN]			1А	[1Mг] [1Rг] (NUN)
[NUT]			1Б	(NUT)
[NUr]			1В	—
[NRT]			1Г	[NMT] (NMT) (NRT)
[NRr]			1Д	[NMr] (NMr) (NRr) (NUr)

Результаты классификации экспериментальных данных для испытаний с периодическим контролем функционирования приведены в табл. 3.3. Если при испытаниях непрерывный контроль отсутствует, то непосредственно зафиксировать момент очередного отказа невозможно. Следовательно, основная особенность экспериментальных данных типа 2 состоит в том, что они содержат только условные и неполные реализации. Значения условных реализаций в этом случае определяются наработкой к моменту контроля, при котором обнаружен отказ. Значения неполных реализаций определяются безотказной наработкой каждого из испытываемых изделий к моменту последнего контроля. Поскольку при периодическом контроле непосредственно зафиксировать момент очередного отказа невозможно, то невозможно, строго говоря, и стратегии с фиксированным числом отказов. Они сводятся в данном случае к стратегиям с фиксированной наработкой.

Таблица 3.3

**Типы экспериментальных данных
при периодическом контроле функционирования**

Условное обозначение стратегии испытаний	Схема процесса испытаний	Диаграмма реализаций	Условное обозначение типа диаграммы (тип выборки)	Стратегии, дающие аналогичные диаграммы
[[NUN]]			2А	[[NMr]] [[1Rr]] (NUN) (NMr)
[[NUT]]			2Б	[[NUr]] (NUN)
[[NRT]]			2В	[[NRr]] [[NMT]] (NRr) (NMT) (NRT) (NUr)
{NUT}			1Г	—

Предельным случаем периодического контроля является стратегия {NUT}, при которой контроль функционирования производится только перед началом и по окончании испытаний. В данном случае испытания состоят из одного межконтрольного периода длительностью T и, следовательно, результаты испытаний содержат условные и неполные реализации одинаковой величины T .

Заметим в заключение, что комбинированные стратегии $[NU(r,T)]$, $[NR(r,T)]$, $[NM(r,T)]$ не вносят каких-либо особенностей в характер информации. Они дают информацию того или иного типа в пределах изложенной классификации в зависимости от того, как конкретно оканчиваются испытания – по достижении определенного числа отказов или по достижении определенной наработки.

Напомним, что здесь рассмотрены экспериментальные данные, получаемые при испытаниях на безотказность. При этом статистический материал отличается наибольшим разнообразием. Примерно такой же характер имеют экспериментальные данные, получаемые при исследовании показателей долговечности.

Оценка показателей ремонтпригодности имеет ряд особенностей, существенно влияющих на характер получаемого статистического материала. Во-первых, в большинстве случаев имеется возможность введения искусственных неисправностей, и, поскольку время восстановления обычно значительно меньше, чем время безотказной работы, гораздо проще набрать необходимое число реализаций. Во-вторых, данные о времени восстановления обычно содержат информацию о моменте начала и моменте окончания восстановления, что соответствует случаю непрерывного контроля при исследовании показателей безотказности. Поэтому в экспериментальных данных отсутствуют условные и неполные реализации. Следовательно, при оценке показателей ремонтпригодности приходится иметь дело, как правило, с выборкой типа 1А.

При исследовании показателей сохраняемости характерны данные типа 2, так как контроль исправности изделия в условиях хранения может быть осуществлен, как правило, только периодически.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Различают точечные и интервальные оценки показателей надежности.

Точечная оценка показателей. Известные методы точечных оценок можно условно разделить на две группы:

- аналитические (метод максимального правдоподобия, метод моментов, метод квантилей и др.);
- графические (с использованием вероятностных бумаг и номограмм).

При обработке конкретных результатов испытаний очень существенным является вопрос применимости и критериев предпочтения того или иного метода.

Известно, что формальными критериями качества точечных оценок являются: состоятельность, несмещенность, эффективность. Напомним, что оценка считается состоятельной, если она сходится (по вероятности) к истинному значению оцениваемого параметра с увеличением объема выборки. Оценка называется несмещенной, если ее математическое ожидание равно истинному значению оцениваемого параметра. Несмещенность означает отсутствие систематической ошибки. Из двух

состоятельных и несмещенных оценок лучшей является та, которая имеет меньшую дисперсию. Оценка считается эффективной, если она обладает наименьшей дисперсией по сравнению с любыми другими несмещенными оценками.

Ясно, что лучшей является состоятельная несмещенная и эффективная оценка, однако такие оценки могут быть получены не для всех статистических данных. Поэтому выбор метода оценки не всегда диктуется соображениями ее качества, а во многих случаях – теми данными, которыми мы располагаем: наличием априорных сведений о функции распределения и характером полученного статистического материала (типом выборки). При выборе методов оценки необходимо также иметь в виду следующее обстоятельство.

Характерной особенностью работ при экспериментальной оценке показателей надежности является повышенная опасность грубых ошибок. Как показывает практика, такие ошибки возникают даже при корректном (формально) использовании строгого аналитического аппарата и в силу этого остаются в большинстве случаев неосознанными. В частности, для статистической информации о надежности сравнительно высока вероятность попадания в выборку аномальных реализаций – как результат ошибки, например, либо в фиксации момента отказа, либо при классификации отказов. Поскольку аналитические методы оценок исходят из доверия к каждому элементу выборки, они, естественно, не чувствительны к такому засорению. Напротив, универсальность и наглядность графических методов позволяют исключить, по крайней мере, грубые ошибки. Поэтому применительно к обработке результатов испытаний на надежность в условиях малого объема статистической информации, низкой ее достоверности и лишь ориентировочных сведений о виде распределения исследуемой случайной величины графические методы приобретают особое значение.

Если вид функции распределения априори известен, то для получения точечных оценок параметров распределений и показателей надежности может быть использован один из методов, описанных ниже.

Метод моментов. Идея метода моментов состоит в том, что моменты распределения, зависящие от неизвестных параметров, приравниваются к эмпирическим моментам. Взяв число моментов равным числу неизвестных параметров, получаем необходимое число уравнений.

Использование метода моментов основано на том, что если число отказов и достаточно велико, то в силу закона больших чисел значения эмпирических моментов близки к теоретическим.

Эмпирическим моментом k -го порядка называется величина

$$I_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^k, \quad (3.1)$$

где t_i – зафиксированные при испытаниях, например, наработки между отказами (полные реализации); n – объем выборки (число полных реализаций).

Метод квантилей. Для получения оценок параметров этим методом используются так же, как и в методе моментов, уравнения, в которых квантиль теоретического распределения приравнивается к эмпирической квантилю. При этом используется столько эмпирических квантилей и соответственно уравнений, сколько параметров необходимо оценить.

Ясно, что метод квантилей более универсален относительно выборки, важно только уметь рассчитать для выборок различного типа значения эмпирической функции распределения.

Однако оценки, получаемые методом квантилей, обладают значительной дисперсией. В частности, для нормального распределения, если за оценку параметра a методом моментов принято выборочное среднее, а за оценку того же параметра методом квантилей принята медиана выборки (50%-я квантиль эмпирической функции распределения), то оценка, получаемая методом квантилей, в этом случае имеет в 1,6 раза большую дисперсию.

Метод максимального правдоподобия. Метод является универсальным и наиболее мощным с точки зрения эффективности оценок. Идея метода заключается в том, что для фиксированного результата эксперимента составляется функция правдоподобия, выражающая вероятность получить реализовавшийся в эксперименте результат. За искомые точечные оценки принимаются значения параметров, максимизирующие функцию правдоподобия.

Метод максимального правдоподобия наилучшим образом использует всю информацию, содержащуюся в экспериментальных данных. Однако в ряде случаев получение оценок связано с необходимостью решения громоздких уравнений.

В отечественной практике оценки максимального правдоподобия для параметров наиболее распространенных распределений регламентированы государственными стандартами.

В заключение отметим, что достоверность оценок, получаемых любым из аналитических методов, существенно зависит от достоверности сведений о виде функции распределения исследуемой случайной величины. Поэтому даже в том случае, когда вид функции распределения считается априори известным, настоятельно рекомендуется, прежде чем использовать какую-либо из формальных процедур для точечных оценок параметров, провести проверку согласия опытного распределения с теоретическим (априори заданным) по вероятностной бумаге.

Если вид функции распределения априори неизвестен, процедура статистической обработки должна предусматривать более детальное исследование выборки. Как уже отмечалось выше, это:

- построение вариационного ряда;
- построение гистограммы и функции интенсивности отказов (если позволяет объем выборки);
- оценка значений эмпирической функции распределения;
- предварительная оценка непротиворечивости экспериментальных данных принятому (гипотетическому) распределению по вероятностной бумаге;
- оценка точечных значений параметров (при положительном результате предыдущего этапа);
- оценка согласия опытного распределения с гипотетическим по количественному критерию.

После того как каким-либо из методов получены оценки для неизвестных параметров, можно перейти к следующему этапу математической обработки – процедуре проверки гипотезы о виде функции распределения.

Качественно такая оценка обычно делается на первых этапах статистической обработки информации. На заключительном этапе после оценки неизвестных параметров имеется возможность проверить гипотезу о законе распределения по количественному критерию. Для этих целей обычно используют критерии Пирсона (χ^2 -критерий) и Колмагорова.

Расчетные выражения для точечных оценок показателей. В итоге показатели надежности объекта могут быть экспериментальными методами оценены следующим образом (оцениваемые показатели обозначены с «крышечкой» сверху).

Вероятность безотказной работы

$$\hat{P}_0(t) = \frac{N(t)}{N(0)}, \quad (3.2)$$

где $N(0)$ – число наблюдаемых объектов в начале эксперимента, $N(t)$ – число оставшихся работоспособных объектов в момент времени t (объекты невосстанавливаемые).

Интенсивность отказа в момент времени t

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \Delta t}, \quad (3.3)$$

где Δt – небольшой интервал времени.

Средняя наработка до отказа:

- при стратегии испытания [NUN]

$$\hat{t}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N(0)} t_{oi}}{N(0)} \quad (3.4)$$

при стратегии испытания [NUT]

$$\hat{t}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N(0)-N(t)} t_{oi} + TN(t)}{N(0)}, \quad (3.5)$$

где t_{oi} – время до отказа i -го наблюдаемого объекта; T – время наблюдения.

Частота отказов на интервале $[t_1; t_2]$

$$\hat{\omega}(t_1, t_2) = \frac{\sum_{i=1}^{N(0)} m_i(t_2) - \sum_{i=1}^{N(0)} m_i(t_1)}{N(0) \cdot (t_2 - t_1)}, \quad (3.6)$$

где $m_i(t_1)$, $m_i(t_2)$ – число отказов i -го объекта до момента времени t_1 и t_2 соответственно.

Интенсивность восстановления

$$\hat{\mu}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{n(t) \Delta t}, \quad (3.7)$$

где $n(t + \Delta t)$, $n(t)$ – число объектов, восстановление которых длилось меньше $t + \Delta t$ и t соответственно.

Коэффициент готовности

$$\hat{K}_r = \frac{\sum_{i=1}^{N(0)} t_{0\Sigma i}}{N(0)T_{\text{раб}}}, \quad (3.8)$$

где $t_{0\Sigma i}$ – суммарное время пребывания i -го объекта в работоспособном состоянии за время $T_{\text{раб}}$, $T_{\text{раб}}$ – продолжительность наблюдения, включающая интервалы работоспособного состояния и ремонтов после отказов.

Если времена $T_{\text{раб}}$ различны для каждого из наблюдаемых объектов, то

$$\hat{K}_r = \frac{t_{\text{н}\Sigma}}{t_{\text{н}\Sigma} + t_{\text{в}\Sigma}}, \quad (3.9)$$

где $t_{\text{н}\Sigma}$ – суммарная наработка всех объектов; $t_{\text{в}\Sigma}$ – суммарное время восстановления после отказов.

Или

$$\hat{K}_r = \frac{N(t_\infty)}{N(0)}, \quad (3.10)$$

где $N(t_\infty)$ – число объектов, находящихся в состоянии работоспособности в произвольный «достаточно удаленный» момент времени.

Коэффициент технического использования

$$\hat{K}_{\text{т и}} = \frac{t_{\text{н}\Sigma}}{t_{\text{н}\Sigma} + t_{\text{в}\Sigma} + t_{\text{в}\Sigma}^{\text{пл}}}, \quad (3.11)$$

где $t_{\text{в}\Sigma}^{\text{пл}}$ – суммарное время плановых ремонтов.

Интервальная оценка показателей. Любая полученная точечная оценка, если даже она удовлетворяет всем критериям качества, обладает существенным недостатком в том смысле, что она сама представляет собой лишь частное значение случайной величины.

Поэтому кроме точечной оценки желательно знать практически надежные границы для оцениваемого параметра, т.е. найти такой интервал оценок, который с достаточно высокой вероятностью «накрывает» неизвестный параметр.

Ясно, что достоверными границами для показателей надежности (абсолютно надежными границами) являются для \bar{t}_0 , λ и других аналогичных показателей – $[0; \infty]$; для $P_0(t)$, $G(t)$, k_r и других вероятностей – $[0; 1]$. Указание других границ сопряжено с риском совершить ошибку. Вероятность ошибок ε_1 и ε_2 называют уровнями зависимости оценок: ε_1 – вероятность того, что найденный интервал не накроет используемый параметр своим левым концом, ε_2 – вероятность того, что найденный интервал не накроет используемый параметр своим правым концом.

За меру достоверности оценки – доверительной вероятности – принимается величина $\gamma = 1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2$, показывающая, с какой вероятностью можно утверждать, что доверительный интервал накроет истинное значение показателя.

$$\gamma = P\left\{\bar{t}_0^{\text{H}} < \bar{t}_0 < \bar{t}_0^{\text{B}}\right\},$$

где \bar{t}_0^{H} , \bar{t}_0^{B} – нижняя и верхняя границы доверительного интервала соответственно для показателя «среднее время до отказа».

Чаще всего вероятности ε_1 и ε_2 выбираются одинаковыми, тогда $\gamma = 1 - 2\varepsilon$ и, следовательно, каждая из доверительных границ

определяется с уровнем значимости $\varepsilon = 1 - \frac{\gamma}{2}$ или с односторонней

доверительной вероятностью (коэффициентом доверия) $\gamma^* = \frac{1 + \gamma}{2} = 1 - \varepsilon$.

Если известен вид функции распределения оценки, то принцип вычисления доверительных интервалов состоит в том, что за нижнюю и верхнюю доверительные границы принимаются квантили этого распределения по соответствующему уровню. Нижняя доверительная граница определяется как квантиль по уровню ε , а верхняя – как квантиль по уровню $\gamma^* = 1 - \varepsilon$. Вид распределения оценки зависит, в свою очередь, от вида распределения исследуемой случайной величины и тех функциональных преобразований, которые производятся над исходной статистикой при получении оценок.

ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ ПАРАГРАФА

1. На испытание поставлено 1000 однотипных ламп. За 3000 ч отказало 80 ламп, а за интервал времени от 3000 до 4000 ч отказало еще 50 ламп. Определить вероятность безотказной работы $\hat{P}_0(t)$, вероятность отказа $\hat{Q}(t)$ для $t = 3000$ ч, 4000 ч и интенсивность отказов $\hat{\lambda}^*(t)$ для $t = 3000$ ч

Решение

Вероятности безотказной работы и отказа

$$\hat{P}_0(t) = \frac{N(t)}{N_0}; \quad \hat{Q}(t) = 1 - \hat{P}_0(t);$$

$$\hat{P}_0(3000) = \frac{1000 - 80}{1000} = 0,92; \quad \hat{Q}(3000) = 0,08;$$

$$\hat{P}_0(4000) = 0,87; \quad \hat{Q}(4000) = 0,13.$$

Интенсивность отказов

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t};$$

$$\hat{\lambda}(3000) = 5,43 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}} \cong 0,5 \frac{1}{\text{год}}.$$

2. Общее количество изоляторов воздушных линий сетевого участка – 20000 шт. Наблюдения показали, что из взятых под наблюдение в начале года изоляторов в первом квартале вышли из строя 4000, во втором – 3000, в третьем – 2000, в четвертом – 1000. Рассчитать и построить по этим данным характеристику безотказности $\hat{P}_0(t)$.

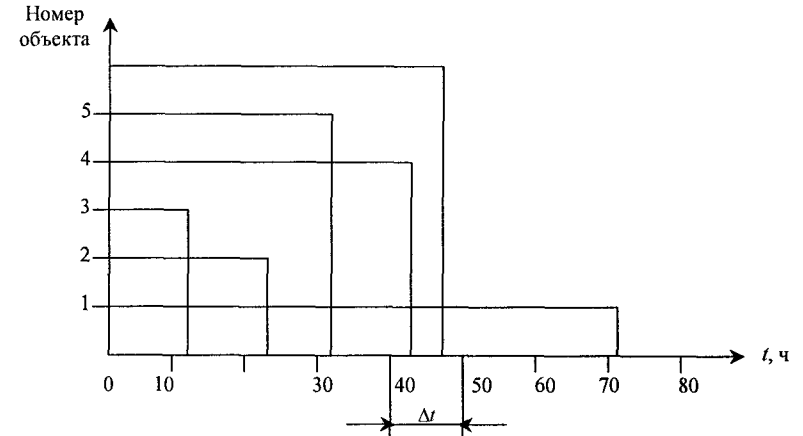
3. Под наблюдением находилось 100 генераторных блоков в течение 3000 ч; $\Delta t = 200$ ч. Результаты наблюдений приведены в таблице, где через каждые 200 ч указано количество оставшихся в работе блоков $N(t)$.

t	0	200	400	600	800	1000	1200	1400
$N(t)$	100	91	85	81	78	75	73	70
t	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
$N(t)$	670	65	62	60	57	54	50	43

По данным наблюдений рассчитать и построить характеристики $\hat{P}_0(t)$, $\hat{Q}(t)$, $\hat{\lambda}(t)$ и определить¹ среднее время наработки, принимая условно объекты невосстанавливаемыми.

¹ Определить среднее время наработки двумя способами

4. Пять невосстанавливаемых объектов поставлены на испытания. Характеристики времени работы этих объектов показаны на рисунке. Определить показатели надежности: вероятность безотказной работы, вероятность отказа, плотность вероятности отказов, интенсивность отказов, среднее время безотказной работы при $t = 40$ ч и $\Delta t = 10$ ч.



5. Наблюдения над серией из 20 однотипных изделий дали следующую статистику (см. таблицу). Определить среднее время наработки изделия до отказа. Сравнить результаты, которые можно было получить на 10-й месяц наблюдений и за 15 месяцев.

Время от начала эксперимента, t , мес	3	4	6	10	12	15
Число отказавших изделий	2	3	7	12	15	20

Решение

Определение среднего времени до отказа при наблюдении до 10 месяцев (план [NUT])

$$\hat{t}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N(0)-N(t)} t_{oi} + TN(t)}{N(0)} = \frac{(2 \cdot 3 + 1 \cdot 4 + 4 \cdot 6 + 5 \cdot 10) + 8 \cdot 10}{20} = 8,2 \text{ мес.},$$

где $T = 10$ мес

Определение среднего времени до отказа при наблюдении 15 месяцев (за это время отказали все изделия - план [NUN])

$$\hat{t}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N(0)} t_{oi}}{N(0)} = \frac{2 \cdot 3 + 1 \cdot 4 + 4 \cdot 6 + 5 \cdot 10 + 3 \cdot 12 + 5 \cdot 15}{20} = 9,75 \text{ мес.}$$

6 Над 12 одинаковыми объектами, работающими в схожих условиях, было установлено наблюдение. В результате этого наблюдения оказалось, что к концу года отказало 3 объекта. Оцените интенсивность отказа объекта, допуская, что время до отказа распределено по экспоненциальному закону.

Решение

$$P(1 \text{ год}) = \frac{9}{12} = 0,75 = e^{-\lambda \cdot 1};$$

$$\ln 0,75 = -\lambda \quad \lambda = 0,288 \text{ 1/год.}$$

7 В системе имеется 50 однотипных трансформаторов с высшим напряжением 220 кВ. Известно, что за 10 лет работы 1 трансформатор отказал два раза, 13 трансформаторов отказали по одному разу, остальные – ни разу. В течение 11-го года 1 трансформатор отказал один раз. Определить статистическую частоту отказов за 10 лет и на интервале от 10 до 11 лет.

Решение

Статистическая частота отказов

$$\hat{\omega}(t_1, t_2) = \frac{\Omega(t_2) - \Omega(t_1)}{N(t_2 - t_1)};$$

$$\hat{\omega}(0,10) = 0,03 \text{ отк/год}; \quad \hat{\omega}(10,11) = 0,02 \text{ отк/год.}$$

8. Общая протяженность одноцепных воздушных линий электрической сети 220 кВ энергосистемы составляет 890 км. Известно, что в течение 15 лет эксплуатации произошло 165 устойчивых и 142 неустойчивых отказов, а на 16-м году – 10 устойчивых и 8 неустойчивых. Определить статистическую частоту устойчивых и неустойчивых отказов за 15 лет и на интервале от 15 до 16 лет для условной линии 100 км длиной

Решение

$$\hat{\omega}_y(0,15) = 1,24 \text{ отк/год};$$

$$\hat{\omega}_y(15,16) = 1,12 \text{ отк/год};$$

$$\hat{\omega}_n(0,15) = 1,06 \text{ отк/год}; \quad \hat{\omega}_n(15,16) = 0,9 \text{ отк/год.}$$

9 В инфекционное отделение больницы поступило 15 больных с диагнозом – отравление. Через 15 дней было выписано 7 пациентов, а через день еще 2. Определить статистические значения вероятности восстановления и среднее время восстановления, предполагая, что закон распределения времени восстановления – экспоненциальный

10 В энергосистеме находится в аварийно-восстановительном ремонте 20 однотипных трансформаторов. Через 300 ч их осталось в ремонте 5 шт., а через 330 ч – 4 шт. Определить статистические вероятности восстановления трансформатора за 300 и 330 ч и интенсивность восстановления

11 В энергосистеме находится в аварийно-восстановительном ремонте 25 однотипных трансформаторов. Статистика восстановительных ремонтов приведена в таблице. Определить статистические значения интенсивности восстановления на каждом интервале, среднюю продолжительность восстановления, среднюю интенсивность восстановления.

t	200	600	1000	1400	1800	2050
$m(t)$	1	2	4	8	15	25

12 В аварийно-восстановительном ремонте находится 10 однотипных выключателей. Через 15 ч были восстановлены 8 выключателей, а через 17 ч еще один. Определить статистические значения вероятности восстановления выключателя за 15 и 17 ч и интенсивности восстановления.

13. В аварийно-восстановительном ремонте находятся 15 однотипных масляных выключателей. Статистика восстановительных ремонтов приведена в таблице. Определить статистические значения интенсивности восстановления на каждом интервале, среднюю продолжительность восстановления, среднюю интенсивность восстановления.

t	10	25	40	55	70
$m(t)$	1	2	4	8	15

14. Ретроспективная информация о работе турбогенератора ТВФ-100 в течение 10 лет приведена в таблице. Определить статистические коэффициенты готовности, неготовности, технического использования, относительную длительность планового простоя.

Годы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Относительное время планового ремонта	0,01	0,08	0,01	0,008	0,08	0,012	0,01	0,08	0,012	0,01
То же, аварийного	0	0,02	0,01	0,03	0,04	0,0	0,03	0,01	0,02	0,04

15. За наблюдаемый период эксплуатации участка системы было зафиксировано семь отказов. Время восстановления составило: 8,2; 7; 8,4; 8,6; 7,4; 8; 7,9 ч соответственно. Определить среднее время восстановления системы.

16. Экспериментальный блок управления находился в работе по 20 ч ежедневно 30 дней. За это время было три отказа, на устранение которых затрачено 12 ч. Определить статистические значения коэффициента готовности блока и относительной длительности простоя.

17. Вы вошли на диспетчерский пункт энергосистемы, в которой установлено 100 однотипных энергоагрегатов, и узнали, что в общей сложности в аварийном ремонте находятся 5 энергоагрегатов. Можно ли по этой информации определить статистическое значение коэффициента готовности энергоагрегата?

§ 3.3. РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ

Как отмечалось выше, эти методы применяются тогда, когда анализируется надежность объекта, который может быть представлен в виде системы, об элементах и связях которой известна вся информация (показатели надежности элементов, структура и функциональное взаимодействие их и т.д.).

Первоначально методы расчета разрабатывались для решения конкретных практических задач. Многообразие реальных задач и объектов породило множество различных методов, которые учитывали ту или иную специфику этих задач, объектов.

Определенная унификация этого множества методов стала возможной только за счет абстрагирования от специфики тех или иных задач, специфики объектов и построения модели некоторого абстрактного объекта.

В итоге такой абстрактный объект представляет собой систему, состоящую из n -элементов, функционально связанных между собой в общем случае любым необходимым способом, обеспечивающим выполнение объектом его функций, т.е. преобразование «входа» в «выход» (рис. 3.1).

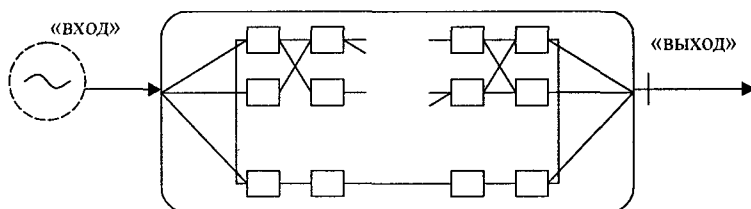


Рис 3 1

Каждый i -й элемент системы в общем случае может находиться в смысле надежности в v_i состояниях. Тогда объект-система может находиться в $v_c = \prod_{i=1}^n v_i$ состояниях.

Отказы и состояния элементов в общем случае могут быть зависимыми. Потoki отказов и восстановлений элементов в общем случае могут быть любыми (нестационарными, с последствиями или простейшими).

Задача состоит в выявлении состояний объекта – системы и событий перехода в эти состояния, обуславливающие изменение уровня работоспособности объекта, а также вероятностные характеристики этих состояний и событий.

Задача состоит в выявлении состояний объекта – системы и событий перехода в эти состояния, обуславливающие изменение уровня работоспособности объекта, а также вероятностные характеристики этих состояний и событий.

Решение такой задачи представляет большую методическую трудность. Поэтому реально разработанные методы имеют ряд допущений.

Практически все они рассматривают объекты-системы, элементы которых могут находиться только в двух состояниях. Часть методов упрощает задачу, при условии, что и сам объект-система имеет два состояния (точнее все множество состояний из 2^n разбивается на два подмножества). Другая группа методов упрощает задачу, в предположении, что потоки отказов, восстановлений являются ординарными и т.д. Ниже все эти упрощения раскрываются при рассмотрении конкретных методов.

Применение этих методов к решению реальных задач требует предварительного моделирования реального объекта с целью представления его в виде абстрактного. Во многих случаях это удается, хотя иногда ценою некоторых потерь.

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

В предыдущей главе для описания состояния объекта мы использовали его параметры x_i и область допустимых значений с границей $D(x) = 0$. Здесь, представляя объект в виде системы, также будем состояние объекта – системы z описывать через состояния ее элементов x_i . При этом состояние каждого элемента, в свою очередь, определяется его параметрами и областью допустимых значений, которые здесь специально не рассматриваются. Таким образом, не будем при описании системы углубляться внутрь элементов, а будем оперировать только внешними их характеристиками, в данном случае – характеристиками их состояний $x = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$.

Тогда состояние системы z будет характеризоваться дискретной функцией

$$z = z(x), \quad (3.12)$$

принимавшей значения от 0 до полного количества возможных состояний системы.

Далее для каждого состояния системы необходимо установить степень выполнения ею своих функций в этом состоянии, уровень работоспособности E

$$E = E(z). \quad (3.13)$$

В итоге решение задачи будет заключаться в определении возможных уровней работоспособности системы и событий, которые приводят систему к этим состояниям (отказы и восстановления каких-либо элементов системы).

Формализованное решение задач (3.12) – (3.13) в общем виде весьма затруднительно, особенно когда уровней работоспособности у системы более двух. Пока что разработаны лишь методы частичной формализации этой задачи, которые и рассматриваются далее.

Графический метод. Достоинство метода – большая наглядность. Функционирование объекта представляется в виде графа состояний и переходов. Поясним суть его на примере систем, состоящих из одного и двух элементов. Если система представляет собой всего лишь один восстанавливаемый элемент, который может находиться в двух состояниях (например, $z = 1$ – работоспособное и $z = 0$ – неработоспособное), то граф такой системы имеет вид, представленный на рис. 3.2. В каждом из состояний система может оказаться или в результате перехода из другого, или сохранения своего прежнего состояния. Граф невосстанавливаемого элемента будет отличаться от изображенного на рис. 3.2 отсутствием стрелки от состояния $z = 0$ к $z = 1$. Для системы, состоящей из двух восстанавливаемых элементов, каждый из которых может находиться в двух состояниях, граф состояний и переходов будет иметь вид, показанный на рис. 3.3. Здесь $z = 0$ – состояние неработоспособности двух элементов, $z = 1$ – состояние неработоспособности только первого элемента, $z = 2$ – состояние неработоспособности только второго элемента, и $z = 3$ – состояние работоспособности обоих элементов.

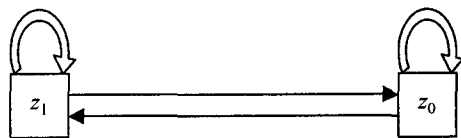


Рис 3 2

Если элементы рассматриваемой системы невосстанавливаемые, то стрелки от состояний 0 к 1 и 2, а также от 1 и 2 к 3 отсутствуют.

В общем случае, когда система включает в себя n элементов, каждый из которых может находиться в двух состояниях, полное количество состояний системы становится равным 2^n . Состояние системы, из которого оно не может выйти (на графе нет стрелок, отходящих от него к другим состояниям), называют по-

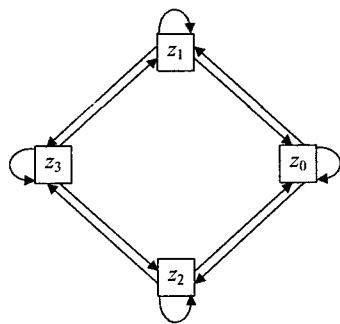


Рис 3 3

глощающим. Таким состоянием, например, является $z = 0$ в рассматриваемых выше системах, когда элементы невосстанавливаемые.

После того как определены все состояния системы, следует идентифицировать их по степени, уровню работоспособности системы в этих состояниях. Если число уровней большое, целесообразно зависимость $E(z)$ представить в виде таблицы. В табл. 3.4 для системы, состоящей из двух элементов, в качестве примера показаны некоторые варианты этой зависимости.

Таблица 3 4

Зависимости уровня работоспособности от состояния системы

Значения z	Значения уровня работоспособности E			
	Варианты систем (структурно-функционального взаимодействия элементов)			
	1	2	3	4
0	0	0	0	0
1	1	0	0,5	0
2	1	0	0,5	1
3	1	1	1	1

Из этой таблицы видно, что, если элементы в системе структурно соединены и функционально взаимодействуют так, как это соответствует варианту 1, то отказ наступает только при отказе обоих ее элементов. В общем случае, если функциональная связь элементов в системе такова, что отказ системы наступает только при отказе всех элементов, то такое соединение элементов называют *параллельным соединением в смысле надежности*.

Если же элементы в системе соединены и взаимодействуют так, как это соответствует варианту 2, то отказ системы наступает при отказе хотя бы одного из элементов.

В общем случае, если связь элементов в системе такова, что отказ системы наступает при отказе хотя бы одного из них, то такое соединение называют *последовательным соединением элементов в смысле надежности*.

Важно заметить, что последовательное и параллельное соединения элементов в системе в смысле надежности – это далеко не всегда то же самое, что и физическое соединение элементов в системе. Например, параллельное в электрическом смысле соединение конденсаторов в батарее образует систему с последовательно со-

единенными элементами (конденсаторами) в смысле надежности по отношению к отказам в конденсаторах типа короткого замыкания.

Варианты 3 и 4 (табл. 3.4), исходя из изложенного выше, нельзя отнести к системам с параллельным или последовательным соединением элементов. При этом вариант 3 еще поддается сведению к параллельному соединению элементов, если рассматривать в качестве отказа системы снижение уровня работоспособности ниже 0,5, или к последовательному соединению элементов, если отказом системы считать снижение работоспособности ниже 1.

Вариант 4 вообще не сводится отнесению ни к параллельному, ни к последовательному соединениям.

Таким образом, не всегда структурно-функциональные связи элементов в системе могут быть отражены последовательным и параллельным соединением элементов в смысле надежности.

В общем случае как состояния элементов x_i , так и состояние системы z изменяются во времени – $x_i(t)$ и $z(t)$. Если при этом нумерация состояний системы сделана так, что с повышением номера состояния l увеличивается (точнее, не уменьшается) и степень ее работоспособности, то изменение номера состояния системы во времени в сторону снижения будет означать частичный отказ системы, а в сторону увеличения – восстановление.

Показателем безотказности в структурно-функциональном плане (условием того, что система, находясь в состоянии l , не откажет за время t) будет

$$z(t) \geq l \quad \text{при} \quad 0 \leq t \leq t_0, \quad 0 < l \leq v,$$

а показателем восстанавливаемости (точнее, невозстанавливаемости, т.е. условием того, что система, находясь в состоянии l , не будет восстановлена за время t)

$$z(t) \leq l \quad \text{при} \quad 0 \leq t \leq t_v, \quad 0 \leq l < v.$$

Метод на основе булевой алгебры. Этот метод использует функции алгебры логики (булевой¹ алгебры) и может применяться для достаточно упрощенных систем, а именно систем, в которых они сами и их элементы могут находиться только в двух состояниях. Кроме того, этот метод применяется для систем, структура в смысле надежности которых может быть представлена в виде сети.

¹ По имени Джорджа Буля, более ста лет назад впервые изложившего математический подход к вопросам исчисления высказываний

Алгебра логики (булева алгебра) представляет собой раздел математической логики, занимающейся исчислением высказываний. Под **высказыванием** понимается любое предложение, относительно которого можно утверждать его истинность или ложность без учета конкретного содержания. Например, высказывание «частота системы измеряется в герцах» – истинное, а высказывание « $2 > 5$ » – ложное. Отдельные высказывания обозначаются буквой (x). При этом высказывание можно рассматривать как величину, которая принимает два значения: «истина» и «ложь». Если x истинно, то $x = 1$; если x ложно, то $x = 0$ (или наоборот).

Каждое конкретное высказывание имеет вполне определенное истинное значение. Но это значение может быть и переменным. Например, высказывание x – «элемент работоспособен» в одной ситуации может быть истинным ($x = 1$), а в другой – ложным ($x = 0$). Переменная величина, которая принимает лишь два значения (1 или 0), называется *двоичной*. Можно построить высказывания, истинность которых определяется значениями истинности других высказываний, т.е. первые являются функциями более простых высказываний – аргументов. Функции, принимающие лишь два значения (1 или 0) и определяемые различными наборами двоичных аргументов, называются *двоичными функциями* или *функциями алгебры логики* (ФАЛ).

В алгебре логики рассматриваются три основные логические операции отрицание, конъюнкция (умножение) и дизъюнкция (сложение).

Отрицание Отрицание высказывания x обозначается как \bar{x} (читается «не x »). Значение истинности \bar{x} определяется соотношениями

$$\bar{1} = 0; \quad \bar{0} = 1. \quad (3.14)$$

Конъюнкция Логическое умножение высказываний x_1 и x_2 обозначается как $x_1 \wedge x_2$ или $x_1 x_2$ (читается « x_1 и x_2 »). Значение истинности произведения определяется в зависимости от значений истинности x_1 и x_2 следующими соотношениями:

$$0 \wedge 0 = 0; \quad 0 \wedge 1 = 0; \quad 1 \wedge 0 = 0; \quad 1 \wedge 1 = 1. \quad (3.15)$$

Таким образом, конъюнкция представляет собой сложное высказывание, которое истинно тогда и только тогда, когда истинны составляющие его.

Дизъюнкция Логическое сложение высказываний x_1 и x_2 обозначается как $x_1 \vee x_2$ или $x_1 + x_2$ (читается « x_1 или x_2 »). Значение истинности логической суммы $x_1 \vee x_2$ в зависимости от значений истинности x_1 и x_2 определяется следующими соотношениями:

$$0 \vee 0 = 0; \quad 0 \vee 1 = 1; \quad 1 \vee 0 = 1; \quad 1 \vee 1 = 1. \quad (3.16)$$

Таким образом, дизъюнкция представляет собой сложное высказывание, которое ложно тогда и только тогда, когда оба слагаемых (x_1 и x_2) ложные.

Основные правила преобразования логических выражений следующие:

$$\left. \begin{aligned} x \cdot 1 = x; \quad x + 1 = 1; \quad x \cdot 0 = 0; \quad x + 0 = x; \\ xx = x; \quad x + x = x; \quad x\bar{x} = 0; \quad x + \bar{x} = 1. \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

Сочетательный (ассоциативный) закон

$$\left. \begin{aligned} x_1(x_2x_3) = (x_1x_2)x_3 = x_1x_2x_3; \\ x_1 + (x_2 + x_3) = (x_1 + x_2) + x_3 = x_1 + x_2 + x_3. \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

Переместительный (коммутативный) закон

$$x_1x_2 = x_2x_1; \quad x_1 + x_2 = x_2 + x_1. \quad (3.19)$$

Распределительный (дистрибутивный) закон

$$\left. \begin{aligned} x_1(x_2 + x_3) = (x_1x_2) + (x_1x_3) \\ x_1 + (x_2x_3) = (x_1 + x_2)(x_1 + x_3). \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

Закон инверсий

$$\overline{(x_1x_2)} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2; \quad \overline{(x_1 + x_2)} = \bar{x}_1 \bar{x}_2. \quad (3.21)$$

Операция поглощения

$$(x_1x_2) + x_1 = x_1; \quad x_1(x_2 + x_1) = x_1. \quad (3.22)$$

Операция склеивания

$$\left. \begin{aligned} (x_1x_2) + (x_1\bar{x}_2) = x_1x_2 + x_1\bar{x}_2 = x_1(x_2 + \bar{x}_2) = x_1 \cdot 1 = x_1; \\ (x_1x_2) + (\bar{x}_1x_2) = x_1x_2 + \bar{x}_1x_2 = x_2(x_1 + \bar{x}_1) = x_2 \cdot 1 = x_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Если применить эту алгебру логики в рассматриваемой нами задаче, то функция состояния системы $Z(x)$ (3.12) в данном конкретном случае может быть описана как функция алгебры логики (ФАЛ), у которой аргументами являются двоичные переменные состояния элементов x_i .

Для графа на рис. 3.3 при последовательном и параллельном соединении элементов можно записать:

$$Z_{\text{послед}} = x_1x_2; \quad Z_{\text{пар}} = x_1 + x_2.$$

Функция Z здесь называется *логической функцией работоспособности* (ФР) системы. Вообще если функциональная связь элементов в системе структурно в смысле надежности может быть представлена в виде некоторой схемы соединения элементов, которые обра-

зуют пути между входом и выходом, то для такой схемы имеются регулярные методы получения логической функции работоспособности. Например, для системы, схема которой показана на рис. 3.4,а, если функциональное взаимодействие элементов структурно в «смысле надежности» можно представить в виде мостиковой схемы (рис. 3.4,б), то ФР системы относительно третьего узла имеет вид

$$\begin{aligned} Z_3 = x_1 \cdot x_{12} \cdot x_2 \cdot x_{23} \cdot x_3 + x_1 \cdot x_{14} \cdot x_4 \cdot x_{43} \cdot x_3 + \\ + x_1 \cdot x_{14} \cdot x_4 \cdot x_{42} \cdot x_2 \cdot x_{23} \cdot x_3 + x_1 \cdot x_{12} \cdot x_2 \cdot x_{24} \cdot x_4 \cdot x_{43} \cdot x_3, \end{aligned} \quad (3.24)$$

где переменная x с одним индексом обозначает состояние соответствующего узла, а с двумя индексами – состояние связи между соответствующими узлами.

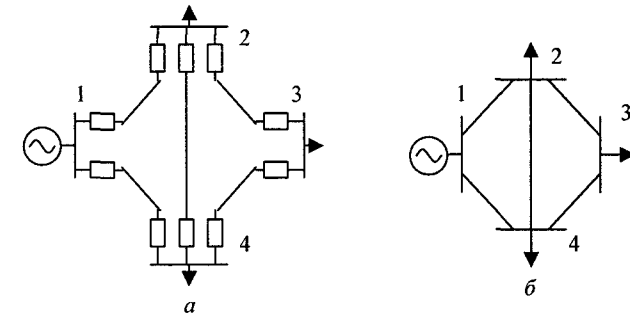


Рис 3.4

Анализ (3.24) показывает, что функция Z_3 состоит из суммы (дизъюнкции) нескольких членов, каждый из которых представляет собой произведение (конъюнкции) определенного набора x . Если просмотреть этот набор, то увидим, что он включает последовательно состояния всех элементов на одном из путей от входа (источника) к выходу (потребителю). В связи с этим вводится понятие *кратчайшего пути успешного функционирования системы*, или *кратчайшего пути*, т.е. описываемого конъюнкцией ее элементов, ни один из компонентов которой нельзя изъять, не нарушив функционирования системы. Такую конъюнкцию можно записать в виде ФАЛ

$$P_l = \bigwedge_{k \in M_{P_l}} x_k,$$

где M_{P_l} – множество номеров элементов, соответствующих данному пути l .

Иначе говоря, кратчайший путь успешного функционирования системы описывает один из возможных самостоятельных вариантов выполнения заданных функций системы с помощью минимального набора работоспособных элементов. Таким образом, Z_3 представляет собой совокупность четырех возможных кратчайших путей в данной системе, которые обеспечивают работоспособность системы при работоспособности хотя бы одного из них.

Для электрических сетей структурная схема системы в смысле надежности часто представляет собой аналог схемы соединения ее реальных элементов. Например, структурная схема системы, показанная на рис. 3.4,б, является отражением функциональных взаимосвязей элементов электрической сети (рис. 3.4,а), где ветви структурной схемы моделируют линии связи, а узлы – выключатели (их отказы и работоспособные состояния) и шины коммутационных пунктов сети. Однако эта аналогия безусловна. Если пропускная способность хотя бы одного элемента сети не позволяет передать всю необходимую мощность, то аналогия нарушается.

Функция работоспособности (3.24) записана для рассматриваемой системы относительно третьего ее узла. Такие же ФР можно записать и для любого другого узла.

Составить условия работоспособности для небольших систем, имеющих в структурной схеме несколько элементов, нетрудно. Задача становится затруднительной при нескольких десятках элементов, при этом простой перебор всех возможных сочетаний элементов и анализ каждого из них громоздки. Если же перейти к системам, имеющим в структурной схеме сотни элементов, то составление функции работоспособности простым перебором становится нереальным.

В связи с этим возникает необходимость использовать аналитический, регулярный метод, позволяющий получать условия работоспособности системы на основе топологии ее структурной схемы надежности. Имеются различные методы получения таких условий. Часть из них основывается на операциях с матрицами. Поскольку порядок матриц пропорционален количеству элементов системы, эти методы могут вызвать вычислительные трудности даже с применением ЭВМ при большом количестве элементов.

Ниже рассматривается метод, который не требует операций с матрицами; он позволяет определить условия работоспособности одновременно для всех узлов системы и имеет простую итерационную процедуру вычисления.

Сущность метода нахождения функции Z удобно пояснить на примере простой схемы сети (рис. 3.4,б). Введем обозначения: x_i – состояние i -го узла системы; x_{ij} – состояние ветви между i -м и j -м узлами; Z_i – состояние системы относительно i -го узла; $Z_{j,i}$ – состояние системы относительно j -го узла при отсутствии связи его с i -м узлом.

Определим сначала функцию работоспособности системы по отношению к узлу 3. Система будет работоспособна по отношению к узлу 3, если работоспособен сам узел 3 и имеется возможность его питания хотя бы по одной из двух подходящих к нему связей. Возможность же питания по одной из связей будет иметься только в том случае, если работоспособны сама связь и тот узел, от которого она отходит, при условии, что работоспособность его определена без узла 3. Все эти

условия логически можно записать как

$$Z_3 = x_3(Z_{2/3}x_{23} \vee Z_{4/3}x_{34}). \quad (3.25)$$

Аналогичные выражения можно получить и для других узлов:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= x_1; \\ Z_2 &= x_2(Z_{1/2}x_{12} \vee Z_{4/2}x_{24} \vee Z_{3/2}x_{23}); \\ Z_4 &= x_4(Z_{1/4}x_{14} \vee Z_{2/4}x_{24} \vee Z_{3/4}x_{34}). \end{aligned} \right\} \quad (3.25a)$$

Если решить составленную систему логических уравнений, то определяются функции работоспособности системы по отношению ко всем узлам:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= x_1; \quad Z_2 = Z_2(x_1, x_{12}, x_{14}, x_2, \dots); \\ Z_3 &= Z_3(x_1, x_{12}, x_{14}, x_2, \dots); \quad Z_4 = Z_4(x_1, x_{12}, x_{14}, x_2, \dots). \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

Условные функции $Z_{2/1}$, $Z_{2/4}$, $Z_{2/3}$, .. можно получить из полных функций (3.26), принимая соответствующие аргументы, равными нулю. Так, например, функция $Z_{2/3}$ получается из функции Z_2 при $x_{23} = 0$, что означает отсутствие связи между узлами 2 и 3.

В общем случае для любой системы (с числом узлов n) по аналогии с (3.25а) можно записать систему логических уравнений

$$Z_i = x_i \left(\bigvee_{j=1}^n Z_{j/i} x_{ij} \right), \quad i = \overline{1, n}, \quad (3.27)$$

$$Z_{j/i} = Z_j \quad \text{при} \quad x_{ij} = 0. \quad (3.28)$$

Наиболее просто решить систему (3.27) итеративным путем. В качестве нулевого приближения можно взять

$$Z_i^{(0)} = x_i \bigvee_{j=1, j \neq i}^n x_{ij}.$$

Соответственно первое, второе и r -е приближения представим как

$$Z_i^{(1)} = x_i \bigvee_{j=1}^n Z_{j/i}^{(0)} x_{ij} = x_i \bigvee_{j=1}^n x_{ij} x_j \bigvee_{k=1}^n x_{jk};$$

$$Z_i^{(2)} = x_i \bigvee_{j=1}^n x_{ij} Z_{j/i}^{(1)} = x_i \bigvee_{j=1}^n x_{ij} x_j \bigvee_{k=1}^n x_{jk} x_k \bigvee_{l=1}^n x_{kl};$$

$$Z_i^{(r)} = x_i \bigvee_{j=1}^n x_{ij} x_j \bigvee_{k=1}^n x_{jk} x_k \bigvee_{m=1}^n \dots x_m \bigvee_{m=1}^n x_{lm};$$

$$j \neq i \quad k \neq j \neq i \quad m \neq i \neq j \neq k \neq i$$

Счет прекращается, когда результат на последующей итерации совпадает с результатом на предыдущей. Количество итераций зависит от объема схемы. По существу, каждое приближение представляет собой различные степени упрощения структурной схемы сети. Нулевая итерация означает закрепление всех ближайших к рассматриваемому узлу и подключение к ним источника. На первой итерации ближайшие узлы раскрепляются, а источники переносятся на узлы, смежные с первыми. В результате последующих итераций постепенно все узлы, кроме питающего, раскрепляются и от них отключаются источники.

В конце итеративного счета получаем функции работоспособности системы по отношению ко всем узлам системы

$$Z_i = Z_i(x_j, x_{jk}), \quad j, k = \overline{1, n} \quad (3.29)$$

Логическая функция совместной работоспособности Z_{ijkl} системы относительно нескольких узлов, например i, j, k, l (после того как выполнены последние итерации и определены функции Z_i, Z_j, Z_k, Z_l), находится как результат логического произведения

$$Z_{ijkl} = Z_i Z_j Z_k Z_l \quad (3.30)$$

Если функция работоспособности записана в так называемой дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ), когда логическая функция – сумма элементарных произведений, то она представляет собой совокупность всех кратчайших путей от источника рассматриваемого узла, а каждое слагаемое ее – один из кратчайших путей.

Часто в практических расчетах пользуются не функцией Z , а функцией неработоспособности, представляющей собой отрицание Z , т.е. \bar{Z} (ФНР). Например, для мостиковой схемы системы, воспользовавшись правилами (3.21), из (3.24) можно определить функцию

$$\bar{Z}_3 = (\bar{x}_1 + \bar{x}_{12} + \bar{x}_2 + \bar{x}_{23} + \bar{x}_3)(\bar{x}_1 + \bar{x}_{14} + \bar{x}_4 + \bar{x}_{43} + \bar{x}_3) \times \\ \times (\bar{x}_1 + \bar{x}_{14} + \bar{x}_4 + \bar{x}_{42} + \bar{x}_2 + \bar{x}_{23} + \bar{x}_3)(\bar{x}_1 + \bar{x}_{12} + \bar{x}_2 + \bar{x}_{24} + \bar{x}_4 + \bar{x}_{43} + \bar{x}_3),$$

которая после простых преобразований к форме ДНФ примет вид

$$\bar{Z}_3 = \bar{x}_1 + \bar{x}_{12} \cdot \bar{x}_{14} + \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_4 + \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_{14} + \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_{12} + \bar{x}_{12} \cdot \bar{x}_{24} \cdot \bar{x}_{34} + \\ + \bar{x}_{14} \cdot \bar{x}_{24} \cdot \bar{x}_{23} + \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_{34} + \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_{23} + \bar{x}_{23} \cdot \bar{x}_{34} + \bar{x}_3. \quad (3.31)$$

Анализ полученной функции показывает, что каждый член представляет собой произведение (конъюнкцию) определенного набора x , включающего те элементы, неработоспособное состояние которых приводит к разрыву связи между источником и нагрузкой, т.е. к неработоспособному состоянию системы.

В связи с этим вводится понятие *минимального сечения отказов системы*, или *минимального сечения*, представляющего собой такое логическое произведение (конъюнкцию) из отрицаний ее элементов, ни один из компонентов которой нельзя изъять, не нарушив условия неработоспособности системы. Такую конъюнкцию можно записать в виде функции

$$S_j = \bigwedge_{k \in M_{S_j}} \bar{x}_k,$$

где M_{S_j} – множество номеров, соответствующих данному сечению j .

Другими словами, минимальное сечение отказов системы описывает один из возможных способов нарушения работоспособности системы с помощью минимального набора отказавших элементов.

Таким образом, если структурно-функциональные связи системы можно отобразить в виде схемы надежности, представляющей собой совокупность элементов системы, связанных между собой последовательным, параллельным или иным способом на пути между источником (генератором) и потребителем, то состояние (работоспособное или неработоспособное) такой системы достаточно просто можно записать в виде функции алгебры логики.

Выше уже отмечалось, что все величины x и z , т.е. состояние элементов и системы, могут изменяться во времени, т.е. $x = x(t)$ и $z = z(t)$. Тогда показателями безотказности (условие отсутствия отказа на интервале времени до t) будут

$$z(t) = 1 \quad \text{при} \quad 0 \leq t \leq t_0, \quad (3.32)$$

а восстанавливаемости (точнее, здесь следовало бы сказать – невозстанавливаемости – условие невозможности восстановления объекта на интервале времени до t)

$$z(t) = 0 \quad \text{при} \quad 0 \leq t \leq t_b. \quad (3.33)$$

Рассматриваемая модель системы предполагает, что если происходит отказ элемента системы, то он каким-то способом изолируется от системы (отсоединяется, отключается и т.п.). Часто это действие осуществляется определенными устройствами (аппаратом, выключателем и т.п.), которые тоже могут отказывать. При этом они могут отказывать не только независимо от других элементов системы, но и при возникновении требования на их работу по изолированию, отключению каких-то частей системы.

В этом случае очаг повреждения в системе не локализуется, возникает потребность локализации и отказавшего коммутационного аппарата, отключения, как правило, новых, смежных элементов. При локализации последних опять-таки возможен отказ уже других коммутационных аппаратов и т.д. Таким образом, может возникнуть цепочечное развитие первоначального отказа с отключением, выводом из работы, в конечном счете, большого количества элементов системы.

Рассмотренная выше модель и метод определения структурно функциональных показателей не учитывает такие отказы. В связи с этим ниже приводятся модель и метод определения показателей с учетом возможного отказа коммутационных аппаратов.

В отличие от использованной ранее логической функции специфика решаемой задачи требует добавления к двум возможным состояниям ветвей сетевой структуры системы двух событий: производства коммутационным устройством правильной коммутации при возникновении такой потребности (например, отключения выключателем поврежденной линии электропередачи) и отказа его в тех же условиях. Обозначим эти события переменной величиной ε_{ij} , принимающей значение $\varepsilon_{ij} = 1$, если коммутационный аппарат отказывается при возникновении требования, и значение $\varepsilon_{ij} = 0$, если не отказывается. Первый индекс у рассматриваемых величин фиксирует номер узла, на который распространяется повреждение из-за отказа данного коммутационного устройства, второй – номер узла, с которого переходит повреждение. Логическая функция неработоспособности сети при этом будет функцией и переменных ε_{ij} , т.е. $\bar{Z} = \bar{Z}(\bar{x}_i, \bar{x}_j, \varepsilon_{ij})$.

Способ получения этой функции удобно пояснить, рассмотрев простейшую схему системы, состоящей из двух узлов и одной ветви (рис. 3.5,а). Погашение или отключение i -го узла этой системы возможно при выполнении хотя бы одного из следующих условий:

- повреждение самого i -го узла (погашение i -го узла);
- разрыв ветви ij (отключение i -го узла) при отсутствии i -го источника;
- повреждение смежного j -го узла (отключение i -го узла ветвью ij) при отсутствии i -го источника;
- отказ коммутационного устройства в ветви ij при повреждении j -го узла (погашение i -го узла).

Логически все эти условия можно представить как

$$\bar{Z}_i = \bar{x}_i + (\bar{x}_j + \bar{x}_j) \cdot \bar{Z}_{ij} + \varepsilon_{ij} \cdot \bar{x}_j$$

(здесь действия сложения и умножения – логические), где \bar{Z}_{ij} – состояние источника, который может быть подключен к i -му узлу.

Если рассмотренную схему несколько усложнить, полагая, что за j -м узлом находится еще часть системы (рис. 3.5,б), то в последнем выражении следует заменить величину, отражающую состояние j -го узла \bar{x}_j как элемента сети на величину, отражающую состояние этого узла с учетом влияния на его состояние всей системы (за исключением i -го узла), т.е. на $\bar{Z}_{j/i}$. Тогда

$$\bar{Z}_i = \bar{x}_i + (\bar{x}_j + \bar{Z}_{j/i}) \bar{Z}_{ij} + \varepsilon_{ij} \bar{Z}_{j/i}.$$

В схеме любой сложности (рис. 3.5,в) для состояния отказа i -го узла дополнительно появляются условия погашения (аналогичные рассмотренным) от других ветвей, а условия отключения заменяются условиями совместного отключения рассматриваемого узла от всех отходящих от него ветвей при отсутствии i -го источника. Логически это можно представить как

$$\bar{Z}_i = \bar{x}_i + \bar{Z}_{ii} \bigwedge_{j \neq i}^n (\bar{x}_j + \bar{Z}_{j/i}) + \bigvee_{j \neq i}^n \varepsilon_{ij} \bar{Z}_{j/i}, \quad i = \bar{1}, n, \quad (3.34)$$

где n – число узлов в системе; \wedge и \vee – знаки логического произведения и суммирования соответственно

Выражение (3.34) представляет собой систему n уравнений, связывающих между собой n неизвестных функций \bar{Z} для каждого узла сети. При этом

$$\bar{Z}_{j/i} = \bar{Z}_j \quad \text{при} \quad \bar{x}_i = 1, \quad \varepsilon_{ki} = 0, \quad \text{где} \quad k = \bar{1}, n, \quad k \neq i, \quad k \neq j.$$

Решение системы уравнений (3.34) даст выражения функции \bar{Z} для всех узлов системы. Наиболее просто решение осуществляется итеративно. В качестве нулевого приближения можно принять

$$\bar{Z}_i = \bar{x}_i + \bar{Z}_{ii} \bigwedge_{j \neq i}^n (\bar{x}_j + \bar{x}_j) + \bigvee_{j \neq i}^n \varepsilon_{ij} \bar{x}_j.$$

Первое приближение примет вид

$$\begin{aligned} \bar{Z}_i &= \bar{x}_i + \bar{Z}_{ii} \bigwedge_{j \neq i}^n (\bar{x}_j + \bar{Z}_{j/i}) + \bigvee_{j \neq i}^n \varepsilon_{ij} \bar{Z}_{j/i} = \\ &= \bar{x}_i + \bar{Z}_{ii} \bigwedge_{j \neq i}^n \left[\bar{x}_j + \bar{x}_j + \bar{Z}_{ii} \bigwedge_{k=1, k \neq j}^n (\bar{x}_{ik} + \bar{x}_k) + \bigvee_{k=1, k \neq j}^n \varepsilon_{ik} \bar{x}_k \right] + \\ &+ \bigvee_{j \neq i}^n \varepsilon_{ij} \left[\bar{x}_j + \bar{Z}_{ii} \bigwedge_{k=1, k \neq j}^n (\bar{x}_{ik} + \bar{x}_k) + \bigvee_{k=1, k \neq j}^n \varepsilon_{ik} \bar{x}_k \right]. \end{aligned} \quad (3.35)$$

Аналогично находят второе и последующие приближения. Расчет прекращается, когда результат на предыдущей итерации совпадает с результатом на последующей итерации.

Анализ функции \bar{Z} показывает, что ее можно представить в виде слагаемых

$$\bar{Z} = \bar{Z}_c \{ \wedge \bar{x} \} + \bar{Z}_u \{ \vee (\varepsilon) \bar{x} \}. \quad (3.36)$$

Составляющая \bar{Z}_c включает члены, представляющие собой произведения переменных \bar{x} . Составляющая \bar{Z}_u состоит из суммы одиночных переменных \bar{x} с некоторыми коэффициентами из функции переменных ε . По существу же функ-

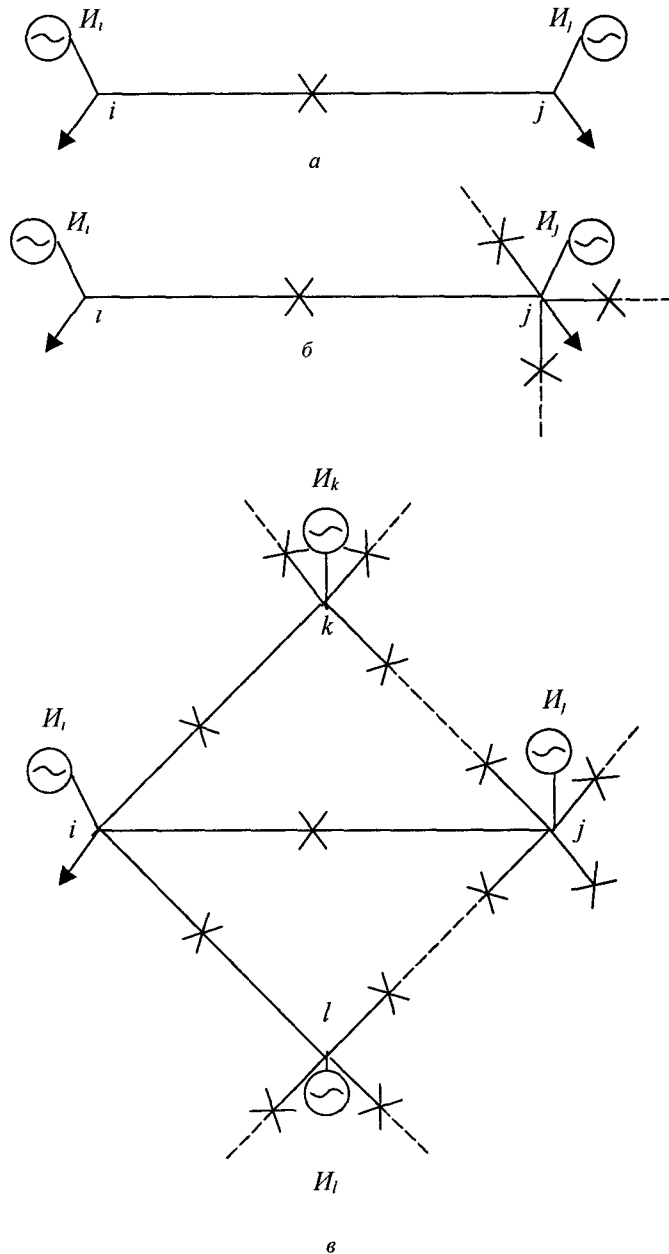


Рис 3.5

ция \bar{Z}_{ic} дает условия неработоспособности i -го узла из-за совпадения отказов и простоев различных узлов и ветвей, в результате чего прерывается связь между источниками и данным i -м узлом. Функция \bar{Z}_{ic} отражает погашения i -го узла системы из-за цепочечного развития аварии, возникшей при повреждении какого-либо одного узла и отказов коммутационных устройств. Определение ее путем решения системы (3.34) и выделения соответствующих составляющих представляет немалые трудности. Задача может быть значительно упрощена, если учесть, что функция \bar{Z}_{ic} не должна зависеть от \bar{x}_{ij} , а должна зависеть только от \bar{x}_k (состояния узлов), причем линейно. Линейность позволяет применить метод суперпозиции следующим образом.

Определим условие погашения каждого узла за счет аварии, возникшей в любом узле и по любой цепочке, дошедшей до рассматриваемого узла, независимо от места нахождения источников питания системы.

Для этого случая выражение (3.34) преобразуется

$$\bar{Z}'_{ic} = \bar{x}_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \epsilon_{ij} \bar{Z}'_{j/m} \quad (3.37)$$

Решение системы (3.37) целесообразно также получить итеративно. В качестве нулевого приближения можно принять

$$\bar{Z}'_{ic(0)} = \bar{x}_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \epsilon_{ij} \bar{x}_j$$

Первое приближение представится как

$$\begin{aligned} \bar{Z}'_{ic(1)} &= \bar{x}_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \epsilon_{ij} \bar{Z}'_{j/m(0)} = \bar{x}_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \epsilon_{ij} \left(\bar{x}_j + \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k \neq j}}^n \epsilon_{jk} \bar{x}_k \right) = \\ &= \bar{x}_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \epsilon_{ij} \bar{x}_j + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \sum_{\substack{k=1 \\ j \neq k \neq i}}^n \epsilon_{ij} \epsilon_{jk} \bar{x}_k \end{aligned}$$

Аналогично находится второе приближение, в результате которого получаются уже тройные суммы и т.д. Счет прекращается, когда результат предыдущей итерации совпадает с результатом последующей итерации. По существу же каждое приближение представляет собой учет различной глубины развития аварий. Так нулевая итерация собирает расчетные события с рассматриваемого узла и примыкающих к нему смежных узлов; первая итерация – дополнительно еще с узлов, находящихся во втором ряду от рассматриваемого, т.е. за двумя ветвями, и т.д. Счет закончится, когда будут охвачены все ветви и узлы и в результате получится выражение

$$\bar{Z}'_{m} = \bar{x}_i + \bigvee_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \varepsilon_{ij} \bar{x}_j + \bigvee_{\substack{j=1 \\ j \neq i \neq k \neq j}}^n \bigvee_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \varepsilon_{ij} \varepsilon_{jk} \bar{x}_k + \dots + \bigvee_{\substack{j=1 \\ j \neq i \neq k \neq j}}^n \bigvee_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \dots + \bigvee_{\substack{l=1 \\ l \neq i \neq k \\ m \neq l \neq j \neq l}}^n \bigvee_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^n \varepsilon_{ij} \varepsilon_{jk} \dots \varepsilon_{lm} \bar{x}_k. \tag{3.38}$$

Выражение (3.38) представляет собой функцию неработоспособности *i*-го узла из-за цепочечного развития аварий, когда развитие отказа доходит до этого узла. Однако часть цепочек или их длина может оказаться излишней, поскольку по пути к *i*-му узлу они могут погасить узлы, через которые питается рассматриваемый. Поэтому необходимое и достаточное условие можно найти из условия погашения узлов, образующих минимальные сечения на пути от источников питания до рассматриваемого

$$\bar{Z}'_{m} = \bigvee_{k=1}^{m_i} \left(\bigwedge_{j \in M_k} \bar{Z}'_{m} \right) \text{ при } \begin{cases} x_j x_g = 0, & g \neq f; \\ x_j x_g x_l = 0, & g \neq l \neq f; \\ x_j x_g x_l \dots = 0, & f \neq l \neq g \neq \dots, \end{cases} \tag{3.39}$$

где m_i – количество минимальных сечений, образуемых узлами на пути от источников питания до *i*-го узла, M_k – множество номеров узлов, входящих в *k*-е сечение

Совокупности узлов, образующих минимальные сечения по отношению к *i*-му узлу, можно получить из выражения (3.34), полагая в нем

$$\bar{x}_{jk} = \varepsilon_{jk} = 0 \quad (j = \bar{1}, n; \quad j = \bar{1}, n; \quad j \neq k).$$

При решении задач с цепочечным развитием аварий характерным является определение показателей надежности не одного узла сети, а некоторой их совокупности, например *i, j, k, l*. Логическая функция неработоспособности для такой совокупности узлов представится произведением

$$\bar{Z}'_{i,j,k,l} = \bar{Z}'_i \bar{Z}'_j \bar{Z}'_k \bar{Z}'_l \tag{3.40}$$

Табличные методы. Суть этих методов состоит в упорядоченном переборе с помощью таблиц состояний и событий в системе и отборе из них тех, которые представляют интерес с позиции надежности. Искомые события и состояния связаны с совпадением отказов одних с неработоспособными состояниями других элементов. Построенные определенным образом таблицы позволяют организовать целенаправленный перебор таких состояний и совпадений. Формы таблиц могут быть различными, отражая специфику задачи и системы.

Обычно количество таблиц зависит от количества рассматриваемых функций системы и количества учитываемых совместных наложений неработоспособных состояний и отказов элементов.

Так, например, если для системы, представленной на рис. 3.4,б, определяется функция связи между входом (генерацией) и узлом 3, а количество учитываемых наложений не более двух, то достаточно иметь только одну таблицу (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Таблица состояний и переходов

Исходные работоспособные состояния системы (номера отключенных элементов)	Номера элементов и результаты их отказов (1 – приводящие к отказу системы, пустые клетки – не приводящие к отказу системы)								
	1	2	3	4	12	14	23	34	24
0	1		1						
2	1	–	1	1		1		1	
4	1	1	1	–	1		1		
12	1		1	1	–	1			
14	1	1	1		1	–			
23	1		1	1			–	1	
34	1	1	1				1	–	
24	1		1						–

Здесь индексы *i* и *j* у сечения S_{ij} обозначают номера элементов системы (например, *i* = 2 или *i* = 23, ..., *j* = 2, *j* = 14 и т.д.), а под номером отключенного элемента «0» указывается исходное состояние системы со всеми включенными элементами, прочерком исключаются события отказа элемента, когда он исходно отключен. Пустые клетки указывают на то, что в данном исходном работоспособном состоянии отказ соответствующего элемента не приведет к отказу системы. Если необходимо учесть более чем двойное, например, тройное наложение состояний и событий, то необходимо составить еще аналогичную таблицу, где исходными работоспособными состояниями будут состояния, отображенные в предыдущей таблице пустыми клетками, т.е. состояния системы с отключенными двумя элементами, а по столбцам будут также перебираться отказы всех элементов системы. Снова появятся пустые клетки и клетки с единицами.

При необходимости учета наложений и отказов сразу четырех элементов повторяется процедура, аналогичная предыдущей.

Если в исследуемой системе рассматривается надежность по отношению к нескольким выполняемым ею функциям (например, надежность электроснабжения, кроме третьего, еще второго и четвертого узлов системы на рис. 3.4), то иногда удобно каждой функции присвоить обозначение (например, Φ_2, Φ_3, Φ_4) и вместо единицы в клетках таблицы внести символы тех функций, которые нарушаются при отказе перебираемых элементов.

Табличный метод представляет собой не что иное, как упорядоченный метод отыскания сочетаний элементов, образующих минимальные сечения. Заполнение таблицы единицами требует соответствующего анализа структуры и функциональных связей элементов в системе, который обычно выполняется не формализованным образом, хотя нет принципиальных каких-либо ограничений по формализации этой процедуры. Метод удобен и прост в неформализованном виде для расчета относительно небольших систем (до ≈ 10 элементов) при учете наложений состояний и отказов до двух элементов и позволяет просто учесть специфику отказов элементов различных объектов.

На основе полученной табл. 3.5 можно составить логическую функцию неработоспособности рассматриваемой системы:

$$\begin{aligned} \bar{Z} = & \overline{x_1 + x_3 + x_2} \cdot \overline{x_1 + x_2} \cdot \overline{x_3 + x_2} \cdot \overline{x_4 + x_2} \cdot \overline{x_{14} + x_2} \cdot \overline{x_{34} + x_4} \cdot \overline{x_1 +} \\ & \overline{x_4} \cdot \overline{x_3 + x_4} \cdot \overline{x_{12} + x_4} \cdot \overline{x_{23} + x_{12}} \cdot \overline{x_1 + x_{12}} \cdot \overline{x_3 + x_{12}} \cdot \overline{x_4 + x_{12}} \cdot \overline{x_{14} +} \\ & \overline{x_{14}} \cdot \overline{x_1 + x_{14}} \cdot \overline{x_2 + x_{14}} \cdot \overline{x_3 + x_{14}} \cdot \overline{x_{12} + x_{23}} \cdot \overline{x_1 + x_{23}} \cdot \overline{x_4 + x_{23}} \cdot \overline{x_{34} +} \\ & \overline{x_{34}} \cdot \overline{x_1 + x_{34}} \cdot \overline{x_2 + x_{34}} \cdot \overline{x_3 + x_{24}} \cdot \overline{x_1 + x_{24}} \cdot \overline{x_3}. \end{aligned}$$

После простейших преобразований (типа поглощения $\overline{x_1 + x_1 x_2} = \overline{x_1}$ и т.п.) получаем

$$\bar{Z} = \overline{x_1 + x_3 + x_2} \cdot \overline{x_4 + x_2} \cdot \overline{x_{14} + x_2} \cdot \overline{x_{34} + x_4} \cdot \overline{x_{12} + x_4} \cdot \overline{x_{23} + x_{12}} \cdot \overline{x_{14} + x_{23}} \cdot \overline{x_{34}}.$$

Как видно, данная логическая функция отличается от ранее полученной (3.31) только отсутствием членов, состоящих из произведений трех показателей состояния элементов. Но это и не учитывалось при составлении табл. 3.5 (учитывалось только наложение неработоспособных состояний двух элементов).

Таблицы вида 3.5 позволяют достаточно просто учесть и более «тонкие» события, например, отказ коммутационного аппарата при отключении им поврежденного элемента. Для тех случаев, когда отказ i -го элемента не приводит к отказу системы (клетка в столбце под номером этого элемента пустая, без единицы — $S_{ri} = 0$), он все

же может наступить, если коммутационный аппарат k , отключающий поврежденный элемент, откажет (событие $\varepsilon_{ki} = 1$) и повреждение перейдет на другой k -й элемент, что в совокупности с предыдущими событиями приведет к отказу системы. Для учета таких событий достаточно в пустые клетки табл. 3.5 вписать величины ε_{ki} , принимающие значения 0 или 1.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Расчетные методы определения вероятностных показателей надежности в зависимости от используемых математических средств можно подразделить на *аналитические* и *имитационные* (машинно-статистические).

Предварительно проанализируем вопрос о необходимой и достаточной номенклатуре определяемых показателей надежности систем, поскольку полный перечень их даже для абстрактного объекта достаточно велик и часть их может быть получена из других (см. гл. 2). Если рассматривается восстанавливаемый объект с v возможными состояниями, то как минимум обычно требуется определение v показателей — частоты попаданий объекта в эти состояния или средние времена нахождения объекта в них. Если же необходимо знать еще и частоты того, из каких состояний объект переходит в данное, то минимальное число показателей возрастает до $v(v-1)$. Слово «минимальное» здесь имеет тот смысл, что нас не интересуют законы распределения времен нахождения объекта в тех или иных состояниях, а мы довольствуемся лишь средними временами нахождения объекта в этих состояниях или полагаем, что эти времена подчиняются экспоненциальному закону.

Для восстанавливаемого объекта, имеющего всего два состояния, минимальное количество показателей также равно двум. Это могут быть средние времена нахождения его в этих состояниях либо один из них в сочетании с комплексным показателем, например коэффициентом готовности (или неготовности), характеризующим одновременно и другое единичное свойство.

В случае невозвращаемого объекта минимальное число показателей сокращается и для объекта с двумя состояниями требуется всего один показатель.

Как правило, этот минимум показателей достаточен для определения других (комплексных) показателей и решения многих практических задач. Это, конечно, не исключает возможности появления практических задач, требующих более полных характеристик

состояний объекта. Поэтому при рассмотрении далее методов расчета мы будем отмечать тот минимум показателей, которые они позволяют определять.

Аналитические методы. Данные методы построены на использовании теорем теории вероятностей (сложения, умножения вероятностей, формулы полной вероятности и др.). С их помощью устанавливаются связи между вероятностями событий, состояний элементов с событиями и состояниями системы. В самом общем виде показатель безотказности – вероятность того, что система, находясь в состоянии l , не снизит свой уровень работоспособности ниже l -го уровня за заданное время t – можно записать как

$$P_0^{(l)}(t) = P\{z(t) \geq l\} \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_0, \quad 0 < l \leq v, \quad (3.41)$$

а показатель восстанавливаемости – вероятность того, что система, находясь в состоянии l , за заданное время t повысит уровень своей работоспособности выше l -го уровня:

$$G^{(l)}(t) = 1 - P\{z(t) \leq l\} \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_b, \quad 0 < l \leq v. \quad (3.42)$$

Комплексный показатель – коэффициент готовности, как вероятность заставить систему в работоспособном состоянии l -го уровня – определяется как

$$K_T^{(l)} = P\{z(t) = l\}. \quad (3.43)$$

В зависимости от способа представления функции состояния $z(t)$ системы и принимаемых допущений разработан ряд аналитических методов расчета показателей надежности для абстрактной системы.

Метод, основанный на моделировании в системе марковским процессом. Процесс, протекающий в системе, называют марковским (или потоком без последствия), если для каждого момента времени вероятность любого состояния системы в будущем зависит только от состояния системы в настоящий момент и не зависит от того, каким образом система пришла в это состояние. Для того чтобы такой процесс протекал в системе, необходимо, чтобы потоки отказов и восстановлений элементов системы были простейшими (пуассоновскими, стационарными), т.е. с постоянными интенсивностями отказов и восстановлений $\lambda_i = \text{const}$, $\mu_i = \text{const}$ (законы распределения времени работы до отказа и времени восстановления элементов – экспоненциальные).

Экспоненциальность законов является первым допущением в этом методе, вторым – элементы могут находиться только в двух состояниях (работоспособном и неработоспособном). Эти два су-

щественных допущения, конечно же, снижают мощность метода, но в остальном он является одним из фундаментальных.

Искомые вероятностные показатели здесь определяются с использованием структурно-функционального представления системы в виде графа состояний и переходов.

Суть метода состоит в следующем. Обозначим вероятность того, что система с n элементами в момент времени t находится в состоянии i через $P^{(i)}(t)$, где $i = 1, 2, 3, \dots, 2^n$ (2^n – общее число состояний системы, так как каждый элемент может находиться в двух состояниях). Далее, пусть $P^{(y)}(\Delta t)$ – условная вероятность того, что система, перейдет за время Δt из состояния i в состояние j . Совокупность всех состояний системы в момент времени t образует полную группу несовместных событий. Тогда на основании теоремы о полной вероятности для состояния j в момент $t + \Delta t$ можно написать

$$P^{(j)}(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^{2^n} P^{(i)}(t) P^{(y)}(\Delta t), \quad j = 1, 2, \dots, 2^n. \quad (3.44)$$

При этом предполагается, что время Δt так мало, что переход из одного состояния в другое за Δt возможен лишь один раз. Если вычесть из обеих частей уравнения (3.44) величину $P^{(j)}(t)$, то его можно переписать следующим образом:

$$P^{(j)}(t + \Delta t) - P^{(j)}(t) = \sum_{i=1}^{2^n} P^{(i)}(t) [P^{(y)}(\Delta t) - \delta_{ij}],$$

где $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$ и $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$.

Разделив последнее уравнение на Δt и устремив $\Delta t \rightarrow 0$, получаем

$$\frac{dP^{(j)}}{dt} = \sum_{i=1}^{2^n} v_{ij} P^{(i)}(t), \quad j = 1, 2, \dots, 2^n, \quad (3.45)$$

где

$$\left. \begin{aligned} v_{ij} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P^{(y)}(\Delta t)}{\Delta t} \quad \text{при } i \neq j; \\ v_{ii} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P^{(ii)}(\Delta t) - 1}{\Delta t}, \quad i = 1, 2, \dots, 2^n. \end{aligned} \right\} \quad (3.46)$$

Коэффициенты v_{ij} – постоянные величины, не зависящие от времени (что следует из понятия марковского процесса), они определяются совокупностью интенсивностей отказов λ_i и ремонтов μ_i элементов системы.

Для решения системы дифференциальных уравнений можно воспользоваться преобразованием Лапласа. Систему (3.45) удобнее представить в матричном виде

$$\begin{bmatrix} \frac{dP^{(1)}}{dt} \\ \frac{dP^{(2)}}{dt} \\ \dots \\ \frac{dP^{(i)}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & \dots & v_{1j} & \dots \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & \dots & v_{2j} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{i1} & v_{i2} & v_{i3} & \dots & v_{ij} & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P^{(1)}(t) \\ P^{(2)}(t) \\ \dots \\ P^{(i)}(t) \end{bmatrix}. \quad (3.47)$$

После операторного (оператор s) преобразования Лапласа получаем

$$sP(s) = VP(s) - P(0), \quad (3.48)$$

где $P(s)$ – матрица-столбец искомых вероятностей; V – матрица коэффициентов перехода; $P(0)$ – матрица-столбец начальных значений вероятностей.

Решая уравнение (3.48), получаем

$$P(s) = [sI - V]^{-1} P(0), \quad (3.49)$$

где I – единичная матрица.

Решение системы уравнений (3.47) или (3.49) позволяет найти вероятность всех состояний во времени с учетом начальных значений

$P^{(i)}(0)$, а также условия $\sum_{i=1}^{2^n} P^{(i)}(t) = 1$.

Если определяется вероятность нахождения системы в каких-то состояниях в момент времени, далеко отстоящий от начального (финальные вероятности), то система уравнений (3.45) или (3.48)

упрощается за счет $\frac{dP^{(j)}}{dt} \rightarrow 0$ (при $s = 0$) и принимает вид

$$\sum_{i=1}^{2^n} P_{\infty}^{(i)} v_{ij} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, 2^n. \quad (3.50)$$

Эта система также с учетом $\sum_{i=1}^{2^n} P_{\infty}^{(i)} = 1$ позволяет найти вероятности

всех состояний $P_{\infty}^{(i)}$.

Уравнения марковских процессов дают возможность вычислять как вероятности состояний (например, коэффициенты готовности или неготовности), так и вероятности наступления тех или иных событий (например, вероятности безотказной работы или отказа). В последнем случае искомое событие связывают с попаданием системы в поглощающее состояние.

В качестве примера определим показатели надежности системы, состоящей из двух элементов.

Решение

Как было отмечено выше, данная система имеет четыре состояния: z_0 – оба элемента неработоспособны, z_1 – неработоспособен только первый элемент, z_2 – неработоспособен второй элемент, z_3 – оба элемента работоспособны. Если элементы системы восстанавливаемые, то граф состояний и переходов системы аналогичен рассматриваемому выше и представлен на рис. 3.3. Для составления уравнения системы определим коэффициенты.

Коэффициент

$$v_{00} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P^{(00)}(\Delta t) - 1}{\Delta t},$$

где $P^{(00)}(\Delta t)$ – условная вероятность того, что оба элемента, находясь в неработоспособном состоянии, через Δt останутся в этом же состоянии E_0 . Эту вероятность можно найти следующим образом. Если в момент времени t оба элемента находились в восстановительном ремонте и законы распределения вероятностей их восстановления описываются функциями $G_1(t) = 1 - e^{-\mu_1 t}$ и $G_2(t) = 1 - e^{-\mu_2 t}$ соответственно, то вероятности того, что ремонты будут закончены за интервал времени Δt , определяются с точностью до малых величин более высокого порядка

$$G_1(\Delta t) = 1 - e^{-\mu_1 \Delta t} = 1 - (1 - \mu_1 \Delta t + \dots) \approx \mu_1 \Delta t;$$

$$G_2(\Delta t) = 1 - e^{-\mu_2 \Delta t} = 1 - (1 - \mu_2 \Delta t + \dots) \approx \mu_2 \Delta t.$$

Вероятность окончания за Δt ремонта хотя бы одного из элементов, т.е. вероятность выхода из состояния E_0 ,

$$G_{1,2}(\Delta t) = \mu_1 \Delta t + \mu_2 \Delta t - \mu_1 \mu_2 \Delta t^2 \approx (\mu_1 + \mu_2) \Delta t.$$

Вероятность противоположного последнему событию и даст искомую вероятность

$$P^{00}(\Delta t) = 1 - G_{1,2}(\Delta t) = 1 - (\mu_1 + \mu_2) \Delta t$$

и, следовательно,

$$v_{00} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1 - (\mu_1 + \mu_2)\Delta t - 1}{\Delta t} = -(\mu_1 + \mu_2).$$

Коэффициент

$$v_{11} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P^{(11)}(\Delta t) - 1}{\Delta t},$$

где $P^{(11)}(\Delta t)$ – условная вероятность того, что первый элемент, находясь в восстановительном ремонте в момент t , за время Δt останется в этом же состоянии, а второй элемент за время Δt не откажет. С точностью до малых величин более высокого порядка вероятность окончания ремонта первого элемента за время Δt равна $G_1(\Delta t) \approx \mu_1 \Delta t$, а вероятность отказа второго элемента

$$Q_2(\Delta t) = 1 - e^{-\lambda_2 \Delta t} \approx \lambda_2 \Delta t.$$

Тогда вероятность выхода системы из первого состояния будет связана с вероятностью реализации хотя бы одного из двух рассмотренных событий и равна их сумме, а искомая вероятность $P^{(11)}(\Delta t)$ является вероятностью противоположного последнему событию и равна

$$P^{(11)}(\Delta t) \approx 1 - \lambda_2 \Delta t - \mu_1 \Delta t = 1 - (\lambda_2 + \mu_1) \Delta t$$

и, следовательно, коэффициент v_{11} и аналогичный ему коэффициент v_{22}

$$v_{11} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1 - (\lambda_2 + \mu_1)\Delta t - 1}{\Delta t} = -(\lambda_2 + \mu_1); \quad v_{22} = -(\lambda_1 + \mu_2).$$

Логика вывода выражения для коэффициента v_{33} аналогична таковой для коэффициента v_{00} , если вместо процесса восстановления рассматривать процесс отказов элементов

$$v_{33} = -(\lambda_1 + \lambda_2).$$

Определим коэффициенты перехода системы из одного состояния в другое, как это показано на графе переходов стрелками между состояниями (см. рис. 2.2).

Коэффициент

$$v_{31} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P^{(31)}(\Delta t)}{\Delta t},$$

где $P^{(31)}(\Delta t)$ – вероятность того, что первый элемент, будучи работоспособным в момент времени t , за время Δt откажет.

Вероятность этого события

$$Q_1(\Delta t) = 1 - e^{-\lambda_1 \Delta t} \approx \lambda_1 \Delta t = P^{(31)}(\Delta t),$$

и, следовательно, коэффициент v_{31} и аналогичный ему коэффициент v_{32}

$$v_{31} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\lambda_1 \Delta t}{\Delta t} = \lambda_1; \quad v_{32} = \lambda_2.$$

Коэффициент

$$v_{13} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P^{(13)}(\Delta t)}{\Delta t},$$

где $P^{(13)}(\Delta t)$ – вероятность того, что первый элемент, находясь в момент времени t в неработоспособном состоянии, за время Δt восстановится, т.е.

$$P^{(13)}(\Delta t) = G_1(\Delta t) = 1 - e^{-\mu_1 \Delta t} \approx \mu_1 \Delta t,$$

и, следовательно, коэффициент $v_{13} = \mu_1$.

Аналогичные рассуждения позволяют получить выражения для остальных коэффициентов: $v_{23} = \mu_2$, $v_{10} = \lambda_2$, $v_{20} = \lambda_1$, $v_{01} = \mu_2$, $v_{02} = \mu_1$. Для наглядности на рис. 3.6 повторен граф состояний и переходов системы с указанием возле стрелок коэффициентов переходов.

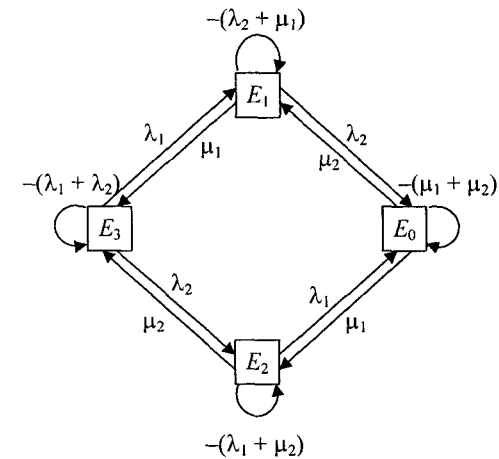


Рис 3 6

Уравнения системы будут иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP^{(0)}(t)}{dt} &= -(\mu_1 + \mu_2)P^{(0)}(t) + \lambda_2 P^{(1)}(t) + \lambda_1 P^{(2)}(t); \\ \frac{dP^{(1)}(t)}{dt} &= \mu_2 P^{(0)}(t) - (\lambda_2 + \mu_1)P^{(1)}(t) + \lambda_1 P^{(3)}(t); \\ \frac{dP^{(2)}(t)}{dt} &= \mu_1 P^{(0)}(t) - (\lambda_1 + \mu_2)P^{(2)}(t) + \lambda_2 P^{(3)}(t); \\ \frac{dP^{(3)}(t)}{dt} &= \mu_1 P^{(1)}(t) + \mu_2 P^{(2)}(t) - (\lambda_1 + \lambda_2)P^{(3)}(t). \end{aligned} \right\}$$

В результате решения системы дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами найдем вероятность нахождения системы в одном из возможных ее состояний $P^{(0)}(t)$, $P^{(1)}(t)$, $P^{(2)}(t)$, $P^{(3)}(t)$.

Если элементы в системе имеют последовательное соединение, то вероятность работоспособного состояния определяется вероятностью третьего состояния, поэтому $K_r(t) = P^{(3)}(t)$. Если же элементы соединены параллельно, то вероятность работоспособного состояния определяется вероятностями первого, второго и третьего состояний. Так как эти состояния несовместны, то

$$K_r(t) = P^{(1)}(t) + P^{(2)}(t) + P^{(3)}(t) = 1 - P^{(0)}(t), \quad q(t) = P^{(0)}(t)$$

Полученные вероятности четырех состояний системы позволяют вычислить коэффициенты готовности системы не только с параллельными или последовательными структурами, но и с более сложными. Например, если в рассматриваемой системе неработоспособными являются нулевое и второе состояния (что уже не позволяет представить соединение элементов ни параллельным, ни последовательным образом), то

$$K_r(t) = P^{(1)}(t) + P^{(3)}(t)$$

При составлении дифференциальных уравнений для определения вероятности события попадания системы в какое-то состояние, например E_0 , являющееся отказом системы при параллельном соединении ее элементов, следует «запретить» переходы системы из E_0 в E_1 и E_2 , т.е. рассмотреть марковский процесс, у которого состояние E_0 является поглощающим (на графе убираются стрелки, исходящие из этого состояния).

Уравнения той же двухэлементной системы примут в этом случае вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP^{(0)}(t)}{dt} &= \lambda_2 P^{(1)}(t) + \lambda_1 P^{(2)}(t); \\ \frac{dP^{(1)}(t)}{dt} &= -(\lambda_2 + \mu_1) P^{(1)}(t) + \lambda_1 P^{(3)}(t); \\ \frac{dP^{(2)}(t)}{dt} &= -(\lambda_1 + \mu_2) P^{(2)}(t) + \lambda_2 P^{(3)}(t); \\ \frac{dP^{(3)}(t)}{dt} &= \mu_1 P^{(1)}(t) + \mu_2 P^{(2)}(t) - (\lambda_1 + \lambda_2) P^{(3)}(t) \end{aligned} \right\}$$

В результате решения этой системы получим $P^{(0)}(t)$, $P^{(1)}(t)$, $P^{(2)}(t)$, $P^{(3)}(t)$.

Вероятность $P^{(0)}(t)$ и в данном случае будет характеризовать вероятность отказа системы за время t

$$Q = P^{(0)}(t)$$

Решение составленных систем уравнений в общем виде представляет значительные трудности и является малонаглядным. Если несколько упростить такую

систему, полагая, что она состоит из двух одинаковых элементов, соединенных параллельно, то при начальных условиях $P^{(3)}(0) = 1$, $P^{(1)}(0) = P^{(2)}(0) = P^{(0)}(0) = 0$ можно получить коэффициент готовности

$$K_r(t) = 1 - \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2} \left[1 - e^{-(\lambda + \mu)t} \right],$$

который при $t \rightarrow \infty$ дает

$$K_r = 1 - \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2}, \quad q = 1 - K_r = \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2} = q_1^2,$$

где q_1 – коэффициент неготовности одного элемента

Вероятность безотказной работы

$$P_0(t) = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} (\alpha_2 e^{\alpha_1 t} - \alpha_1 e^{\alpha_2 t}),$$

где

$$\alpha_{1,2} = -0,5\mu \left[\left(1 + \frac{3\lambda}{\mu} \right) \mp \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^2 + \frac{6\lambda}{\mu} + 1} \right].$$

Таким образом, метод, использующий марковские процессы, позволяет строго и в общем виде получать решения, т.е. вероятности всех состояний и их изменения во времени. Однако он ограничен только экспоненциальными моделями элементов. Существенный недостаток метода – большая размерность матрицы состояния $\|v\|$. Например, для системы, состоящей всего из 10 элементов, порядок матрицы равен $2^{10} = 1024$, что вызывает, с одной стороны, большие трудности в переборе всех состояний системы и определении коэффициентов перехода, а с другой стороны, создает даже при существующих вычислительных средствах затруднения по обращению матриц. Чтобы избежать затруднений, можно далее упростить модель системы.

Как было видно, одной из трудностей метода, использующего марковские процессы, являлась большая размерность возможных состояний системы. В практических задачах обычно интерес представляют не все состояния системы, а только некоторые, связанные с ее отказом. Поэтому если все состояния системы разделены на два множества, одно из которых определяет работоспособные состояния системы, а второе – неработоспособные, и важен лишь факт нахождения системы в одном из двух множеств, то решение задачи можно существенно упростить.

Логико-вероятностный метод. Такое название закрепилось за рассматриваемым методом, хотя любой метод расчета надежности содержит в себе и логическую и вероятностную части. Здесь же подразумевается то, что метод основан на применении теорем теории вероятностей к функциям алгебры логики.

Такая основа метода предопределила принимаемые здесь допущения. В отличие от предыдущего метода предполагается, что не только элементы могут находиться в двух состояниях, но и сама система. Кроме того, этот метод в основном применим к системам, которые могут быть представлены сетевой структурой в смысле надежности.

Теоретически метод может быть применим к системе, времена безотказной работы и восстановлений элементов которой распределены по любому закону, однако практически он используется для систем с экспоненциально распределенными временами (простейшим потоком отказов).

Таким образом, если структурно-функционально система описана функцией алгебры логики $z = z \{x(t)\}$, то коэффициент готовности определится как

$$K_r = P\{z(t) = 1\}, \quad (3.43a)$$

где $z(t)$ – функция работоспособности в момент времени t ,

а

$$q = P\{\bar{z}(t) = 1\},$$

где $\bar{z}(t)$ – функция неработоспособности в момент времени t .

В качестве второго основного показателя можно определять вероятность безотказной работы на интервале времени $[0; t]$:

$$P_0(t) = P\{z(t) = 1, \quad 0 \leq t \leq t_0\}, \quad (3.41a)$$

где t_0 – время до отказа; а $z(t)$ функция работоспособности системы на интервале времени $0 \leq t \leq t_0$.

Различие между (3.43a) и (3.41a) заключается в том, что функция работоспособности системы примет значение 1 в заданный момент t , а во втором случае – функция работоспособности будет равна единице на интервале времени до отказа.

В качестве примера определим вероятностные показатели надежности системы, состоящей из n последовательно соединенных в смысле надежности независимых элементов.

Решение

Функция работоспособности в момент времени t имеет вид

$$z = x_1 x_2 \dots x_n.$$

Коэффициент готовности

$$K_r = P(z = 1).$$

На основе теоремы умножения вероятностей получаем

$$K_r = P(z = 1) = P(x_1 = 1) P(x_2 = 1) \dots P(x_n = 1) = \prod_{i=1}^n P(x_i = 1).$$

Поскольку $P(x_i = 1) = K_{r_i}$, то

$$K_r = \prod_{i=1}^n K_{r_i}.$$

Здесь под K_r, K_{r_i} имеются в виду как стационарные, так и нестационарные коэффициенты готовности.

Коэффициент неготовности

$$q = 1 - K_r = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i).$$

Если $q_i \ll 1$, то

$$q \approx \sum_{i=1}^n q_i.$$

Ошибка последней формулы не превышает величины $0,5 \left[\sum_{i=1}^n q_i \right]^2$.

Вероятность безотказной работы. Так как система проработает без отказа на интервале $[0; t]$ только при условии, что все ее элементы не откажут на этом интервале времени, то

$$z(t) = x_1(t) x_2(t) \dots x_n(t) \quad \text{при} \quad 0 \leq t \leq t_0$$

и

$$P_0(t) = P\{z(t) = 1\} = P\{x_1(t) = 1\} P\{x_2(t) = 1\} \dots P\{x_n(t) = 1\} =$$

$$= \prod_{i=1}^n P\{x_i(t) = 1\}.$$

Но $P\{x_i(t)=1 \text{ при } 0 \leq t \leq t_0\} = P_{0i}(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента, тогда

$$P_0(t) = \prod_{i=1}^n P_{0i}(t).$$

Если учесть (2.8), то

$$e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(t) dt},$$

откуда

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t),$$

т.е. интенсивность отказа системы равна сумме интенсивностей отказов ее элементов.

Если элементы с простейшими потоками отказов, то $\lambda_i = \omega_i$ и $\omega = \sum_{i=1}^n \omega_i = \sum_{i=1}^n \lambda_i$.

Аналогично вероятность отказа

$$Q(t) = 1 - P_0(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - Q_i(t)].$$

При $Q_i(t) \ll 1$

$$Q(t) \approx \sum_{i=1}^n Q_i(t)$$

с ошибкой, не превышающей величины $0,5 \left[\sum_{i=1}^n Q_i(t) \right]^2$.

Для примера найдем показатели надежности системы, состоящей из n параллельно соединенных в смысле надежности независимых и невосстанавливаемых элементов

Решение

В данном случае удобнее воспользоваться логической функцией неработоспособности на заданном интервале времени $0 \leq t \leq t_0$

$$\bar{z}(t) = \bar{x}_1(t) \bar{x}_2(t) \dots \bar{x}_n(t) \text{ при } 0 \leq t \leq t_0;$$

$$\begin{aligned} Q(t) &= 1 - P_0(t) = P\{\bar{z}(t) = 1 \text{ при } 0 \leq t \leq t_0\} = \\ &= P\{\bar{x}_1(t) = 1\} P\{\bar{x}_2(t) = 1\} \dots P\{\bar{x}_n(t) = 1\}. \end{aligned}$$

Но $P\{\bar{z}_i(t) = 1 \text{ при } 0 \leq t \leq t_0\} = Q_i(t)$, следовательно,

$$\begin{aligned} Q(t) &= \prod_{i=1}^n Q_i(t), \\ P_0 &= 1 - Q(t) \end{aligned}$$

Усложним ситуацию и определим показатели надежности системы, состоящей из двух независимых и восстанавливаемых элементов.

Решение

Логическая функция работоспособности в заданный момент времени $z = x_1 + x_2$ и неработоспособности $\bar{z} = \bar{x}_1 \bar{x}_2$.

Коэффициент неготовности

$$q = P\{\bar{z}(t) = 1\} = P\{\bar{x}_1 \bar{x}_2 = 1\} = P\{\bar{x}_1 = 1\} P\{\bar{x}_2 = 1\}.$$

Но $P\{\bar{x}_i = 1\} = q_i$, следовательно,

$$q = q_1 q_2, \quad (*)$$

соответственно коэффициент готовности

$$K_r = 1 - q = 1 - q_1 q_2 = 1 - (1 - K_{r1})(1 - K_{r2}) = K_{r1} + K_{r2} - K_{r1} K_{r2},$$

или

$$\begin{aligned} K_r &= P(z = 1) = P(x_1 x_2 = 1) = P(x_1 = 1) + P(x_2 = 1) - P(x_1, x_2 = 1) = \\ &= K_{r1} + K_{r2} - K_{r1} \cdot K_{r2}. \end{aligned}$$

В качестве второго основного показателя определим вероятность безотказной работы.

Логическая функция работоспособности z на интервале времени $0 \leq t \leq t_0$ должна быть $z(t) = 1$. Это условие распадается на пять несовместимых событий.

$$z(t) = z_1(t) + z_2(t) + z_3(t) + z_4(t) + z_5(t) = 1,$$

$z_1(t) = 1$ – условие, что отказ обоих элементов не наступит до момента t (рис 3.7,а)

$$z_1(t) = x_1(t) x_2(t) = 1, \text{ при } 0 \leq t \leq t_0,$$

$z_2(t) = 1$ – условие, что отказ элемента 1 наступает до момента t , восстановление его заканчивается после момента t , но второй элемент за время t не отказывает (рис. 3.7,б)

$$z_2(t) = \bar{x}_1(t') \bar{x}_1(\tau) x_2(t) = 1, \text{ при } \begin{cases} 0 \leq t \leq t_0, \\ 0 < t' \leq t, \\ t' < \tau \leq t; \end{cases}$$

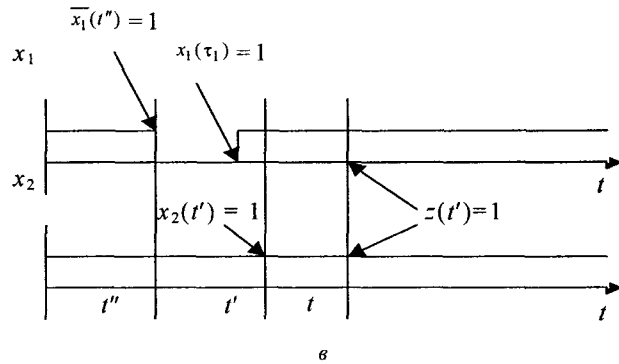
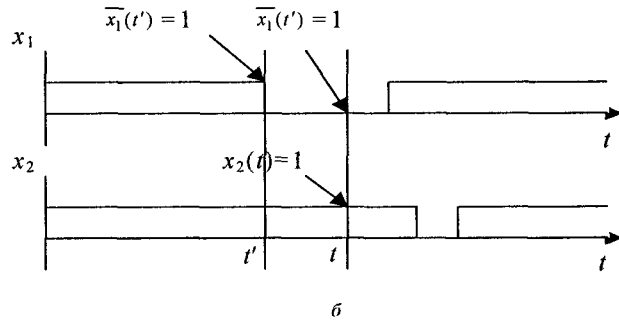
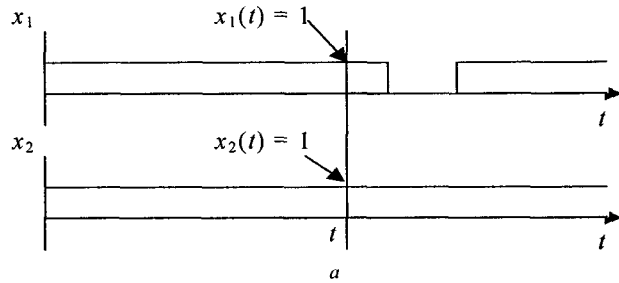


Рис 3 7

$z_3(t) = 1$ – условие, аналогичное $z_2(t) = 1$, но элементы меняются местами

$$z_3(t) = \bar{x}_2(t') \bar{x}_2(\tau) x_1(t) = 1, \text{ при } \begin{cases} 0 \leq t \leq t_0, \\ 0 < t' \leq t, \\ t' < \tau \leq t; \end{cases}$$

$z_4(t) = 1$ – условие, что отказ первого элемента наступает до момента t , восстановление его заканчивается тоже до момента t , второй элемент не отказывает, а на оставшемся участке времени пара работает безотказно (рис. 3.7,в)

$$z_4(t) = \bar{x}_1(t'') x_1(\tau_1) x_2(t') z(\tau) = 1, \text{ при } \begin{cases} 0 < t'' \leq t', \\ t' < \tau_1 \leq t', \\ 0 \leq t' \leq t, \\ t' \leq \tau \leq t; \end{cases}$$

$z_5(t) = 1$ – условие, аналогичное предыдущему, но элементы меняются местами:

$$z_5(t) = \bar{x}_2(t'') x_2(\tau_1) x_1(t') z(\tau) = 1, \text{ при } \begin{cases} 0 < t'' \leq t', \\ t'' < \tau_1 \leq t', \\ 0 \leq t' \leq t, \\ t' \leq \tau \leq t. \end{cases}$$

Переходя к вероятности безотказной работы рассматриваемой системы, получаем:

$$\begin{aligned} P_0(t) &= P\{z(t) = 1, 0 \leq t \leq t_0\} = P\{z_1(t) + z_2(t) + z_3(t) + z_4(t) + z_5(t) = 1\} = \\ &= P\{z_1(t) = 1\} + P\{z_2(t) = 1\} + P\{z_3(t) = 1\} + P\{z_4(t) = 1\} + P\{z_5(t) = 1\} = \\ &= P_{01}(t) P_{02}(t) + \\ &+ P_{02}(t) \int_{t'=0}^t [1 - G_1(t - t')] dQ_1(t') + P_{01}(t) \int_{t'=0}^t [1 - G_2(t - t')] dQ_2(t') + \\ &+ \int_{t'=0}^t P_0(t - t') P_{02}(t') dt' \int_{t''=0}^{t'} \frac{dG_1(t' - t'')}{dt'} dQ_1(t'') + \\ &+ \int_{t'=0}^t P_0(t - t') P_{01}(t') dt' \int_{t''=0}^{t'} \frac{dG_2(t' - t'')}{dt'} dQ_2(t''). \end{aligned}$$

Как видно, строгое определение вероятности безотказной работы даже такой простой системы требует решения интегрального уравнения. Поэтому в практических расчетах часто упрощают метод решения. В частности, допуская, что поток отказов и восстановлений как элементов системы, так и ее самой, стационарный, можно для системы любой сложности частоту отказов и интенсивность восстановлений вычислить по [31]

$$\omega = \frac{1}{1-q} \sum_{i=1}^n \frac{\partial q}{\partial q_i} q_i \mu_i = \frac{1}{K_r} \sum_{i=1}^n \frac{\partial K_r}{\partial K_{r_i}} K_{r_i} \omega_i, \quad (3.51)$$

$$\mu = \frac{1}{1-K_r} \sum_{i=1}^n \frac{\partial K_r}{\partial K_{r_i}} K_{r_i} \omega_i = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^n \frac{\partial q}{\partial q_i} q_i \mu_i. \quad (3.52)$$

Для предыдущего примера (система состоит из двух параллельно соединенных в смысле надежности восстанавливаемых элементов) можно, воспользовавшись (3.51), получить

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{1}{1-q} \left[\frac{\partial(q_1 q_2)}{\partial q_1} q_1 \mu_1 + \frac{\partial(q_1 q_2)}{\partial q_2} q_2 \mu_2 \right] = \\ &= \frac{1}{1-q} (q_2 q_1 \mu_1 + q_1 q_2 \mu_2). \end{aligned}$$

Если учесть, что $q\mu = K_r \omega$, то

$$\omega = \frac{1}{1-q} (q_2 K_{r_1} \omega_1 + q_1 K_{r_2} \omega_2) = \frac{1}{K_r} \sum_{i=1}^2 q_{(-i)} K_{r_i} \omega_i, \quad (**)$$

где $q_{(-i)}$ – коэффициент неготовности исходной системы, у которой исключен i -й элемент.

При $q \ll 1$, когда $1-q \approx 1$, $K_{r_i} \approx 1$,

$$\omega \approx q_2 \omega_1 + q_1 \omega_2.$$

Если же система состоит из n параллельно соединенных в смысле надежности элементов, то функция ее неработоспособности для момента t будет

$$\bar{z}(t) = \bar{x}_1(t) \bar{x}_2(t) \dots \bar{x}_n(t),$$

а коэффициент неготовности

$$q = P\{\bar{z}(t) = 1\} = \prod_{i=1}^n q_i.$$

Для подсчета второго показателя (ω) воспользуемся (3.51):

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{1}{1-q} \left(\frac{\partial \left(\prod_{i=1}^n q_i \right)}{\partial q_1} q_1 \mu_1 + \frac{\partial \left(\prod_{i=1}^n q_i \right)}{\partial q_2} q_2 \mu_2 + \dots + \frac{\partial \left(\prod_{i=1}^n q_i \right)}{\partial q_n} q_n \mu_n \right) = \\ &= \frac{1}{1-q} \left(\prod_{i=1, i \neq 1}^n q_i K_{r_1} \omega_1 + \prod_{i=1, i \neq 2}^n q_i K_{r_2} \omega_2 + \dots + \prod_{i=1, i \neq n}^n q_i K_{r_n} \omega_n \right) = \frac{1}{1-q} \sum_{i=1}^n q_{(-i)} K_{r_i} \omega_i. \end{aligned}$$

Физический смысл полученного выражения достаточно простой: число отказов системы, состоящей из параллельно соединенных в смысле надежности восстанавливаемых элементов, складывается (сумма) из числа отказов ее элементов (множитель ω_i) во время их работы (множитель K_{r_i}) в то время, когда остальная часть системы находится в неработоспособном состоянии (множитель $q_{(-i)}$).

В качестве более сложного примера рассмотрим систему с мостиковой схемой соединения ее элементов (рис. 3.4,б). Логическая функция работоспособности для момента времени t такой системы получена выше и по отношению к третьему узлу имеет вид (3.24). Если для упрощения допустить, что все узлы системы абсолютно надежны, т.е. всегда $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = 1$, то

$$Z_3 = x_{12} x_{23} + x_{14} x_{24} x_{23} + x_{14} x_{34} + x_{12} x_{24} x_{34}.$$

Коэффициент готовности системы найдем как

$$\begin{aligned} K_r = P(z=1) &= K_{r_{12}} K_{r_{23}} + K_{r_{14}} K_{r_{34}} + K_{r_{12}} K_{r_{34}} K_{r_{24}} + K_{r_{14}} K_{r_{24}} K_{r_{23}} - \\ &- K_{r_{12}} K_{r_{23}} K_{r_{14}} K_{r_{24}} - K_{r_{12}} K_{r_{34}} K_{r_{14}} K_{r_{24}} - K_{r_{12}} K_{r_{23}} K_{r_{34}} K_{r_{24}} - \\ &- K_{r_{23}} K_{r_{34}} K_{r_{14}} K_{r_{24}} - K_{r_{12}} K_{r_{23}} K_{r_{34}} K_{r_{14}} + 2K_{r_{12}} K_{r_{23}} K_{r_{34}} K_{r_{14}} K_{r_{24}}. \end{aligned}$$

При равнонадежных элементах ($K_{\Gamma 12} = K_{\Gamma 23} = \dots = K_{\Gamma_{эл}}$)

$$K_{\Gamma} = 2K_{\Gamma_{эл}} + 2K_{\Gamma_{эл}}^3 - 5K_{\Gamma_{эл}}^4 + 2K_{\Gamma_{эл}}^5,$$

а частоту отказов определим по (3.51)

$$\begin{aligned} \omega = & \frac{1}{K_{\Gamma}} \sum_{ij} \frac{\partial K_{\Gamma}}{\partial K_{\Gamma ij}} K_{\Gamma ij} \omega_{ij} = \frac{1}{K_{\Gamma}} \left[\left(K_{\Gamma 23} + K_{\Gamma 34} K_{\Gamma 24} - K_{\Gamma 23} K_{\Gamma 14} K_{\Gamma 24} - \right. \right. \\ & \left. \left. - K_{\Gamma 34} K_{\Gamma 14} K_{\Gamma 24} - K_{\Gamma 23} K_{\Gamma 34} K_{\Gamma 24} + 2K_{\Gamma 23} K_{\Gamma 34} K_{\Gamma 14} K_{\Gamma 24} \right) \times \right. \\ & \times K_{\Gamma 12} \omega_{12} + \left(K_{\Gamma 12} + K_{\Gamma 14} K_{\Gamma 24} - K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 14} K_{\Gamma 24} - K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 34} K_{\Gamma 24} - \right. \\ & \left. - K_{\Gamma 34} K_{\Gamma 14} K_{\Gamma 24} - K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 34} K_{\Gamma 24} + 2K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 34} K_{\Gamma 14} K_{\Gamma 24} \right) \times \\ & \times K_{\Gamma 23} \omega_{23} + \left(K_{\Gamma 34} + K_{\Gamma 24} K_{\Gamma 23} - K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 23} K_{\Gamma 24} - K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 34} K_{\Gamma 24} - \right. \\ & \left. - K_{\Gamma 23} K_{\Gamma 34} K_{\Gamma 24} - K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 23} K_{\Gamma 34} + 2K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 23} K_{\Gamma 34} K_{\Gamma 24} \right) \times \\ & \times K_{\Gamma 14} \omega_{14} + \left(K_{\Gamma 14} + K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 24} - K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 14} K_{\Gamma 24} - K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 23} K_{\Gamma 24} - \right. \\ & \left. - K_{\Gamma 23} K_{\Gamma 14} K_{\Gamma 24} - K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 23} K_{\Gamma 14} + 2K_{\Gamma 23} K_{\Gamma 34} K_{\Gamma 14} K_{\Gamma 24} \right) \times \\ & \times K_{\Gamma 34} \omega_{34} + \left(K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 34} + K_{\Gamma 14} K_{\Gamma 23} - K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 23} K_{\Gamma 14} - \right. \\ & \left. - K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 34} K_{\Gamma 14} - K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 23} K_{\Gamma 34} - K_{\Gamma 23} K_{\Gamma 34} K_{\Gamma 14} + \right. \\ & \left. + 2K_{\Gamma 12} K_{\Gamma 23} K_{\Gamma 34} K_{\Gamma 14} \right) K_{\Gamma 24} \omega_{24} \left. \right]. \end{aligned}$$

При равнонадежных элементах, когда $K_{\Gamma ij} = K_{\Gamma_{эл}}$, $\omega_{ij} = \omega_{эл}$,

$$\omega = \frac{(4K_{\Gamma_{эл}}^2 + 6K_{\Gamma_{эл}}^3 - 20K_{\Gamma_{эл}}^4 + 10K_{\Gamma_{эл}}^5) \omega_{эл}}{K_{\Gamma}}.$$

Табличный метод. Этот метод применяется в тех случаях, когда структурно-функциональные показатели системы определены табличным методом. Как отмечалось выше, этот метод сводит описание структурно-функциональных показателей системы к логическим функциям. Поэтому и вероятные показатели здесь определяются так же, как в логико-вероятностном методе.

Более того, этот метод позволяет рассчитывать показатели надежности систем, элементы которых могут находиться в трех состояниях: в работоспособном, аварийном и плановых ремонтах.

Для этого воспользуемся формулой полной вероятности (см. приложение 3), составим перечень всех состояний плановых ремон-

тов (обычно это перечень элементов системы, хотя могут быть и случаи, когда плановые ремонты некоторых элементов совмещаются). Пусть номер очередного ремонта r , а всего их m . Будем рассматривать коэффициенты плановых простоев $K_{пл}$ (2.38) как вероятности плановых состояний. Поскольку эти состояния не совместны, они образуют полную группу состояний, если в их состав включить и состояние отсутствия в системе плановых ремонтов с его вероятностью

$$K_{пл0} = 1 - \sum_{r=1}^m K_{плr}.$$

Далее на основании формулы полной вероятности

$$q = \sum_{r=0}^m \sum_{i=1}^n K_{плr} S_{ri} q_i, \quad (3.53)$$

для случая, если учитываются наложения отключенных состояний и отказов только двух элементов (см. табл. 3.5).

Если же имеется необходимость учета совпадения наложения отказовых состояний большого количества элементов, то

$$q = \sum_{r=0}^m \sum_{i=1}^n K_{плr} S_{ri} q_i + \frac{1}{2} \sum_{r=0}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n K_{плr} S_{rij} q_i q_j + \dots, \quad (3.53a)$$

где i, j, \dots – номера элементов системы.

Но для этого необходимо построение таблиц состояний и переходов для S_{ij}, \dots .

Обычно очередной плановый ремонт в системе начинается при условии, что его вывод не будет связан с отказом системы, не приведет к нарушению ее функций. Это означает, что параллельные ему элементы находятся в работоспособном состоянии, т.е. в момент отключения $t_{отк}$ для них справедливо $q(t_{отк}) = 0$. Тогда в формуле (3.53) надо подставлять средний коэффициент неготовности (2.33)

$$q(0, t_{плr}) = \alpha q,$$

где α в соответствии с (2.34)

$$\alpha \cong \frac{1}{1 + 1,7 \frac{t_{в}}{t_{плr}}},$$

$\bar{t}_{плr}$ – среднее время r -го планового простоя.

Второй показатель ω найдем на основе (3.51):

$$\omega = \frac{1}{1-q} \sum_{r=0}^m \sum_{i=1}^n K_{плr} S_{ri} K_{\Gamma_i} \omega_i \quad (3.54)$$

при учете наложения отказа одного элемента на отключенное состояние другого элемента.

Если необходимо учесть наложение большого количества отказов, то

$$\omega = \frac{1}{1-q} \left[\sum_{r=0}^m \sum_{i=1}^n K_{плr} S_{ri} \omega_i + \sum_{r=0}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m K_{плr} S_{rij} q_j \omega_i + \dots \right]. \quad (3.54a)$$

Для энергетических систем в большинстве случаев степень резервирования не превышает 2. В большом ходу правило $n-1$, которое означает, что энергоснабжение не должно нарушаться при отказе любого одного элемента (двойная степень резервирования). Для этих случаев достаточным оказываются выражения (3.53) и (3.54).

Прочие аналитические методы. Иногда приходится решать задачи по расчету показателей надежности, когда логическая часть либо весьма индивидуальна, либо крайне проста. Обычно в этих случаях логика укладывается в известные схемы: схема Бернулли или схема независимых испытаний, пуассоновский простейший поток, схема формулы полной вероятности и др.

Схема Бернулли предполагает проведение серии взаимно независимых испытаний, каждое из которых завершается успехом (в соответствии с заранее выбранным критерием) с вероятностью p или неудачей с дополнительной вероятностью $q = 1 - p$.

Для такой схемы можно определить вероятность того, что при n опытах успешными будут k из них, а $(n-k)$ – неудачными:

$$P_k(n) = C_n^k p^k q^{n-k}, \quad (3.55)$$

где $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$.

Если число успехов в n испытаниях обозначить величиной k , то эта величина случайная, а функция распределения ее будет $P_k(n)$, которую называют биномиальной. Слово «биномиальное» отражает тот факт, что (3.55) представляет собой k -й член биномиального разложения $(p+q)^n = 1$.

На основе схемы Бернулли можно решать многие задачи. В частности, определять вероятности работоспособной мощности на

электростанциях и в энергосистеме. Так, если полагать, что на электростанции работают n однотипных агрегатов (т.е. имеем n испытаний), каждый из которых с вероятностью K_{Γ} находится в работоспособном состоянии, а с вероятностью $q = 1 - K_{\Gamma}$ – в неработоспособном состоянии, то вероятность, что в определенный момент окажутся работоспособными k агрегатов, будет определяться формулой (3.55), где $p = K_{\Gamma}$.

Пуассоновский процесс предполагает, что поток происходящих во времени событий обладает свойствами:

- вероятность определенного количества событий пропорциональна длине интервала времени;
- вероятность двух и более событий за промежутки времени стремится к нулю, когда длительность этого промежутка времени стремится к нулю;
- количество событий, появляющихся на любых неперекрещивающихся интервалах времени, независимо между собой.

Такой поток характеризуется параметром – среднее количество событий на интервале времени t

$$\alpha = \lambda t,$$

где λ – частота появления события.

Для пуассоновского потока вероятность появления k событий на интервале времени k определяется как

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}. \quad (3.56)$$

На основе этой формулы можно решать многие задачи надежности. Например, если предположить, что поток отказов генератора на электростанции пуассоновский, то вероятность безотказной работы агрегата будет

$$P_0(t) = e^{-\lambda t},$$

что согласуется с ранее полученным значением.

Если на станции n агрегатов, то вероятность того, что не откажет ни один из них,

$$P_{0,n}(t) = e^{-n\lambda t},$$

а вероятность того, что откажет один агрегат из всех,

$$P_{1,n}(t) = n\lambda t e^{-n\lambda t}$$

и т.д.

В ряде случаев формула полной вероятности позволяет решить задачи, которые не формализуются под рассмотренные выше методы расчета надежности, например, задачи, требующие учета не только аварийных простоев, но и плановых ремонтов. Примеры некоторых задач на рассмотренные здесь методы приводятся в конце параграфа.

Имитационные методы. В тех случаях, когда невозможно при существующих средствах получить решение аналитическими методами или решение крайне сложное, громоздкое, применяют имитационное моделирование, основанное на машинном (ЭВМ) представлении процессов в системе. Основу имитационных методов составляет метод статистического моделирования (метод Монте-Карло от названия города в Монако, знаменитого игорными домами).

Процесс статистического моделирования представляет собой процедуру многократного повторения определенных внешних условий и взаимодействий элементов системы. В результате каждого такого опыта формируется та или иная конкретная реализация исхода испытания. После серии опытов исследователь получает некоторую выборку случайных реализаций, которые затем подвергает стандартным процедурам статистической обработки (рассмотренным, в частности, в § 3.2).

Таким образом, в этом методе моделирование рассматривается как последовательность реальных экспериментов. В ходе этих «экспериментов» происходят «события», причем происходят они в моменты, определяемые случайными процессами с заданными распределениями вероятностей.

Основными этапами такого исследования являются: построение формальной модели, программное обеспечение процесса имитации траекторий модели, имитационные эксперименты.

Этап построения формальной модели сводится к составлению алгоритма формирования необходимой последовательности событий, а также к определению траектории движения объекта, полученной на основе ее характеристик.

Этап организации программного обеспечения заключается в создании машинной программы, позволяющей воспроизвести (имитировать) траекторию модели в соответствии с найденными закономерностями и найти соответствующие показатели работы модели, а также в создании программ работы с моделью.

Этап организации имитационных экспериментов – это работа с моделью (выбор модели, способа обработки выходной информации для эффективного получения необходимых результатов).

В итоге процесс функционирования системы представляется цепью изменений состояний системы $C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow \dots \rightarrow C_k \rightarrow \dots$ в случайные моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots$.

Схематически процесс функционирования для системы из n элементов показан на рис. 3.8, где приняты следующие обозначения: t'_k – момент k -го отказа элемента; t''_k – момент окончания k -го восстановления элемента; t_{ok} – интервал времени от момента $(k-1)$ -го восстановления до момента k -го отказа элемента; t_{bk} – интервал времени от момента $(k-1)$ -го отказа до момента окончания k -го восстановления элемента. Указанные величины связаны между собой соотношениями

$$\left. \begin{aligned} t'_1 &= t_{o1}; & t''_1 &= t'_1 + t_{b1}; \\ t'_2 &= t''_1 + t_{o2}; & t''_2 &= t'_2 + t_{b2}; \\ & \dots & & \dots \\ t'_k &= t''_{k-1} + t_{ok}; & t''_k &= t'_k + t_{bk}. \end{aligned} \right\} \quad (3.57)$$

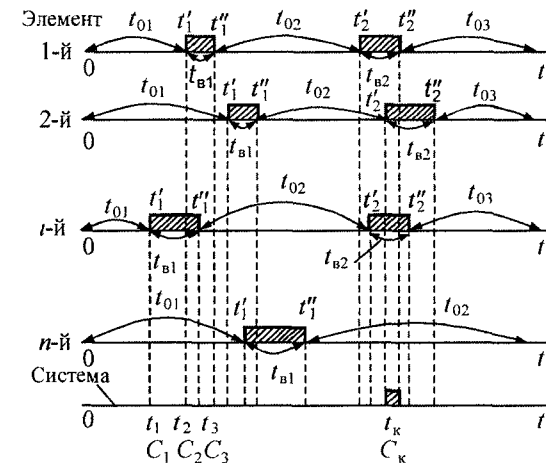


Рис 3.8

Интервалы времени t_{ok} и t_{bk} представляют собой отдельные реализации непрерывных случайных величин t_o и t_b , характеризующих время исправной работы и время восстановления элемента системы. На ЭВМ организуется генерация потоков случайных чисел, подчиненных заданным законам распределения времени работы и

времени восстановления элементов. На основании этих чисел формируются моменты времени по формулам (3.57).

Формирование потоков событий отказов и восстановлений во времени для каждого элемента и анализ состояний системы может быть осуществлен двумя способами, называемыми «параллельным» и «последовательным» решением задачи.

При «параллельном» решении находятся все моменты отказов и восстановлений на рассматриваемом интервале времени для каждого элемента в отдельности. По состояниям элементов в каждый момент времени определяются состояния системы C_k , из них отбираются те, которые характеризуют отказ системы, ее простой. Например, на рис. 3.8 показано, что совпадение простоев элементов 1, 2 и i приводит к отказу системы. Следовательно, момент наступления событий C_k является моментом первого отказа системы, а интервал времени от события C_k до C_{k-1} – временем простоя системы. Запомнив все интересующие нас величины при каждом испытании v , например время до первого отказа $t_{01}(v)$, число отказов n_v , время простоя $t_B(v)$ повторяют испытания системы N раз. При каждом испытании будут получаться новые случайные моменты отказов и восстановлений элементов системы. Если из N испытаний система отказала в L опытах хотя бы по одному разу, то вероятность отказа системы за период t

$$Q(t) = L/N. \quad (3.58)$$

Частота отказов

$$\omega = \sum_{v=1}^N \frac{n_v}{Nt}. \quad (3.59)$$

Аналогично вычисляют и другие необходимые показатели. При «последовательном» решении задачи сначала моделируют моменты времени только первого (очередного) изменения состояния у каждого из элементов системы. По наименьшему из полученных моментов времени формируют первый переход системы в другое состояние (C_1) и одновременно полученное состояние системы анализируется на отказ. Затем аналогично моделируется момент времени следующего изменения состояния системы. Интересующая нас величина (например, время до первого отказа системы, количество отказов, время простоя системы и т.п.) запоминается при каждом опыте на интервале времени и после проведения опытов используется для определения искомых показателей надежности системы. Опыт решения задач на ЭВМ показал, что при «последовательном»

решении задачи лучше и эффективнее используется ЭВМ и прежде всего ее память.

Из краткого описания метода статистических испытаний можно сделать следующие выводы. Его преимущества: позволяет полнее учесть особенности функционирования сложной системы, в том числе с зависимыми элементами, а также любые законы распределения случайных величин, имеет наглядную вероятностную трактовку, малую чувствительность к случайным сбоям машины в процессе решения. Недостатки: частный характер решения, соответствующего фиксированным значениям параметров элементов и выбранным начальным условиям, и сильная зависимость точности и количества необходимых реализаций N от степени надежности элементов и системы.

Чем надежнее элементы и система, тем больше времени требуется для расчета. Минимальное число испытаний системы, обеспечивающее желаемую точность, определяется в процессе расчета. Число необходимых опытов можно оценивать по формуле

$$N \geq \sigma^2 / [\Delta^2 P(\Delta)], \quad (3.60)$$

где σ^2 – дисперсия характеристики; $P(\Delta)$ – вероятность ошибки, большей Δ .

Указанные основные преимущества и недостатки метода определяют и область его использования. Это в основном исследовательские расчеты. Метод может быть эталонным и использоваться для оценки точности других приближенных, но простых методов.

Все рассмотренные методы оценки вероятностных характеристик системы на основе показателей надежности ее элементов предполагали однозначность исходной информации. В действительности же характеристики надежности элементов системы известны с определенной точностью, обусловленной достоверностью и объемом статистической информации, точностью их расчета и прогноза. В связи с этим и выходные показатели надежности системы должны обладать заданной неточностью (неопределенностью). Поэтому возникает задача – оценка достоверности получаемых показателей надежности системы по данным о достоверности характеристик ее элементов. Возможен различный подход к решению этой задачи. Можно использовать теорию чувствительности и статистического моделирования. Разрабатываются специальные прямые методы. Однако все эти подходы находятся пока в стадии разработки.

ЗАДАЧИ ПО МАТЕРИАЛУ ПАРАГРАФА

1. Какой элемент характеризует граф состояний и переходов, изображенный на рисунке?



Здесь E_0 – неработоспособное; E_1 – работоспособное состояние.

2. Построить граф состояний и переходов системы, состоящий из трех независимых и восстанавливаемых элементов.

3. Для условий задачи 2 построить зависимость работоспособности от состояния системы, если отказ первого элемента приводит к снижению работоспособности на 10 %, второго – на 20 %, третьего – на 30 %. Отказ первого и второго – на 40 %, первого и третьего – на 50 %, второго и третьего – на 60 %.

4. Для условия задач 2 и 3 записать условие безотказности системы, работоспособность которой составляет 80 % (в неработоспособном состоянии находится второй элемент).

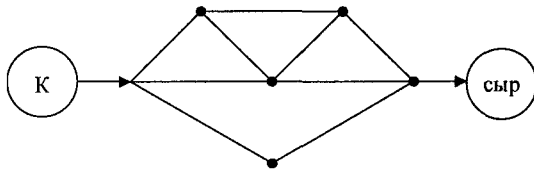
5. Для условий задач 2 и 3 записать условия невозможности, если система находится в состоянии 50 % работоспособности.

6. Студент может добраться до университета несколькими путями:

- сначала автобусом до метро, а потом пересечь на метро или на маршрутное такси до университета;
- сначала трамваем до троллейбуса, а потом пересечь на троллейбус и до университета;
- от дома до университета на такси.

Составить логические функции работоспособности и неработоспособности транспортной системы для данного студента.

7. Крысу поместили в лабиринт, схема которого показана на рисунке. На каждом участке стоит устройство, которое случайным образом может сработать и перекрыть проход через участок. Написать ФАЛ «работоспособности» лабиринта (условия достижения крысой сыра).



8. Представить схемой систему, для которой логическая функция работоспособности в момент t имеет вид:

$$z = x_1x_4x_6 + x_1x_3x_7 + x_1x_3x_5x_6 + x_1x_4x_5x_7 + x_2x_7 + x_2x_3x_4x_6 + x_2x_5x_6.$$

9. По словесной формулировке минимально необходимых условий работоспособности тракта написать логическую функцию работоспособности: тракт работоспособен, если работоспособны каналы a и d , или каналы a , c и e , или каналы b и e , или каналы b , c и d . Построить схему системы.

10. Определить формализованным способом функцию работоспособности системы, изображенной на рис. 3.4,б, относительно всех ее узлов.

Решение

Нулевое приближение

$$Z_1 = x_1; \quad Z_2 = x_2(x_{21} \vee x_{24} \vee x_{23}); \quad Z_3 = x_3(x_{32} \vee x_{34}); \\ Z_4 = x_4(x_{41} \vee x_{42} \vee x_{43}).$$

Первое приближение

$$Z_1 = x_1; \\ Z_2 = x_2[x_{21}Z_{1/2} \vee x_{24}Z_{4/2} \vee x_{23}Z_{3/2}] = x_2[x_{21}x_1 \vee x_{24}x_4 \vee (x_{41} \vee x_{43}) \vee x_{23}x_3x_{34}]; \\ Z_3 = x_3[x_{32}Z_{2/3} \vee x_{34}Z_{4/3}] = x_3[x_{32}x_2(x_{21} \vee x_{24}) \vee x_{34}x_4(x_{41} \vee x_{42})]; \\ Z_4 = x_4[x_{41}Z_{1/4} \vee x_{42}Z_{2/4} \vee x_{43}Z_{3/4}] = x_4[x_{41}x_1 \vee x_{42}x_2(x_{21} \vee x_{23}) \vee x_{43}x_3x_{32}].$$

Второе приближение

$$Z_1 = x_1; \\ Z_2 = x_2[x_{21}Z_{1/2} \vee x_{24}Z_{4/2} \vee x_{23}Z_{3/2}] = \\ = x_2[x_{21}x_1 \vee x_{24}x_4(x_{41}x_1 \vee x_{43}x_3x_{32}) \vee x_{23}x_3x_{34}x_4(x_{41} \vee x_{42})]; \\ Z_3 = x_3[x_{32}Z_{2/3} \vee x_{34}Z_{4/3}] = \\ = x_3\{x_{32}x_2[x_{21}x_1 \vee x_{24}x_4(x_{41} \vee x_{43})] \vee x_{34}x_4[x_{41}x_1 \vee x_{42}x_2(x_{21} \vee x_{23})]\}; \\ Z_4 = x_4[x_{41}Z_{1/4} \vee x_{42}Z_{2/4} \vee x_{43}Z_{3/4}] = \\ = x_4[x_{41}x_1 \vee x_{42}x_2(x_{21}x_1 \vee x_{23}x_3x_{34}) \vee x_{43}x_3x_{32}x_2(x_{21} \vee x_{24})].$$

Третье приближение

$$Z_1 = x_1; \\ Z_2 = x_2[x_{21}Z_{1/2} \vee x_{24}Z_{4/2} \vee x_{23}Z_{3/2}] = \\ = x_2\{x_{21}x_1 \vee x_{24}x_4(x_{41}x_1 \vee x_{43}x_3x_{32}x_2x_{21}) \vee x_{23}x_3[x_{34}x_4(x_{41}x_1 \vee x_{42}x_2x_{21})]\}; \\ Z_3 = x_3[x_{32}Z_{2/3} \vee x_{34}Z_{4/3}] = \\ = x_3[x_{32}x_2(x_{21}x_1 \vee x_{24}x_4x_{41}x_1) \vee x_{34}x_4(x_{41}x_1 \vee x_{42}x_2x_{21}x_1)]; \\ Z_4 = x_4[x_{41}Z_{1/4} \vee x_{42}Z_{2/4} \vee x_{43}Z_{3/4}] = \\ = x_4[x_{41}x_1 \vee x_{42}x_2(x_{21}x_1 \vee x_{23}x_3x_{34}x_4x_{41}) \vee x_{43}x_3x_{32}x_2(x_{21}x_1 \vee x_{24}x_4x_{41})].$$

Четвертое приближение

$$Z_1 = x_1; \\ Z_2 = x_2[x_{21}Z_{1/2} \vee x_{24}Z_{4/2} \vee x_{23}Z_{3/2}] = \\ = x_2\{x_{21}x_1 \vee x_{24}x_4(x_{41}x_1 \vee x_{43}x_3x_{32}x_2x_{21}) \vee x_{23}x_3[x_{34}x_4(x_{41}x_1 \vee x_{42}x_2x_{21}x_1)]\};$$

$$\begin{aligned}
 Z_3 &= x_3 [x_{32}Z_{2/3} \vee x_{34}Z_{4/3}] = \\
 &= x_3 [x_{32}x_2 (x_{21}x_1 \vee x_{24}x_4x_4x_1) \vee x_{34}x_4 (x_{41}x_1 \vee x_{42}x_2x_{21}x_1)]; \\
 Z_4 &= x_4 [x_{41}Z_{1/4} \vee x_{42}Z_{2/4} \vee x_{43}Z_{3/4}] = \\
 &= x_4 [x_{41}x_1 \vee x_{42}x_2 (x_{21}x_1 \vee x_{23}x_3x_{34}x_4x_4x_1) \vee x_{43}x_3x_{32}x_2 (x_{21}x_1 \vee x_{24}x_4x_4x_1)].
 \end{aligned}$$

Функция Z_3 на четвертой итерации не отличается от функции после третьей итерации. Последующие итерации не изменяют вид функций и для остальных узлов.

Если перепишем функцию Z , например, для узла 3 в ДНФ, то получим:

$$Z_3 = x_3x_{32}x_2x_1 + x_3x_{32}x_2x_2x_4x_4x_1 + x_3x_{34}x_4x_4x_1 + x_3x_{34}x_4x_4x_2x_2x_1.$$

Четыре полученных слагаемых соответствуют четырем возможным кратчайшим путям от источника к потребителю, что может быть выявлено из анализа структурной схемы данной системы простым перебором.

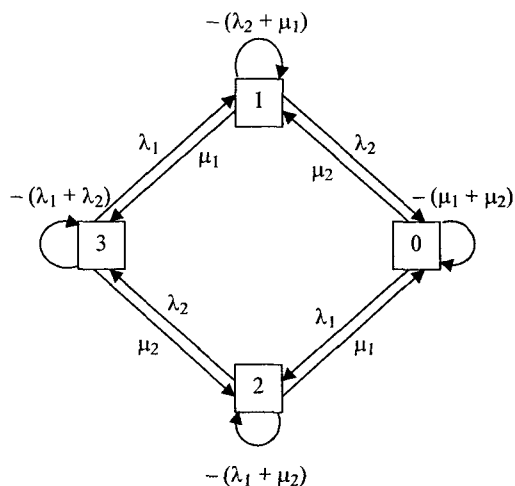
11. Проиллюстрировать (привести примеры) понятия «последовательное» и «параллельное» соединение элементов в системе. Например, лампочки в новогодней гирлянде (соединенные в электрическом смысле последовательно) в смысле надежности также соединены последовательно, а конденсаторы, соединенные в электрическом смысле параллельно в батарею, в смысле надежности (при повреждении типа короткое замыкание) соединены последовательно.

12. Как соединены (в смысле надежности) две руки в системе «человек»?

13. Студент купил кроссовки. По опыту студентов они требуют ремонта в среднем через полгода. Ремонт в мастерской занимает в среднем неделю. Составить граф состояний и переходов и записать систему уравнений для определения различных вероятностей (отказа одной кроссовки, второй, обоих и т.д.).

Решение

Граф состояний и переходов имеет вид:



Здесь $\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{1}{0,5 \text{ года}} = 2 \frac{1}{\text{год}}$ – интенсивность отказа одной кроссовки.

$$\mu_1 = \mu_2 = 1 \frac{1}{\text{нед}} = \frac{1}{1/52 \text{ год}} = 52 \frac{1}{\text{год}}.$$

Система уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dP^{(0)}(t)}{dt} &= -(\mu_1 + \mu_2)P^{(0)}(t) + \lambda_2P^{(1)}(t) + \lambda_1P^{(2)}(t); \\
 \frac{dP^{(1)}(t)}{dt} &= \mu_2P^{(0)}(t) - (\lambda_2 + \mu_1)P^{(1)}(t) + \lambda_1P^{(3)}(t); \\
 \frac{dP^{(2)}(t)}{dt} &= \mu_1P^{(0)}(t) - (\lambda_1 + \mu_2)P^{(2)}(t) + \lambda_2P^{(3)}(t); \\
 \frac{dP^{(3)}(t)}{dt} &= \mu_1P^{(1)}(t) + \mu_2P^{(2)}(t) - (\lambda_1 + \lambda_2)P^{(3)}(t).
 \end{aligned} \right\}$$

Или после подстановки значений интенсивностей:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dP^{(0)}}{dt} &= -104P^{(0)} + 2P^{(1)} + 2P^{(2)}; \\
 \frac{dP^{(1)}}{dt} &= 52P^{(0)} - 54P^{(1)} + 2P^{(3)}; \\
 \frac{dP^{(2)}}{dt} &= 52P^{(0)} - 54P^{(2)} + 2P^{(3)}; \\
 \frac{dP^{(3)}}{dt} &= 52P^{(1)} + 52P^{(2)} - 4P^{(3)}.
 \end{aligned} \right\}$$

Здесь зависимости вероятностей от времени для упрощения записи опущены.

Из второго и третьего уравнений системы видно, что $P^{(1)} = P^{(2)}$.

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dP^{(0)}}{dt} &= -104P^{(0)} + 4P^{(1)}; \\
 \frac{dP^{(1)}}{dt} &= 52P^{(0)} - 54P^{(1)} + 2P^{(3)}; \\
 \frac{dP^{(2)}}{dt} &= 52P^{(0)} - 54P^{(2)} + 2P^{(3)}; \\
 \frac{dP^{(3)}}{dt} &= 104P^{(1)} - 4P^{(3)}.
 \end{aligned} \right\}$$

Если устремить $t \rightarrow \infty$, то рассматриваемые вероятности будут характеризовать коэффициенты готовности – вероятности нахождения кроссовок в соответствующих состояниях. Таким образом, если еще учесть, что

$$P^{(0)} + 2P^{(1)} + P^{(3)} = 1, \quad (*)$$

то из первого уравнения $\frac{dP^{(0)}}{dt} \rightarrow 0$ и $P^{(0)} = \frac{2}{52}P^{(1)}$, из третьего $\frac{dP^{(3)}}{dt} \rightarrow 0$ и $P^{(3)} = 26P^{(1)}$.

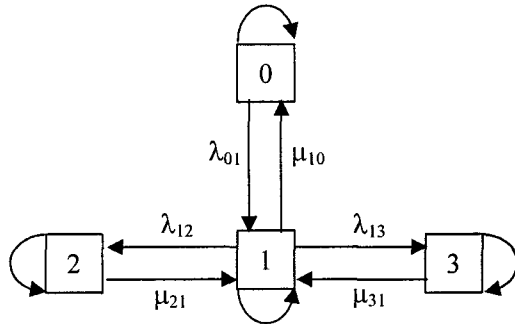
Подставляя это в (*), получаем

$$\frac{2}{52}P^{(1)} + 2P^{(1)} + 26P^{(1)} = 1,$$

$$P^{(1)} = 0,03567; \quad P^{(0)} = 0,00137; \quad P^{(3)} = 0,92742.$$

Следовательно, с вероятностью 92,742 % мы будем встречать студента в кроссовках, а с вероятностью $P^{(0)} + 2P^{(1)} = 7,258$ % они будут находиться в ремонте.

14. По графу состояний и переходов системы, изображенному на рисунке, составить схему дифференциальных уравнений и подобрать пример соответствующей системы.



15. Невосстанавливаемая система состоит из пяти последовательно соединенных в смысле надежности элементов. Определить $P_0(0,5)$, $Q(0,5)$, λ , если времена до отказов элементов распределены экспоненциально. Исходные данные приведены в таблице.

Номер элемента	1	2	3	4	5
λ_i , 1/год	0,1	0,1	0,05	0,1	0,12

16. Для данных предыдущей задачи определить $P_0(0,5)$, $Q(0,5)$, если элементы системы соединены параллельно в смысле надежности.

17. Восстанавливаемая система состоит из пяти последовательно соединенных в смысле надежности элементов. Определить установившиеся значения коэффициента готовности, коэффициента неготовности, частоты отказов системы. Исходные данные приведены в таблице.

Номер элемента	1	2	3	4	5
q_i , о. е.	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
ω_i , отк/год	1	1	2	2	2

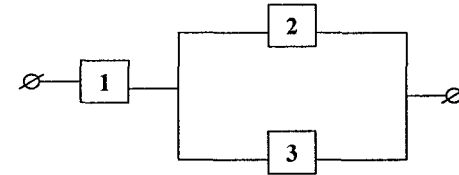
18. Решить предыдущую задачу, если элементы в смысле надежности соединены параллельно.

19. Автомобильное колесо в смысле надежности можно представить состоящим из двух последовательно соединенных элементов: покрышки (шины) и камеры. Интенсивность отказа камеры может быть принята постоянной и равной $\lambda_k = 0,46 \cdot 10^{-3}$ 1/ч. Интенсивность покрышки зависит от состояния ее износа, т.е. от времени ее эксплуатации $\lambda_n = 0,52 \cdot 10^{-5} t$ 1/ч. Определить вероятность безотказной работы колеса в течение 300 ч.

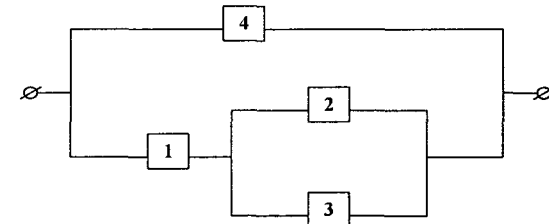
20. Система образована последовательно-параллельным соединением невосстанавливаемых блоков (см. рисунок) с одинаковой и постоянной интенсивностью отказов каждого блока. Записать выражения для расчета:

- 1) вероятности безотказной работы и вероятности отказа;
- 2) средней наработки на отказ.

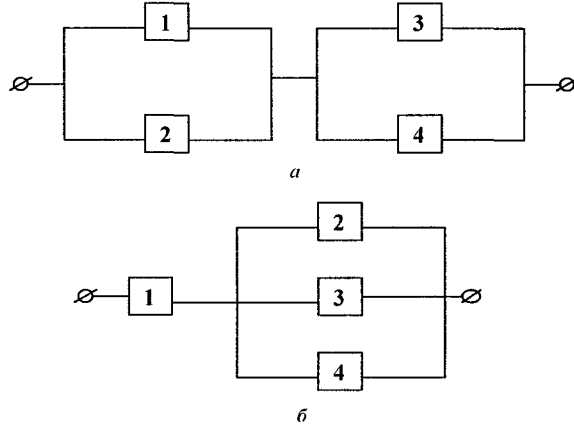
Вычислить данные характеристики системы при $\lambda = 0,4 \cdot 10^{-3}$ 1/ч и $\Delta t = 100$ ч.



21. Для схемы соединения невосстанавливаемых блоков системы, показанной на рисунке, записать формулу расчета вероятности безотказной работы и среднего времени наработки на отказ. Полагая, что все элементы одинаковые и их $\lambda = 0,4 \cdot 10^{-3}$ 1/ч, рассчитать эти показатели для $t = 100$ ч.



22. Для схем соединения невосстанавливаемых блоков системы, показанных на рисунке (а, б) с одинаковой и постоянной интенсивностью отказов каждого блока, записать формулу расчета вероятности безотказной работы и среднего времени наработки на отказ. Рассчитать эти показатели при $\lambda = 0,4 \cdot 10^{-3}$ 1/ч для $\Delta t = 100$ ч. Составить полученные показатели последних четырех систем (задачи 20, 21 и 22).



Решение

а) Запишем функцию неработоспособности

$$\bar{z} = \overline{x_1 x_2} + \overline{x_3 x_4}.$$

Вероятность отказа

$$\begin{aligned} Q(t) &= P(\bar{z} = 1) = P(\overline{x_1 x_2} = 1) + P(\overline{x_3 x_4} = 1) - P(\overline{x_1 x_2 x_3 x_4} = 1) = \\ &= P(\overline{x_1} = 1)P(\overline{x_2} = 1) + \\ &+ P(\overline{x_3} = 1)P(\overline{x_4} = 1) - P(\overline{x_1} = 1)P(\overline{x_2} = 1)P(\overline{x_3} = 1)P(\overline{x_4} = 1) = \\ &= Q_1(t)Q_2(t) + Q_3(t)Q_4(t) - Q_1(t)Q_2(t)Q_3(t)Q_4(t). \end{aligned}$$

При $Q_1(t) = Q_2(t) = Q_3(t) = Q_4(t) = Q_{\text{бл}}(t) = 1 - e^{-\lambda_{\text{бл}} t}$

$$Q(t) = 2Q_{\text{бл}}^2 - Q_{\text{бл}}^4 = (2 - Q_{\text{бл}}^2(t))Q_{\text{бл}}^2(t) = 1 - (2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t})^2;$$

$$P_0(t) = 1 - Q(t) = (2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t})^2 = e^{-2\lambda t} (2 - e^{-\lambda t})^2;$$

$$\bar{t}_0 = \int_0^{\infty} P_0(t) dt = 4 \int_0^{\infty} e^{-2\lambda t} dt - 4 \int_0^{\infty} e^{-3\lambda t} dt + \int_0^{\infty} e^{-4\lambda t} dt = \frac{4}{2\lambda} - \frac{4}{3\lambda} + \frac{1}{4\lambda} = \frac{11}{12\lambda}.$$

При $\lambda = 0,4 \cdot 10^{-3}$ 1/ч и $t = 100$ ч

$$P_0(100) = 0,99684, \bar{t}_0 = 2292 \text{ ч.}$$

23. Система управления состоит из трех блоков. Нарботка на отказ блоков составляет 1100, 960, 980 ч, а среднее время восстановления блоков 50, 40, 42 ч. Предполагая отказы блоков независимыми и закон распределения времени отказов экспоненциальным, определить:

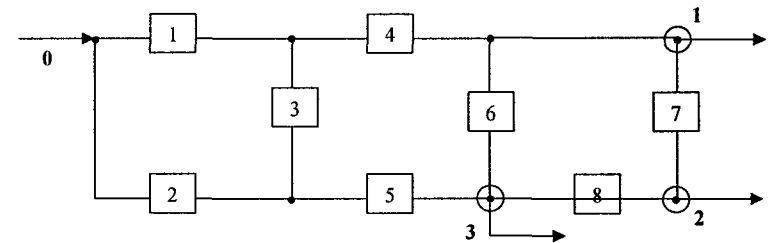
- 1) вероятность безотказной работы системы за период времени 100 часов;
- 2) интенсивности отказов и восстановления системы;
- 3) частоту отказов;
- 4) коэффициенты готовности и неготовности.

Принять, что при отказе любого блока система неработоспособна.

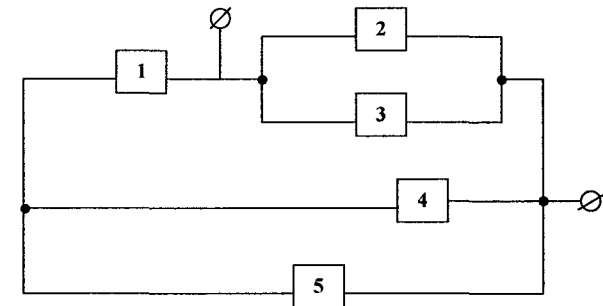
24. Проектируемая система состоит из трех соединенных последовательно блоков. На основании расчетов известно, что интенсивности отказов первого и второго блоков равны $0,4 \cdot 10^{-3}$ 1/ч и $0,35 \cdot 10^{-3}$ 1/ч. Время безотказной работы каждого блока подчинено экспоненциальному закону. Определить:

- 1) интенсивность отказов третьего блока, при которой вероятность безотказной работы системы в течение времени $t = 360$ ч равна 0,94;
- 2) среднее время наработки на отказ отдельных блоков и системы в целом;
- 3) для времени восстановления блоков 170, 160, 200 ч соответственно найти коэффициент готовности системы.

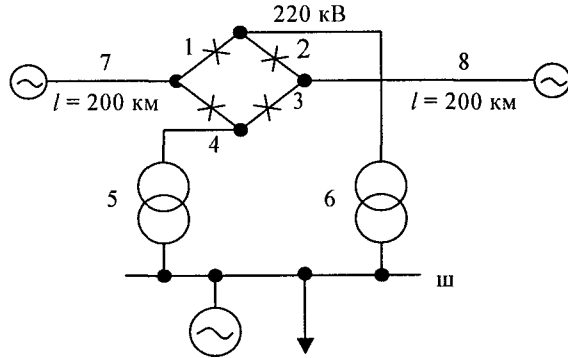
25. Дана схема системы, состоящей из 8 элементов. Записать логические функции работоспособности узлов 1, 2 и 3 относительно узла 0.



26. Дана схема некоторой системы, состоящей из 5 элементов. Записать логические функции работоспособности и неработоспособности относительно выделенных узлов системы.



27. Определить табличным методом показатели надежности РУ (распределительного устройства) (см. схему четырехугольника на рисунке) по отношению к шинам низкого напряжения (Ш) подстанции. Ненадежностью элементов низшего напряжения пренебречь. Пропускные способности элементов сети никаких ограничений не накладывают.



Показатели надежности элементов:

линий $\omega_{y7} = \omega_{y8} = \omega_{yl} = 1 \cdot 10^{-2} \cdot 200 = 2$; $\omega_{н7} = \omega_{н8} = \omega_{нл} = 2,4 \cdot 10^{-2} \cdot 200 = 4,8$;

выключателей $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega_в = 1,5 \cdot 10^{-2}$;

вероятности отказов выключателей на требование $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho_4 = \rho = 0,02$;

$t_{в1} = t_{в2} = t_{в3} = t_{в4} = t_{вв} = 5 \cdot 10^{-3}$; $K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = 20 \cdot 10^{-3}$;

трансформаторов $\omega_5 = \omega_6 = \omega_т = 0,02$; $t_{в5} = t_{в6} = t_{вт} = 80 \cdot 10^{-3}$; $q_5 = q_6 = q_т = 0,02 \cdot 80 \cdot 10^{-3} = 1,6 \cdot 10^{-3}$; $K_5 = K_6 = 8,5 \cdot 10^{-3}$ (K – относительные длительности плановых ремонтов).

Решение

Составим таблицу условных вероятностей отключения шин, где номера (r) столбцов указывают ремонтные состояния сети, а номера (j) строк – отказы элементов. В клетках таблицы приведем вероятности погашения шин при возникновении соответствующих ситуаций. В тех случаях, когда отказ какого-то элемента не приводит к отказу шин подстанции ($S_{rj} \neq 1$), в клетках приведем вероятности отказов этих же шин, вызванные дальнейшим цепочечным развитием аварии из-за отказов соответствующих выключателей. Как видно из схемы сети, большинство отказов шин может быть ликвидировано в результате оперативных переключений в РУ (отключения кратковременные, длительностью $t_{н}$) и только два отключения, связанных с ремонтами трансформаторов, будут длительными (в дальнейшем обозначаемые индексами «кр» и «дл» соответственно)

$$k_0 = 1 - \sum_{r=1}^6 k_r = 1 - (4k_1 + 2k_5) = 0,903.$$

Отказы элементов	Условные вероятности отключения шин при различных ремонтных состояниях r						
	0	1	2	3	4	5	6
	Нормальная схема	B1	B2	B3	B4	T1	T2
1 – B1	$\rho_2 + \rho_4 \rho_3$	–	ρ_4	1	ρ_2	1	$\rho_4 + \rho_2$
2 – B2	$\rho_1 + \rho_3 \rho_4$	ρ_3	–	ρ_1	1	1	$\rho_1 + \rho_3$
3 – B3	$\rho_4 + \rho_2 \rho_1$	1	ρ_4	–	ρ_2	$\rho_2 + \rho_4$	1
4 – B4	$\rho_3 + \rho_1 \rho_2$	ρ_3	1	ρ_1	–	$\rho_3 + \rho_1$	1
5 – T1	$\rho_4 \rho_1 + \rho_3 \rho_2 + \rho_4 \rho_3$	ρ_3	ρ_4	$\rho_4 \rho_1$	$\rho_3 \rho_2$	–	1
6 – T2	$\rho_1 \rho_4 + \rho_2 \rho_1 + \rho_3 \rho_2$	$\rho_2 \rho_3$	$\rho_1 \rho_4$	ρ_1	ρ_2	1	---
7 – Л1	$\rho_3 \rho_4 + \rho_1 \rho_2 + \rho_1 \rho_4$	$\rho_4 \rho_3$	ρ_4	ρ_1	$\rho_1 \rho_2$	ρ_1	ρ_4
8 – Л2	$\rho_3 \rho_4 + \rho_3 \rho_2 + \rho_2 \rho_1$	ρ_3	$\rho_3 \rho_4$	$\rho_2 \rho_1$	ρ_2	ρ_2	ρ_3

Показатели надежности РУ определим как

$$\omega_{ш} = \omega_{ш кр} + \omega_{ш дл}; \quad q_{ш} = q_{ш кр} + q_{ш дл};$$

$$\omega_{ш кр} = \sum_{r=0}^6 k_r \omega_{ш кр(r)}; \quad q_{ш кр} = \sum_{r=0}^6 k_r x_r q_{ш кр(r)};$$

$$\omega_{ш дл} = \sum_{r=0}^6 k_r \omega_{ш дл(r)}; \quad q_{ш дл} = \sum_{r=0}^6 k_r x_r q_{ш дл(r)};$$

$$\omega_{ш кр(r)} = \sum_{j=1}^6 S_{rj} \omega_j; \quad q_{ш кр(r)} \approx \omega_{ш кр(r)} \bar{t}_y;$$

$$\omega_{ш дл(r)} = \sum_{j=1}^6 S_{rj} \omega_j; \quad q_{ш дл(r)} \approx \sum_{j=1}^6 S_{rj} q_j.$$

Определим $\omega_{ш(r)}$ и $q_{ш(r)}$ При $r = 0$

$$\omega_{ш дл} = 0; \quad q_{ш дл} = 0;$$

$$\omega_{ш кр} = 4(\rho + \rho^2) \omega_в + 6 \rho^2 \omega_т + 6 \rho^2 [(1 + k_{АПВ}) \omega_{yl} + \omega_{нл}] = 0,83 \cdot 10^{-2};$$

$$q_{ш кр} = \omega_{ш кр} \bar{t}_y = 0,83 \cdot 10^{-2} \cdot 0,03 \cdot 10^{-3} = 0,25 \cdot 10^{-6}.$$

При $r = 1; 2; 3; 4$

$$\omega_{ш дл} = 0; \quad q_{ш дл} = 0;$$

$$\omega_{ш кр} = (1 + 2\rho) \omega_в + (\rho + \rho^2) \omega_т + (\rho + \rho^2) * [(1 + k_{АПВ}) \omega_{yl} + \omega_{нл}] = 19,2 \cdot 10^{-2};$$

$$q_{ш кр} = 19,2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,03 \cdot 10^{-3} = 5,76 \cdot 10^{-6}.$$

При $r = 5; 6$

$$\omega_{ш\ дл} = \omega_r = 2 \cdot 10^{-2}; \quad q_{ш\ дл} = q_l = 1,6 \cdot 10^{-3};$$

$$\omega_{ш\ кр} = 2(1 + 2\rho) \omega_b + 2\rho [(1 + k_{АПВ}) \omega_{у\ л} + \omega_{н\ л}] = 38,3 \cdot 10^{-3};$$

$$q_{ш\ кр} = 38,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,03 \cdot 10^{-3} = 11,5 \cdot 10^{-6}.$$

Найдем полную частоту

$$\omega_{ш\ кр} = 0,903 \cdot 0,83 \cdot 10^{-2} + 4 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 19,2 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 38,3 \cdot 10^{-2} = 2,93 \cdot 10^{-2};$$

$$\omega_{ш\ дл} = 2 \cdot 8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 0,034 \cdot 10^{-2};$$

$$\omega_{ш} = (2,93 + 0,034) \cdot 10^{-2} = 2,964 \cdot 10^{-2}.$$

Определим коэффициенты χ и относительные длительности отключений

$$\chi_{1кр} = \chi_{2кр} = \chi_{3кр} = \chi_{4кр} = \chi_{5кр} = \chi_{6кр} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{1,7 \cdot 0,03 \cdot 10^{-3} + 20 \cdot 10^{-3}} \approx 1;$$

$$\chi_{5дл} = \chi_{6дл} = \frac{8,5 \cdot 10^{-3}}{1,7 \cdot 80 \cdot 10^{-3} + 8,5 \cdot 10^{-3}} = 0,059;$$

$$q_{ш\ кр} \approx \omega_{ш\ кр} \bar{t}_y = 2,964 \cdot 10^{-2} \cdot 0,03 \cdot 10^{-3} = 0,885 \cdot 10^{-6}.$$

$$q_{ш\ дл} = 2,85 \cdot 10^{-3} \cdot 0,059 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} = 1,6 \cdot 10^{-6};$$

$$q_{ш} = 2,485 \cdot 10^{-6}.$$

Средняя длительность одного отключения

$$\bar{t}_b = \frac{2,485 \cdot 10^{-6}}{2,964 \cdot 10^{-2}} = 0,83 \cdot 10^{-4} \text{ год} \approx 0,73 \text{ ч.}$$

При абсолютно надежных элементах РУ

$$\omega_{ш} = 0,034 \cdot 10^{-2}; \quad q_{ш} = 1,6 \cdot 10^{-6}.$$

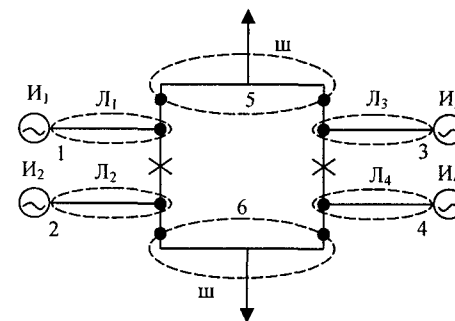
Изменение показателей надежности системы из-за появления РУ

$$\Delta \omega_{ш} = (2,964 - 2,930) \cdot 10^{-2} = 0,034 \cdot 10^{-2};$$

$$\Delta q_{ш} = 2,485 \cdot 10^{-6} - 1,6 \cdot 10^{-6} = 0,885 \cdot 10^{-6}.$$

Как видно, надежность РУ определяется только кратковременными отказами (ликвидируемыми оперативными переключениями).

28. Определить частоту отказов системы (см. рисунок) относительно узла 5 и узлов 5 и 6 одновременно для трех вариантов схемы: при наличии одного источника питания (по линии Л₁), двух источников питания (по линиям Л₁ и Л₂) и четырех (по линиям Л₁ – Л₄).



Показатели надежности линии

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega_l = 3; \quad q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_l = 0,5 \cdot 10^{-2}.$$

Релейная защита, установленная на выключателях, предусматривает отключение ими повреждений в прилегающих узлах, а также резервирует отключение смежных выключателей при повреждениях в смежных узлах. Отключение при повреждениях в более удаленных узлах не предусматривается. Вероятность отказа выключателей при повреждениях в прилегающих узлах с учетом автоматического повторного включения и неустойчивых повреждений элементов составляет $p_1 = 0,04$ отказ/треб., вероятность отказа выключателей при повреждениях в смежных узлах $p_2 = 0,08$ отказ/треб. Вероятность отказа (несрабатывания) при повреждениях в более удаленных узлах $p_3 = 1$.

Показатели надежности ветвей: $\omega_{ij} = q_{ij} = 0$.

Показатели надежности сборных шин (узлы 5 и 6): $\omega_5 = \omega_6 = \omega_{ш} = 0,05$;

$$q_5 = q_6 = q_{ш} = 0,3 \cdot 10^{-4}.$$

Решение

Выполним расчет в предположении абсолютно надежных выключателей (отсутствует процесс развития аварий) $\varepsilon_{ij} = 0$. Систему смоделируем в виде сети из узлов и ветвей (на рисунке узлы околонулены пунктирными линиями). При этом узлы моделируют все оборудование, находящееся между смежными выключателями, ветви – выключатели.

Логическую функцию неработоспособности для этого случая получим итеративно из выражения

$$\bar{Z}_i = \bar{x}_i + \bigwedge_{j \neq i}^n (\bar{x}_{ij} + \bar{Z}_{j/i}).$$

Поскольку для всех ветвей $\omega_{ij} = q_{ij} = 0$, следовательно, они всегда находятся во включенном состоянии, или $\bar{x}_{ij} = 0$. Выражение для логической функции упрощается

$$\bar{Z}_i = \bar{x}_i + \bigwedge_{j \neq i}^n \bar{Z}_{j/i}.$$

Четвертое и пятое приближения дадут одинаковый результат:

$$\left. \begin{aligned} \overline{Z}_1 &= \overline{x}_1, \text{ так как } \overline{Z}_{n_1} \neq 1; \\ \overline{Z}_2 &= \overline{x}_2 + \overline{x}_1 \overline{x}_6 \overline{Z}_{n_2} + \overline{x}_1 \overline{x}_4 \overline{Z}_{n_2} + \overline{x}_1 \overline{Z}_{n_2} \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4}; \\ \overline{Z}_3 &= \overline{x}_3 + \overline{x}_4 \overline{x}_5 \overline{Z}_{n_3} + \overline{x}_5 \overline{x}_6 \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4} + \overline{x}_2 \overline{x}_5 \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4} + \overline{x}_1 \overline{x}_4 \overline{Z}_{n_3} + \\ &\quad + \overline{x}_1 \overline{x}_6 \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4} + \overline{x}_1 \overline{x}_2 \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4} + \overline{x}_1 \overline{Z}_{n_2} \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4}; \\ \overline{Z}_4 &= \overline{x}_4 + \overline{x}_3 \overline{x}_6 \overline{Z}_{n_4} + \overline{x}_2 \overline{x}_3 \overline{Z}_{n_4} + \overline{x}_1 \overline{x}_3 \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4} + \overline{x}_5 \overline{x}_6 \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4} + \\ &\quad + \overline{x}_5 \overline{x}_2 \overline{Z}_{n_3} + \overline{x}_1 \overline{x}_6 \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4} + \overline{x}_1 \overline{x}_2 \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4} + \overline{x}_1 \overline{Z}_{n_2} \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4}; \\ \overline{Z}_5 &= \overline{x}_5 + \overline{x}_1 \overline{x}_3 + \overline{x}_1 \overline{x}_4 \overline{Z}_{n_3} + \overline{x}_1 \overline{x}_2 \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4} + \overline{x}_1 \overline{x}_6 \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4} + \\ &\quad + \overline{x}_1 \overline{Z}_{n_2} \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4}; \\ \overline{Z}_6 &= \overline{x}_6 + \overline{x}_2 \overline{x}_4 + \overline{x}_2 \overline{x}_3 \overline{Z}_{n_4} + \overline{x}_2 \overline{x}_5 \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4} + \overline{x}_1 \overline{x}_2 \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4} + \\ &\quad + \overline{x}_1 \overline{x}_2 \overline{Z}_{n_2} + \overline{x}_1 \overline{x}_3 \overline{Z}_{n_2} \overline{Z}_{n_4} + \overline{x}_1 \overline{Z}_{n_2} \overline{Z}_{n_3} \overline{Z}_{n_4}. \end{aligned} \right\}$$

I. Определим показатели надежности без учета цепочечного развития отказов.

1. Вариант с одним источником (источники, присоединенные к узлам 2, 3 и 4, отключены, т.е. $\overline{Z}_{n_2} = \overline{Z}_{n_3} = \overline{Z}_{n_4} = 1$). Логические функции для узлов 5 и 6 примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \overline{Z}_5 &= \overline{x}_5 + \overline{x}_1 \overline{x}_3 + \overline{x}_1 \overline{x}_4 + \overline{x}_1 \overline{x}_2 + \overline{x}_1 \overline{x}_6 + \overline{x}_1 = \overline{x}_1 + \overline{x}_5; \\ \overline{Z}_6 &= \overline{x}_1 + \overline{x}_6 + \overline{x}_2 \overline{x}_4 + \overline{x}_2 \overline{x}_3 + \overline{x}_2 \overline{x}_5; \\ \overline{Z}_{5,6} &= \overline{Z}_5 \overline{Z}_6 = \overline{x}_1 + \overline{x}_2 \overline{x}_5 + \overline{x}_5 \overline{x}_6. \end{aligned} \right\} (*)$$

Частота отказов (при $1 - q \approx 1$)

$$\begin{aligned} \omega_{5,6}^c &= (1 - q_1) \omega_1 + (1 - q_5) \omega_5 \approx \omega_n + \omega_{ш} = 3,05; \\ \omega_{5,6}^c &= (1 - q_1) \omega_1 + (1 - q_2) q_5 \omega_5 + (1 - q_5) q_2 \omega_5 + (1 - q_5) q_5 \omega_5 + \\ &\quad + (1 - q_6) q_5 \omega_6 \cong (1 + q_{ш}) \omega_n + (q_n + 2q_{ш}) \omega_{ш} = 3,00043. \end{aligned}$$

2. Вариант с двумя источниками ($\overline{Z}_{n_3} = \overline{Z}_{n_4} = 1, \overline{Z}_{n_1} = \overline{Z}_{n_2} = 1$). Логические функции представляются как

$$\left. \begin{aligned} \overline{Z}_5 &= \overline{x}_5 + \overline{x}_1 \overline{x}_3 + \overline{x}_1 \overline{x}_4 + \overline{x}_1 \overline{x}_2 + \overline{x}_1 \overline{x}_6; \\ \overline{Z}_6 &= \overline{x}_6 + \overline{x}_2 \overline{x}_4 + \overline{x}_2 \overline{x}_3 + \overline{x}_2 \overline{x}_5 + \overline{x}_1 \overline{x}_2; \\ \overline{Z}_{5,6} &= \overline{Z}_5 \overline{Z}_6 = \overline{x}_1 \overline{x}_2 + \overline{x}_1 \overline{x}_6 + \overline{x}_2 \overline{x}_5 + \overline{x}_5 \overline{x}_6. \end{aligned} \right\}$$

Параметр потока отказов (при $1 - q \approx 1$)

$$\omega_{5,6}^c \approx \omega_{ш} + 6q_n \omega_n + q_{ш} \omega_n + q_n \omega_{ш} = 0,14;$$

$$\omega_{5,6}^c \approx 2(q_n + q_{ш})(\omega_n + \omega_{ш}) = 0,0305.$$

3. Вариант с четырьмя источниками ($\overline{Z}_{n_1} = \overline{Z}_{n_2} = \overline{Z}_{n_3} = \overline{Z}_{n_4} = 0$). Логические функции и частота отказов

$$\left. \begin{aligned} \overline{Z}_5 &= \overline{x}_5 + \overline{x}_1 \overline{x}_3; \quad \overline{Z}_6 = \overline{x}_6 + \overline{x}_2 \overline{x}_4; \\ \overline{Z}_{5,6} &= \overline{Z}_5 \overline{Z}_6 = \overline{x}_2 \overline{x}_6 + \overline{x}_2 \overline{x}_4 \overline{x}_5 + \overline{x}_1 \overline{x}_3 \overline{x}_6 + \overline{x}_1 \overline{x}_2 \overline{x}_3 \overline{x}_4; \\ \omega_{5,6}^c &\approx \omega_{ш} + 2q_n \omega_n = 0,11; \\ \omega_{5,6}^c &\approx 2q_{ш} \omega_{ш} + 4q_n q_{ш} \omega_n + 2q_n^2 \omega_{ш} + 4q_n^3 \omega_n = 8,8 \cdot 10^{-6}. \end{aligned} \right\}$$

Определим далее частоту отказов из-за цепочечного развития аварий. Составляющую $\overline{Z}'_{ш}$ найдем по формуле (3.38)

$$\left. \begin{aligned} \overline{Z}'_{ш} &= \overline{x}_1 + \left| \varepsilon_{12} \overline{x}_2 + \varepsilon_{15} \overline{x}_5 \right| + \left| \varepsilon_{12} (\varepsilon_{26} \overline{x}_6) + \varepsilon_{15} (\varepsilon_{53} \overline{x}_3) \right| + \\ &\quad + \left| \varepsilon_{12} \left[\varepsilon_{26} (\varepsilon_{64} \overline{x}_4) \right] + \varepsilon_{15} \left[\varepsilon_{53} (\varepsilon_{34} \overline{x}_4) \right] \right| + \\ &\quad + \left| \varepsilon_{12} \left\{ \varepsilon_{26} \left[\varepsilon_{64} (\varepsilon_{43} \overline{x}_3) \right] \right\} + \varepsilon_{15} \left\{ \varepsilon_{53} \left[\varepsilon_{34} (\varepsilon_{46} \overline{x}_6) \right] \right\} \right| + \\ &\quad + \left| \varepsilon_{12} \left(\varepsilon_{26} \left\{ \varepsilon_{64} \left[\varepsilon_{43} (\varepsilon_{35} \overline{x}_5) \right] \right\} \right) + \varepsilon_{15} \left(\varepsilon_{53} \left\{ \varepsilon_{34} \left[\varepsilon_{46} (\varepsilon_{62} \overline{x}_2) \right] \right\} \right) \right| = \\ &\quad = \overline{x}_1 + (\varepsilon_{12} + \varepsilon_{15} \varepsilon_{53} \varepsilon_{34} \varepsilon_{46} \varepsilon_{62}) \overline{x}_2 + \\ &\quad + (\varepsilon_{15} \varepsilon_{53} + \varepsilon_{12} \varepsilon_{26} \varepsilon_{64} \varepsilon_{43}) \overline{x}_3 + (\varepsilon_{12} \varepsilon_{26} \varepsilon_{64} + \varepsilon_{15} \varepsilon_{53} \varepsilon_{34}) \overline{x}_4 + \\ &\quad + (\varepsilon_{15} + \varepsilon_{12} \varepsilon_{26} \varepsilon_{64} \varepsilon_{43} \varepsilon_{35}) \overline{x}_5 + (\varepsilon_{12} \varepsilon_{26} + \varepsilon_{15} \varepsilon_{53} \varepsilon_{34} \varepsilon_{46}) \overline{x}_6. \end{aligned} \right\} (**)$$

Здесь вертикальными линиями отделены члены, соответствующие в выражении (3.38) разным суммам сумм. Аналогично находятся логические функции $\overline{Z}'_{ш}$ и для других узлов:

$$\begin{aligned}
\bar{Z}'_{2ц} &= \bar{x}_2 + (\varepsilon_{21} + \varepsilon_{26}\varepsilon_{64}\varepsilon_{43}\varepsilon_{35}\varepsilon_{51})\bar{x}_1 + (\varepsilon_{21}\varepsilon_{15}\varepsilon_{53} + \varepsilon_{26}\varepsilon_{64}\varepsilon_{43})\bar{x}_3 + \\
&+ (\varepsilon_{21}\varepsilon_{15}\varepsilon_{53}\varepsilon_{34} + \varepsilon_{26}\varepsilon_{64})\bar{x}_4 + (\varepsilon_{21}\varepsilon_{15} + \varepsilon_{26}\varepsilon_{64}\varepsilon_{43}\varepsilon_{35})\bar{x}_5 + (\varepsilon_{21}\varepsilon_{15}\varepsilon_{53}\varepsilon_{34}\varepsilon_{46} + \varepsilon_{26})\bar{x}_6; \\
\bar{Z}'_{3ц} &= (\varepsilon_{35}\varepsilon_{51} + \varepsilon_{34}\varepsilon_{46}\varepsilon_{62}\varepsilon_{21})\bar{x}_1 + (\varepsilon_{35}\varepsilon_{51}\varepsilon_{12} + \varepsilon_{34}\varepsilon_{46}\varepsilon_{62})\bar{x}_2 + \bar{x}_3 + \\
&+ (\varepsilon_{35}\varepsilon_{51}\varepsilon_{12}\varepsilon_{26}\varepsilon_{64} + \varepsilon_{34})\bar{x}_4 + (\varepsilon_{35}\varepsilon_{34}\varepsilon_{46} + \varepsilon_{62}\varepsilon_{21}\varepsilon_{15})\bar{x}_5 + (\varepsilon_{35}\varepsilon_{51}\varepsilon_{12}\varepsilon_{26}\varepsilon_{34} + \varepsilon_{46})\bar{x}_6; \\
\bar{Z}'_{4ц} &= (\varepsilon_{43}\varepsilon_{35}\varepsilon_{51} + \varepsilon_{26}\varepsilon_{64}\varepsilon_{21})\bar{x}_1 + (\varepsilon_{43}\varepsilon_{35}\varepsilon_{51}\varepsilon_{12} + \varepsilon_{46}\varepsilon_{62})\bar{x}_2 + \\
&+ (\varepsilon_{43}\varepsilon_{46} + \varepsilon_{62}\varepsilon_{21}\varepsilon_{15}\varepsilon_{53})\bar{x}_3 + \bar{x}_4 + (\varepsilon_{43}\varepsilon_{35} + \varepsilon_{46}\varepsilon_{62}\varepsilon_{21}\varepsilon_{15})\bar{x}_5 + \\
&+ (\varepsilon_{43}\varepsilon_{35}\varepsilon_{51}\varepsilon_{12}\varepsilon_{26} + \varepsilon_{46})\bar{x}_6; \\
\bar{Z}'_{5ц} &= (\varepsilon_{51} + \varepsilon_{53}\varepsilon_{34}\varepsilon_{46}\varepsilon_{62}\varepsilon_{21})\bar{x}_1 + (\varepsilon_{51}\varepsilon_{12} + \varepsilon_{53}\varepsilon_{34}\varepsilon_{46}\varepsilon_{62})\bar{x}_2 + \\
&+ (\varepsilon_{51}\varepsilon_{12}\varepsilon_{26}\varepsilon_{64}\varepsilon_{43} + \varepsilon_{53})\bar{x}_3 + (\varepsilon_{51}\varepsilon_{12}\varepsilon_{26}\varepsilon_{64} + \varepsilon_{53}\varepsilon_{34})\bar{x}_4 + \\
&+ \bar{x}_5 + (\varepsilon_{51}\varepsilon_{12}\varepsilon_{26} + \varepsilon_{53}\varepsilon_{34}\varepsilon_{46})\bar{x}_6; \\
\bar{Z}'_{6ц} &= (\varepsilon_{62}\varepsilon_{21} + \varepsilon_{64}\varepsilon_{43}\varepsilon_{35}\varepsilon_{51})\bar{x}_1 + (\varepsilon_{62} + \varepsilon_{64}\varepsilon_{43}\varepsilon_{35}\varepsilon_{51}\varepsilon_{12})\bar{x}_2 + \\
&+ (\varepsilon_{62}\varepsilon_{21}\varepsilon_{15}\varepsilon_{53} + \varepsilon_{64}\varepsilon_{43})\bar{x}_3 + (\varepsilon_{62}\varepsilon_{21}\varepsilon_{15}\varepsilon_{53}\varepsilon_{34} + \varepsilon_{64})\bar{x}_4 + (\varepsilon_{62}\varepsilon_{21}\varepsilon_{15} + \varepsilon_{64}\varepsilon_{43}\varepsilon_{35})\bar{x}_5 + \bar{x}_6.
\end{aligned}$$

(**)

II. Определим составляющую показателей надежности, обусловленную цепочными отказами.

1. Вариант с одним источником.

Узел 5. Состав узлов, образующих минимальные сечения между источниками и узлом 5 системы, находим из выражения (*). В соответствии с (3.39) после сложения коэффициентов при одинаковых \bar{x} и простых логических преобразований логическая функция $\bar{Z}'_{5ц}$ и частота отказов

$$\begin{aligned}
\bar{Z}'_{5ц} &= \bar{Z}'_{1ц} + \bar{Z}'_{5ц} = \bar{x}_1 + (\varepsilon_{12} + \varepsilon_{53}\varepsilon_{34}\varepsilon_{46}\varepsilon_{62})\bar{x}_2 + (\varepsilon_{12}\varepsilon_{26}\varepsilon_{64}\varepsilon_{43} + \varepsilon_{53})\bar{x}_3 + \\
&+ (\varepsilon_{12}\varepsilon_{26}\varepsilon_{64} + \varepsilon_{53}\varepsilon_{34})\bar{x}_4 + \bar{x}_5 + (\varepsilon_{12}\varepsilon_{26} + \varepsilon_{53}\varepsilon_{34}\varepsilon_{46})\bar{x}_6; \\
\omega^c_{5ц} &= (\rho_1 + \rho_1\rho_2)\omega_2 + (\rho_1\rho_2 + \rho_1)\omega_3 + (\rho_1\rho_2 + \rho_1\rho_2)\omega_4 + \\
&+ (\rho_1\rho_2 + \rho_1\rho_2)\omega_6 = 2\rho_1(1 + 2\rho_2)\omega_1 + 2\rho_1\rho_2\omega_5 = 0,28
\end{aligned}$$

(в том числе 0,04 или 14 % за счет цепочек из двух и более элементов).

Узел 6. Состав узлов, образующих минимальные сечения, находим из (*). Логическая функция

$$\bar{Z}'_{6ц} = \bar{Z}'_{1ц} + \bar{Z}'_{6ц} + \bar{Z}'_{2ц} + \bar{Z}'_{3ц} + \bar{Z}'_{4ц} + \bar{Z}'_{5ц}.$$

Узлы 5 и 6 совместно Состав узлов, образующих минимальные сечения, находим из (*). Логическая функция

$$\bar{Z}'_{5,6ц} = \bar{Z}'_{5ц} + \bar{Z}'_{6ц} = \bar{Z}'_{1ц} + \bar{Z}'_{2ц} + \bar{Z}'_{3ц} + \bar{Z}'_{4ц} + \bar{Z}'_{5ц} + \bar{Z}'_{6ц}.$$

Подставляя (**) и проводя небольшие преобразования, получаем

$$\begin{aligned}
\bar{Z}'_{5,6ц} &= \bar{x}_1 + (\varepsilon_{12} + \varepsilon_{53}\varepsilon_{34}\varepsilon_{46}\varepsilon_{62})\bar{x}_2 + (\varepsilon_{15}\varepsilon_{53} + \varepsilon_{64}\varepsilon_{45}\varepsilon_{53} + \\
&+ \varepsilon_{12}\varepsilon_{26}\varepsilon_{64}\varepsilon_{43})\bar{x}_3 + (\varepsilon_{12}\varepsilon_{26}\varepsilon_{64} + \varepsilon_{15}\varepsilon_{53}\varepsilon_{34} + \varepsilon_{65}\varepsilon_{53}\varepsilon_{34})\bar{x}_4 + \\
&+ (\varepsilon_{15} + \varepsilon_{64}\varepsilon_{43}\varepsilon_{35})\bar{x}_5 + (\varepsilon_{12}\varepsilon_{26} + \varepsilon_{53}\varepsilon_{34}\varepsilon_{46})\bar{x}_6; \\
\omega^c_{5,6ц} &= (\rho_1 + \rho_1\rho_2)\omega_2 + (\rho_1\rho_2 + \rho_1^2\rho_2 + \rho_1\rho_2)\omega_3 + (\rho_1\rho_2 + \rho_1\rho_2 + \\
&+ \rho_1^2\rho_2)\omega_4 + (\rho_1 + \rho_1\rho_2)\omega_5 + (\rho_1\rho_2 + \rho_1\rho_2)\omega_6 = 0,17
\end{aligned}$$

(в том числе 0,05 или 30 % за счет цепочек из двух элементов и более).

Расчеты, выполненные аналогично для вариантов с двумя и четырьмя источниками питания, дали следующие результаты.

2. Вариант с двумя источниками: $\omega^c_{5ц} = 0,293$, $\omega^c_{5,6ц} = 0,145$.

3. Вариант с четырьмя источниками: $\omega^c_{5ц} = 0,307$ (в том числе 0,067, или 21 % за счет цепочек из двух элементов и более); $\omega^c_{5,6ц} = 0,081$ (все 100 % за счет цепочек из двух элементов и более).

Результаты проведенных расчетов показывают:

- для сетей без резервирования доля отказов из-за цепочечного развития аварий составляет небольшую величину по сравнению с количеством отказов, полученных без их учета (~ 10 %);
- по мере повышения степени резервирования цепочечные отказы становятся определяющими надежность (доля их быстро стремится к 100 %), так как число отказов системы из-за случайного наложения отказов элементов резко сокращается, а число цепочечных отказов растет из-за появления новых элементов и их повреждений;
- по мере повышения степени резервирования растет доля цепочечных аварий, обусловленных цепочками с двумя звеньями и более, особенно для отказов, охватывающих одновременно большое количество узлов;
- показатели надежности отказов сети, охватывающих большое количество узлов одновременно, для хорошо зарезервированных узлов не могут быть выявлены без учета цепочечных аварий.

Хотя рассмотренная схема выбрана простейшей с целью проверки получаемых логических функций простым анализом и перебором, вместе с тем она характерна для отдельных узлов сетей 500 кВ, а принятые показатели надежности – близки к реальным для этих сетей, что придает полученным результатам расчета определенную общность.

29. Найти среднюю частоту отказа железнодорожного полотна длиной 100 км из-за повреждения шпал. Известно, что ремонт производят, если повреждены 3 шпалы на одном звене полотна (в одном звене 12 шпал), а длина звена 12,5 м. По статистике каждый год на всем железнодорожном полотне меняют 150 шпал.

Решение

$$\text{Число звеньев } n = \frac{100 \cdot 1000 \text{ м}}{12,5} = 8000.$$

$$\text{Число шпал } m = 12 \cdot 8000 = 96000.$$

$$\text{Вероятность повреждения шпалы в год } Q = \frac{150}{96000} = 1,56 \cdot 10^{-3}.$$

Вероятность отказа одного звена в год

$$Q_3(12) = C_{12}^3 Q^3 (1-Q)^{12-3} = \frac{12!}{3!(12-3)!} (1-1,56 \cdot 10^{-3})^3 (0,99844)^9 = 0,824 \cdot 10^{-6}.$$

Вероятность безотказной работы всего полотна в течение года

$$P_0 = [1 - Q_3(12)]^{8000} = 0,99327 = e^{-\lambda};$$

$$\lambda = -\ln 0,99327 = 0,00675 \text{ 1/год,}$$

т. е. около 7 раз в тысячу лет на 100 км.

30. На воздушной линии электропередачи в гирляндах подвешено 10500 изоляторов. По статистике каждый год в среднем заменяется 42 изолятора (поврежденных). Каждая гирлянда скомплектована из 7 изоляторов. При повреждении двух и более изоляторов в гирлянде линия отключается и производится замена гирлянды. Определить частоту отключения линии для замены гирлянд изоляторов.

Решение

$$\text{Вероятность отказа каждого изолятора в год } Q = \frac{42}{10500} = 4 \cdot 10^{-3}.$$

Вероятность отказа гирлянды (отказа двух и более изоляторов)

$$\begin{aligned} Q_{\text{гирл}} &= Q_2(7) + Q_3(7) + Q_4(7) + Q_5(7) + Q_6(7) + Q_7(7) = \\ &= 1 - Q_0(7) - Q_1(7) = 1 - C_7^0 \cdot Q^0 \cdot (1-Q)^{7-0} + C_7^1 \cdot Q^1 \cdot (1-Q)^{7-1} = \\ &= 1 - 1 \cdot 0,996^7 - 7 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,996^6 = 1 - 0,999668 = 0,000332. \end{aligned}$$

$$\text{Количество гирлянд на линии } n = \frac{10500}{7} = 1500.$$

Вероятность безотказной работы линии в течение года

$$P_0 = [1 - Q_{\text{гирл}}]^{1500} = e^{-\lambda};$$

$$\lambda = -\ln [1 - Q_{\text{гирл}}]^{1500} = -1500 \cdot \ln (1 - Q_{\text{гирл}}) = 0,5 \frac{1}{\text{год}}.$$

Таким образом, линия будет отключаться раз в два года для замены дефектной гирлянды.

31. В десяти аудиториях подвешено по 6 светильников в каждой. Светильник состоит из четырех ламп (трубок) «дневного света». За год в среднем заменяют 20 ламп. Какова частота замены светильников, если светильник заменяется при перегорании трех ламп из четырех?

32. В соревновании участвуют три команды. Отсутствие хотя бы одной из них приводит к срыву мероприятия. В первой команде – 16, во второй – 15, в третьей – 18 человек. Каждая команда должна выставить по 10 человек. Известно, что по различным причинам в среднем на соревнование не является один из восьми человек. Определить вероятность того, что соревнование будет проведено.

33. Семья Петровых получает по почте в день в среднем по одному письму. Какова вероятность того, что за неделю семья:

- не получит ни одно письма;
- получит 20 писем;
- получит одно письмо;
- получит не менее одного письма?

Решение

Воспользуемся формулой Пуассона.
 $\lambda = 1$ 1/день, $t = 7$ дней, $\lambda t = 7$.

$$\text{а) } P_0 = \frac{(\lambda t)^0}{0!} e^{-\lambda t} = e^{-7} \approx 0,0009 = 9 \cdot 10^{-4};$$

$$\text{б) } P_{20} = \frac{(7)^{20}}{20!} e^{-7} \approx 3 \cdot 10^{-5};$$

$$\text{в) } P_1 = \frac{(7)^1}{1!} e^{-7} \approx 0,006 = 6 \cdot 10^{-3};$$

$$\text{г) } P_{>1} = 1 - P_0 = 0,9991.$$

34. Аварийную бригаду в среднем за смену вызывают на ликвидацию возникающих аварий 2 раза. Какова вероятность того, что в течение всей смены:

- не будет ни одного вызова;
- будет пять вызовов?

35. Рыбак за пять часов рыбалки обычно в среднем вылавливает 10 рыб. Какова вероятность того, что:

- за один час он поймает 10 рыб;
- за час поймает хотя бы одну рыбу?

36. Фирма разместила свои средства равными частями в четырех инвестиционных фондах. Известна вероятность банкротства каждого из фондов в течение года: $Q_1 = 0,05$; $Q_2 = 0,1$; $Q_3 = 0,15$; $Q_4 = 0,2$. Определить:

- вероятность потери в течение года фирмой половины вложенных средств;
- вероятности потери всех средств.

37. Потребитель получает питание по линиям электропередачи от двух источников. Коэффициенты готовности этих линий соответственно $K_{Г1} = 0,998$ и $K_{Г2} = 0,995$. Каждая линия еще простаивает в плановых ремонтах с относительной длительностью $K_{пл1} = 0,02$ и $K_{пл2} = 0,03$. Определить относительную длительность аварийного простоя потребителя.

Решение

Воспользуемся формулой полной вероятности. Сформируем полную группу несовместных событий: событие A_1 – плановый ремонт первой линии, событие A_2 – плановый ремонт второй линии, событие A_3 – в рассматриваемой системе нет пла-

новых ремонтов. Вероятность первого события – $K_{пл1}$, второго – $K_{пл2}$ (события несовместны), вероятность третьего – $(1 - K_{пл1} - K_{пл2})$. При первом состоянии системы (A_1) потребитель окажется в отключенном состоянии с вероятностью $(1 - K_{г2})$, при втором (A_2) – с вероятностью $(1 - K_{г1})$, при третьем (A_3) – с вероятностью $(1 - K_{г1})(1 - K_{г2})$. Следовательно, полная вероятность оказаться в отключенном состоянии будет

$$q = K_{пл1}(1 - K_{г2}) + K_{пл2}(1 - K_{г1}) + (1 - K_{пл1} - K_{пл2})(1 - K_{г1})(1 - K_{г2}).$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 3

1. Что понимается под «определением надежности»?
2. В чем заключается суть метода прогнозирования?
3. Что понимается под экспериментальным методом определения надежности?
4. Что представляет собой метод определения надежности расчетом?
5. В какой связи находятся все эти методы определения надежности?
6. Чем отличается метод испытаний от метода наблюдения?
7. Чем отличается метод исследовательский (определяющий) от контрольного?
8. В чем различие между точечными и интервальными оценками показателей?
9. Какое количество состояний имеет система, состоящая из n элементов, каждое из которых может находиться: а) в двух состояниях; б) в трех состояниях?
10. Что понимается под параллельным соединением элементов в системе в смысле надежности? Приведите примеры.
11. Что понимается под последовательным соединением элементов в системе в смысле надежности? Приведите примеры.
12. Можно ли всегда связи элементов в системе свести к сочетанию последовательных и параллельных соединений их в смысле надежности?
13. Что представляет собой логическая функция работоспособности и работоспособности системы?
14. Что представляет собой граф состояний и переходов?
15. Как можно записать условие работоспособности системы в момент времени t ?
16. Что представляет собой табличный метод определения условий работоспособности объекта?
17. Как можно классифицировать методы расчета показателей надежности?
18. Что позволяет определить метод, основанный на использовании марковских процессов и какие допущения он предполагает?
19. Какими возможностями обладает логико-вероятностный метод расчета показателей надежности и какие здесь имеются трудности?
20. Какими возможностями обладает табличный метод расчета показателей надежности и каковы трудности его использования?
21. Какие схемы описывает схема Бернулли? Какие процессы описывает пуассоновский процесс?
22. В чем суть, достоинства и недостатки имитационных методов определения показателей надежности?



ГЛАВА 4

КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ НАДЕЖНОСТИ

Критерий (греч. Kriterion) – признак, мерило, на основании которого производится оценка (например, оценка качества системы, ее функционирования), сравнение альтернатив, классификация объектов и явлений.

Другими словами, критерий – это правило сравнения альтернатив для выработки решений.

Эффективность (лат. effectivus – действенный) – это способность приносить эффект, оказывать действие. Обычно этот термин используется для характеристики качества объекта-системы, процесса с точки зрения соотношения затрат и результатов, их полезности.

Количественно эффективность, как правило, измеряется отношением полезности «выхода» системы и полезности «входа» системы или наоборот. Например, коэффициент полезного действия какого-то механизма (отношение «выхода» к «входу»), расход бензина (в литрах) к пройденному пути (в километрах) для автомобиля (отношение «входа» к «выходу») и др.

Желаемая степень эффективности объекта-системы, процесса, их полезности определяется целью субъекта, и в общем случае эта степень может быть различной для разных субъектов по отношению к одному и тому же объекту, процессу. Например, производитель энергии относится к энергосистеме с позиции полезности для него объема оплаты за энергию, затрат на ее производство и неприятностей из-за ненадежности энергоснабжения. Полезность же энергосистемы для потребителя энергии имеет совсем иной характер, хотя и определяется в том числе теми же факторами, но с другими оценками их. Или – полезность той же энергосистемы для ее собственника и полезность ее для наемного рабочего, работающего в ней, очевидно, далеко не одинаковые.

В итоге мы получаем многоцелевую задачу. Производитель, например, желает максимум прибыли, потребитель – минимум итоговой оплаты за энергию, рабочий – максимум зарплаты и т.д.

Если все субъекты, имеющие отношение к данному объекту, заинтересованы в его существовании, то должен быть установлен компромиссный баланс полезностей для каждого из них, который и определит рациональные характеристики всех составляющих качества объекта. В рассматриваемой нами задаче наиболее существен баланс интересов между производителем и потребителем энергии.

В настоящее время известно два подхода к установлению этого баланса: экономический и нормативный, которые далее и рассматриваются.

§ 4.1. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Надежность является одной из характеристик, обуславливающих качество объекта, и обеспечение какого-то уровня надежности требует ресурсов, усилий, имеющих известную полезность для производителя. Но он готов до определенной степени ими поступиться для повышения надежности системы.

Потребитель энергии, приобретающий ее у производителя по определенной цене, при поиске компромисса готов терпеть ненадежность в снабжении его энергией, если производитель будет компенсировать возникающие у потребителя ущербы из-за ненадежности.

Таким образом, компромисс должен быть найден между ценой продаваемой потребителю энергии и величиной компенсируемого ущерба, что и выявит рациональный уровень надежности объекта.

Следовательно, производитель и потребитель должны обмениваться информацией. В общем случае потребитель должен предоставить зависимость ущерба от ненадежности $У(На)$, а производитель – цену энергии как функцию от надежности $Ц_э(На)$. После этого каждый из них может спланировать свои действия и определить рациональный (компромиссный) уровень надежности. Качественно это может быть проиллюстрировано рис. 4.1.

Здесь $На$ – характеристики (показатели) надежности объекта; $\Delta Z(На)$ – увеличение затрат на обеспечение надежности, которые дополнительно повысят цену энергии. Точка $На^{опт}$ и будет характеризовать искомую, эффективную надежность объекта.

Рассмотрим поиск этой точки с позиции как производителя, так и потребителя.

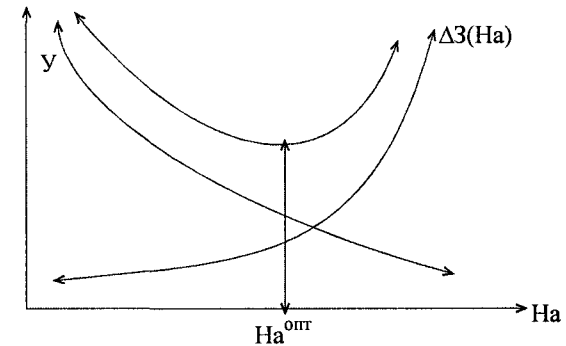


Рис 4.1

ПОДХОД С ПОЗИЦИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЯ

Критерий эффективности при таком компромиссе может быть найден с использованием общепринятой методики оценки эффективности инвестиционных проектов [32].

Пусть K_t – капиталовложения в t -м году в объект с заданными его параметрами, которые обеспечивают определенный уровень его надежности $На$;

Z_t – текущие затраты в t -м году, необходимые для функционирования этого объекта;

$У_t$ – оплачиваемый потребителю ущерб в t -м году из-за ненадежности;

R_t – результат функционирования объекта для производителя на t -м году (объем реализованной продукции, например выручка от проданной в этом году энергии ее потребителям);

E – норма дисконта (норма дохода на капитал для инвестора, годовая цена капитала на рынке);

T – горизонт расчета (например, срок службы объекта);

$K = \sum_{t=0}^T a_t K_t$ – суммарные приведенные за период T капиталовложения в объект;

$Z_{\Sigma} = \sum_{t=0}^T a_t Z_t$ – суммарные приведенные за период T затраты на обеспечение функционирования объекта;

$Y_{\Sigma} = \sum_{t=0}^T a_t Y_t$ – суммарный оплаченный за период T приведенный ущерб потребителю из-за ненадежности объекта;

где $a_t = \frac{1}{(1+E)^t}$.

$R_{\Sigma} = \sum_{t=0}^T a_t R_t$ – суммарный приведенный за период T результат функционирования объекта, где

$$a_t = \frac{1}{(1+E)^t}. \quad (4.1)$$

Все приведенные параметры являются функциями от показателей надежности. Критерием согласованной степени (эффективной) надежности объекта-системы может служить в соответствии с указанной выше методикой один из следующих:

1. Чистый дисконтированный доход ЧДД (Net Present Value – NPV) эффективного (i -го) варианта объекта-системы должен быть положительным и максимальным

$$\left. \begin{aligned} \text{ЧДД}_i = R_{\Sigma_i} - (K_i + Z_{\Sigma_i} + Y_{\Sigma_i}) \geq 0, \\ \max_i \text{ЧДД}_i. \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

2. Индекс доходности ИД (Profitability Index – PI) i -го варианта должен быть не меньше единицы и максимальным

$$\left. \begin{aligned} \text{ИД}_i = (R_{\Sigma_i} - Z_{\Sigma_i} - Y_{\Sigma_i}) / K_i \geq 1, \\ \max_i \text{ИД}_i. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

3. Внутренняя норма доходности ВНД (Internal Rate of Return – IRR), определяемая из условия $R_{\Sigma} - Z_{\Sigma} - Y_{\Sigma} = K$, для эффективного (i -го) варианта объекта-системы должна быть не меньше нормы дисконта и максимальной

$$\left. \begin{aligned} \text{ВНД}_i = E_{\text{вн}_i} \geq E, \\ \max_i E_{\text{вн}_i}. \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

4. Срок окупаемости $T_{\text{ок}}$ эффективного (i -го) варианта должен быть не больше периода T и минимальным

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{ок}_i} \leq T, \\ \min_i T_{\text{ок}_i}. \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

Здесь индекс i обозначает искомый эффективный вариант объекта-системы с оптимальными параметрами надежности N_a , с которой производитель обеспечивает потребителя, выплачивая ему за ненадежность согласованный с ним ущерб Y_{Σ_i} .

Во многих случаях $R_{\Sigma_i} = \text{const}$. Это может быть, например, тогда, когда объем реализуемой потребителю энергии остается для всех вариантов объекта-системы неизменным. Неизменна также цена продукции (определяемая, например, на конкурентном рынке). В этих условиях критерий (4.2) может быть преобразован в

$$\min_i (K_i + Z_{\Sigma_i} + Y_{\Sigma_i}). \quad (4.6)$$

В том случае, когда $T = T_{\text{ам}} = \frac{1}{\alpha_{\text{ам}}}$, а затраты Z_i и ущербы неизменны по годам $Z_i = Z$ и $Y_i = Y$, критерий (4.6) может быть приведен к годовому периоду

к годовому периоду

$$\min_i (EK_i + Z_i + Y_i + \alpha_{\text{ам}} K_i), \quad (4.7)$$

где $\alpha_{\text{ам}}$ – коэффициент амортизации.

Наконец, если затраты, ущерб и амортизация по годам различны, то в качестве критерия могут быть использованы приведенные ежегодные затраты в форме

$$\min_i \left[EK_i + \sum a_t (\delta Z_t + \delta Y_t + \delta I_{\text{ам}_t}) \right], \quad (4.7a)$$

где $\delta Z_t = Z_t - Z_{t-1}$; $\delta Y_t = Y_t - Y_{t-1}$; $\delta I_{\text{ам}} = I_{\text{ам}_t} - I_{\text{ам}_{t-1}}$.

Во всех выше приведенных критериях и их модификациях предполагалось, что величина Y_t – детерминированная. Только при этих условиях можно находить максимумы, минимумы, проверять условия равенства и неравенства. В действительности, как это следует из рассмотрения предыдущих глав, величина Y_t – случайная, что не позволяет прямо использовать приведенные критерии. Часто для ухода от этой неопределенности заменяют случайную величину на ее среднее значение. Но при этом остается риск, что фактический

ущерб окажется больше среднего и тем значительнее, чем больше дисперсия этой случайной величины σ_y^2 .

Поэтому, если субъект делает какие-то затраты на обеспечение надежности, то он должен быть уверен, что они будут оправданы с учетом ожидаемого риска, т.е. его расчетные затраты должны быть

$$Z_{\text{расч}} = \bar{Z} + C_p \sigma_y, \quad (4.8)$$

где \bar{Z} – суммарные средние затраты, включая среднее значение ущерба, а C_p – цена риска.

Величина C_p зависит от допускаемой степени риска и от того, каким ресурсным потенциалом обладает субъект, принимающий решение.

Рассмотрим эти факторы более подробно. Если случайная величина ущерба распределена по нормальному закону, то с достоверностью $\sim 0,999$ $C_p = 3$, а с достоверностью $\sim 0,99997$ $C_p = 4$.

Если случайная величина ущерба распределена по экспоненциальному закону, то достоверность $\sim 0,999$ обеспечивает уже при $C_p \approx 7$, а достоверность $\sim 0,9999$ при $C_p \approx 9$.

В предыдущей главе мы отмечали, что часто вполне допустимо функцию распределения дефицита мощности принимать нормально распределенной (рис. 4.2). Если предполагать, что ущерб пропорционален только положительному дефициту (строго – он не пропорционален), то распределение ущерба будет усеченно-нормальным (показан жирной линией на рис. 4.2). Чем больше вводится резерва, тем более усеченным нормальным будет получаться закон распределения ущерба (пунктир на рис. 4.2).

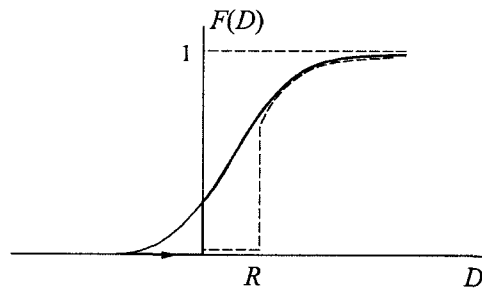


Рис 4 2

Обычно если $\sigma_y < 0,3\bar{Y}$, то можно принимать закон нормальным, если $\sigma_y \approx \bar{Y}$ – то приближенно экспоненциальным.

Переходя к оценке влияния ресурсного потенциала, которым распоряжается лицо, принимающее решение, поясним суть этого на следующей бытовой ситуации. Если вы обладаете годовым доходом в 100 тыс. руб., то без особых сомнений можете позволить себе купить в год один лотерейный билет в 100 руб. Но задумаетесь, если вам предложат купить 100 билетов и почти уверенно не купите 1000 билетов. С учетом этого фактора можно получить, что

$$C_p = \alpha \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\sum Z}},$$

где α характеризует рассмотренную выше допускаемую степень риска, а $\sum Z$ – суммарный средний располагаемый ресурс, которым распоряжается субъект, принимающий ее решение.

Если отношение $\frac{\bar{Z}}{\sum Z}$ меньше 0,25, то закон распределения суммарного ущерба, с которым имеет дело лицо, принимающее решение, приближается к нормальному. Поэтому с рисками (вероятностью 0,001 и 0,0001)

$$C_p = (3...4) \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\sum Z}}. \quad (4.9)$$

Из этого выражения видно, что в случае, если все экономические решения принимаются государством или от имени государства (как это было недавно в нашей стране), то $\frac{\bar{Z}}{\sum Z}$ очень велико по сравнению с затратами по какому-то конкретному объекту и цена риска приближается к нулю. На этом основании во всех расчетах по приведенным выше критериям вполне было допустимо пользоваться средними значениями.

В современной многоукладной экономике при большом количестве хозяйствующих субъектов, распоряжающихся гораздо меньшими ресурсами, важно учитывать экономические риски и использовать различные страховые механизмы.

ПОДХОД С ПОЗИЦИИ ПОТРЕБИТЕЛЯ

Для потребителя энергии важно оценить реальные затраты, которые он будет иметь из-за ненадежности энергоснабжения и которые он мог бы закладывать, с одной стороны, в договорные отношения с энергоснабжающим предприятием, а с другой стороны, со смежными предприятиями в случае срыва поставок своей продукции к ним из-за недополучения энергии.

Для оценки этих затрат разрабатывались различные подходы и методы [33...39 и др.]. Рассмотрим один из них, основанный на макро моделировании как наиболее эффективный при минимуме необходимой информации. Изобразим связи i -го рассматриваемого предприятия-потребителя энергии в виде схемы, показанной на рис. 4.3 [37]. На этой схеме выделено одно из рассматриваемых предприятий, а все остальные, включая электроэнергетику, объединены в один блок. Связями со стрелками показаны потоки продукции между этим предприятием и остальной системой.

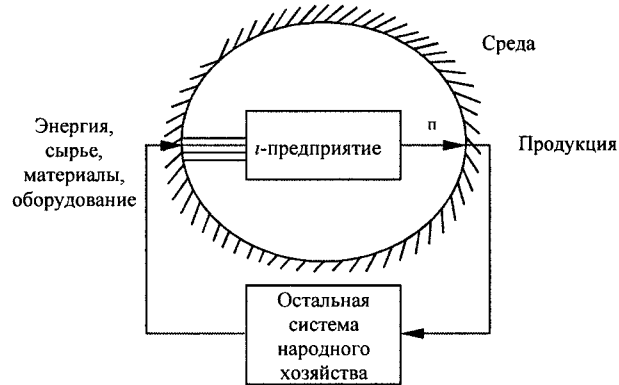


Рис 4.3

Продукция выделенного предприятия поступает в систему общего хозяйства, а последнее, в свою очередь, снабжает выделенные предприятия сырьем, материалами, оборудованием и всем необходимым, в том числе и электроэнергией. В итоге такого функционирования народного хозяйства создается доход предприятия D_i и национальный доход D . Далее будем исходить из того, что количество выпускаемой предприятием продукции Π_i пропорционально получаемой им электроэнергией \mathcal{E}_i ,

$$\Pi_i = P_i \mathcal{E}_i, \quad (4.10)$$

а степень электровооруженности предприятия такова, что перерыв в снабжении электроэнергией, сопровождающийся ее недодачей $\Delta \mathcal{E}_i$, будет также пропорционально снижать вырабатываемую продукцию $\Delta \Pi_i$:

$$\Delta \Pi_i = P_i \Delta \mathcal{E}_i. \quad (4.10a)$$

Кроме того, перерыв электроснабжения будет дополнительно приводить к нарушению технологического процесса и другим отрицательным последствиям внутри рассматриваемого предприятия в зависимости от степени внезапности перерыва электроснабжения.

Таким образом, величину ущерба можно представить в виде суммы двух составляющих: одна обусловлена фактом недовыработки продукции во время недополучения потребителем энергии, а вторая – фактом внезапности отключения. При этом под ущербом будем понимать отрицательные экономические последствия у потребителя и во всем народном хозяйстве в результате нарушения энергоснабжения. Количественно величина ущерба в общем случае оценивается изменением дохода.

Опыт, теоретическое осмысление проблемы показывают, что можно выделить следующие существенные факторы, которые определяют величину ущерба: тип потребителя и характер его производства (i), величину недоданной во время ограничения электроэнергии ($\Delta \mathcal{E}$), глубину ограничения по мощности (ΔN), время ограничения ($t_{огр}$), степень внезапности, наличие технологических и иных резервов у рассматриваемого электропотребителя ($\mathcal{E}_{рез}$), момент наступления ограничения (t) и др.

Методически удобно начать оценку ущерба со случая, при котором фактор внезапности отсутствует. Предположим, что факт ограничения рассматриваемого потребителя известен с заблаговременностью, достаточной для принятия всех необходимых мер по предотвращению срыва технологического процесса, брака, поломки оборудования и т.д. Таким образом, останется только та часть ущерба, которая будет в любом случае. Эту составляющую будем в дальнейшем обозначать основным ущербом. Все то, что будет связано с дополнительным ущербом из-за появления фактора внезапности, будем обозначать ущербом внезапности.

Методика оценки основного ущерба. Можно предположить, что эта составляющая ущерба зависит от типа потребителя, величины недоданной энергии, глубины ограничения и наличия у потребителя самых различных резервов.

Представим, что рассматриваемый потребитель в общем случае состоит из нескольких более «элементарных» потребителей, которые если и ограничиваются, то полностью. Сосредоточив основное внимание на элементарном потребителе, фактор глубины ограничения для него исключим, поскольку каждый раз он может ограничиваться только полностью. Фактор глубины останется лишь для комплексного потребителя, у которого будут ограничиваться те или иные более элементарные потребители.

Далее выделим фактор наличия у потребителя своих резервов. Здесь возможны три случая. Первый – величина этих резервов у потребителя достаточна для того, чтобы компенсировать недовыработанную во время ограничения его по энергии продукцию и не нарушать график поставок своей продукции смежным предприятием. Второй – резервов у ограничиваемого потребителя нет, он простаивает, не вырабатывает продукцию и недопоставляет ее смежным предприятиям. Третий – промежуточное между предыдущими.

В первом случае недополученная во время ограничения энергия затем компенсируется системой и потребитель дорабатывает свою продукцию в резерв или за счет резервов. Этот случай, по существу, не связан в итоге с ограничением потребителя по энергии. Деформируется лишь режим ее потребления. Поэтому в дальнейшем будем обозначать его ущербом по мощности Y_N . Очевидно, что величина этого ущерба будет определяться величиной тех затрат, которые изъяты из дохода предприятия на создание резервов у потребителя $Z_{рез}$, т. е.

$$Y_N = Z_{рез},$$

Для электроэнергетиков удобно затраты на резервы представлять в следующем виде

$$Z_{рез} = Y_N \mathcal{E}_{рез}, \quad (4.11)$$

где $\mathcal{E}_{рез}$ – та предельная энергия, которую допустимо недодать потребителю за время ограничения, не нарушая срыва графика выдачи им продукции смежным предприятиям; Y_N – удельная величина приведенной стоимости затрат (ущерба) на создание резервов на предприятии.

Здесь и далее для упрощения индекс i (тип потребителя) опущен. Минимальная величина удельного ущерба может быть оценена как

$$y_N = \frac{Z(N)}{\mathcal{E}}, \quad (4.12)$$

где $Z(N)$ – приведенные годовые затраты на создание предприятия, производящего данную продукцию, а \mathcal{E} – его годовое электропотребление.

Из сказанного следует, что задача оценки ущерба в проектных и эксплуатационных ситуациях имеет разный смысл. В проектных задачах обособываются резервы для надежности. Их можно создать в энергосистеме, которая при этом будет недодавать потребителю во время ограничений или аварий энергию $\Delta\mathcal{E}$. Для компенсации последней у потребителя должен быть создан свой резерв $\mathcal{E}_{рез}$.

В оптимальных соотношениях очевидно $\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_{рез}$ и, следовательно,

$$Y_N = Z_{рез} = Y_N \mathcal{E}_{рез} = Y_N \Delta\mathcal{E}.$$

Таким образом, используемое в практике соотношение

$$Y_N = y_N \Delta\mathcal{E}$$

является справедливым только для случая, когда в системе «энергетика-потребитель» созданы оптимальные резервы с минимальными затратами, а фактические аварийные недоотпуски энергии потребителю строго равны расчетным без каких-либо отклонений. Фактический недоотпуск энергии, конечно же, никогда не равен расчетному как в силу случайного характера аварий, так и потому, что ни система, ни потребитель реально сегодня не знают об этой расчетной и оптимальной величине. Отклонение же от оптимального значения как в одну, так и в другую сторону всегда связано с перерасходом, с увеличением ущерба. Поэтому реальная величина удельного ущерба y_N , используемая в проектных расчетах, должна быть больше той, которая определяется по (4.12).

В эксплуатационных задачах, где решаются вопросы оптимального использования уже сложившихся резервов, величина основного ущерба определяется по (4.11) и не зависит от фактически недоданной энергии $\Delta\mathcal{E}$ (при условии, что $\Delta\mathcal{E} \leq \mathcal{E}_{рез}$), так как у потребителя резервы уже созданы и на них затрачены определенные средства.

Во втором случае (при полном отсутствии резервов у потребителя) аварийная недодача энергии потребителю прямо связана с невозможной недовыработкой для народного хозяйства его продукции. Последствия зависят от того, насколько жестко связана работа других предприятий с продукцией рассматриваемого. В [37] анализируются несколько возможных моделей этих связей. При наиболее «жесткой», «конвейерной» связи, когда останавливаются все остальные предприятия, величина ущерба будет наибольшей. Представляется, что более реальна «мягкая», адаптационная связь, когда все предприятия, использующие продукцию данного, перестраиваются, адаптируются на другие ресурсы, используют свои резервы и т. п. В этом случае рассматриваемое предприятие как бы шунтируется (см. рис. 4.3), а поступавшее на него сырье, материалы, оборудование минуют его и идут на компенсацию адаптационных затрат в системе народного хозяйства. В итоге оно недополучит продукцию, вырабатываемую на данном предприятии за время простоя, доход D уменьшится на величину стоимости недовыработанной продукции, которая и должна быть компенсирована i -му предприятию

$$\Delta D = \Delta C_i.$$

С учетом (4.10) и (4.10а)

$$\Delta D = C_i \frac{\Delta P_i}{P_i}, \quad y_{\mathcal{E}} = \frac{\Delta D}{\Delta \mathcal{E}_i} = \frac{C_i}{\mathcal{E}_i}, \quad (4.13)$$

где C_i – цена годовой продукции i -го предприятия; \mathcal{E}_i – его годовое электропотребление.

Величина народнохозяйственного ущерба будет такой же даже при наличии резервов у потребителя, но при дефиците энергии в энергосистеме. Поэтому удобно этот случай связывать с дефицитом энергии в отличие от предыдущего – дефицита мощности (временного).

В практических расчетах величина удельного ущерба от недоотпуска (дефицита) энергии может быть определена как

$$y_{\Sigma} = \frac{1000}{H_{\Sigma}},$$

где H_{Σ} – норма электропотребления на 1000 рублей выпускаемой данным предприятием продукции

Если α_c – доля сырья в стоимости выпускаемой продукции, то

$$y_N \approx y_{\Sigma}(1 - \alpha_c).$$

Вместе с тем имеется, вероятно, некоторая граница, за которой снизить последствия простоя предприятия адаптацией народнохозяйственной системы к этому простою за счет уменьшения поставки сырья, материалов и других видов материальных ресурсов уже принципиально невозможно. Это, прежде всего, должно касаться добывающих предприятий, а также предприятий, близко к ним расположенных по цепочке движения продукции (первичная переработка полезных ископаемых и т. п.). Для таких предприятий входные ресурсы (см. рис. 4.3) в малой степени зависят от работы других звеньев народного хозяйства. Оценить величину ущерба в этом случае можно исходя из следующей модели. При развитии народнохозяйственной системы каждая дополнительная единица продукции энергетике (например, 1 кВт·ч) распределяется между всеми отраслями и предприятиями, в которых создаются соответствующие этой единице энергии свои производственные мощности, предусматриваются оборотные фонды, рабочая сила и т.д. В результате потребления такой единицы энергии в процессе функционирования народного хозяйства создается в соответствующем объеме национальный доход. При недополучении этой единицы запланированной энергии предприятиями народного хозяйства на них в соответствующих пропорциях простаивают оборудование, рабочая сила и т.д. Следовательно, не будет получена соответствующая величина национального дохода.

Таким образом, если бы было возможно каждую недоданную единицу энергии распределить между всеми потребителями в тех пропорциях, в которых эта энергия потребляется в нормальных условиях, то ущерб при малых $\Delta \Sigma$ определялся бы как

$$y_{\Sigma \min} = \frac{dD}{\Delta \Sigma} = \frac{dD}{d \Sigma} \Delta \Sigma / \Delta \Sigma = \frac{dD}{d \Sigma}, \quad (4.14)$$

где dD и $d \Sigma$ – суммарное приращение национального дохода и выработки энергии при развитии народнохозяйственной системы за некоторый интервал (например, годовой).

В десятилетие, предшествовавшее 1985 г., эта величина была близка к $y_{\Sigma \min} = 0,3$ руб/кВт·ч. По данным ЦСУ СССР, динамика национального дохода и выработки электроэнергии в стране за годы после 1985 года была следующей:

Годы	1985	1986	1987	1988	1989
Д (млрд руб.)	578	587	599	631	674
Σ (млрд кВт·ч)	1544	1599	1665	1705	1722
$dD/d \Sigma$	0,32	0,18	0,18	0,8	2,53

В соответствии с этой динамикой удельный ущерб $y_{\Sigma \min}$ после 1985 г. сначала снизился, а с 1987 г. стал возрастать. Снижение в 1986 и 1987 гг. можно объяснить общим снижением эффективности функционирования народного хозяйства, а последующий рост – начавшейся инфляцией и возросшим дефицитом энергии после Чернобыльской аварии.

Оценка (4.14) ущерба из-за недополучения энергии является минимально возможной для любого предприятия, так как недодача единицы энергии только одному предприятию исказит лишь оптимальную пропорцию распределения этой единицы энергии между предприятиями, что усугубит еще больше отрицательные последствия.

В общем случае (третий случай) основной ущерб определится следующим образом

$$y_{\text{осн}} = \begin{cases} y_N \Sigma_{\text{рез}} & \text{при } \Delta \Sigma \leq \Sigma_{\text{рез}}, \\ y_N \Sigma_{\text{рез}} + y_{\Sigma} (\Delta \Sigma - \Sigma_{\text{рез}}) & \text{при } \Delta \Sigma > \Sigma_{\text{рез}}. \end{cases}$$

Изложенная методология позволяет с единых позиций оценить основной ущерб всех потребителей, включая и такие специфические, как коммунально-бытовые и электрифицированный железнодорожный транспорт

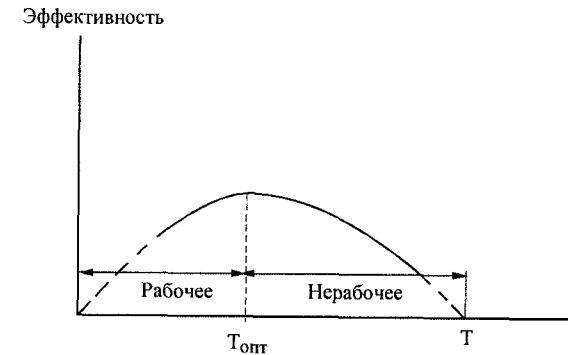
Ущерб от аварийного недоотпуска электроэнергии коммунально-бытовому потребителю [39] – наиболее трудно определяемая величина, поэтому некоторые специалисты отказываются от учета ее в денежном выражении. Обычно приводят доводы о моральном, психологическом и других ущербах, количественная оценка которых полагается принципиально невозможной. Не отрицая ряда трудностей, следует все же более четко представить себе цель оценки ущерба. Денежная оценка ущерба в коммунально-бытовом секторе нужна не для компенсации причиненного морального, психологического или иных неудобств тому или иному лицу деньгами. Цель оценки ущерба – обосновать необходимые мероприятия по повышению надежности энергоснабжения. То, что перерывы в энергоснабжении были, есть и будут, ни у кого не вызывает сомнения. К ним все подготовлены, обсуждается лишь частота и длительность этих перерывов.

Пессимистические взгляды на гносеологическую недоступность количественной оценки социальных категорий в последнее время все больше подвергаются критике. Более того, в ряде работ утверждается и на большом фактическом материале показывается, что такая оценка не только возможна, но и необходима для определения эффективности и выбора варианта социальных программ путем сопоставления все возрастающих затрат на их реализацию с эффектом от повышения общественного производства. Конечно, решение такой задачи требует разработки различных научных методов квалиметрии социальных мероприятий, их моделирования, исследования и т.д. Применительно же к данной, значительно более узкой задаче прямое использование такого подхода весьма громоздко, и маловероятно, что может быть в ближайшем времени реализовано. Однако принципиально искомый ущерб можно оценить на основе изложенной общей методологии определения ущерба, если учесть, что отыскиваются не абсолютные величины, а лишь изменения (изменения ущерба в зависимости от изменения надежности, недоотпущенной энергии), а также использовать некоторые достаточно очевидные принципы, например принцип оптимальности, и др.

Первая из перечисленных предпосылок подразумевает следующее: ущерб является разницей тех эффектов, которые можно получить от коммунально-бытового обслуживания при различном качестве энергии. Естественно, что получение абсолютных значений эффектов в денежном выражении проблематично. Однако если искать не абсолютные величины, а разность в функции от изменения качества и уровня энергоснабжения и учитывать, что эти изменения относительно невелики (допустима линеаризация), то задача существенно упростится (отпадет необходимость оценки значительной постоянной части эффекта) и резко повысится точность решения (исключается погрешность определения разницы больших и близких чисел). Более конкретно указанное будет поясняться далее по мере использования.

Абстрагируясь от реальных явлений и процессов, протекающих в сфере коммунально-бытового и социального обслуживания населения, представим его как подсистему общества («черный ящик»), выполняющую определенную функцию. Основная выходная функция этой подсистемы по отношению к остальным подсистемам общества – обеспечение их рабочей силой в определенном размере и качестве (номенклатура специальностей, квалификация работников и т.п.). Переходя к экономическим категориям, оценим «продукцию» этой подсистемы стоимостью рабочей силы или рабочим временем. В результате отключения потребителей коммунально-бытовой сферы либо происходит потеря времени населением (вне рабочего), либо снижается производительность труда («ухудшается качество рабочей силы»), либо одновременно теряется время и снижается производительность. Действительно, перерыв в электропитании городского транспорта, зрелищных и других заведений приводит к потере времени населением; перерывы в электроснабжении магазинов, столовых и других объектов – к созданию или увеличению очередей, что также связано с потерей времени; перерывы в электропитании бытовых холодильников – к ухудшению качества продуктов, снижению калорийности, питательности, а следовательно, в конечном счете, к снижению производительности труда населения. Этот перечень примеров можно продолжить, пересмотрев все энергоприемники, и выявить те же итоговые результаты.

При оптимальном соотношении между рабочим и нерабочим временем эффективности (стоимость) единицы как того, так и другого должна быть одинаковой для общества (принцип оптимальности). На рис. 4.4 показана зависимость эффективности труда \mathcal{E}_ϕ от соотношения длительностей рабочего и нерабочего времени. Действительно, нерабочее время $T_{\text{нер}}$ необходимо для отдыха и восстановления затраченных в рабочее время $T_{\text{раб}}$ сил для повышения квалификации, воспитания детей (воспроизводства рабочей силы) и т.п. И если бы эффективность нерабочего времени была меньше эффективности рабочего времени, то это свидетельствовало бы о том, что общая длительность нерабочего времени выбрана неоптимально и его следует увеличить и наоборот. Отвлекаясь от оптимизационного поиска этого времени, будем считать, что рабочее время выбрано оптимально. Тогда общественная полезность (стоимость) любого времени (рабочего и нерабочего) одинакова, и потеря любого времени связана с одинаковым снижением эффективности функционирования общества. Цена единицы потерянного времени будет зависеть от значения дисбаланса, вносимого в оптимальное состояние. Из рассмотрения рис. 4.4 видно, что чем больше потерянное время и отклонение от оптимального соотношения, тем больше проявляется эффект нелинейности.



Поскольку рассматриваются малые отклонения, стоимость потерянного времени можно оценивать по стоимости рабочего времени при оптимальном соотношении рабочего и нерабочего времени.

Между величиной нерабочего времени и потребляемой электроэнергией имеется связь

$$\mathcal{E}_{\text{к-б}} = P_{\text{к-б}} T_{\text{нер}}, \quad (4.15)$$

аналогичная связи между продукцией какого-либо предприятия и потребляемой энергией [(см. (4.10)]. Если предположить, что эта связь достаточно жесткая и коэффициент пропорциональности сохраняется также для малых отклонений, то

$$\Delta T_{\text{нер}} = \Delta \mathcal{E}_{\text{к-б}} / P_{\text{к-б}}, \quad (4.16)$$

где $\Delta \mathcal{E}_{\text{к-б}}$ – недоотпуск энергии коммунально-бытовому потребителю.

С учетом (4.15) можно написать:

$$\Delta T_{\text{нер}} = T_{\text{нер}} \Delta \mathcal{E}_{\text{к-б}} / P_{\text{к-б}}. \quad (4.17)$$

Здесь под потерей времени понимается не только продолжительность его, а более общий смысл, определяющий прежде всего «производительность» свойство времени, включая и его «качество». Например, если из-за простоя городского электрифицированного транспорта работники были вынуждены повысить затраты энергии, чтобы вовремя успеть к началу работы, то, хотя и будет отработано необходимое календарное время, но его «качество», «производительность» окажутся ниже. Последнее же эквивалентно соответствующему снижению рабочего времени.

К такому же результату могут быть сведены и перерывы в электроснабжении любых других энергоприемников. Так перерыв в домашнем и общественном приготовлении сопряжен непосредственно с потерей времени или заменой на другие продукты. Между качеством питания и производительностью также имеется вполне определенная зависимость, которая учитывалась еще при разработке плана ГОЭЛРО (при определении соотношения между городским и сельским населением).

Получив оценки (4.15) и (4.16), для нахождения характеристик ущерба воспользуемся общей методикой определения ущербов. Оценим значение ущерба u_3

по (4.13). Стоимость всей продукции коммунально-бытового сектора оценим по денежным доходам населения $D_{\text{нас}}$. Стоимость единицы времени

$$\text{Ц} = D_{\text{нас}} / T_{\Sigma}.$$

Стоимость всего нерабочего времени или стоимость продукции коммунально-бытового сектора

$$\text{Ц}_{\text{к-б}} = \text{Ц} T_{\text{нер}} = D_{\text{нас}} \frac{T_{\text{нер}}}{T_{\Sigma}},$$

и удельное значение ущерба составит

$$y_{\Sigma} = \frac{D_{\text{нас}}}{\text{Э}_{\text{к-б}}} \frac{T_{\text{нер}}}{T_{\Sigma}}. \quad (4.18)$$

Если воспользоваться статистическими данными, которые входят в выражения (4.18) для y_{Σ} и (4.12) – для y_N , то расчеты в ценах 1985 года показывают, что основной удельный ущерб из-за ограничения по мощности близок к $y_N = 1,0$ руб/кВт·ч, а удельный ущерб из-за ограничения по энергии $y_{\Sigma} = 2,0$ руб/кВт·ч. В условиях неопределенности с резервами у коммунально-бытовых потребителей удельный ущерб имеет значение в диапазоне $y_{\text{к-б}} = (1 \div 2)$ руб/кВт·ч (курс рубля в то время был близок к одному доллару).

Отметим, что найденные оценки справедливы только для большой группы потребителей коммунально-бытового сектора и сферы обслуживания, т.е. для оценки ущерба от перерыва питания, например, районных подстанций 35 кВ и выше. Естественно, что для отдельных конкретных потребителей ущерб будет отличаться от полученных средних оценок. Близкие оценки получились и при определении удельного ущерба прямым способом, т.е. специальной обработкой результатов опроса населения.

Ущерб от аварийного недоотпуска электроэнергии электрифицированному железнодорожному транспорту можно оценить, используя общую методологию ущербов, если транспорт представить как подсистему (производство) народного хозяйства, продукцией (выходом) которой являются грузы в заданных местах и в заданное время. На вход этого производства поступают те же грузы, но в других местах и в другое время, а также потребляемая энергия, материалы, оборудование и т.д. Основная «технологическая» особенность рассматриваемого потребителя – достаточно жесткая корреляционная зависимость нарушения функционирования на значительной длине дороги при нарушении питания в одном пункте. Среднюю длину участка, на котором нарушается движение, достаточно полно характеризует такой параметр, как средняя дальность перевозки 1 т груза L . Поэтому при ограничениях на подстанциях, питающих контактную сеть, количество энергии, «использованной» на дороге, определяется средней дальностью перевозки:

$$\Delta \text{Э} = \text{Э}_0 K_{\text{огр}} [L + (n-1)l_0] t_{\text{огр}} / 8760,$$

где Э_0 – годовое потребление энергии на железной дороге, отнесенное к единице ее длины, кВт·ч/км в год; $K_{\text{огр}}$ – степень ограничения движения транспорта при ава-

рии; n – количество отключенных питающих (тяговых) подстанций; l_0 – среднее расстояние между подстанциями, км; $t_{\text{огр}}$ – время ограничений, ч.

Исходя из изложенного, полное значение ущерба при нарушениях электрообеспечения

$$Y = y_{\text{ожд}} \Delta \text{Э} = y_{\text{ожд}} \text{Э}_0 K_{\text{огр}} [L + (n-1)l_0] t_{\text{огр}} / 8760. \quad (4.19)$$

Оценка удельных ущербов электрифицированного железнодорожного транспорта по среднестатистическим данным страны в ценах 1985 г. дает следующие значения: $y_N = 0,3$ руб/кВт·ч, $y_{\Sigma} = 0,6$ руб/кВт·ч, т.е.

$$y_{\text{жд}} = (0,3 \dots 0,6) \text{ руб/кВт} \cdot \text{ч}.$$

По этим же данным $L \approx 1000$ км.

Выражение (4.19) показывает, что при ограничении по мощности какого-либо энергоузла, от которого питается электрифицируемый участок железной дороги протяженностью $L_{\text{уз}}$, эквивалентный ущерб (учитывающий последствия и за пределами энергоузла) от ограничения этого потребителя составит

$$y_{\text{экр}} = \frac{L}{L_{\text{уз}}} y_{\text{жд}}.$$

Так при $L_{\text{уз}} = 100$ км, а $L = 1000$ км эквивалентный удельный ущерб уже не 0,3 и 0,6 руб/кВт·ч, а 3 и 6 руб/кВт·ч.

Методика оценки ущерба внезапности. Рассматривается ущерб при внезапном отключении элементарного потребителя. Ущерб при отключении же с той или иной заблаговременностью, видимо, потребует дополнительных исследований, а до этого соответствующие характеристики ущерба могут быть получены интерполяцией по определенным законам между двумя крайними случаями (ущерба внезапного и основного).

В литературных источниках информация по данной составляющей ущерба крайне ограничена, ее несоизмеримо меньше, чем по первой составляющей. Это объясняется тем, что получение такой информации сопряжено с очень сложными и трудоемкими обследованиями реальных потребителей и моделированием всех возможных последствий от аварийных внезапных отключений. Рассчитывать на то, что такие исследования могут быть проведены в ближайшее время по всем (или хотя бы по наиболее представительным и существенным) потребителям, вряд ли приходится. Поэтому целесообразна разработка методики на основе не микро-моделирования всех процессов в технологии электропотребителя, а на идее кибернетического моделирования, где он представляется в виде «черно-серого ящика», с использованием максимально той информации, которая сегодня уже накопилась. Это прежде всего: понятия и данные по технологической и аварийной брони, о категоричности потребителей и т.п.

Моделирование элементарного предприятия начнем с представления его в виде «серого ящика» (рис. 4.5), на входе которого имеем сырье и электроэнергию, а на выходе – продукцию П [38]. В общем случае нагрузка потребителя состоит из нагрузок электроприемников аварийной брони, технологической брони и прочей. Нагрузка аварийной брони, как правило, составляет небольшую долю и имеет многократное резервирование от независимых источников. Потеря в питании этих электроприемников связана с повреждением оборудования, инструмента, вероят-

ностью взрывов и других аналогичных последствий. Однако учитывая крайне малую вероятность таких отключений из-за высокой надежности питания соответствующих электроприемников и относительно небольшую величину этой нагрузки, в дальнейшей исключим ее из рассмотрения. При необходимости же потребуются специальное обследование потребителей.

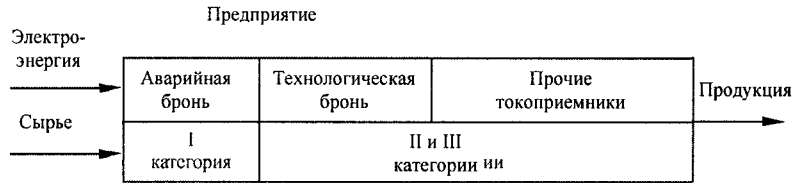


Рис. 4.5

Внезапные отключения электроприемников технологической брони приводят к браку сырья и потере соответствующей продукции предприятия (если время ограничения больше допустимого, после которого наступает срыв технологического процесса), а также к потерям времени и энергии на восстановление технологического процесса.

Представим весь технологический процесс потребителя последовательной совокупностью технологических циклов, в течение которых потребляется энергия цикла $\mathcal{E}_ц$. Предположим, что в какой-то момент времени t технологического цикла произошло отключение электроприемников технологической брони (рис. 4.6). К моменту t цикла была потреблена энергия $\mathcal{E}_{цб}$, которая оказалась бесполезной, так как после восстановления электроснабжения цикл начнется заново. Энергия $\mathcal{E}_{цбр} = \mathcal{E}_ц - \mathcal{E}_{цб}$ представляет ту часть энергии цикла, которую надо затратить с момента отключения до окончания технологического цикла.

$\mathcal{E}_{вос}$ – электроэнергия, которую необходимо затратить после восстановления электроснабжения до доведения технологического цикла от начала до того состояния, при котором произошло отключение.

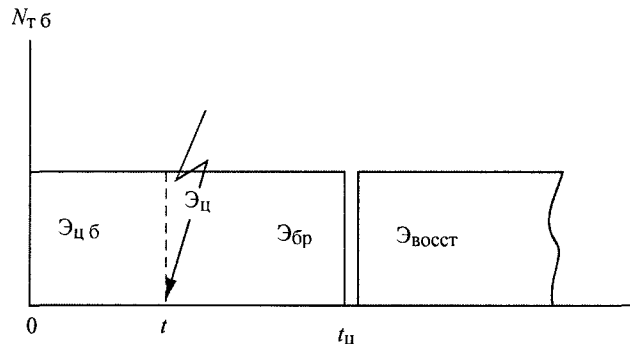


Рис. 4.6

Если вначале технологического цикла была произведена загрузка производства сырьем, материалами и всем остальным в объеме, необходимом для одного цикла, то к моменту t будет затрачена еще и электроэнергия $\mathcal{E}_{цб}$. Следовательно, при отключении в момент t не будет произведено продукции пропорционально этой энергии $\mathcal{E}_{цб}$ и она безвозвратно потеряется для хозяйства. Оставшаяся часть сырья, задействованного в технологическом цикле, пропорциональна энергии $\mathcal{E}_{цбр}$ и будет забракована. Наконец, на восстановление технологического процесса потребуются время и соответствующие резервы мощности предприятия $\mathcal{E}_{рез}$, если они имеются. При их отсутствии будет недодана народному хозяйству продукция данного предприятия в размере, соответствующем $\mathcal{E}_{вос}$. Полагая, что

$$\mathcal{E}_{цб} = \mathcal{E}_ц \frac{t}{t_ц}; \quad \mathcal{E}_{цбр} = \mathcal{E}_ц \frac{t_ц - t}{t_ц}; \quad \mathcal{E}_{вос} \geq \mathcal{E}_{цб},$$

ущерб внезапности можно оценить следующим образом:

$$Y_{вн} = y_3 \mathcal{E}_{цб} + y_3 \mathcal{E}_{цбр} (1 - K_{исп}) \alpha_c + \begin{cases} y_N \mathcal{E}_{вос} & \text{при } \mathcal{E}_{вос} + \Delta \mathcal{E} \leq \mathcal{E}_{рез}, \\ y_N \mathcal{E}_{вос} + y_3 (\mathcal{E}_{вос} - \mathcal{E}_{рез} - \Delta \mathcal{E}) & \text{при } \mathcal{E}_{вос} + \Delta \mathcal{E} > \mathcal{E}_{рез}. \end{cases}$$

А с учетом предыдущего

$$Y_{вн} = y_3 \mathcal{E}_ц \frac{t}{t_ц} + y_3 \frac{t_ц - t}{t_ц} \mathcal{E}_ц (1 - K_{исп}) \alpha_c + \begin{cases} y_N \mathcal{E}_{цб} & \text{при } \mathcal{E}_{вос} + \Delta \mathcal{E} \leq \mathcal{E}_{рез}, \\ y_N \mathcal{E}_{цб} + y_3 (\mathcal{E}_{цб} - \mathcal{E}_{рез} + \Delta \mathcal{E}) & \text{при } \mathcal{E}_{вос} + \Delta \mathcal{E} > \mathcal{E}_{рез}, \end{cases} \quad (4.20)$$

где $K_{исп}$ – коэффициент, указывающий степень возможного использования бракованной продукции.

Выражение (4.20) позволяет оценить размер ущерба внезапности при известных моментах наступления аварии после начала цикла. Им можно пользоваться при анализе фактических аварий. Если же решается плановая или проектная задача, то момент наступления аварии неизвестен. Тогда, полагая равновероятное ее наступление в течение всего цикла, можно принять $t = 0,5t_ц$ и

$$Y_{вн} = 0,5 y_3 \mathcal{E}_ц [1 + \alpha_c (1 - K_{исп})] + \begin{cases} y_N \cdot 0,5 \mathcal{E}_ц & \text{при } \mathcal{E}_ц \leq 2(\mathcal{E}_{рез} - \Delta \mathcal{E}), \\ y_N \cdot 0,5 \mathcal{E}_ц + y_3 (0,5 \mathcal{E}_ц - \mathcal{E}_{рез} - \Delta \mathcal{E}) & \text{при } \mathcal{E}_ц > 2(\mathcal{E}_{рез} - \Delta \mathcal{E}). \end{cases} \quad (4.21)$$

Для приближенной оценки можно считать, что $\mathcal{E}_{цб} \approx \mathcal{E}_{рез} - \Delta \mathcal{E}$ (с некоторым уменьшением расчетного ущерба), $K_{исп} = 0$ (с некоторым увеличением расчетного ущерба). Тогда, учитывая, что $y_N = (1 - \alpha_c) y_3$, получаем

$$Y_{вн} \approx y_3 \mathcal{E}_ц. \quad (4.20б)$$

В практических расчетах надежности удобно пользоваться удельными величинами ущерба. В данном случае рационально отнести величину всего ущерба либо к мощности технологической брони, либо ко всей мощности рассматриваемого потребителя. В первом случае

$$y_{\text{вн}} = \frac{Y_{\text{вн}}}{N_{\text{тех бр}}},$$

во втором случае

$$y_{\text{вн}} = \frac{Y_{\text{вн}}}{N}.$$

Сопоставление полученных по предлагаемому методу характеристик ущерба внезапности предприятий ряда отраслей (в ценах 1985 г.) с имеющимися в литературных источниках данными других авторов показывает на хорошее совпадение результатов (табл. 4.1). Это повышает уверенность в том, что принятая достаточно простая модель явления отражает главные влияющие на ущерб внезапности факторы.

Таблица 4.1

Сравнительные данные по характеристикам удельных ущербов внезапности

Наименование отрасли, предприятия	Удельные ущербы внезапности в руб/кВт, полученные		
	по предлагаемому методу	по данным [32, 33]	по данным ЭНИН им. Кржижановского
Завод тяжелого машиностроения	3,12	—	1,5...11
Автобусный завод	0,09	0,16	0,2...0,34
Химфармзавод	86...300	100	100
Металлургия	0,45...5,20	1,00...1,01	0,43...9,50
Химическая промышленность	0,45...6,70	0,27...6,30	0,18...6,6
Деревообработка и производство стройматериалов	0,10...1,56	0,60...2,20	0,20...3,40
Легкая и текстильная промышленность	0,22...12,6	0,80...13,5	0,97...11
Машиностроение	0,61...1,8	0,9...1,67	0,4...2,9
Станкостроение	0,67...1,5	0,3...0,68	0,37...3,2
Пищевая промышленность	1,84...78,1	—	0,46...59

В более общем случае зависимость ущерба внезапности нелинейна от глубины дефицита, глубины ограничения потребителя по мощности и от длительности ограничения. Эта зависимость может быть аппроксимирована функцией

$$Y_{\text{вн}} = Y_{\text{вн}}^{\text{max}}(t_{\text{в}}) \Delta N^{*\alpha}, \quad (4.22)$$

где

$$Y_{\text{вн}}(t_{\text{в}}) = y_{\text{вн}}(t_{\text{в}}) N^{\text{max}},$$

$y_{\text{вн}}(t_{\text{в}})$ – удельный ущерб внезапности; N^{max} – максимальная нагрузка потребителя;

$$\Delta N^* = \frac{\Delta N}{N^{\text{max}}},$$

ΔN – отключенная мощность потребителя; α – показатель степени.

В приложении 2 в табл. П.2.1 приведены характеристики ущербов потребителей всех отраслей народного хозяйства, рассчитанные по изложенным выше методам в условных единицах (условная единица примерно соответствует доллару).

Характеристика ущербов узлов энергосистем. При проектировании электрических сетей часто приходится оперировать мощностью не отдельных потребителей, а их совокупностью, питающейся от узлов системы. Отключение мощности всего узла – событие крайне редкое. При частичном же отключении величина ущерба будет зависеть от состава ограничиваемых потребителей. Очевидно, при этом должна быть установлена оптимальная очередность отключаемых потребителей, которая и определит однозначно величину ущерба. Эта очередность зависит, прежде всего, от характеристик ущерба отдельных потребителей. Кроме того, на эту очередность влияет система управления отключением мощности потребителей, ее стоимость. Последнее же определяется в большей части стоимостью передачи информации управляющего центра к потребителям, ее объема и скорости. Для решения задачи ранжировки потребителей по очередности их отключения можно составить следующую модель. Пусть требуется ограничивать мощность потребителей узла в общем случае на величину $N_{\text{огр}}$ и время $t_{\text{огр}}$ с частотой $\omega(N)$ раз в год.

Целевая функция будет иметь вид

$$Z = \omega(N) \sum_{i=1}^n [y_{\text{вн}i} \Delta N_i + y_{\text{о}i} \Delta N_i t_{\text{огр}}] + Z_{\text{с}y} \rightarrow \min$$

при условии

$$\sum \Delta N_i = N_{\text{огр}}.$$

Здесь в скобках – выражение, отражающее ущерб при одном отключении i -го потребителя; $Z_{\text{с}y}$ – приведенные годовые затраты на создание и поддержание системы управления мощностью потребителей.

Исследуем полученную модель. Вначале представим, что затраты на систему управления можно записать в виде суммы (хотя это не во всех случаях легко сделать)

$$Z_{cy} = \sum_{i=1}^n Z_{cy_i}, \quad (4.23)$$

где Z_{cy_i} – затраты системы управления, приходящиеся на i -го потребителя.

Перепишем целевую функцию (4.22), несколько преобразовав ее с учетом (4.23):

$$Z = \omega(N)t_{огр} \sum_{i=1}^n \left[(y_{вн_i} / t_{огр} + y_{o_i}) + Z_{cy_i} / (\Delta N_i \omega(N)t_{огр}) \right] \Delta N_i \rightarrow \min. \quad (4.24)$$

Это выражение позволяет наметить путь сравнения потребителей-претендентов на отключение. Первое выражение в круглых скобках представляет собой суммарную характеристику удельного ущерба потребителя. Из двух потребителей, имеющих одинаковые мощности и суммарные характеристики удельного ущерба, в первую очередь должен отключаться тот, у которого удельные затраты на его подключение к системе управления меньше. Если же их удельные характеристики ущербов разные, то очередность еще зависит и от частоты ограничения потребителей $\omega(N)$.

Рассмотрим частные, но характерные случаи.

1. *Плановые ограничения.* Информация о плановых ограничениях передается потребителям с достаточно большой заблаговременностью и не требует больших затрат для этого. Поэтому вторым слагаемым в (4.24) можно пренебречь. Кроме того, при достаточно большой заблаговременности равна нулю и величина ущерба внезапности. Поэтому критерий (4.24) приобретает вид

$$Z = \omega(N)t_{огр} \sum_{i=1}^n y_{o_i} \Delta N_i \rightarrow \min.$$

Плановый характер ограничения предполагает наличие у потребителей соответствующих резервов, поэтому удельная величина основного ущерба здесь определяется по выражению (4.12). Если размер мощности каждого потребителя ΔN_i много меньше общей величины ограничиваемой мощности $N_{огр}$, то ранжировка потребителей должна осуществляться по величине их удельного основного ущерба Y_{N_i} . На рис. 4.7 представлены зависимости удельного ущерба при плановых ограничениях для некоторых реальных крупных энергоузлов, полученные на основе данных табл. П.2.1 (приложение 2).

2. *Аварийные ограничения.* Сегодня в энергосистемах основными системами аварийного ограничения потребителей являются автоматическая частотная разгрузка (АЧР) и специальная автоматика отключения нагрузки (САОН).

Затраты на создание системы автоматической частотной разгрузки связаны в основном с установкой частотных реле на фидерах потребителей. При этом, как правило, на каждом реле подбирается примерно одинаковая мощность потребителей, что делает второе слагаемое в критерии (4.24) примерно одинаковым для всех потребителей. Поэтому ранжировку потребителей здесь можно выполнять без учета затрат в систему управления. Далее представим всю нагрузку потребителя (без аварийной брони) N_i двумя составляющими:

$$N_i = N_{тех бр_i} + N_{n_i},$$

где $N_{тех бр_i}$ – мощность технологической брони; N_{n_i} – остальная мощность.

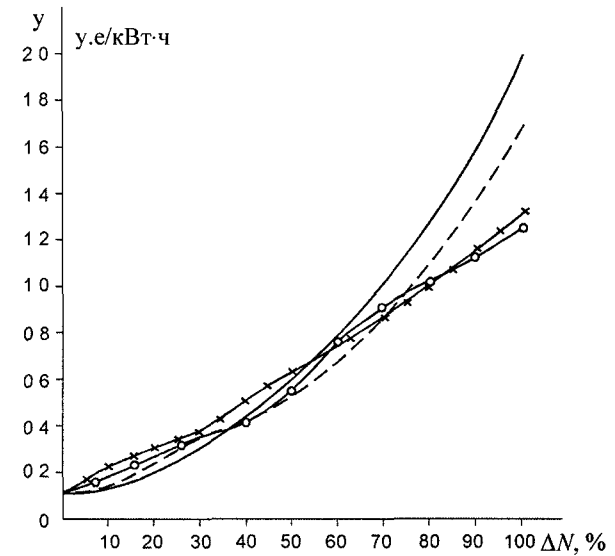


Рис. 4.7

Будем полагать, что нагрузка каждого потребителя может и будет отключаться двумя частями, сначала мощностью N_{n_i} , а затем при необходимости – мощностью $N_{тех бр_i}$. Тогда ущерб каждого потребителя при отключении составит

$$Y_i = y_{o_i} N_{n_i} t_{огр} + (y_{o_i} + y_{вн_i} / t_{огр}) N_{тех бр_i} t_{огр}.$$

Таким образом, заменив одного потребителя двумя эквивалентными с удельными ущербами y_{o_i} и $(y_{o_i} + y_{вн_i} / t_{огр})$, осуществим ранжировку теперь уже увеличенного множества эквивалентных потребителей по их новым величинам удельных ущербов.

Здесь необходимо лишь особо остановиться на величине y_{o_i} . При решении проектных задач, когда обосновываются в том числе и резервы для обеспечения надежности систем (электрических сетей и в общем случае – резервы потребителей), следовало бы использовать величину $y_{o_i} = Y_{N_i}$, определенную при условии, что ограничения потребителей строго компенсируются их резервами [по выражению (4.12)]. Но случайный характер аварийных отключений, а также качество системы управления мощностью потребителей не позволяют предполагать, что величина ограничиваемой энергии всегда будет точно совпадать с резервами у потребителей. Поэтому величина Y_{o_i} реально будет больше Y_{N_i} . Можно полагать, что $y_{o_i} = Y_{N_i} + \theta(y_{э} + Y_{N_i})$.

Если система управления мощностью плохая (нет взаимной информации между энергоснабжающей организацией и потребляющими предприятиями о резервах и т.п.), но у потребителя в среднем имеются необходимые резервы, то, вероятно, $\theta \approx 0,5$ (в половине всех случаев резервов было достаточно, в половине — нет). Если же система управления идеальная (постоянно следит за состоянием резервов у потребителей и в соответствии с ними организует при каждой аварии их ограничение), то, вероятно, $\theta \rightarrow 0$.

На рис. 4.8 показаны зависимости удельного ущерба от глубины дефицита для ряда реальных энергоузлов (при времени отключения 0,5 ч). Несколько иная картина складывается в случае применения САОН. Эта автоматика предназначена главным образом для сохранения устойчивости за счет быстрого отключения нагрузки потребителей в приемных системах. Она требует создания специальных каналов передачи управляющей информации от центра управления к отключаемым потребителям. В этих условиях второй член квадратных скобок целевого функционала (4.24), во-первых, значителен по величине, а во-вторых, существенно различен для отдельных потребителей. Поэтому для САОН привлекаются при одинаковых характеристиках удельного ущерба и затратах на систему управления $Z_{c,y}$,

более крупные по мощности потребители и очень часто приходится подключать под САОН потребителей с большими удельными ущербами, но более доступными (меньшими затратами на телеканалы). Поэтому САОН является менее избирательной, более грубой автоматикой, чем АЧР, но позволяет выполнять функции, недоступные последней. Наличие большого по величине слагаемого $Z_{c,y}$ в (4.24) не позволяет найти общего, достаточно простого алгоритма ранжировки потребителей для подключения их к САОН. Как правило, для различных систем решение получается индивидуальным.

На рис. 4.8 приведена зависимость суммарного удельного ущерба одной из энергосистем при отключении потребителей посредством САОН.

Анализ всех полученных зависимостей показывает, что начальная часть их (примерно до 75 % ограничения от всей мощности) мало зависит от энергосистемы или узла, если его мощность более 1000 МВт и нет особо выделяющихся потребителей, по своей мощности соизмеримых с мощностью узла. После 75 % ограничения мощности потребителей системы (узла) суммарный удельный ущерб начинает резко возрастать. Скорость этого возрастания зависит от состава потребителей. Если среди потребителей энергосистемы преобладают предприятия машиностроительного профиля, то возрастание характеристики существенно меньше, чем если бы среди потребителей преобладали предприятия химии и нефтехимии.

Зависимости ущерба при САОН отличаются тем, что они в начальной части превышают аналогичные зависимости при АЧР, а далее сливаются с последними. При этом в разных системах начальное превышение может существенно различаться. В системах, где имеются крупные электроемкие, а следовательно, «дешевые» потребители, они подключаются и к САОН и к АЧР. Поэтому эти характеристики почти совпадают. В системах, где нет таких крупных и «дешевых» потребителей и к САОН подключаются наиболее доступные предприятия, характеристики удельных ущербов в начальной части могут возрастать по сравнению с таковыми для АЧР в 1,5...2,0 раза.

Исходя из изложенного характеристики удельных ущербов при работе АЧР (характеристика а) и при плановых ограничениях (характеристика б) могут быть для большинства энергосистем и узлов унифицированы в своей начальной части и представлены так, как это показано на рис. 4.9.

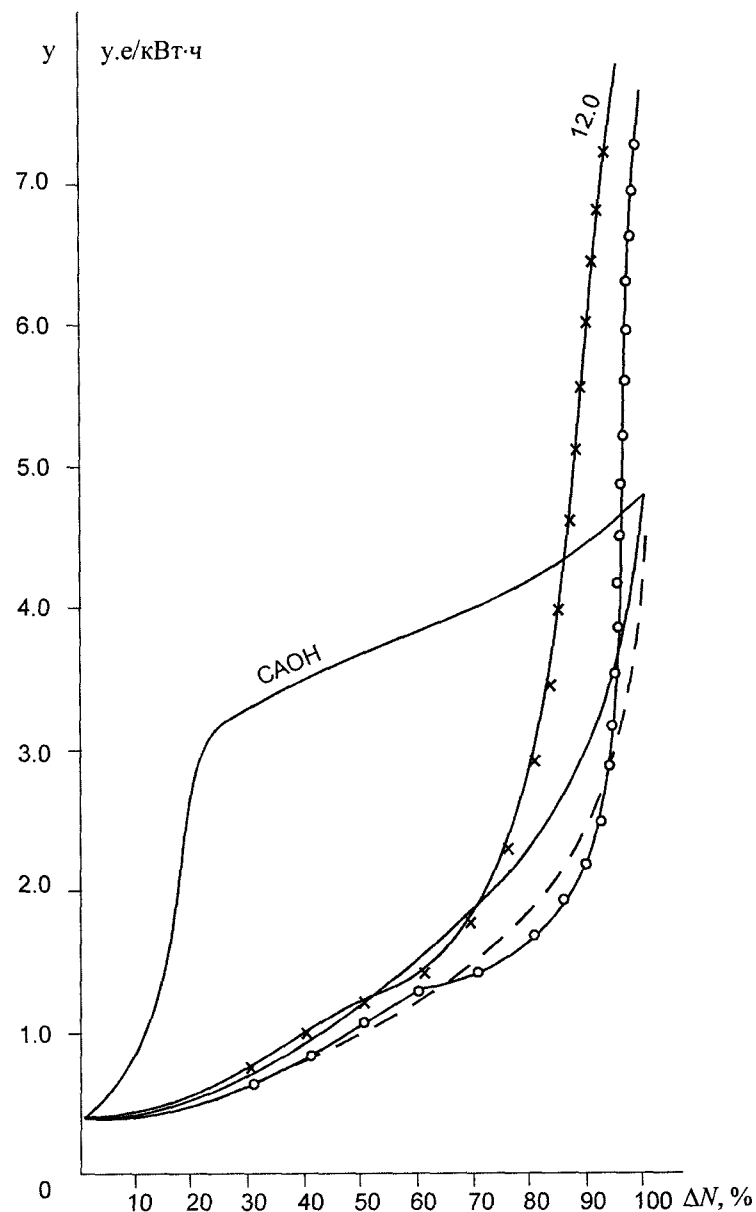


Рис. 4.8

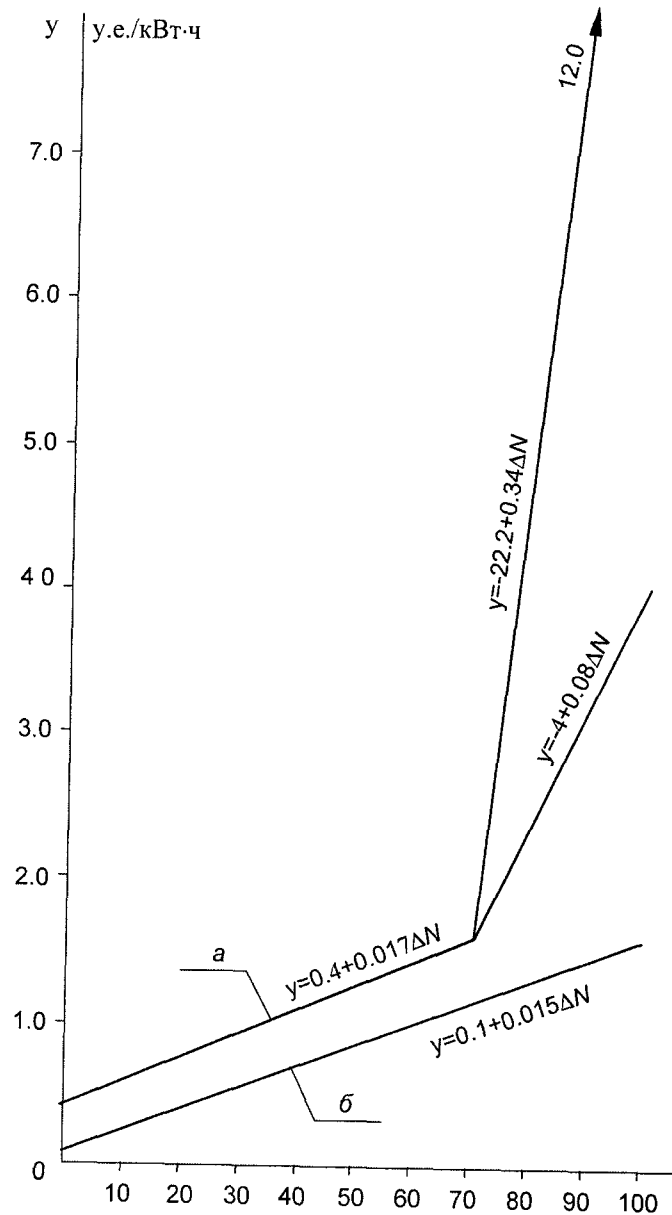


Рис. 4 9

ХАРАКТЕРИСТИКИ УЩЕРБОВ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПРИ НИЗКОМ КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Выше рассматривались ущербы электропотребителей, связанные с прямыми их отключениями и ограничениями, т. е. вызванные прямыми отказами и перерывами электроснабжения. Но, как отмечалось ранее, ввиду нечеткости критерия отказа (нечеткости границ значений параметров, переход через которые классифицируется как отказ), с одной стороны, и разной эффективности функционирования потребителей при различных отклонениях значений параметров даже внутри области допустимых их значений, с другой стороны, необходимо оценивать ущерб потребителей при отклонении значений параметров электроэнергии от номинальных. В первую очередь это относится к таким параметрам, как частота тока f_U , величина напряжения U .

Строгое определение ущерба из-за отклонения параметров (Δf и ΔU) от номинальных требует разработки весьма сложных моделей функционирования потребителей. Однако достаточно представительные оценки этого ущерба можно получить косвенным путем. Одним из таких путей является установление связи между характеристиками ущербов потребителей из-за аварийного простоя и характеристиками ущерба из-за низкого качества электроэнергии.

Рассмотрение этой возможности показывает, что оценку ущерба от снижения значений параметров можно сделать при наличии статических характеристик потребителей по данным параметрам [40 и др.]:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_f &= \frac{dN}{df}, \\ \alpha_U &= \frac{dN}{dU}, \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

где N — мощность рассматриваемого потребителя.

При отклонении параметров от номинальных на Δf и ΔU происходит изменение потребляемой мощности:

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_f &= \alpha_f \Delta f, \\ \Delta N_U &= \alpha_U \Delta U. \end{aligned} \right\} \quad (4.26)$$

Но снижение потребляемой электрической мощности должно сопровождаться и снижением за некоторый интервал времени dt потребляемой энергии $d\mathcal{E}$ и производимой продукции $d\Pi$. При этом очевидно:

$$d\Pi / \Pi \geq d\mathcal{E} / \mathcal{E} = \Delta N dt / \mathcal{E},$$

или

$$d\Pi \geq (\Pi / \mathcal{E}) \Delta N dt. \quad (4.27)$$

Полагая, что ущерб от невыработки продукции из-за низкого качества энергии, с одной стороны, прямо пропорционален этой продукции, а с другой — прямо пропорционален отклонению параметра энергии (ΔU , Δf), можно записать:

$$\left. \begin{aligned} dy_f &= y_f \Delta f dt = y_{\Pi} d\Pi, \\ dy_U &= y_U \Delta U dt = y_{\Pi} d\Pi, \end{aligned} \right\} \quad (4.28)$$

где коэффициенты пропорциональности являются характеристиками удельных ущербов, отнесенные в первом случае к отклонению параметров (y_f и y_U), во втором случае – невыработанной продукции (y_{Π}).

С учетом неравенства (4.27) имеем:

$$\left. \begin{aligned} dy_f &= y_f \Delta f dt \geq y_{\Pi} (\Pi/\mathcal{E}) \Delta N_f dt, \\ dy_U &= y_U \Delta U dt \geq y_{\Pi} (\Pi/\mathcal{E}) \Delta N_U dt. \end{aligned} \right\} \quad (4.29)$$

Из последних равенств следует, что

$$\left. \begin{aligned} y_f &\geq y_{\Pi} (\Pi/\mathcal{E}) (\Delta N_f / \Delta f), \\ y_U &\geq y_{\Pi} (\Pi/\mathcal{E}) (\Delta N_U / \Delta U). \end{aligned} \right\}$$

С учетом (4.26) имеем:

$$\left. \begin{aligned} y_f &\geq y_{\Pi} (\Pi/\mathcal{E}) \alpha_f, \\ y_U &\geq y_{\Pi} (\Pi/\mathcal{E}) \alpha_U. \end{aligned} \right\}$$

Но

$$y_{\Pi} (\Pi/\mathcal{E}) = y,$$

где y – удельный ущерб от недополученной потребителем энергии, отнесенной к этой энергии, величина которого может быть определена по приведенной выше методике или по любой иной.

Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} y_f &= y \alpha_f, \\ y_U &= y \alpha_U. \end{aligned} \right\} \quad (4.30)$$

Полученные выражения показывают, что удельный ущерб от снижения значения параметра энергии на единицу пропорционален удельному ущербу от недополучения энергии и регулируемому эффекту мощности потребителя по данному параметру.

Полный ущерб за время работы потребителя со сниженным параметром энергии, например, сниженным напряжением $t_{\Delta U}$, будет:

$$y_U \geq y \int_0^{t_{\Delta U}} \alpha_U \Delta U \cdot dt = y \alpha_U \int_0^{t_{\Delta U}} (U/N) N (\Delta U/U) dt = y \alpha_U^* \int_0^{t_{\Delta U}} N \Delta U^* dt, \quad (4.31)$$

где α_U^* , ΔU^* – регулирующий эффект нагрузки и отклонение значения параметра в относительных единицах

$$\left. \begin{aligned} \alpha_U^* &= \alpha_U \frac{U}{N}, \\ \alpha_f^* &= \alpha_f \frac{f}{N}. \end{aligned} \right\}$$

Если рассматривать отклонение значения параметра как случайную величину, то в силу «почти линейности» подынтегральной функции (4.31) среднюю величину ущерба можно оценить как

$$\overline{Y_U} \geq y \alpha_U^* \mathcal{E}_{\Delta U} \overline{\Delta U}^*. \quad (4.32)$$

Здесь $\mathcal{E}_{\Delta U}$ – энергия, потребленная при сниженном значении параметра (за время $t_{\Delta U}$); $\overline{\Delta U}^*$ – относительная величина среднего снижения значения параметра за время $t_{\Delta U}$.

До этого времени мы рассматривали только случай, когда значения параметров энергии отклонялись от номинальных в сторону снижения. Но они могут отклоняться и в сторону повышения. Потребляемая мощность и энергия электропотребителей в соответствии с регулирующими эффектами будут возрастать. Но это уже не будет означать, что эффективность работы потребителей повышается. Если номинальные параметры энергии являются оптимальными (на них рассчитывались все параметры токоприемников, технологические режимы электропотребителей), то в соответствии со свойством целевого функционала экономичности (V -образной конфигурации) любое отклонение значения параметра (как в сторону снижения, так и в сторону повышения) будет приводить к увеличению значения функционала (затрат). Если предположить, что целевой функционал, имеющий V -образную форму достаточно точно симметричен относительно точки оптимума (номинального значения параметра), то общую оценку ущерба за данный период T от низкого качества можно выполнить так:

$$\left. \begin{aligned} y_U &\approx y \alpha_U^* \mathcal{E}_T \sqrt{(\Delta U)^2 + (\sigma_{\Delta U})^2}, \\ y_f &\approx y \alpha_f^* \mathcal{E}_T \sqrt{(\Delta f)^2 + (\sigma_{\Delta f})^2}, \end{aligned} \right\} \quad (4.33)$$

где \mathcal{E}_T – потребленная энергия за период T , $\overline{\Delta U}^*$ и $\overline{\Delta f}^*$ – средние отклонения напряжения и частоты в относительных единицах за период T ; $\sigma_{\Delta U}^*$ и $\sigma_{\Delta f}^*$ – относительные значения среднеквадратичных отклонений напряжения и частоты за период T .

Выражение (4.33) надо использовать для случаев, когда отклонения параметров электроэнергии относительно невелики (еще существенна линейная зависимость ущерба от величины отклонения параметров (4.26), и не так сильно проявляются слагаемые более высоких порядков), а в работе самих токоприемников не происходит необратимых процессов (срывов технологических процессов, лавин напряжения, частоты).

В противном случае такие отклонения параметров электроэнергии следует рассматривать как явные отказы.

ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ ПАРАГРАФА

1. Сформулируйте ваш критерий поведения человека в обществе.
2. Можно ли считать библейские заповеди критериями эффективного поведения человека в обществе? Если да, то на каком компромиссе они получены?
3. Можно ли считать гражданский кодекс критерием эффективного поведения человека в обществе? Если да, то на компромиссе чьих интересов он построен?
4. Для данной машины расход бензина на 100 км составляет 12 литров. Величина 12 литров/100 км – это показатель или критерий эффективности?

Ответ зависит от контекста. Если, например, эта цифра указана на табличке в магазине, где выставлена машина на продажу, то – показатель. Если же на основании этой цифры кто-то приобретает данную машину, то для него – критерий.

5. Цена товара – это показатель или критерий?

6. Электроснабжение потребителя электроэнергии осуществляется по одной цепи. В результате аварийных отключений его среднегодовой ущерб составляет 10 млн руб. Сооружение второй цепи стоит 50 млн руб., ее эксплуатация 2,5 млн руб. в год и срок службы 20 лет. Средний ущерб при этом снижается до 1 млн руб. в год.

Оценить экономическую целесообразность для энергоснабжающей организации описанного варианта повышения надежности, если норма дисконта $E = 0,15$.

Решение

Приведенные годовые затраты в первом варианте – $Z_{1\Sigma} = Y = 10$ млн руб. Затраты во втором варианте – $Z_{2\Sigma} = 0,15 \cdot 50 + 2,5 + 1 = 11$ млн руб. Как видно, второй вариант дороже на 10 % первого, поэтому в этих условиях экономически нецелесообразен.

7. В условиях предыдущей задачи, где были приведены средние значения ущербов, известно, что среднеквадратичное отклонение ущерба для первого варианта $\sigma_{y1} = 3$ млн руб., а для второго – $\sigma_{y2} = 0,5$ млн руб. Оценить экономическую целесообразность второго варианта с учетом риска, полагая, что законы распределения ущерба близки к нормальному, а надежность принимаемого решения не ниже 0,999.

Решение

Приведенные годовые затраты с учетом риска в первом варианте – $Z_{1\Sigma} = \bar{Y} + 3\sigma_{y1} = 10 + 3 \cdot 3 = 19$ млн руб. Затраты во втором варианте – $Z_{2\Sigma} = 0,15 \cdot 50 + 2,5 + 1,0 + 3 \cdot 0,5 = 12,5$ млн руб. Как видно, первый вариант с учетом риска становится далеко не привлекательным.

8. Рассчитать эффективность вариантов, рассмотренных в предыдущих задачах, если лицо, принимающее решение, располагает годовыми ресурсами в 100 млн руб.

Решение

Затраты в первом варианте в соответствии с (4.8) и (4.9) составят $Z_{1\Sigma} = 10 + 3\sqrt{\frac{10}{100}} \approx 10,9$ млн руб., а во втором варианте – $Z_{2\Sigma} = 0,15 \cdot 50 + 2,5 + 1 + 3\sqrt{\frac{11}{100}} \approx 11,50$ млн руб.

Таким образом, только если лицо, принимающее решение, располагает ресурсами в 10 раз большими, чем требуется для рассматриваемого решения, варианты становятся практически равноценными.

9. Определить показатели удельного ущерба предприятия из-за аварийного ограничения его в электроэнергии, если основные и оборотные фонды его составляют 400 млн руб., постоянные годовые издержки 30 млн руб., а переменные 50 млн руб. Потребляемая годовая электроэнергия – 5,0 млн кВт·ч. Нагрузка 1000 кВт. Норма дисконта 0,15.

Решение

Удельный ущерб из-за недоотпуска энергии, которая компенсируется затем потребителю без срыва его поставок продукции, в соответствии с (4.12)

$$y_N = \frac{0,15 \cdot 400 + 30}{5} = \frac{90}{5} = 18 \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$$

Удельный ущерб из-за некомпенсированной недодачи энергии

$$y_{\Sigma} = \frac{0,15 \cdot 400 + 30 + 50}{5} = \frac{140}{5} = 28 \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$$

Таким образом, в зависимости от размера резервов на предприятии удельный ущерб лежит в диапазоне

$$y_0 = (18 \dots 28) \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$$

10. Определить удельный ущерб внезапности предприятия, рассмотренного в предыдущей задаче, если технологическая броня составляет 50 % его максимальной нагрузки, а энергия одного цикла 5000 кВт·ч.

Решение

Суммарный ущерб внезапности на основе (4.20б) при одном отключении технологической брони

$$y_{\text{вн}} = y_{\Sigma} \alpha_{\text{ц}} = 28 \cdot 5000 = 140000 \text{ руб.}$$

Удельный ущерб внезапности, отнесенный к мощности технологической брони

$$y_{\text{нв}} = \frac{y_{\text{вн}}}{N_{\text{тех бр}}} = \frac{140000}{500} = 280 \text{ руб/кВт.}$$

11. Определить удельные ущербы от недоотпуска энергии предприятия, если известны:

– норма электропотребления на 1000 руб. выпускаемой продукции

$$H_{\Sigma} = \frac{40 \text{ кВт} \cdot \text{ч}}{1000 \text{ руб.}};$$

– доля сырья в стоимости выпускаемой продукции $\alpha_c = 0,4$.

Решение

Удельный ущерб от некомпенсированного недоотпуска энергии

$$y_{\Sigma} = \frac{1000}{H_{\Sigma}} = \frac{1000}{40} = 25 \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$$

Удельный ущерб от компенсируемого недоотпуска энергии

$$y_N \approx y_{\Sigma} (1 - \alpha_c) = 25(1 - 0,4) = 15 \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$$

12. Определить величину удельного ущерба внезапности для завода тяжелого машиностроения Исходные данные

- установленная мощность токоприемников $N_{уст} = 28000$ кВт;
- заявленный максимум потребляемой мощности $N_{max} = 7790$ кВт;
- величина технологической брони $N_{тех бр} = 3275$ кВт;
- количество электроэнергии, потребляемой всеми приемниками технологической брони за технологический цикл (по карте технологической брони)

$$\begin{aligned} \Theta_{ц тех бр} &= K_{одн} \sum N_{тех бр} t_{ц} = 70 \cdot 2 + 55 \cdot 2 + 90 \cdot 4 + 180 \cdot 24 + \\ &+ 280 \cdot 40 + 85 \cdot 4,5 + 100 \cdot 2 + 180 \cdot 1,5 + 95 \cdot 1,5 + 100 \cdot 1,5 + 1000 \cdot 72 + \\ &+ 180 \cdot 72 + 300 \cdot 6 + 500 \cdot 6 = 112338 \cdot 0,278 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)} = 31230 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)}; \end{aligned}$$

- $N_{тех бр, i}$ – установленная мощность i -го токоприемника, входящего в технологическую бронь;
- $t_{ц, i}$ – время работы i -го токоприемника в цикле,
- коэффициент одновременности работы электроприемников (по предприятию в целом) $K_{одн} = \frac{7790}{28000} = 0,278$;
- средняя норма электропотребления на 1000 рублей выпускаемой продукции $H_{\Theta} = 21,5 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{1000 \text{ руб}}$;
- коэффициент использования бракованного сырья в других звеньях технологического процесса $K_{исп} = 0$.

Суммарный ущерб внезапности на основе (4 20б)

$$Y_{вн} = \frac{1000}{H_{\Theta}} \Theta_{ц тех бр} = \frac{1000}{21,5} 31230 = 1,453 \text{ млн руб.}$$

Удельный ущерб внезапности

$$y_{вн} = \frac{1453000}{3275} = 443,5 \text{ руб/кВт};$$

$$y'_{вн} = \frac{1453000}{7790} = 186,5 \text{ руб/кВт.}$$

13. Определить экспертным путем опроса своих домашних или друзей, как они оценивают ущерб от аварийного недоотпуска электроэнергии для себя лично. Разработать для этого методику опроса, обеспечивающую достаточно обоснованные результаты.

14. Оценить величину удельного ущерба от аварийного недоотпуска электроэнергии вашей семье, используя модели, рассмотренные в настоящем параграфе.

15. Напряжение электрической сети в точке подключения рассматриваемого потребителя в среднем понижено на 10 %, а среднеквадратичное отклонение со-

ставляет 3 %. Регулирующий эффект по напряжению $\alpha_{U}^* = 1,5$. Величина удельного ущерба потребителя от аварийного ограничения его энергией в десять раз превышает тариф на электроэнергию (по действовавшим раньше правилам пользования энергией, что явно занижено). Определить величину ущерба от низкого качества электроэнергии по отношению к стоимости Ц потребленной энергии.

Решение

В соответствии с (4.33) оценим ущерб

$$Y_U \approx y \alpha_U^* \Theta \sqrt{(\Delta U)^2 + (\sigma_{\Delta U})^2} = y \cdot 1,5 \Theta \sqrt{0,1^2 + 0,03^2} = 0,157 y \Theta.$$

Цена энергии Ц = цЭ, а отношение

$$\frac{Y_U}{Ц} = 0,157 \frac{y \Theta}{цЭ} = 0,157 \cdot 10 = 1,57.$$

Если учесть, что стандартом на электрическую энергию устанавливается допустимая норма на снижение напряжения в 5 %, то определенный выше ущерб, предъявляемый к оплате, снизится примерно вдвое, до $Y/Ц = 0,78$.

Как видно, ущерб данного потребителя в рассматриваемой ситуации становится соизмеримым с платой за энергию.

§4.2. НОРМАТИВНЫЙ ПОДХОД

Рассмотренный в предыдущем параграфе подход к определению рациональной надежности требует объемной информации, выполнения достаточно квалифицированных расчетов, анализа.

К сожалению, далеко не всегда можно иметь всю необходимую информацию. При такой массовости использования электроэнергии во всех сферах деятельности человека и соответственно – массовости принимаемых решений по организации энергоснабжения трудно обеспечить и необходимую высокую квалификацию специалистов.

С другой стороны, практика проектирования и эксплуатации накопила определенный опыт в решении этой задачи на эмпирической основе, который позволил сформулировать определенные требования по надежности в виде нормативов.

Кроме того, возникают случаи, когда экономический подход трудноприменим по принципиальным соображениям. Например, когда надежность связана с жизнью людей (опасность взрывов на химических производствах, откачка воды, вентиляция в шахтах, ядерная энергетика и т. п.). Определять и использовать цену жизни

человека, с одной стороны, выглядит антигуманно и даже кощунственно, но с другой стороны, зная, что невозможно обеспечить абсолютную надежность, принимая или нормируя ту или иную надежность, мы тем самым косвенно производим оценку жизни человека.

Такие оценки делаются различными способами. Один из таких косвенных способов заключается в следующем. Во время энергетических кризисов 70-х годов прошлого столетия, когда резко возросла цена на бензин, водители машин были вынуждены понизить скорости движения для повышения эффективности использования бензина. Одновременно с этим было зафиксировано снижение смертей из-за транспортных происшествий. Отношение эффекта, полученного от экономии топлива при снижении скорости движения, к изменению числа погибших в автокатастрофах и дало оценку жизни человека. Имеются и другие косвенные методы.

Эти оценки используются при проектировании надежности ядерных установок. В определенной мере на них построен страховой бизнес и др. Обычно для снятия неудобства от такого названия вещи своим именем стараются уйти, заменяя выражение «цена жизни» выражением, например, «оценка сохранения человеческой жизни» и др.

Естественно, цена жизни существенно зависит от уровня социально-экономического развития страны. В [41] приведены данные по оценкам «хозяйственной составляющей цены жизни для разных стран (млн долл США):

- США – 1,5...3;
- ФРГ – 0,5...1,0;
- Россия* – 0,09...0,19.

Более поздние оценки стоимости жизни дают существенно увеличенные значения, достигающие 10...15 млн долл.

Однако в большинстве случаев практикуется нормативный подход. Вид, форма нормативов могут быть самой различной. Могут нормироваться прямо показатели надежности, могут быть нормированы косвенные параметры системы, от которых зависит надежность и т. п. В разных странах находят применение различные формы этих нормативов, исключением может быть лишь один норматив, которому следуют почти во всех странах. Это так называемое правило « $n - 1$ », означающее, что электроснабжение потребителей не должно нарушаться при отказе одного любого элемента системы.

* Оценки института проблем безопасного развития ядерной энергетики

Используемые в нашей стране нормативы сформулированы в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ [42]). Здесь компромисс между потребителями и производителями разрешается следующим образом. С позиции потребителей, последние (точнее, их токоприемники) подразделены на категории по их важности (что отражает ущербы потребителей в экономическом подходе). Производители же обязаны обеспечивать разные категории потребителей надежностью различной степени, которая формируется разной кратностью резервирования и разной скоростью восстановления нарушенного электроснабжения (что отражается, естественно, на экономических показателях энергоснабжающей системы).

В соответствии с ПУЭ электроприемники потребителей подразделяются на следующие три категории.

К а т е г о р и я – электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой: опасность для жизни людей, значительный ущерб народному хозяйству, повреждение дорогостоящего основного оборудования, массовый брак продукции, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства.

Из состава электроприемников I категории выделяется особая группа электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства для предотвращения угрозы жизни людей, взрывов, пожаров и повреждения дорогостоящего основного оборудования.

К а т е г о р и я – электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности значительного количества городских и сельских жителей.

К а т е г о р и я – все остальные электроприемники, не входящие под определения I и II категорий.

Электроприемники I категории должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников питания, и перерыв их электроснабжения при нарушении электроснабжения от одного из источников питания может быть допущен лишь на время автоматического восстановления питания.

Для электроснабжения особой группы электроприемников I категории необходимо предусматривать дополнительное питание от третьего независимого взаимно резервирующего источника питания.

В качестве третьего независимого источника питания для особой группы электроприемников и в качестве второго независимого источника питания для остальных электроприемников I категории могут быть использованы местные электростанции, электростанции энергосистем (в частности, шины генераторного напряжения), специальные агрегаты бесперебойного питания, аккумуляторные батареи и т.п.

Если резервированием электроснабжения нельзя обеспечить необходимой непрерывности технологического процесса или если резервирование электроснабжения экономически нецелесообразно, должно быть осуществлено технологическое резервирование, например, путем установки взаимно резервирующих технологических агрегатов, специальных устройств безаварийного останова технологического процесса, действующих при нарушении электроснабжения.

Электроснабжение электроприемников I категории с особо сложным непрерывным технологическим процессом, требующим длительного времени на восстановление рабочего режима, при наличии технико-экономических обоснований рекомендуется осуществлять от двух независимых взаимно резервирующих источников питания, к которым предъявляются дополнительные требования, определяемые особенностями технологического процесса.

Электроприемники II категории рекомендуется обеспечивать электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников питания.

Для электроприемников II категории при нарушении электроснабжения от одного из источников питания допустимы перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания дежурным персоналом или выездной оперативной бригадой.

Допускается питание электроприемников II категории по одной ВЛ, в том числе с кабельной вставкой, если обеспечена возможность проведения аварийного ремонта этой линии за время не более 1 сут. Кабельные вставки этой линии должны выполняться двумя кабелями, каждый из которых выбирается по наибольшему длительному току ВЛ. Допускается питание электроприемников II категории по одной кабельной линии, состоящей не менее чем из двух кабелей, присоединенных к одному общему аппарату.

При наличии централизованного резерва трансформаторов и возможности замены повредившегося трансформатора за время не более 1 сут. допускается питание электроприемников II категории от одного трансформатора.

Для электроприемников III категории электроснабжение может выполняться от одного источника питания при условии, что перерывы электроснабжения, необходимые для ремонта или замены поврежденного элемента системы электроснабжения, не превышают 1 сут.

Применение нормативов значительно упрощает выработку решений по обеспечению рациональной надежности, не требует много информации и высокой квалификации в области надежности лица, принимавшего решения.

К сожалению, ничего в жизни даром не дается. Нормативы допускают много неточностей, например в критериях отнесения электроприемников к различным категориям. Нечеткость требований к надежности также допускает многовариантность систем энергоснабжения.

Однако более существенными дефектами нормативов является то, что они построены на опыте прошлого, и при проектировании существенно новых систем энергоснабжения появляется риск выработки совершенно неверных решений.

Кроме того, появление многоукладной экономики в нашей стране, реструктуризация производства могут существенно изменить требования потребителей к надежности их энергоснабжения, по сравнению с тем, что было отражено в нормативах, полученных совершенно для другой экономики страны.

В этих условиях, как это обычно и бывает, «истина» находится где-то между двумя подходами – экономическим и нормативным.

Поскольку энергетическая система – многофункциональная система (в том числе – много узлов, от которых осуществляется энергоснабжение различных потребителей), критерий рациональной надежности можно сформировать как совокупность экономических компромиссов (для тех узлов питания, для которых это возможно сделать), и нормативных требований (для тех узлов, где экономические расчеты затруднены).

ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ ПАРАГРАФА

1 Потребитель с суммарной потребляемой мощностью в 20 МВт находится на расстоянии 15 км от одной подстанции 110/10 кВ и в 25 км от другой подстанции 110/35/10 кВ. Структура электрической нагрузки – 5 МВт – I категории, в том числе 0,5 МВт – особая группа, остальная (15 МВт) – III категории.

Построить схему электроснабжения данного потребителя в соответствии с нормами ПУЭ

9. От каких факторов существенно зависит величина ущерба потребителей из-за ненадежности энергоснабжения?

10. Чем отличается величина ущерба в случае, когда аварийно недоданная потребителю энергия затем компенсируется, от случая, когда эта компенсация не происходит?

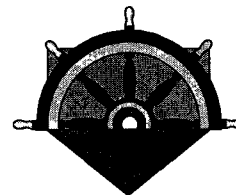
11. В чем заключается специфика оценки ущерба от аварийно недоданной энергии коммунально-бытовому потребителю?

12. В чем заключается специфика оценки ущерба от аварийно недоданной энергии электрифицированному железнодорожному транспорту?

13. Какие основные факторы влияют на величину ущерба внезапности?

14. По каким факторам необходимо подбирать потребителей, претендентов на участие в их отключениях от энергопитания при возникновении различных дефицитов в энергосистеме?

15. Какие факторы определяют ущерб от низкого качества энергии?



ГЛАВА 5

ЗАДАЧИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Задача обеспечения надежного энергоснабжения является задачей целенаправленной деятельности в искусственно создаваемой системе и поэтому может быть отнесена к управленческой. С этих позиций в самом общем виде эта задача может быть сформулирована как выработка управленческих решений по определению параметров энергосистемы и их реализация в соответствии с заданными критериями и средствами.

Здесь «средства» будем понимать достаточно расширенно. С одной стороны, это методы, при помощи которых решается задача, а с другой – это информация о тех материалах, оборудовании и других ресурсах, которая может быть использована при выработке управленческих решений и которая адекватно отражает характеристики (физические, технические, экономические и др.) располагаемого материала, оборудования и т.д. В связи с этим далее условно будем средства подразделять на методические и инженерные. Ниже преимущественно рассматриваются методические.

Очевидно, первым и основным методическим средством должен стать системный подход, который позволяет рассматриваемую весьма сложную и многообразную задачу представить в виде системы подзадач. Подразделение общей задачи на систему подзадач возможно различными способами. Естественным желанием и требованием к такому разделению является обеспечение максимальной независимости получающихся подзадач между собою. Далее представлены возможные подходы такой декомпозиции общей задачи.

Если опираться на системный подход и представить рассматриваемый объект как систему II (см. § 1.1), процессуально, то целесообразно выделить две группы существенных процессов. Первая – физические процессы в объекте: преобразования, передача, распределение, потребление энергии, характеризующие функции объекта, износ и старение, восстановление ресурса, утилизация оборудования, характеризующие использования материала объекта. Вторая группа – управленческие процессы: целеполагание и выработка решений, организация, регулирование, благодаря которым первые (физические) процессы направляются в определенное русло.

Такое рассмотрение общей задачи позволяет подразделить ее на подзадачи:

- изучения и описания физических процессов в объекте;
- выбора критериев и выработки управленческих решений;
- реализации управленческих решений.

Решение первой подзадачи в плане надежности в общеметодическом аспекте рассматривалось в 1...3 главах. Приложение этих методов к конкретным объектам энергетики будет связано с выбором средств обеспечения надежности, которые рассматриваются ниже, а также будут разбираться во второй части пособия (см. предисловие).

Из двух других подзадач с позиции управления фокусирующей является выбор критериев и выработка решений (с учетом решения первой задачи), которая далее и рассматривается.

Выбор критериев, которые по смыслу являются моделями целей, осуществляется на этапе целеполагания. В процессе целеполагания происходит балансирование и приведение в соответствие желаний лиц, принимающих решения, с располагаемыми средствами.

Состав лиц, принимающих решения, определяется организацией энергетики. Следовательно, и состав решаемых задач прямо зависит от ее организации: состава субъектов, их отношений и т.д.

Таким образом, общая задача обеспечения надежности энергообеспечения может быть подразделена, с одной стороны, по составу лиц, принимающих решения в энергетике, а с другой – по составу средств, используемых для этих целей.

Методически удобно начать рассматривать декомпозицию задач с анализа средств обеспечения надежности, а затем перейти к субъектному анализу.

§ 5.1. СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Создание объекта, выполняющего заданные функции, обычно начинается с анализа существенных процессов, которые должны в нем протекать (например, потоки мощностей в электрической сети), а затем подбора материала, который обеспечит протекание этих процессов (например, сечение и материал проводов, передающих эти мощности, конструкции гирлянд опор и т.д.). Очевидно, от количества и качества материала будет зависеть прочность, долговечность объекта, его способность выдерживать возможные возмущения, перегрузки, т.е. надежность.

Обычно объект рассчитывается и изготавливается под определенные заданные нагрузки (токовые, напряжения, механические и т.д.). Предполагается, что если действительные нагрузки не будут превышать расчетных (номинальные), то объект отработает срок своей жизни без отказов. Реально же на объект эпизодический действуют различные возмущения, превышающие номинальные, проявляются скрытые дефекты проекта, изготовления, монтажа, в результате чего происходят отказы объекта до истечения срока его жизни. Для уменьшения этого влияния обычно увеличивают прочность объекта, закладывая определенные запасы.

Таким образом, создание запаса прочности в материале объекта является одним из средств повышения надежности. В более общем случае, повышение надежности можно обеспечивать как запасами прочности, так и сырьем, продукции и т.п.

Однако надежность объекта – системы определяется не только прочностью и конструкцией материала, из которого изготовлены элементы ее, но и тем, как вообще структурирован материал всей системы. Та же электрическая сеть может быть построена по кольцеобразной, радиальной или смешанной схеме. И во всех этих вариантах сети даже при одинаковых запасах прочности в элементах надежность ее будет различной. Это следует и из известного положения, что структура объекта обуславливает его свойства. Следовательно, определенным образом направленная структуризация объекта при его создании также является средством обеспечения надежности.

Если созданием запаса прочности обеспечивается повышение надежности за счет избыточности внутри объекта (элемента), то возможно повышение надежности за счет создания внешней избыточности – резервирования.

Резервирование (лат. Reservo-сберегаю, сохраняю) – повышение надежности объекта введением дополнительных элементов и

функциональных возможностей сверх минимально необходимых для нормального выполнения объектом заданных функций. Различают следующие его виды.

Структурное резервирование – метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточных элементов, входящих в физическую структуру объекта (например, установка вторых трансформаторов на подстанциях; сооружение вторых цепей линий электропередач, когда пропускная способность первых цепей еще не исчерпана; установка дополнительных – резервных генераторов в энергосистеме и т.д.).

Временное резервирование – метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточного времени, выделенного для выполнения объектом заданных функций (например, резервный генератор в энергосистеме по своему прямому назначению используется очень небольшую часть общего времени, а остальную часть времени находится в состоянии ожидания отказов работающих генераторов; этот резерв времени может быть использован для повышения надежности в другой, соседней энергосистеме, связанной с первой, когда тот же резервный генератор будет включен для замещения отказавшего здесь генератора).

Информационное резервирование – метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточной информации сверх минимально необходимой для выполнения заданных функций (например, если при отказе и отключении какого-либо элемента электрической сети оставшиеся перегружаются и требуется их срочная разгрузка, то по информации об отключении элемента сети производится отключение части нагрузки исходя из возможной максимальной загрузки сети. Если же информацию об отключении элемента сети дополнить еще и информацией о доаварийной нагрузке сети, то после отказа элемента можно отключить нагрузку в меньшем размере, в соответствии с реальной, а не предполагаемой максимальной нагрузкой сети).

Функциональное резервирование – метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование способности элементов выполнять дополнительные функции вместо основных или наряду с ними (например, межсистемная линия электропередачи, предназначенная для транспорта электроэнергии из одной системы в другую, может выполнять и другие функции – взаиморезервирование генераторов в этих системах, реализовать эффект совмещения максимумов нагрузок энергосистем и т.д.; трансформаторы на отдельных подстанциях помимо своего основного назначения могут быть использованы и для осуществления плавки гололеда током на

проводах и тросах воздушных линий с целью повышения их надежности).

Нагрузочное резервирование – метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование способности его элементов воспринимать дополнительные нагрузки сверх номинальных. Как правило, здесь временное повышение степени использования (увеличения объема выполняемых функций) осуществляется за счет более быстрого срабатывания ресурса объекта (например, при отказе одного трансформатора допускается временная перегрузка второго).

В зависимости от схемы использования резервного элемента в системе различают:

- *общее резервирование*, при котором резервируется объект в целом;
- *раздельное резервирование*, при котором резервируются отдельные элементы системы или их группы;
- *скользящее резервирование*, при котором группа основных элементов системы резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший основной элемент в данной группе (например, передвижной резервный трансформатор на предприятии электрических сетей, привозимый на подстанцию на время ремонта основного трансформатора).

В зависимости от режима использования резервного элемента различают:

- *нагруженный резерв*, когда резервный элемент находится в том же режиме загрузки, что и основной;
- *облегченный резерв*, когда резервный элемент находится в менее нагруженном режиме, чем основной.
- *включенный резерв* (в энергетической практике часто называемый «горячим резервом»), когда резервный элемент готов в любое время взять на себя функции резервного элемента;
- *невключенный резерв* (в энергетической практике часто называемый «холодным резервом»), когда требуются определенное время для ввода резервного элемента в работу.

Для характеристики степени резервирования используется показатель *кратность резервирования*, как отношение числа резервных элементов к числу резервируемых элементов объекта.

Часто под кратностью резервирования, например, в электрических сетях, понимается отношение пропускной способности сети после отключения основных элементов к пропускной способности

этих элементов. В тех случаях, когда кратность резервирования равна единице, говорят, что имеет место дублирование. Создание резервов, запасов является, как правило, необходимым условием обеспечения надежности систем. Однако степень использования их существенно зависит от системы управления (регулирования).

Так равномерная, пропорциональная нагрузка различных элементов системы повышает надежность за счет более эффективного использования их ресурса, поскольку сработка ресурса обычно нелинейно зависит от загрузки объекта (например, если два одинаковых трансформатора на подстанции загружать неравномерно, то их суммарный ресурс будет сработан быстрее, чем это имело бы место при их равномерной загрузке). Выявление, предупреждение отказов на основе использования диагностических систем позволяет существенно поднять надежность и уменьшить отрицательные последствия отказов.

Время восстановления объекта после отказа прямо зависит от скорости локализации повреждения, от организации и проведения ремонтных работ. От системы управления прямо зависят скорость и объем ввода резервов и степень их использования. Наиболее эффективна здесь автоматизация управления.

Таким образом, создание адекватной системы управления является средством обеспечения надежности.

Наконец, следует отнести к наиболее эффективным средствам обеспечения надежности – *повышение квалификации производственного персонала*. Действительно, по статистике до 30 % аварий или их развитие происходит из-за неправильных действия персонала.

В итоге средствами обеспечения надежности являются:

- формирование соответствующей структуры объекта,
- создание различных резервов,
- создание запасов (прочности оборудования и д.р.),
- создание соответствующей системы управления объектом, включающей, в первую очередь, организацию ремонтов, техническую диагностику и автоматизацию,
- повышение квалификации персонала объекта.

В современных, рыночных условиях функционирования предприятий для полноты картины средств обеспечения надежности следует в их состав включить и различные *страховые механизмы*.

§ 5.2. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЗАДАЧИ

С управленческих позиций используемые выше отглагольные существительные «создание», «формирование» означают, прежде всего, выработку решений по параметрам создаваемого объекта, системы. При этом различные средства обеспечения надежности отражаются в различных параметрах объекта. С рассматриваемых позиций представляет интерес провести структуризацию его параметров.

Обычно создание объекта начинается с определения *структурных* параметров, во многом обуславливающих все его свойства. Это параметры, которые задают состав элементов, отношения и связи между ними. При этом элементы, связи задаются своими выходными параметрами (элемент как «черный ящик»).

На втором этапе следует определение внутренних параметров элементов (просветление «черных ящиков»), т.е. представление их, в свою очередь, как систем – выявление структурных параметров второго порядка.

При необходимости могут определяться структурные параметры третьего и выше порядков (элементов «элементов» и т.д.).

После того как найдены все параметры, характеризующие материал объекта, задаются параметры, представляющие режим работы объекта (например, нагрузка генераторов, потоки мощности, напряжения в узлах сети и т.д.).

Естественно, что структурные параметры объекта в снятом виде должны включать в себя параметры элементов и режимные параметры, точнее, допускать возможность осуществлять необходимые режимы, обусловленные заданными функциями объекта. Аналогично, параметры элементов также должны включать в себя в сжатом виде режимные параметры, допускать их реализуемость.

Взаимосвязь всех этих параметров показана на рис. 5.1.

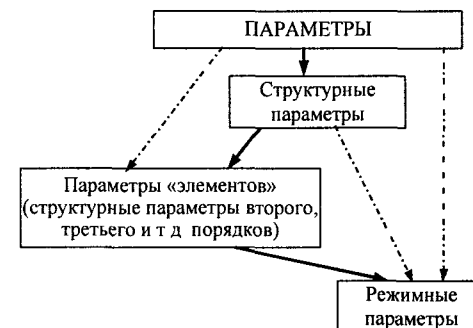


Рис. 5.1

В литературе можно встретить так называемую временную иерархию проектирования, планирования, создания объектов, которая определяет последовательность во времени решения задач (например, стратегическое, тактическое, оперативное планирование или долгосрочное, среднесрочное, текущее планирование и др.).

Предлагаемая выше декомпозиция параметров отражает ту же суть, но не требует указания сроков, так как для разных объектов эти сроки могут быть самыми различными.

Если сопоставить состав средств обеспечения надежности и декомпозицию параметров системы, то можно установить в определенной степени соответствие между ними. Так формирование соответствующей структуры объекта соответствует выявлению структурных параметров его. Во многом эти же параметры обуславливаются и структурным резервированием (в первую очередь общее резервирование). Параметры элементов (структурные параметры второго и последующих порядков) обуславливаются создаваемыми запасами, резервами (раздельными, скользящими), страховыми механизмами.

Режимные параметры определяются системой управления (законами регулирования, установками автоматических устройств и т.п.), персоналом, а также использованием страховых механизмов.

§ 5.3. СУБЪЕКТНАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЗАДАЧИ

В условиях рыночной организации энергетики, многосубъектности, с одной стороны, и функционирования электроэнергетики как единого комплекса, с другой стороны, возникают границы между различными подсистемами и соответствующими взаимодействующими субъектами и как следствие – договорные отношения, устанавливающие их права и обязанности, в том числе и обязанности по надежности энергоснабжения. А следовательно, у субъектов появляются задачи по определению и обеспечению выполнения своих обязательств, в том числе и по надежности. Естественно, что это положение должно лечь в основу декомпозиции общей задачи обеспечения надежности.

Состав субъектов можно рассмотреть на основе несколько идеализированной схемы (рис. 5.2) управления. Исходя из этой схемы общую задачу обеспечения надежности можно по этому принципу подразделить на задачи:

- законодательной власти;
- исполнительной власти;
- субъектов энергетического рынка:
 - администратора торговой системы (АТС);
 - системного оператора (СО);
 - генерирующих компаний;
 - системообразующей электрической сети;
 - распределительных электрических сетей;
 - сбытовых компаний;
 - потребителей энергии.

При этом задачи каждого субъекта подразделяются на *внешние* и *внутренние*.

Внешние задачи обуславливаются связями субъекта с другими. Здесь определяются те надежностные параметры, которые гарантируются между субъектами, которые закладываются в договорные отношения между ними.

Внутренние задачи – выявляют параметры объектов – элементов системы, которые обеспечивают договорные отношения на границах с другими субъектами.

В условиях же, когда имеется всего один субъект – государство, вместо этой субъектной декомпозиции использовалась *функциональная декомпозиция* – решались задачи обеспечения надежности генерирующей части системы, сетевой части системы и т.д. По сути, во многом, решались те же задачи, что и при субъектной декомпозиции, но все по критерию, отражающего интересы одного субъекта – государства.

На рис. 5.2 представлена схема, когда все бизнесы в энергетике разделены. В принципе могут быть субъекты, представляющие вертикально интегрированные энергопредприятия (включающие в себя в общем случае генерацию, передачу, распределение и сбыт).

Для таких предприятий внутренняя задача обеспечения надежности декомпозируется по функциональному принципу.

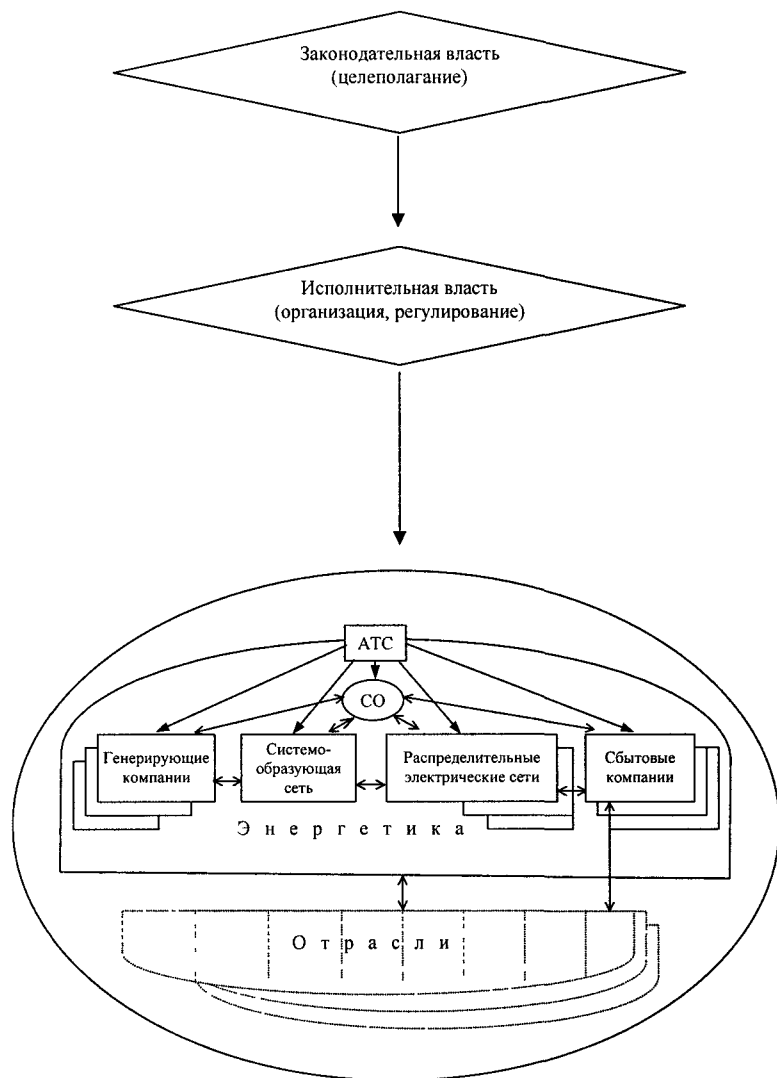


Рис. 5.2

§ 5.4. СТРУКТУРИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ НАДЕЖНОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Рассмотренные выше принципы декомпозиции позволяют провести структуризацию общей задачи надежности. Следуя системному подходу, прежде всего необходимо выделить объект и предмет исследования и по возможности максимально точно обозначить границы. Для этого обратимся к рис. 5.2 и примем за объект исследования систему хозяйствования, ограниченную на рисунке кругом. Все, что находится вне круга, – это среда изучаемого объекта, которая во многом формируется законодательным и исполнительным органами, определяя в том числе и свойство надежности. Поэтому ниже мы сформулируем и задачи этих органов.

Сам объект, достаточно сложный, в свою очередь, представим в виде двух частей: собственно энергетику и другие отрасли хозяйства, а задачи подразделим на внутренние (определение параметров самой энергетики) и внешние (определение параметров взаимодействия энергетики с другими отраслями).

В соответствии с таким видением целостности структурируем общую задачу следующим образом (рис. 5.3). Стрелками показана последовательность решения задач, которая в общем случае является итеративной, где используется подразделение их на предварительные и окончательные. Предварительные решения задачи – это решения, которые, с одной стороны, получены в условиях повышенной неопределенности, а с другой – решения, реализация которых еще не требуется (имеется временной запас). Вместе с тем решение таких задач обычно необходимо для обеспечения информацией других задач, связанных с данной.

Окончательные решения задач – это решения, реализация которых требуется сразу же (запас времени отсутствует). Задачи, помещенные в таблицу, решаются последовательно сверху вниз и слева направо. Практически обычно все задачи решаются одновременно на основе информации, полученной из последних решений всех остальных задач.

Ниже приводится состав характерных, типовых задач надежности в соответствии с приведенной их структуризацией.

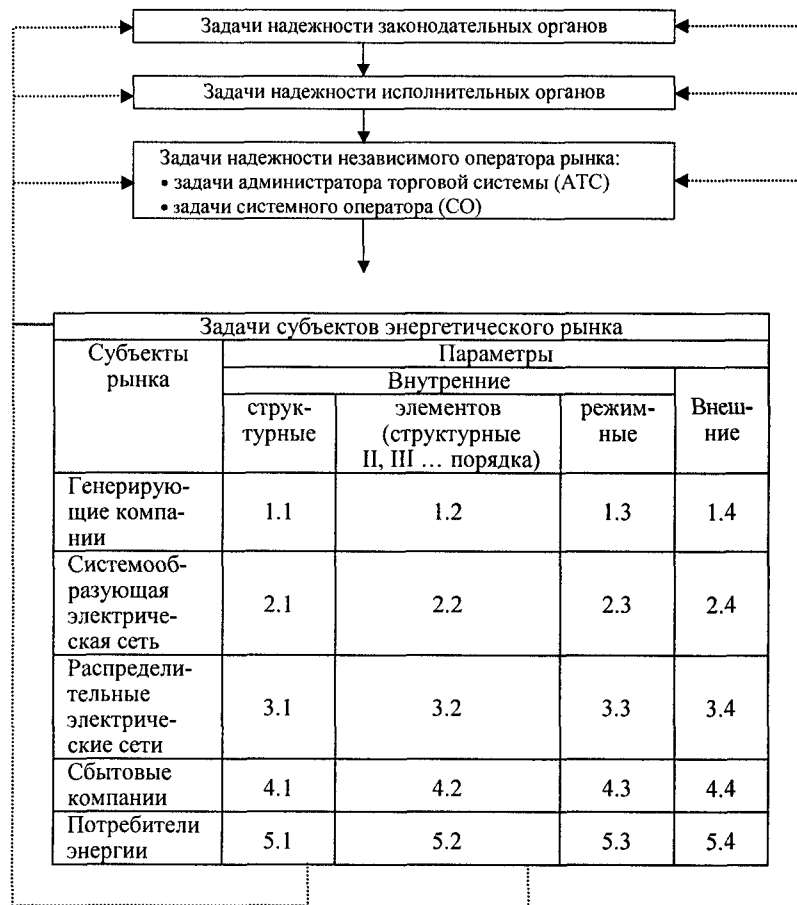


Рис. 5.3

ЗАДАЧИ ЗАКОНОДАТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ВЛАСТИ

Разработка и принятие законов и законодательных актов (закон об энергетике, Гражданский кодекс, Указы президента и др.), их последующее улучшение, которые во многом предопределяют организацию энергетики, отношения между субъектами, права, ответственность, нормы и стандарты по надежности, ограничение на использование тех или иных энергоресурсов, энергетическую безопасность страны, регионов и т.д.

Решают эти задачи на основе политических, экономических, экологических критериев. В результате их решения определяются параметры среды, в которой функционирует и развивается экономика, в том числе и энергетика, формируются требования к энергетике, ее надежности.

ЗАДАЧИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ВЛАСТИ

Разработка и реализация энергетических стратегий (политик) страны, регионов, установление льгот и ограничений на использование энергетических ресурсов, их квотирование, установление норм, контроль и регулирование уровня надежности энергоснабжения, уровня энергетической безопасности.

Решают эти задачи преимущественно на основе экономических и экологических критериев. В результате их решения уточняются и конкретизируются требования к энергетике, ее надежности, выявляются параметры для мониторинга и определяются законы регулирования.

ЗАДАЧИ НАДЕЖНОСТИ НЕЗАВИСИМОГО ОПЕРАТОРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЫНКА

Задачи администратора торговой системы. Определение состава и объемов необходимых резервов мощности и организация рынка резервов.

Решение этих задач осуществляется на основе конкретных ценовых критериев (закон спроса – предложения). В результате их решения определяются ценовые сигналы по резервам мощности, уточняются их структура, размеры, размещение в энергосистеме и др.

Задачи системного оператора. Определение рациональных правил, алгоритмов использования выделенных резервов мощности, пропускной способности электрических сетей, в том числе рациональной величины включенного резерва мощности. Выявление рациональных масштабов привлечения отключаемых потребителей для обеспечения надежности энергоснабжения и разработка систем противоаварийной автоматики (автоматической частотной разгрузки – АЧР, специальной автоматики отключения нагрузки – САОН и др.), разработка законов регулирования и др.

Решение этих задач осуществляется на основе экономических критериев и нормативов надежности. В результате их решения, помимо указанных выше, определяется уровень надежности, который системный оператор обеспечивает потребителям энергии.

ЗАДАЧИ НАДЕЖНОСТИ СУБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЫНКА

(Номера задач см. на рис. 5.3)

1.1. Определение:

- структура генерирующих мощностей с учетом их надежности;
- определение структуры резервов генерирующих мощностей (по виду резервов, их размерам, размещению по энергоузлам системы и т.п.).

1.2. Определение:

- единичной мощности агрегатов электростанции с учетом надежности;
- схем коммутации оборудования электростанций с учетом надежности;
- системы организации ремонтного обслуживания оборудования электростанций.

1.3. Планирование:

- режима использования оборудования электростанций с учетом его надежности;
- рационального включенного резерва;
- сроков и объемов проведения ремонтов оборудования электростанций;
- объема топлива на складах электростанций.

1.4. Определение:

- требований в том числе и по надежности к оборудованию, поставляемому на электростанции;
- требований к ремонтному обслуживанию, осуществляемого внешними организациями.

2.1. Определение структуры системообразующей электрической сети с учетом надежности ее оборудования и степени реализации системных эффектов, в том числе и по надежности (взаиморезервирования и сокращения резервов др.).

2.2. Определение:

- параметров линий электропередач (пропускная способность, материал и конструкция с учетом климатических условий прохождения и т.п.), подстанций и коммутационных пунктов (схем коммутаций, управляемости, резервирования аппаратуры, трансформаторов и т.п.);
- системы ремонтно-эксплуатационного обслуживания электрических сетей (количество и размещение ремонтно-производственных баз, количество подстанций с обслуживающим персоналом на подстанции, на дому, количество оперативно-выездных бригад и т.п.).

2.3. Планирование:

- режимов использования сети с учетом ее надежности, ограничений по пропускной способности;
- ремонтных воздействий (объемов, сроков и т.д.).

2.4. Определение требований по надежности к поставляемому в электрические сети оборудованию (к коммутационной аппаратуре: выключателям, разъединителям, отделителям; трансформаторам; компенсирующим устройствам; арматуре; изоляции и т.д.).

3.1–3.4. Эти задачи по форме подобны задачам 2.1–2.4, отличие их – в функциональном значении этих сетей. Кроме того, следует ожидать отличие еще и в том, что за надежность на выходе генерирующей подсистемы и системообразующей сети в конечном сети отвечает Системный Оператор, а за надежность на выходе распределительной сети отвечает само предприятие электрических сетей.

4.1–4.4. Задачи этого субъекта в настоящее время наименее ясны. Можно предполагать, что одной из главных общих задач здесь будет переупаковка порций энергии, закупаемой сбытовой компанией на оптовом рынке (на спотовом рынке, рынке резервов, балансирующем рынке, на бирже) или прямо у производителей, в свои обязательства перед розничными потребителями. В итоге решения должны быть получены в виде «меню», в котором розничному потребителю предлагается электроэнергия с разными параметрами (одноставочными, двухставочными и другими тарифами, в том числе с различной надежностью).

5.1–5.4. Суть этих задач будет заключаться в выборе сбытовых компаний и выработке решений по установлению договорных отношений с ней, в том числе и по надежности электроснабжения. Далее, на основе этих оговоренных условий – выработка решений о степени технологического резервирования, размеров запасов и других мероприятий по снижению ущербов от ненадежности на самом предприятии потребителя энергии.

Решение всех задач 1.1–5.4 осуществляется на основе экономических и нормативных критериев, на основе функций полезностей соответствующих субъектов. В результате их решения, помимо указанного выше, вырабатываются также правила, инструкции для деятельности персонала в возможных ситуациях.

Приведенный перечень задач претендует в какой-то степени на полноту и целостность при определенных условиях: использование типовых решений, оборудования и т.п. Имеется еще неограниченный круг исследовательских задач. Например, если рассмотренные выше задачи по выбору параметра электропередачи основывались

на использовании типовых решений по конструкциям линий электропередач, то могут быть поставлены задачи по разработке новых конструкций линий. Тогда линия должна рассматриваться как система, состоящая из конструкций фаз, изоляции, конструкций опор, различных защитных устройств. Определение параметров каждого из этих элементов – уже новая задача, решаемая с учетом фактора надежности.

Аналогична ситуация и с другими типовыми решениями. Так что в общем случае множество задач надежности является открытым.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 5

1. В чем заключается суть общей задачи обеспечения надежности с позиций управления и какой подход может быть применен к ее решению?
2. На какие подмножества задач можно подразделить общую задачу обеспечения надежности с позиции управления?
3. Какие средства используются для обеспечения надежности?
4. Как можно произвести декомпозицию параметров системы?
5. Что представляет собой временная декомпозиция задач и как она связана с декомпозицией параметров?
6. Как может быть представлена современная система управления энергетикой?
7. Как может быть декомпозирована общая задача обеспечения надежности по субъектному признаку?
8. Как может быть представлена структура общей задачи обеспечения надежности?
9. В чем суть задач обеспечения надежности:
 - законодательных органов власти;
 - исполнительных органов власти;
 - независимого оператора электроэнергетического рынка;
 - генерирующих компаний;
 - электросетевых предприятий;
 - энергосбытовых компаний;
 - потребителей энергии?



Рассмотренные понятия, способы измерения и определения надежности (гл. 1, 2 и 3) отвечают на поставленный во введении вопрос «что такое надежность» и составляют теоретическую базу этой науки. Обсуждение критериев эффективности и общего подхода к решению задачи надежности (гл. 4, 5) отвечает на остальные два: «что такое надежное энергоснабжение» и «как обеспечивать надежность». В совокупности с предыдущим вопросом они составляют теоретическую базу надежности энергетических систем.

Эта основа знаний позволяет в принципе решать реальные задачи надежности. При этом потребуются интерпретация реальных процессов в рассматриваемых системах на язык теории надежности, а для сложных задач – разработки необходимых моделей этих систем. Все это является предметом прикладных проблем надежности, и применительно к различным энергопредприятиям их предполагается рассматривать в последующих частях пособия.

Представленная теория, конечно же, требует своего развития. Прежде всего, – это информационное обеспечение. Сегодняшний понятийный и методический аппарат построен главным образом на вероятностной парадигме. Но, видимо, более обобщенной и адекватной была бы методология неопределенности. К сожалению, работ в этом направлении очень мало.

В методической главе (гл. 3) отмечалось, что все методы определения надежности даются как методы анализа надежности. Методы определения надежности на основе синтеза имеются лишь для некоторых частных задач, а в общеметодическом плане практически не разработаны.

Требует дальнейшего осмысления и понятийный аппарат, в частности, такие понятия, как долговечность, ремонтпригодность. Благожелательный смысл, например, термина «долговечность» (чем больше, тем лучше) становится сомнительным в век ускоренного старения знаний, быстрой смены технологий и т.п. Аналогичная ситуация и с «ремонтнопригодностью».

Наконец, еще очень мало проработаны критериальные вопросы, особенно методы учета риска при определении параметров систем.

Все эти проблемы еще ждут своих исследователей.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ
ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Таблица П 1.1

Относительные длительности простоя агрегатов (блоков)
в отказовом (аварийном) состоянии (q)

Тип станций	q , %
ТЭС с поперечными связями	2,0
КЭС с блоками 150 200 МВт	4,0 6,0 *
КЭС и ТЭС с блоками 250 300 МВт	5,0 9,0 *
КЭС с блоками 500 МВт	15,0
КЭС с блоками 850 МВт	12,0
ГЭС	0,5 3,0 **

*) Большая из указанных величин относится к первым серийным агрегатам данного типа, типа, меньшая – к агрегатам, выпущенным через 5 лет и более после начала выпуска серии

***) Большая из величин относится к крупным агрегатам

Таблица П 1.2

Средняя частота и длительность нахождения агрегатов
в капитальных ремонтах

Тип агрегатов	Частота $\omega_{пл}^{кап}$, 1/год	Длительность $t_{пл}^{кап}$, дни
Агрегаты ТЭС с поперечными связями	0,25	60
Энергоблоки мощностью, МВт		
50 200	0,25	72
300	0,25	96
500 800	0,25	120
1200	0,25	144
Энергоблоки атомных станций	0,25	180
Гидроагрегаты	0,25	60

Таблица П 1.3

Единичные показатели надежности работы энергоблоков
с паротурбинными установками

Оборудование	Номинальная мощность, МВт	Средняя частота отказов ω , 1/год	Среднее время восстановления $\bar{t}_в$, ч	Средняя частота плановых остановов $\omega_{пл}$, 1/год	Среднее время планового простоя $\bar{t}_{пл}$, ч
Энергоблок, в т ч	150 165	7,2	49	17	120
– котлоагрегат		5,2	44		
– турбина		1,3	43		
– турбогенератор		0,7	91		
Энергоблок, в т ч	180 210	10,5	45	9,3	155
– котлоагрегат		7,6	47		
– турбина		1,8	45		
– турбогенератор		1,1	58		
Энергоблок, в т ч	250 300	9,8	45	8,0	150
– котлоагрегат		6,6	38		
– турбина		2,5	68		
– турбогенератор		0,7	83		
Энергоблок, в т ч	500*	29,5	70	3,6	345
– котлоагрегат		12,7	56		
– турбина		8,1	85		
– турбогенератор		8,7	136		
Энергоблок, в т ч	800	15,6	74	5,1	277
– котлоагрегат		11,2	50		
– турбина		3,3	99		
– турбогенератор		1,1	179		

*) Для турбогенераторов ТГВ-500 и ТВН-500

ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Таблица П.1.4

Единичные показатели надежности
линий электропередачи

Тип линий	Номинальное напряжение, $U_{ном}$, кВ	Материал опор	Число цепей	Средняя частота устойчивых отказов ω , 1/100 км год	Среднее время восста- новления $\bar{t}_в$, ч	Средняя частота плано- вых остано- вов $\omega_{пл}$, 1/год	Среднее время плано- вого простоя $\bar{t}_{пл}$, ч	
Воздушные	До 1			25	2,0	0,17	5	
	6 10			7,6	5,0	0,17	6	
	35	Металлические	Одноцепные		0,9	9,0	2,1	16,0
			Двухцепные	Откл 1 цепь	1,1	6,0	1,0	13,0
				Откл 2 цепи	0,3	8,0	0,3	9,0
			Одноцепные		0,7	10,0	1,2	15,0
		Железобетонные	Двухцепные	Откл 1 цепь	0,8	10,0	1,3	14,0
				Откл 2 цепи	0,1	12,0	0,2	13,0
		Деревянные	Одноцепные		1,5	13,0	2,5	16,0
		110	Металлические	Одноцепные		1,3	9,0	2,1
	Двухцепные			Откл 1 цепь	1,7	7,0	3,8	15,0
				Откл 2 цепи	0,2	10,0	0,4	19,0
	Одноцепные				0,7	11,0	1,6	16,0
	Железобетонные		Двухцепные	Откл 1 цепь	1,0	9,0	2,4	12,0
				Откл 2 цепи	0,2	15,0	0,4	13,0
	Деревянные		Одноцепные		1,5	10,0	3,6	14,0
	220		Металлические	Одноцепные		0,5	11,0	2,8
		Двухцепные		Откл 1 цепь	0,6	11,0	3,3	14,0
				Откл 2 цепи	0,1	15,0	0,5	24,0

Окончание табл. П.1.4

Тип линий	Номинальное напряжение, $U_{ном}$, кВ	Материал опор	Число цепей	Средняя частота устойчивых отказов ω , 1/100 км год	Среднее время восста- новления $\bar{t}_в$, ч	Средняя частота плано- вых остано- вов $\omega_{пл}$, 1/год	Среднее время плано- вого простоя $\bar{t}_{пл}$, ч	
Воздушные	220	Железобетонные	Одноцепные	0,4	9,0	1,8	24,0	
			Двухцепные	Откл 1 цепь	0,5	9,0	1,1	17,0
		Откл 2 цепи		0,1	8,0	0,3	10,0	
		Деревянные	Одноцепные		0,6	11,0	5,4	18,0
	330		Металлические	Одноцепные	0,6	11,0	3,0	21,0
		Двухцепные		Откл 1 цепь	0,9	10,0	7,3	15,0
			Откл 2 цепи	0,1	2,0	0,3	11,0	
		Железобетонные	Одноцепные		0,3	15,0	2,9	20,0
	500	Металлические	Одноцепные		0,2	14,0	3,1	18,0
			Железобетонные	Одноцепные		0,2	13,0	3,5
750		Одноцепные		0,2	20,0	0,17	25,0*	
1150*		Одноцепные		0,2	25,0	0,17	25,0	
Кабельные	6 15			7,5	16,0**	1,0	2,0	
	20 35			3,2	16,0**	1,0	2,0	
	до 1			10,0	2**	1,0	2,0*	

*) Экспертная оценка

**) Указана продолжительность ремонта

Таблица П15

Значения параметров α ,
с помощью которых определяется средняя частота
неустойчивых отказов как $\omega_{неуст} = \alpha \omega_{уст}$

Номинальное напряжение воздушной линии электропередачи, кВ	α
35	2,0
110 154	3,2
220 330	3,0
500 750	1,8
1150*	1,4

*) Экспертная оценка

Таблица П1.6

Единичные показатели надежности трансформаторов

Номинальная мощность, МВа	Номинальное напряжение, кВ	Средняя частота отказов ω , 1/год	Среднее время восстановления $\bar{t}_в$, ч	Средняя частота текущих ремонтов $\omega_{тек}$, 1/год	Средняя продолжительность текущего ремонта, ч	Средняя частота капитальных ремонтов $\omega_{кап}$, 1/год	Средняя продолжительность капитального ремонта, ч
До 2,5	6 20	0,016	50	0,25	6	0,166	150
	35	0,010	40	0,25	6	0,166	200
2,5 7,5	6 20	0,008	120	0,25	8	0,166	150
	35	0,007	65	0,25	26	0,166	200
	110	0,018	40	0,25	28	0,166	250
10 80	35 и ниже	0,012	70	0,75	26	0,166	200
	110 150	0,014	70	0,75	28	0,166	280
	220	0,035	60	0,75	28	0,166	300
Более 80	110 150	0,075	95	1,0	30	0,166	300
	220	0,025	60	1,0	30	0,166	330
	330	0,053	45	1,0	30	0,166	380
	500 750	0,024*	220	1,0	50	0,166	400
		0,050**					
1150***	0,030	250	1,0	70	0,166	400	

*) Для однофазных трансформаторов

**) Для трехфазных трансформаторов

***) Экспертная оценка

Таблица П17

Единичные показатели надежности выключателей

Вид выключателей	Номинальное напряжение кВ	Тип	Средняя частота отказов числитель – короткое замыкание, знаменатель – разрыв цепи ω , 1/год	Среднее время восстановления $\bar{t}_в$, ч	Вероятность отказа на коммутационную операцию, $\alpha_{оп}$, о е	Вероятность отказа при отключении короткого замыкания $\alpha_{кз}$, о е	Средняя частота капитальных ремонтов $\omega_{кап}$, 1/год	Средняя продолжительность капитального ремонта, ч	Средняя частота текущих ремонтов $\omega_{тек}$, 1/год	Средняя продолжительность текущего ремонта, ч
Автоматические	До 1		0,02/0,03	4			0,33	10	0,67	8
Электромагнитные	6 10	ВЭМ-6, ВЭМ-10, ВЭ-10	0,01/0,01	11	0,002	0,027	0,2	24	0,8	16
Маломастные	10	ВМП-10	0,003/0,007	20	0,003	0,005	0,14	8	0,86	8
		Прочие	0,003/0,007	20	0,003	0,005	0,14	10	0,86	8
	20		0,002/0,008	26	0,003	0,005	0,14	10	0,86	8
	35		0,014/0,016	25	0,005	0,005	0,14	9	0,86	8
	110 150		0,02/0,04	20	0,006	0,013	0,14	30	0,86	8
Масляные баковые	35		0,002/0,007	30	0,006	0,006	0,14	12	0,86	8
	110		0,005/0,011	40	0,004	0,006	0,14	23	0,86	8
Воздушные	15 20		0,015/0,025	20	0,020**	0,015**	0,2	40	0,8	8
		35		0,004/0,016	40	0,013	0,012	0,2	29	0,8
	110		0,003/0,017	20	0,004	0,004	0,2	45	0,8	12
	220	ВВБ	0,004/0,016	55	0,004	0,006	0,2	122	0,8	15
		Прочие	0,004/0,016	25	0,004	0,003	0,2	96	0,8	15

Окончание табл. П 1.7

Вид выключателей	Номинальное напряжение, кВ	Тип	Средняя частота отказов числитель – короткое замыкание, знаменатель – разрыв цепи ω , 1/год	Среднее время восстановления $\bar{t}_в$, ч	Вероятность отказа на коммутационную операцию, $\alpha_{оп}$, о е	Вероятность отказа при отключении короткого замыкания $\alpha_{кз}$, о е	Средняя частота капитальных ремонтов $\omega_{пл}^{кап}$, 1/год	Средняя продолжительность капитального ремонта, ч	Средняя частота текущих ремонтов $\omega_{пл}^{тек}$, 1/год	Средняя продолжительность текущего ремонта, ч
	330*	ВВБ	0,005/0,026	48	0,002	0,006	0,2	160	0,8	16
		Прочие	0,005/0,026	60	0,002	0,002	0,2	113	0,8	16
	500*	ВВБ	0,025/0,125	60	0,007	0,003	0,2	130	0,8	20
		Прочие	0,025/0,125	60	0,007	0,002	0,2	133	0,8	20
	750		0,050/0,200	75	0,009	0,003	0,2	270	0,8	30
	1150*		0,060/0,240	90	0,010	0,004	0,2	350	0,8	40

*) Показатели приведены без учета отказов выключателей ВВБ

**) Экспертная оценка

 $\alpha_{оп}$ – отношение количества отказов выключателей при выполнении коммутационных операций, в том числе отключений КЗ, к общему количеству операций (в расчете на один аппарат) $\alpha_{кз}$ – отношение количества отказов выключателей при отключении КЗ к количеству отключенных КЗ

Таблица П 1.8

Единичные показатели надежности остальной коммутационной аппаратуры

Аппарат	Номинальное напряжение, кВ	Средняя частота отказов ω , 1/год	Среднее время восстановления, $\bar{t}_в$, ч	Средняя частота капитальных ремонтов $\omega_{пл}^{кап}$, 1/год	Средняя продолжительность капитального ремонта, ч	Средняя частота текущих ремонтов $\omega_{пл}^{тек}$, 1/год	Средняя продолжительность текущего ремонта, ч
Разъединители	6-10	0,01	7	0,166	4	0,834	3
	35	0,01	6	0,166	6	0,834	4
	110	0,01	11	0,166	8	0,834	5
	154	0,01	15	0,166	11	0,834	5
	220	0,01	7	0,166	13	0,834	6
	330	0,01	10	0,166	18	0,834	7
	500	0,01	14	0,166	31	0,834	8
	750	0,01	14	0,166	81	0,834	16
1150*	0,01	20	0,166	100	0,834	16	
Отделители	35	0,015	3	0,33	7	0,667	4
	110	0,01	3,5	0,33	10	0,667	5
	220	0,01	3,5	0,33	16	0,667	6
Короткозамыкатели	35	0,01	4	0,33	8	0,667	4
	110	0,01	6	0,33	6	0,667	5
	220	0,01	6	0,33	8	0,667	6

*) Экспертная оценка

Таблица П 1.9

Единичные показатели надежности сборных шин распределительных устройств

Номинальное напряжение, кВ	Средняя частота отказов ω , 1/год	Среднее время восстановления, $\bar{t}_в$, ч	Средняя частота капитальных ремонтов $\omega_{пл}^{кап}$, 1/год	Средняя продолжительность капитального ремонта, ч	Средняя частота текущих ремонтов $\omega_{пл}^{тек}$, 1/год	Средняя продолжительность текущего ремонта, ч
6 10	0,030	5	0,166	5	0,834	2
10	0,030	7	0,166	5	0,834	2
20 35	0,020	7	0,166	4	0,834	2
110 150	0,016	5	0,166	4	0,834	3
220	0,013	5	0,166	3	0,834	3
330	0,013	5	0,166	3	0,834	3
500	0,013	5	0,166	5	0,834	3
750	0,010	6	0,166	5	0,837	4
1150*	0,010	7	0,166	7	0,837	4

*) На присоединение

**) Экспертная оценка

ПОКАЗАТЕЛИ УПРАВЛЯЕМОСТИ

Средняя длительность отключения поврежденного элемента от сети на подстанциях с постоянным дежурным персоналом составляет:

- в схемах с обходной системой шин 0,5 ч
- в полупотурных и многоугольниковых мостковых схемах 0,25 ч

Длительность шунтирования выключателя (отделителя) в РУ 35...220 кВ составляет 0,4 ч, поврежденного короткозамыкателя – 0,25 ч.

Указанные длительности оперативных коммутаций следует увеличить на 0,4 ч при эксплуатации с дежурством на дому, и на 2 ч при обслуживании оперативно-выездными бригадами.

Таблица П 1.10

Показатели надежности устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики

Тип устройства	Средняя частота ложных отказов $\omega_{лож}$, 1/год	Вероятность излишних срабатываний на требования вне зоны $\rho_{изл}$, о.е	Частота излишних срабатываний $\omega_{изл}$, 1/год	Вероятность отказа на требование ρ , отказ/требование
Дифференциально-фазная высокочастотная защита типа ДФЗ-2	1,0	0,2	1,9	0,24
Фильтровая высокочастотная направленная защита типов ПЗ-162, ПЗ-164, ПЗ-164А	4,0	0,2	1,8	0,78
Дистанционные защиты типов ПЗ-156, ПЗ-157, ПЗ-158, с высокочастотной блокировкой	0,68	0,3	2,70	0,59
ПЗ-156, ПЗ-157, ПЗ-158, без высокочастотной блокировки	0,77	0,1	0,73	0,57
ПЗ-151, ПЗ-152 и ПЗ-153	0,7	0,02	0,18	0,80
Дифференциальная защита шин 110 кВ и выше	0,42	0,1	1,10	2,90
Газовая защита трансформаторов с действием на отключение	0,45	–	0,10	0,30
Продольная дифференциальная защита генераторов	0,05	0,1	0,07	0

Окончание табл. П 1.10

Тип устройства	Средняя частота ложных отказов $\omega_{лож}$, 1/год	Вероятность излишних срабатываний на требования вне зоны $\rho_{изл}$, о.е.	Или частота излишних срабатываний $\omega_{изл}$, 1/год	Вероятность отказа на требование ρ , отказ/требование
Автоматы:				
повторного включения линий 110...330 кВ	–	–	–	0,72
подстанций	0,7	–	–12,0	
частотной разгрузки	0,17	–	0,25	0,16
Автоматическое устройство разгрузки при отключении участков электропередачи	–	–	–	0,03

*) Ориентировочная оценка.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П.2.1

Характеристики удельных ущербов предприятий*

Наименование отрасли и предприятия	Средняя величина удельного ущерба u_0 , у е /кВт·ч	Удельная величина ущерба внезапности при полном отключении $U_{вн}$, у е /кВт при продолжительности отключения, ч			Показатель степени, α	Доля нагрузки технологической брони, σ , %	Удельный ущерб при невосполняемом дефиците энергии, U_3 , у е /кВт·ч	Удельный ущерб при последующей компенсации недоданной энергии, U_N , у е /кВт·ч
		отключения, ч						
		0,5	1,0	3,0				
Топливная промышленность								
Добыча нефти	0,4	3,5	3,5	3,5	8	12	0,60	0,10
Нефтепереработка	0,6	1,5	1,5	1,5	1	90	1,00	0,15
Шахты	0,2	0,2	0,3	0,8	4	20	0,35	0,10
Гидрошахты	0,15						0,35	0,05
Разрезы Кузбасса	0,30						0,4	0,25
Разрезы Хакасии	0,25	0,15	0,15	0,15	1	5	0,35	0,20
Разрезы Восточной Сибири	0,15						0,35	0,10
Добыча торфа	0,25	0	0	0	0	0	0,35	0,15
Черная металлургия								
Горно-обогатительные комбинаты (ГОК)	0,15	0,35	0,45	0,7	3,0	35	0,35	0,05
Металлургический завод полного цикла	0,4	2,9	4,0	8,0	2	33	0,60	0,20
Трубопрокатный завод	0,3	0,5	0,5	0,5	4	33	0,45	0,10
Завод ферросплавов	0,1	0,07	0,10	0,35	4	5	0,35	0,02
Металлургические производства высококачественных сталей	0,25	0,5	0,1	0,1	5	20	0,35	0,10

Продолжение табл. П.2.1

Наименование отрасли и предприятия	Средняя величина удельного ущерба u_0 , у е /кВт·ч	Удельная величина ущерба внезапности при полном отключении $U_{вн}$, у е /кВт при продолжительности отключения, ч			Показатель степени, α	Доля нагрузки технологической брони, σ , %	Удельный ущерб при невосполняемом дефиците энергии, U_3 , у е /кВт·ч	Удельный ущерб при последующей компенсации недоданной энергии, U_N , у е /кВт·ч
		отключения, ч						
		0,5	1,0	3,0				
Цветная металлургия								
Глиноземный завод (на базе нефелина)	0,15	10	11	12	2	10	0,35	0,10
Алюминиевый завод	0,10	0	0,05	0,35	16	5	0,35	0,02
Медеплавильный завод	0,40	0,30	0,50	1,6	20	5	0,55	0,25
Химическая промышленность								
Серный карьер и рудники	1,5	0,15	0,15	0,15	1	5	2,00	0,90
Фосфорный карьер и обогатительная фабрика	0,25	0,15	0,15	0,15	1	5	0,40	0,15
Суперфосфатный завод	0,15	0,209	0,30	0,80	3	50	0,35	0,10
Содовый завод	0,60	25,0	30,0	42,0	5	35	0,90	0,35
Завод азотно-туковых удобрений	0,10	2,1	3,0	5,0	15	10	0,35	0,01
Завод вискозного шелка	0,70						1,005	0,40
Завод вискозного штапельного волокна	0,40						0,60	0,10
Завод вискозного корда	0,40						0,60	0,20
Завод ацетатного шелка	0,90	9,7	9,7	9,7	3	10	1,50	0,15
Завод капронового волокна	0,60						1,00	0,20

Продолжение табл. П.2.1

Наименование отрасли и предприятия	Средняя величина удельного ущерба u_0 у е /кВт·ч	Удельная величина ущерба внезапности при полном отключении $u_{вн}$, у е /кВт при продолжительности отключения, ч			Показатель степени, α	Доля нагрузки технологической брони, σ , %	Удельный ущерб при невосполняемом дефиците энергии, u_3 , у е /кВт·ч	Удельный ущерб при последующей компенсации недоданной энергии, $u_к$, у е /кВт·ч
		0,5	1,0	3,0				
Завод волокна «лавсан»	0,60					1,0	0,15	
Завод волокна «натрон»	0,50					1,0	0,10	
Лакокрасочный завод	0,30	6,3	6,3	6,3	22	10	0,05	
Химфармзавод	0,30	100,0	100,0	100,0	2	60	0,50	
Электрохимкомбинат	0,20	0,3	0,5	0,5	2	50	0,45	
Производство смол и пластмасс	0,80	0,3	2,0	2,0	2	30	1,20	
Карбидный завод	0,10	0,10	0,15	0,26	2,0	30	0,60	
Нефтехимическая промышленность								
Нефтехимический комбинат по производству продуктов основного органического синтеза	1,00	4,8	12,5	27,5	2	60	2,00	0,35
Шинный завод	0,60	6,5	6,5	6,5	3	50	1,20	0,15
Завод асбестовых технических изделий	0,20	0,15	0,20	0,20	3	50	0,35	0,10
Завод резинотехнических изделий	0,60	2,0	2,0	2,0	3	50	1,20	0,10
Машиностроение и металлообработка								
Завод металлорежущего оборудования при наличии заготовительных цехов	0,20	0,6	1,7	2,2	7	27	0,35	0,10

Продолжение табл. П.2.1

Наименование отрасли и предприятия	Средняя величина удельного ущерба u_0 у е /кВт·ч	Удельная величина ущерба внезапности при полном отключении $u_{вн}$, у е /кВт при продолжительности отключения, ч			Показатель степени, α	Доля нагрузки технологической брони, σ , %	Удельный ущерб при невосполняемом дефиците энергии, u_3 , у е /кВт·ч	Удельный ущерб при последующей компенсации недоданной энергии, $u_к$, у е /кВт·ч
		0,5	1,0	3,0				
То же, без заготовительных цехов	0,40	0,60	1,70	2,20	7	27	0,80	0,20
Завод турбостроения	0,25	2,50	5,30	15,0	6	30	0,40	0,10
Завод подъемно-транспортного оборудования	0,6						1,00	0,20
Завод котлостроения	0,4	2,5	5,3	15,0	6	30	0,70	0,15
Завод химического оборудования	0,80						1,40	0,25
Завод по производству оборудования для цементной промышленности	0,40	0,7	1,5	1,5	3	35	0,70	0,15
Завод автогрейдеров	0,50						0,80	0,15
Завод экскаваторов	1,20						2,00	0,40
Комбайновый завод	0,80	1,7	1,7	1,7	1	35	1,50	0,15
Завод сельскохозяйственного машиностроения	0,60						0,90	0,20
Тракторный завод	3,00						6,0	0,45
Завод дизельных тракторов	0,35	1,7	1,7	1,7	1	35	0,65	0,10
Завод тракторных двигателей	0,90						1,70	0,15
Завод топливных насосов	0,40	1,0	1,0	1,0	5	5	0,70	0,20

Продолжение табл П 2 1

Наименование отрасли и предприятия	Средняя величина удельного ущерба u_0 , у е /кВт ч	Удельная величина ущерба внезапности при полном отключении $u_{вн}$, у е /кВт при продолжительности отключения, ч			Показатель степени, α	Доля нагрузки технологической брони, σ , %	Удельный ущерб при невосполняемом дефиците энергии, u_3 , у е /кВт ч	Удельный ущерб при последующей компенсации недоданной энергии, $u_л$, у е /кВт ч
		0,5	1,0	3,0				
Завод кузнечно-прессового оборудования	0,80	1,7	1,7	1,7	1	35	1,30	0,35
Электрокабельный завод	0,20	1,5	1,5	1,5	4	35	0,50	0,1-
Станкоинструментальный завод	0,70	0,7	0,7	0,7	2	35	1,30	0,20
Завод текстильного машиностроения	0,50	0,7	1,5	1,5	3	35	0,90	0,20
Завод продовольственного машиностроения	0,70	0,7	0,7	0,7	2	35	1,10	0,25
Завод крупного электромашиностроения	0,20	2,2	2,6	4,4	6	30	0,35	0,05
То же, среднего	0,30	1,0	1,0	1,0	7	30	0,50	0,10
То же, малого	0,40	0,8	1,6	3,8	7	30	0,70	0,10
Приборостроительный завод	1,20	1,5	2,0	3,0	7	30	2,20	0,30
Завод роликоподшипников	0,20						0,35	0,05
Завод шарикоподшипников	0,30	8,8	0,8	0,8	3	35	0,50	0,1
Инструментальные заводы	0,45	0,4	0,5	1,4	2	35	0,75	0,15
Завод крановых и тяговых двигателей	0,90	0,6	1,	2,2	3	0,40	1,40	0,15
Завод малолитражных автомобилей	0,20	0,80	1,5	3,0	5	30	0,60	0,10
Автобусный завод	0,20	1,0	2,0	3,0	3	35	0,60	0,10

Продолжение табл П 2 1

Наименование отрасли и предприятия	Средняя величина удельного ущерба u_0 , у е /кВт ч	Удельная величина ущерба внезапности при полном отключении $u_{вн}$, у е /кВт при продолжительности отключения, ч			Показатель степени, α	Доля нагрузки технологической брони, σ , %	Удельный ущерб при невосполняемом дефиците энергии, u_3 , у е /кВт ч	Удельный ущерб при последующей компенсации недоданной энергии, $u_л$, у е /кВт ч
		0,5	1,0	3,0				
Карбюраторный завод	0,30	0,4	0,4	0,4	2	35	0,75	0,15
Часовой завод	0,50	2,0	2,0	2,0	7	30	0,80	0,30
Судостроительный завод	0,40	-	-	-	-	5	0,60	0,20
Электромеханический завод	0,20	0,5	0,5	0,5	3	30	0,60	0,15
Завод металлоконструкций	0,40	0,25	0,25	0,25	3	30	0,70	0,15
Деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность								
Деревообрабатывающие предприятия	0,80	0,15	0,15	0,15	1	5	1,50	0,30
Целлюлозно-бумажный комбинат	0,10						0,35	0,05
Сульфат-целлюлозно-картонный комбинат	0,10	0,3	0,4	3,2	3	40	0,35	0,05
Промышленность строительных материалов								
Цементный завод (мокрый способ производства)	0,15						0,35	0,04
То же, сухой способ	0,40	0,2	1,0	1,0	2	46	0,40	0,10
Дробильно-сортировочное обогатительное предприятие	0,50	0,10	0,10	0,10	1	5	0,80	0,30
Гравийно-сортировочное обогатительное предприятие	0,50						0,80	0,25
Завод по обогащению песка	0,20						0,30	0,15

Продолжение табл П21

Наименование отрасли и предприятия	Средняя величина удельного ущерба U_0 , у е /кВт ч	Удельная величина ущерба внезапности при полном отключении $U_{вн}$, у е /кВт при продолжительности отключения, ч			Показатель степени, α	Доля нагрузки технологической брони, σ , %	Удельный ущерб при невосполняемом дефиците энергии, U_3 , у е /кВт ч	Удельный ущерб при последующей компенсации недоданной энергии, U_n , у е /кВт ч
		0,5	1,0	3,0				
		Шиферный завод	0,40	2,0				
Завод мягких кровельных материалов	0,40	10,0	10,0	10,0	3	40	0,70	0,10
Завод крупнопанельного домостроения	0,70	0,6	0,6	0,6	20	5	1,10	0,40
Завод сборного железобетона	0,70						1,10	0,40
Завод крупных бетонных блоков на легких бетонах	0,40	0,6	0,7	0,8	20	5	0,60	0,20
Завод силикатных крупноразмерных деталей из гладкой и ячеистой массы	0,40						0,60	0,35
Завод силикатных изделий из плотных ячеистых масс	0,40	0,2	0,25	0,40	3	5	0,50	0,20
Бетонный завод	1,60						3,0	0,10
Керамико-плиточный завод	0,40						0,80	0,15
Легкая промышленность								
Хлопкозавод	3,0	-	-	-	-	5	7,30	0,30
Хлопчатобумажный комбинат	0,50	6,0	6,0	6,0	5	30	0,70	0,35
Камвольно-суконный комбинат	1,50						2,80	0,20
Комбинат шелковых тканей из штапельного волокна	0,25	4,0	4,1	4,3	7	30	0,40	0,10
Ситценабивная фабрика	0,90	8,0	10,0	20,0	7	30	1,20	0,70
Чулочно-носочная фабрика	2,00	0,1	0,1	0,1	1	5	4,80	0,65

Окончание табл П21

Наименование отрасли и предприятия	Средняя величина удельного ущерба U_0 , у е /кВт ч	Удельная величина ущерба внезапности при полном отключении $U_{вн}$, у е /кВт при продолжительности отключения, ч			Показатель степени, α	Доля нагрузки технологической брони, σ , %	Удельный ущерб при невосполняемом дефиците энергии, U_3 , у е /кВт ч	Удельный ущерб при последующей компенсации недоданной энергии, U_n , у е /кВт ч
		0,5	1,0	3,0				
		Фабрика бельевого трикотажа	2,20					
Фабрика верхнего трикотажа	5,00	0,1	0,1	0,1	1	5	10,0	0,65
Швейная фабрика	4,00						7,60	0,60
Кожевенный комбинат	0,70	0,4	0,4	0,4	5	5	1,20	0,10
Обувная фабрика	1,50	1,60	2,1	2,1	7	5	2,80	0,35
Пищевая промышленность								
Мелькомбинат	1,20	0,8	0,8	0,8	4	5	2,50	0,15
Хлебозавод	0,8	15,8	22,0	29,0	2	30	2,0	0,30
Завод овощных и фруктовых консервов	1,80	0,2	10,0	18,5	5	30	3,20	0,50
Прочие предприятия пищевой промышленности	1,00	2,5	6,0	9,0	5	30	3,00	0,70
Прочие отрасли промышленности	0,8	-	-	-	-	10	1,50	0,20
Строительство, транспорт	1,00	0	0	0	0	10	1,50	0,80
Электрифицируемая железная дорога**	0,40	-	-	-	-	-	0,60	0,20
Газопроводы**	0,30	0	0	0	0	0	0,50	0,15
Коммунально-бытовой сектор	1,50	0	0	0	0	0	2,20	0,80
Сельское хозяйство	1,50	-	-	-	-	-	2,20	0,80

*) Оценка ущерба приведена в условных единицах, равных приблизительно доллару США

**) Без учета простоя или снижения производительности на смежных участках

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, АКСИМОМЫ И ТЕОРЕМЫ
ИЗ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ,
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

Событие — всякий факт, который в результате опыта может произойти или не произойти.

Если в результате опыта непременно должно появиться хотя бы одно из нескольких данных событий, то эти события образуют *полную группу событий*.

Суммой нескольких событий $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ называется событие B , состоящее в появлении хотя бы одного из этих событий:

$$B = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n. \quad (\text{П.1})$$

Произведением нескольких событий $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ называется событие C , состоящее в совместном появлении всех событий:

$$C = A_1, A_2, A_3, \dots, A_n. \quad (\text{П.2})$$

Каждому случаю события A поставлено в соответствие неотрицательное число $P(A)$, называемое его *вероятностью*.

Вероятность события представляет собой численную меру степени объективной возможности (частоты) появления этого события.

За единицу измерения принимают вероятность достоверного события. Все другие события — возможные, но не достоверные — будут характеризоваться вероятностями, меньшими единицы, составляющими какую-либо долю единицы.

Вероятность события A , вычисленная при условии, что имело место другое событие B , называется *условной вероятностью* события A и обозначается как

$$P_{\text{усл}}(A) = P(A/B) = P_B(A). \quad (\text{П.3})$$

Теорема сложения вероятностей: для произвольных событий A и B вероятность суммы этих событий выражается формулой

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(A \cdot B). \quad (\text{П.4})$$

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

$$P(A \cdot B) = P(A) P(B/A) = P(B) P(A/B). \quad (\text{П.5})$$

Из этой теоремы вытекают два следствия:

– если событие A не зависит от события B , то событие B не зависит от события A ;

– вероятность произведения двух независимых событий равна произведению вероятностей этих событий.

Формула полной вероятности: если событие B может осуществляться с одним из n несовместимых событий A_1, A_2, \dots, A_n , образующих полную группу и обычно называемых гипотезами, то полная вероятность события B определяется формулой

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(A_i) P(B/A_i). \quad (\text{П.6})$$

Формула Бернулли: если произошло последовательно n независимых опытов, в каждом из которых событие A может произойти с одной и той же вероятностью q , то вероятность того, что событие A произойдет ровно m раз, определяется по формуле Бернулли или по биномиальному распределению

$$P_n(m) = C_n^m q^m (1-q)^{n-m}, \quad (\text{П.7})$$

где

$$C_n^m = n! / m!(n-m)! \quad (\text{П.8})$$

Случайной величиной X называется величина, которая в результате опыта может принять то или иное значение, причем неизвестно заранее, какое именно.

Дискретная случайная величина — величина, принимающая только отделенные друг от друга значения, которые можно заранее перечислить.

Непрерывная случайная величина — величина, возможные значения которой непрерывно заполняют некоторый промежуток.

Если дискретная случайная величина X примет значения $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ с заданными вероятностями $P_1, P_2, P_3, \dots, P_m$, то соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями, называется *законом распределения*.

Непрерывная случайная величина имеет бесчисленное множество возможных значений, сплошь заполняющих некоторый промежуток. А так как сумма вероятностей отдельных значений случайной величины равна единице, то вероятность каждого значения должна стремиться к нулю. Поэтому вводится другая количествен-

ная характеристика – функция распределения, показывающая вероятность события $X = x$, как закон распределения, а вероятность события $X < x$, где x – некоторая текущая переменная:

$$F(x) = P(X < x). \quad (\text{П.9})$$

Функция $F(x)$ существует как для дискретных, так и непрерывных случайных величин. Ее свойства:

$$F(x_2) \geq F(x_1) \quad \text{при } x_2 > x_1; \quad (\text{П.10})$$

$$F(x) \rightarrow 0 \quad \text{при } x \rightarrow -\infty; \quad (\text{П.11})$$

$$F(x) \rightarrow 1 \quad \text{при } x \rightarrow +\infty; \quad (\text{П.12})$$

$$P(a < x < b) = F(b) - F(a). \quad (\text{П.13})$$

Плотность распределения

$$f(x) = dF(x)/dx. \quad (\text{П.14})$$

Элемент вероятности dP – вероятность того, что случайная величина X попадает на интервал dx около значения x :

$$dP = f(x)dx. \quad (\text{П.15})$$

Наибольшее применение в практических задачах надежности находят показательные (экспоненциальные) и нормальные теоретические функции распределения для непрерывных случайных величин и закон Пуассона для дискретных случайных величин.

Показательное (экспоненциальное) распределение имеет следующий вид:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} & \text{при } x \geq 0, \lambda > 0; \\ 0 & \text{при } x < 0, \end{cases} \quad (\text{П.16})$$

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

Нормальное распределение

$$\left. \begin{aligned} F(x) &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-(t-a)^2/2\sigma^2} dt, \\ f(x) &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-a)^2/2\sigma^2}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П.17})$$

Значение функций (П.17) при $a = 0$ и $\sigma = 1$ приведены в таблицах П.3.1 и П.3.2.

Закон Пуассона позволяет определить вероятность того, что случайная величина, значениями которой могут быть только целые неотрицательные числа, примет определенное значение:

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}. \quad (\text{П.18})$$

Математическое ожидание (среднее значение) случайной величины X , принимающей дискретные значения $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, с вероятностями $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ определяется как

$$M[X] = \bar{X} = \sum_{i=1}^n P_i x_i. \quad (\text{П.19})$$

Для непрерывной случайной величины математическое ожидание определяется как

$$\bar{X} = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx. \quad (\text{П.20})$$

Так, имеем:

для экспоненциального распределения

$$\bar{X} = \int_0^{\infty} x \lambda e^{-\lambda x} dx = \frac{1}{\lambda}; \quad (\text{П.21})$$

для нормального

$$\bar{X} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x e^{-(x-a)^2/2\sigma^2} dx = a; \quad (\text{П.22})$$

для закона Пуассона

$$\bar{X} = a. \quad (\text{П.23})$$

Основные свойства математического ожидания:

- математическое ожидание постоянной C равно этой же постоянной

$$M[C] = C; \quad (\text{П.24})$$

- постоянный множитель выносится за знак математического ожидания

$$M[CX] = CM[X]; \quad (\text{П.25})$$

- математическое ожидание суммы любых случайных величин (как угодно связанных) равно сумме их математических ожиданий

$$M[X + Y] = M[X] + M[Y]; \quad (\text{П.26})$$

- математическое ожидание произведения независимых случайных величин равно произведению их математических ожиданий

$$M[XY] = M[X]M[Y]. \quad (\text{П.27})$$

Дисперсия определяется как математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины от ее математического ожидания

$$D[X] = D_x = M[(X - \bar{X})^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{X})^2 f(x) dx. \quad (\text{П.28})$$

Дисперсия:

- экспоненциального распределения

$$D_x = 1/\lambda^2; \quad (\text{П.29})$$

- нормального распределения

$$D_x = \sigma^2; \quad (\text{П.30})$$

- закона Пуассона

$$D_x = a. \quad (\text{П.31})$$

Основные свойства дисперсии:

- дисперсия постоянной C равна нулю

$$D_C = 0; \quad (\text{П.32})$$

- постоянный множитель выходит за знак дисперсии в квадрате

$$D[CX] = C^2 D[X]; \quad (\text{П.33})$$

- дисперсия суммы попарно независимых случайных величин равна сумме дисперсии слагаемых:

$$D\left[\sum_{k=1}^m X_k\right] = \sum_{k=1}^m D[X_k]. \quad (\text{П.34})$$

Среднеквадратичное отклонение случайной величины определяется как

$$\sigma = \sqrt{D_x}. \quad (\text{П.35})$$

Если произведена серия из n независимых опытов, в каждом из которых могло появиться или не появиться некоторое событие A , то отношение числа опытов m , в которых появилось событие A , к общему числу произведенных опытов называется *частотой события A* или *статистической вероятностью события A* :

$$\hat{P}(A) = m/n. \quad (\text{П.36})$$

Оценку математического ожидания, удовлетворяющего условию состоятельности и несмещенности, можно произвести по формуле

$$\hat{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (\text{П.37})$$

Дисперсия, удовлетворяющая этим же условиям, оценивается по формуле

$$\hat{D}_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2. \quad (\text{П.38})$$

Центральная предельная теорема позволяет определить закон распределения случайной величины, которая может быть представлена как сумма других величин. Согласно этой теореме, если исследуемая случайная величина может быть представлена в виде суммы достаточно большого числа независимых или слабо независимых (или слабо зависимых) элементарных слагаемых, каждое из которых в отдельности сравнительно мало влияет на сумму, то закон распределения этой случайной величины приближается к нормальному при увеличении числа слагаемых.

Практически центральной предельной теоремой можно пользоваться и тогда, когда имеет место сумма сравнительно небольшого числа случайных величин. Опыт показывает, что когда число слагаемых порядка десяти (а часто и меньше), закон распределения суммы обычно может быть заменен нормальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руденко Ю.Н. Ушаков И.А. Надежность систем энергетики – 2-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Наука, 1989. – 328 с.
2. Биллингтон Р. Алан Р. Оценка надежности электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
3. Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах: Пер. с англ. / Под ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 336 с.
4. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1984. – 256 с.
5. Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике: Учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
6. Фокин Ю.А. Надежность и эффективность сетей электрических систем. – М.: Высшая школа, 1989. – 151 с.
7. Трубицын В.И. Надежность электростанций: Учеб. пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 240 с.
8. Кадомская К.П. Основы математической теории надежности и ее приложения к задачам электроэнергетики: Учеб. пособие / Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 1995. – 68 с.
9. Ноздренко Г.В., Томилов В.Г., Зыков В.В., Пугач Ю.М. Надежность ТЭС: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 63 с.
10. Папков Б.В. Надежность и эффективность электроснабжения / Учеб. пособие. – Н. Новгород, 1996. – 212 с.
11. Шалин А.И. Надежность релейной защиты энергосистем: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 177 с.
12. Надежность автоматизированных систем управления: Учеб. пособие для вузов / И.О. Атовмян, А.С. Вайрадян, Ю.П. Руднев, Ю.Н. Федосеев, Я.А. Хетагуров / Под ред. Я.А. Хетагурова. – М.: Высшая школа, 1979. – 187 с.
13. Глазунов Л.П., Грабовецкий В.П., Щербаков О.В. Основы теории надежности автоматических систем управления: Учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
14. Рябинин И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. – 2-е изд. – Л.: Судостроение, 1971. – 456 с.
15. Эдельман В.И. Надежность технических систем: экономическая оценка. – М.: Экономика, 1988. – 151 с.

16. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др. / Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
17. Надежность систем энергетики и их оборудования: Справочник. В 4-х т. / Под ред. Ю.Н. Руденко. Т. 2. Надежность электроэнергетических систем. Справочник / Под ред. М.Н. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 568 с.
18. Арзамасцев Д.А., Казанцев В.Н. Надежность энергосистем: Учеб. пособие. – Свердловск: Изд-во УПИ им. С.М. Кирова, 1982. – 76 с.
19. Розанов М.Н. Управление надежностью электроэнергетических систем. – Новосибирск: Наука, 1991. – 208 с.
20. Гнеденко Д.А., Беляев Ю.К., Соловьёв А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965.
21. ГОСТ 27.001-95. Система стандартов «Надежность в технике». Основные положения. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Минск, 1996.
22. ГОСТ 27.002-83. Надежность в технике. Термины и определения. Гос. ком. СССР по стандартам. – М., 1983.
23. ГОСТ 18322-78. [СТ СЭВ 5151-85]. Система технического обслуживания и ремонт техники. Термины и определения. Гос. ком. СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – М., 1991.
24. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. Гос. ком. СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – М., 1991.
25. Надежность систем энергетики. Терминология. – Вып. 95. – М.: Наука, 1980.
26. Руденко Ю.Н., Ушаков И.А. К вопросу оценки живучести сложных систем энергетики. – Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. – 1979. – № 1.
27. Фокин Ю.А., Файницкий О.В., Алиев Р.С.-О., Туманин А.Б. Структуризация понятия «Надежность электроэнергетических систем» // Электричество. – 1998. – № 1. – С. 2-9.
28. Сидельников Ю.В. Теория и организация экспертного прогнозирования. – М., 1990.
29. Дрейтер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Кн. 1,2. – М.: Статистика, 1986.
30. Шор Я.Б. Кузьмин Ф.И. Таблицы для анализа и контроля надежности. – М., Наука, 1998.
31. Константинов Б.А., Лосев Э.А. Логико-аналитический метод. Расчет надежности восстанавливаемых систем электроснабжения // Электричество. – 1971. – № 12. – С. 37-43.
32. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. Официальное издание. – М., 1994.
33. Китушин В.Г., Христов И.В., Червонный Е. М. Анализ методов определения ущерба при нарушениях электроснабжения потребителей // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – Вып. 18. – Иркутск, 1980. – С. 9-21.
34. Михайлов В.В., Эдельман В.И. Определение ущерба промышленных предприятий от перерывов электроснабжения. – М.: СОСИНТИ, 1968.
35. Чокан М.Ч., Лайтер Э.Э. Методические пути количественной оценки ущерба у потребителей от внезапных нарушениях электроснабжения // Проблемы

общей и единой энергетической системы. – Вып. 10. – Алма-Ата: Наука, 1976. – С. 5-13.

36. Головкин П.И. Режимы электроснабжения потребителей. – М.: Энергия, 1971. – 112 с.

37. Китушин В.Г. Ущерб при перерывах электроснабжения и его оценка // Проектирование и эксплуатация энергетических систем и электрических сетей: Труды ин-та «Энергосетьпроект». – Вып. 16. – М.: Энергия, 1979. – С. 18-25.

38. Беленький А.И., Ермолаева М.Э., Китушин В.Г. Методика оценки ущерба от нарушения электроснабжения // Изв. вузов. Энергетика. – 1990. – № 8. – С. 9-14.

39. Китушин В.Г. Ущерб коммунально-бытовых потребителей при нарушении электроснабжения // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – Вып. 18. – Иркутск. – 1980. – С. 22-31.

40. Мерпорт Э.И., Орнов В.Г. Некоторые вопросы экспериментального и расчетного определения регулирующего эффекта нагрузки по частоте и напряжению // Электрические станции. – 1969. – № 1. – С. 27-34.

41. Лесных В.В. Анализ риска и механизмов возмещения от аварий на объектах энергетики. – Новосибирск: Наука, 1999. – 251 с.

42. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – Красноярск, 1998. – 656 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
Введение.....	8
Г л а в а 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ.....	13
§ 1.1. Понятия системного подхода.....	14
§ 1.2. Процессы в объектах.....	20
§ 1.3. Надежность как комплексное свойство.....	32
Контрольные вопросы к главе 1.....	40
Г л а в а 2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ.....	42
§ 2.1. Безотказность.....	43
§ 2.2. Восстанавливаемость.....	54
§ 2.3. Комплексные показатели.....	58
Контрольные вопросы к главе 2.....	78
Г л а в а 3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ.....	79
§ 3.1. Общая характеристика методов.....	79
§ 3.2. Экспериментальные методы.....	82
§ 3.3. Расчетные методы.....	104
Контрольные вопросы к главе 3.....	165
Г л а в а 4. КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ НАДЕЖНОСТИ.....	167
§ 4.1. Экономический подход.....	168
§ 4.2. Нормативный подход.....	199
Контрольные вопросы к главе 4.....	205

Глава 5 ЗАДАЧИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ.....	207
§ 5.1. Средства обеспечения надежности	209
§ 5.2. Параметрическая декомпозиция задачи.....	213
§ 5.3. Субъектная декомпозиция задачи.....	214
§ 5.4. Структуризация задачи надежности в электроэнергетике.....	217
Контрольные вопросы к главе 5.....	222
Заключение	223
Приложение 1.....	224
Приложение 2.....	234
Приложение 3.....	242
Приложение 4.....	244
Список литературы.....	250

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Викентий Георгиевич Китушин

НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Часть 1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Учебное пособие

Редактор *И. Л. Кескевич*
Художник-дизайнер *А. В. Волошина*
Корректор *Л. Н. Ветчакова*
Компьютерная верстка *С. Н. Кондратенко*

Лицензия ИД № 04303 от 20.03.01.
Подписано в печать 14.04.03.
Формат 60 × 90 1/16. Бумага офсетная.
Уч.-изд. л. 14,5 Печ. л. 16.
Тираж 3000 экз. (1-й завод 1 – 500 экз.). Заказ № 710.

Издательство Новосибирского государственного
технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
Тел (383-2) 46-31-87
E = mail: root@publish.nstu.ru

Отпечатано в сибирском полиграфическом предприятии «Наука»
630077, г. Новосибирск, ул. Станиславского, 25