

2. НАДЕЖНОСТЬ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

2.1. Проблемы надежности сетей следующего поколения - NGN

Общие подходы к построению мультисервисных сетей связи нашли отражение в концепции перспективных сетей связи следующего поколения - NGN. Поэтому рассмотрим концепцию надежности сетей связи в период перехода к NGN

Обеспечение надежности требует принятия специальных и целенаправленных мер, проведения соответствующих исследований, испытаний, расчетов и т. п., согласны уже далеко не все. К сожалению, в последнее время мнение об отсутствии необходимости всего этого стало достаточно распространенным.

Правда, в нем неоднократно говорится об обеспечении устойчивости функционирования единой сети электросвязи, но что Для понимания понятие устойчивости функционирования сети рассмотреть его эволюцию.

В течение многих лет под устойчивостью понималась совокупность трех свойств: надежности, живучести и помехоустойчивости.

Авторы монографии [1] указывали, что применение интегральной категории устойчивости не предполагает ликвидации составляющих ее понятий. При этом "надежность отражает влияние на работоспособность системы главным образом внутрисистемного фактора – случайных отказов техники... Живучесть же характеризует устойчивость системы связи против действия причин, лежащих вне системы и приводящих к разрушениям или значительным повреждениям некоторой части ее элементов". Подчеркивалось, что "надежность и живучесть – существенно различные понятия и самостоятельные проблемы, требующие своих решений при разработке и совершенствовании систем и сетей связи".

Существует еще одно определение устойчивости:

"Устойчивость – способность сети сохранять работоспособное состояние во времени и в условиях, создаваемых воздействиями внешних и внутренних ДФ" (ДФ – дестабилизирующий фактор). При этом поясняется, что "устойчивость характеризуется свойствами надежности и живучести". Указывается, что "свойство надежности должно обеспечивать функционирование сети связи и ее элементов в условиях действия внутренних непреднамеренных (случайных) ДФ", а "живучесть – свойство сети сохранять способность выполнять требуемые функции в условиях, создаваемых воздействием внешних ДФ".

Еще одно определение устойчивости: "Устойчивость функционирования единой сети электросвязи – свойство сети связи выполнять свои функции при воздействии внешних дестабилизирующих факторов". Оно практически совпадает с приведенным выше определением живучести.

Таким образом, в настоящее время устойчивость сети связи свелась фактически только к одному свойству живучести и перестала включать в себя надежность!

Пренебрежение вопросами надежности нередко обосновывается тем, что современные средства связи являются весьма надежными, а сети связи – разветвленными и допускающими обходы, поэтому отказы возникают очень редко, а если и возникают, то их последствия незначительны. С этим частично можно согласиться (только частично, ибо так обстоит дело далеко не везде и не всегда), однако каждый этап развития техники, давая ответы на одни вопросы, в то же время порождает новые. Это в полной мере относится и к обеспечению надежности сетей связи.

Почему сейчас вопросам надежности надо уделять серьезное внимание? Во-первых, рост требований к качеству со стороны пользователей, обусловленный активным проникновением телекоммуникаций во все сферы жизни, и обострение конкуренции, вызванное либерализацией рынка, заставляют операторов все больше заботиться о качестве обслуживания

(Quality of Service, QoS). Соглашения об уровне обслуживания (Service Level Agreement, SLA), заключаемые как с конечными пользователями, так и между операторами, становятся важным атрибутом взаимоотношений на современном рынке. А надежность является одним из важнейших факторов, влияющих на QoS, в силу чего требования к надежности (чаще всего к готовности) включаются практически во все SLA. При этом за "сверхнормативные" простои в SLA, как правило, предусматриваются штрафные санкции.

Негативные последствия отказов не ограничиваются прямыми финансовыми потерями, обусловленными уменьшением доходов от предоставления услуг из-за простоев, и штрафными санкциями в случаях нарушения SLA. Нельзя забывать и о потерях, связанных с недовольством клиентов и ухудшением имиджа компании, которые обусловлены:

- оттоком недовольных клиентов к конкурентам;
- снижением привлекательности оператора в глазах потенциальных клиентов;
- снижением привлекательности компании в глазах существующих и потенциальных партнеров, акционеров и инвесторов.

Во-вторых, в настоящее время происходят радикальные перемены в технологиях связи. На смену коммутации каналов приходит коммутация пакетов, активно внедряются новые технологии транспорта и доступа, применяются новые протоколы. Такое обновление, тем более идущее быстрыми темпами, всегда чревато потерями, в том числе и в надежности. Это обусловлено тем, что, с одной стороны, на сетях связи начинают использоваться недостаточно апробированные, сырые продукты и решения, а с другой, – эксплуатационный персонал компаний-операторов оказывается не подготовленным к их обслуживанию. В этой связи стоит еще раз обратить внимание на необходимость проведения тщательных и всесторонних испытаний нового оборудования, обучения специалистов его обслуживанию

и вообще новым технологиям совершенствования эксплуатационных процессов.

Подобная ситуация уже имела место в прошлом. В конце 80-х – начале 90-х годов прошлого века в период активного внедрения ВОЛС, ОКС-7 и других новшеств на сетях связи США произошло несколько крупных аварий, вызвавших значительный общественный резонанс. Это заставило обратить на вопросы обеспечения надежности самое серьезное внимание. В частности, в 1991 г. был создан Совет по сетевой надежности (Network Reliability Council).

Помимо общих задач обеспечения надежности, обусловленных всяким техническим перевооружением, свои специфические проблемы выдвигает идущий в настоящее время активный переход к построению сетей связи в соответствии с принципами NGN.

В-третьих, чтобы шагать в ногу со временем, оператору недостаточно закупить современное оборудование и ПО, начать предоставлять новые услуги. Нуждаются в обновлении и бизнес-процессы. Работы по реорганизации и совершенствованию бизнес-процессов ведутся сейчас в целом ряде операторских компаний. При этом, как уже отмечалось, важно не упускать из виду эксплуатационные процессы, в частности, обеспечения надежности.

Проблемы надежности NGN. Одной из проблемных областей при переходе к NGN является надежность. К сожалению, это обстоятельство понимается далеко не всеми руководителями и специалистами. Бытует мнение, что обеспечение надежности в NGN принципиально не отличается от решения этой задачи в традиционных сетях связи. Более того, порой даже встречаются высказывания о бесспорном преимуществе NGN перед традиционными сетями с точки зрения надежности. В действительности, ситуация с обеспечением надежности в условиях перехода к NGN является гораздо более сложной.

Помимо указанных выше общих задач обеспечения надежности, обусловленных всяким техническим перевооружением, свои специфические

проблемы возникают в связи с некоторыми особенностями NGN, которые могут приводить к снижению надежности. При этом целесообразно выделить две составляющие: надежность коммутационного оборудования и надежность инфраструктуры IP. Более подробно они будут рассмотрены ниже.

В целом можно отметить, что инженерия надежности в NGN отличается от применяемой в сетях коммутации каналов, поэтому эта область требует проведения соответствующих исследований. В ряде развитых стран эти вопросы решаются на правительственном уровне. В частности, обеспечением надежности, устойчивости и безопасности будущих сетей серьезно обеспокоена Европейская комиссия. По ее заказу Alcatel-Lucent Bell Labs провела специальное исследование, по результатам которого был подготовлен отчет, озаглавленный "Готовность и устойчивость инфраструктур электронных коммуникаций".

Надежность коммутационного оборудования NGN. Для традиционных узлов с коммутацией каналов основной нормируемой составляющей надежности является готовность, требование к которой задавалось в виде "не более 2ч простоя за 20 лет службы", что соответствует значению коэффициента готовности "пять девяток", т.е. 0,99999.

При переходе к NGN место традиционного узла коммутации занимает гибкий коммутатор (Softswitch). Возникает комплекс из большого числа отдельных устройств (контроллеров, шлюзов, серверов). Все они имеют высокую надежность: значение коэффициента готовности каждого из них, как обычно заявляют производители, составляет все те же "пять девяток". Однако для выполнения функций узла коммутации необходима совместная работа нескольких таких устройств, поэтому результирующая надежность будет равняться произведению их коэффициентов готовности, т.е. в итоге оказывается более низкой.

Еще более важным фактором, негативно влияющим на надежность NGN, является централизация управления процессами обслуживания

вызовов. Ключевым элементом структуры становится контроллер шлюзов или сервер вызовов (Softswitch в узком понимании этого термина). При этом один такой контроллер или сервер управляет многими шлюзами, поэтому его отказ может привести к прекращению работы сети на большой территории. Подобная ситуация негативно влияет не только на надежность, но и на живучесть сети. На это обстоятельство и связанные с этим риски уже обращали внимание в своих публикациях руководители Управления связи Федерального агентства связи.

Неслучайно ведущие производители оборудования NGN предусматривают возможность резервирования контроллеров шлюзов, в том числе с географическим разнесением. Некоторые операторы связи учитывают необходимость подобного резервирования при проектировании своих сетей. К сожалению, часто из соображений экономии это не делается. Это противоречит одному из основных принципов построения отказоустойчивых систем, каковыми и должны быть современные сети связи, – отсутствию в структуре "единой точки отказа".

Все указанные обстоятельства требуют изучения, для компенсации указанных негативных факторов должны разрабатываться и применяться соответствующие схемы и методы резервирования. При этом они должны реализовываться как на аппаратурном, так и на сетевом уровне.

Надежность сетей IP. Характерной тенденцией NGN является широкомасштабное использование сетей на основе протокола IP. Методы оценки и обеспечения надежности таких сетей разработаны пока недостаточно. Работа в этом направлении ведется в ряде зарубежных стран. В частности, в Финляндии разрабатывается исследовательский проект IPLU (это сокращение от его полного названия "Методы оценки надежности сетей IP"). В рамках этого проекта в мае 2006 г. был проведен международный семинар, который отметил актуальность этой тематики, подвел итоги проведенных исследований, наметил направления дальнейшей работы.

Достоинством сетей IP является возможность предоставлять множество альтернативных путей передачи информации. Именно по этой причине и делается вывод о преимуществе решений NGN с точки зрения надежности. Распространено даже мнение, что разработчики Интернета и лежащих в его основе протоколов ставили своей целью создание сети, способной обеспечить связь в условиях выхода из строя некоторых сетевых элементов, в том числе в условиях военных действий.

Однако для реализации указанного преимущества необходимо иметь достаточно разветвленную физическую инфраструктуру. Только в этом случае различные маршруты будут разделены не только логически, но и физически. Иначе они могут проходить, например, в общем кабеле, обрыв которого приведет к неработоспособности всех проходящих по нему путей. Такая ситуация нередко встречается на практике.

Кроме того, время перехода на новые пути передачи информации в сетях IP слишком велико для трафика реального времени, и если не принять дополнительных мер защиты, такое переключение приведет к разрывам соединений. Поэтому механизмы быстрого восстановления часто реализуются на физическом уровне. А здесь наблюдается переход от технологии SDH, имеющей различные стандартизованные механизмы резервирования, обеспечивающие высокую отказоустойчивость сети, к более дешевой, но не имеющей пока подобных механизмов технологии Ethernet. Это также негативно влияет на надежность сети.

Наконец, указанное выше достоинство имеет и обратную сторону. Существенной особенностью сетей IP с точки зрения надежности является то, что в них появляется новый источник отказов – сбои в работе протоколов маршрутизации. Эти протоколы имеют проблемы со стабильностью и весьма чувствительны к ошибкам конфигурации. При этом в силу особенностей работы протоколов маршрутизации подобные нарушения могут распространяться по сети лавинообразно.

На это обстоятельство также обращает внимание в своем отчете Проблемная группа по NGN Консультативного комитета по связи для национальной безопасности при Президенте США. Вообще, стоит отметить, что приложение G к этому отчету содержит детальный анализ всех угроз и уязвимостей NGN.

Рекомендация МСЭ-Т G.1000 указывает, что использование сетей и служб на основе IP выдвигает целый ряд проблем, таких как отсутствие апробированных, надежных и масштабируемых механизмов для решения целого ряда задач, в частности, быстрого и полного восстановления связности на уровне IP после серьезных простоев (или атак) в сильно загруженных сетях.

Реальным и конкретным примером, показывающим опасность перехода к инфраструктуре на основе IP, является выход из строя значительной части сети IP японского оператора NTT, имевший место 15 мая 2007 г. При этом от 2 до 4 тыс. маршрутизаторов производства Cisco прекратили работу, и их неработоспособность продолжалась около 7 ч. В результате миллионы пользователей в большей части Восточной Японии потеряли связь. Первопричиной события стало переключение на резервные маршруты, вызвавшее некорректное обновление маршрутных таблиц, что и привело к массовой неработоспособности маршрутизаторов.

Для уменьшения опасности возникновения подобных ситуаций необходимо:

- тщательное тестирование нового оборудования и ПО, в том числе при стрессовых нагрузках, с имитацией ошибок и отказов отдельных технических средств и т.п.;

- применение средств сетевого мониторинга, позволяющих быстро выявлять и локализовывать неисправности;

- наличие эксплуатационного персонала, численность и квалификация которого позволяли бы вести мониторинг сети и оперативно устранять возникающие неисправности;

- обеспечение технической поддержки со стороны производителей сетевого оборудования.

Процессы эксплуатации и совершенствования бизнес-процессов. Как показывают результаты проведенного в ЦНИИС анализа, "осложнения в организации эксплуатации сетей связи следующего поколения обусловлены в первую очередь изменением конфигурации сети и зон ответственности персонала. Сегодня неисправности на сети устраняются локально, на месте, а в распределенной сети следующего поколения это должно делаться централизованно. Пока у руководящего персонала оператора связи недостаточно опыта по организации, контролю и управлению эксплуатацией сетей NGN, а у технического персонала – опыта обслуживания нового оборудования".

В этой связи чрезвычайно полезными для операторов связи будут разработки международного Форума управления телекоммуникациями (TM Forum, TM Форум), направленные на совершенствование бизнес-процессов, построение современных OSS и т. п. В частности, одной из важнейших разработок TM Форума является эталонная модель процессов оператора связи eТОМ (enhanced Telecom Operations Map –расширенная карта процессов телекоммуникационной компании). Она принята МСЭ-Т и использована при выработке принципов организации управления NGN.

Хочется подчеркнуть, что eТОМ представляет собой не какие-то абстрактные умозрительные построения, а активно используется ведущими мировыми операторами связи и производителями и является обобщением их опыта.

К сожалению, в нашей стране применение eТОМ нередко ограничивается финансово-экономической сферой и взаимоотношениями с клиентами, поставщиками и партнерами, а внутренние эксплуатационные процессы, в том числе те, которые направлены на обеспечение надежности, зачастую остаются за рамками рассмотрения.

Под бизнес-процессами в документах ТМ Форума понимаются вообще все процессы, относящиеся к деятельности компании. Многие консультанты, оказывающие операторам связи услуги по описанию и совершенствованию бизнес-процессов на основе eTOM, не являются специалистами в области телекоммуникаций и слабо представляют принципы функционирования и эксплуатации сетей связи. Поэтому они не могут полноценно заниматься эксплуатационными процессами.

В области операционных процессов eTOM имеется целый ряд процессов, направленных на обеспечение надежности. При этом речь идет не только об обнаружении и устранении возникающих отказов, за что отвечает процесс "Управление проблемами с ресурсами" (это процесс 2-го уровня декомпозиции, входящий в вертикальную группу процессов "Обеспечение"), но и о предупреждении их возникновения. Этой цели служит процесс "Поддержка управления проблемами с ресурсами" (3-й уровень, вертикальная группа "Поддержка и готовность операционных процессов"). Он осуществляет преактивное управление выполняемыми на основании статистических данных действиями по профилактическому и плановому техническому обслуживанию и ремонту инфраструктуры ресурсов, а также охватывает мониторинг, управление и отчетность для процессов управления проблемами с ресурсами.

Краткие выводы

Итак, задачи обеспечения надежности нисколько не потеряли своей актуальности в современных телекоммуникациях. Напротив, целый ряд тенденций – рост требований к QoS и применение SLA, переход к NGN, совершенствование бизнес-процессов – настоячиво требуют уделять им самое серьезное внимание. Отказы в сетях связи влекут финансовые и прочие потери для операторов. Нельзя упускать из виду, что ряд характерных особенностей NGN могут приводить к снижению надежности. Поэтому вопросы ее обеспечения должны быть в сфере внимания руководителей и специалистов регулирующих и контролирующих органов, операторов связи,

производителей оборудования, системных интеграторов, проектных, исследовательских и образовательных организаций.

2.2. Понятия надежности сетей телекоммуникации

Надежность сети телекоммуникации есть ее свойство обеспечивать связь, сохраняя во времени значения установленных показателей качества в заданных условиях эксплуатации, она отражает влияние на работоспособность системы главным образом внутрисистемного фактора — случайных отказов техники, вызываемых физико-химическими процессами старения аппаратуры, дефектами технологии ее изготовления или ошибками обслуживающего персонала.

Случайные отказы характерны для отдельных устройств, линий или каналов телекоммуникации. При этом отказ одного аппарата на узле телекоммуникации обычно не вызывают отказов других комплектов аппаратуры, а тем более целого элемента или всего узла телекоммуникации. Исключение составляют общие коммутаторы и агрегаты электропитания. Поэтому при расчете надежности системы или сети телекоммуникации отказы ее структурных элементов, не имеющих общих устройств, считаются взаимонезависимыми.

Показатели надежности сетей телекоммуникации. Основой понятия надежности техники является понятие отказа, т.е. состояние техники когда она не может продолжать выполнение своих функций. Это понятие применимо не только к аппаратуре телекоммуникации, но и к таким комплексам, как линии телекоммуникации (кабельные, радиорелейные и др.). Через понятие отказа целесообразно оценивать надежность также и двухполюсных сетей телекоммуникации. При этом под отказом двухполюсной сети телекоммуникации понимается такое ее состояние, когда пропускная способность и качество связи между ее полюсами ниже заданного порогового значения (требования).

В тех случаях, когда двухполюсная система обеспечивает несколько видов связи (в ней имеется несколько вторичных сетей), состоянием отказа является такое, когда между полюсами не сохраняется ни одного вида связи требуемой минимальной пропускной способности и заданного ограничения по качеству.

Что же касается первичной сети двухполюсной системы телекоммуникации, то ее отказ наступает при выходе из строя всех каналов телекоммуникации или когда число работоспособных каналов становится меньше требуемого для обеспечения функционирования системы управления

Учитывая это обстоятельство, а также наличие общности понятий отказа двухполюсной сети (ДС) и аппаратуры телекоммуникации, в качестве показателей надежности ДС могут применяться показатели, для восстанавливаемого технического объекта.

$$K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_B} \quad (2.1)$$

где: K_r -коэффициент готовности, T_0 -наработка сети на отказ, T_B -среднее время восстановления сети.

Во многих случаях вместо термина «коэффициент готовности» широко используется эквивалентный ему термин «вероятность связности» ДС.

Понятие отказа в частных случаях может быть применено и к многополюсной сети (МС) телекоммуникации. Так, если МС обслуживает такую систему, которая работает только при сохранении связи обязательно со всеми полюсами, то при отказе связи хотя бы с одним из них фиксируется отказ всей сети телекоммуникации. В качестве показателей надежности такой МС целесообразно использовать те же, которые рекомендованы для двухполюсной сети телекоммуникации.

Другим примером МС, к которой применимо понятие отказа, является система телекоммуникации строго централизованной системы управления, состояниями отказа которой являются: вышел из строя узел

телекоммуникации главного пункта управления (прекратились связи со всеми остальными полюсами); отказали узлы телекоммуникации всех подчиненных пунктов управления; вышли из строя узлы телекоммуникации всех пунктов управления системы; узлы телекоммуникации в предыдущих случаях исправны, но связь отсутствует из-за отказов линий или каналов. Поскольку в подобной МС четко фиксируются два ее состояния: работает, не работает, - то ее надежность оценивается так же и теми же показателями, что и надежность двухполюсной сети.

Под надежностью многополюсной сети телекоммуникации будем понимать ее свойство, обусловленное конечной надежностью линий (каналов), узловой аппаратуры и качеством управления, определяющее ее способность выполнять предусмотренные функции в установленном объеме в заданных условиях эксплуатации. Понятие “в установленном объеме” конкретизируется при проектировании сети или в процессе ее эксплуатации. Вместе с тем требуемая доля сохраняемых связей может устанавливаться выше средней. Тогда показателем надежности такой МС является вероятность p того, что доля пар связанных полюсов ($d_{c,n}$) будет не меньше заданной d_3 , т.е.

$$H_{MC} = p(d_{c,n} \geq d_3) \quad (2.2)$$

Между тем МС в большинстве случаев бывает неоднородна как по структуре ее фрагментов, используемых на различных информационных направлениях, так и по важности ее полюсов. Поэтому оценка надежности системы с помощью указанных выше показателей без дифференциации связей между полюсами оказалась бы неопределенной. Например, как можно было бы сопоставить две МС по надежности, если доли сохраняемых связей у них одинаковы, но у одной более устойчиво работают более важные связи, а у другой - менее важные.

Для устранения этой неопределенности целесообразно связи с полюсами разбить по степени важности их (в соответствии с важностью обслуживаемых пунктов управления) на две-три группы. Удельные веса

(важности) каждой группы g_i устанавливаются экспертным путем и согласовываются с заказчиком системы. Нормирующим условием является

$$\sum_{i=1}^m g_i = 1$$

где m - число групп связей. Тогда доля сохраняемых связей (полюсов) вычисляется по каждой группе d_i , а средневзвешенная доля их по всей МС

$$D_{c.n}^0 = \sum_{i=1}^m d_i g_i \quad (2.3)$$

Кроме того, надежность МС можно характеризовать так называемой матрицей надежности, элементами которой являются показатели надежности связи на всех информационных направлениях системы. Так, если дана матрица

$$\|H_{MC}\| = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 & 0,99 & 0,9 & 0,95 & 0,999 \\ & 1 & 0,95 & 0,92 & 0,99 \\ & & 1 & 0,96 & 0,95 \\ & & & 1 & 0,98 \\ & & & & 1 \end{matrix} \end{matrix},$$

то это значит, что надежность связи между первым и вторым полюсами МС по коэффициенту готовности равна 0,99, между первым и третьим - 0,9 и т. д. Главным недостатком матричной формы оценки надежности МС является то, что по ней трудно сравнивать надежность двух МС.

Таким образом, понятие надежности МС и ее показатели, а также способы их вычисления являются более сложными, чем у двухполюсных сетей и тем более аппаратуры. Однако из этого не следует, что от них надо отказываться и не учитывать при проектировании и эксплуатации систем и сетей телекоммуникации. Это способствовало бы принятию необоснованных и неоптимальных решений.

2.3. Методы расчета показателей надежности сети телекоммуникации

2.3.1. Классификация методов расчета надежности

Множество методов расчета показателей надежности сетей телекоммуникации, делится на два самостоятельных подмножества: точных и приближенных методов. Практическое применение того или иного метода определяется постановкой задачи, степенью точности исходных вероятностей $p(z_i)$, исправности элементов и размерностью оцениваемой сети телекоммуникации. Общая схема деления методов расчета показателей надежности сетей телекоммуникации изображена на рис. 2.1.

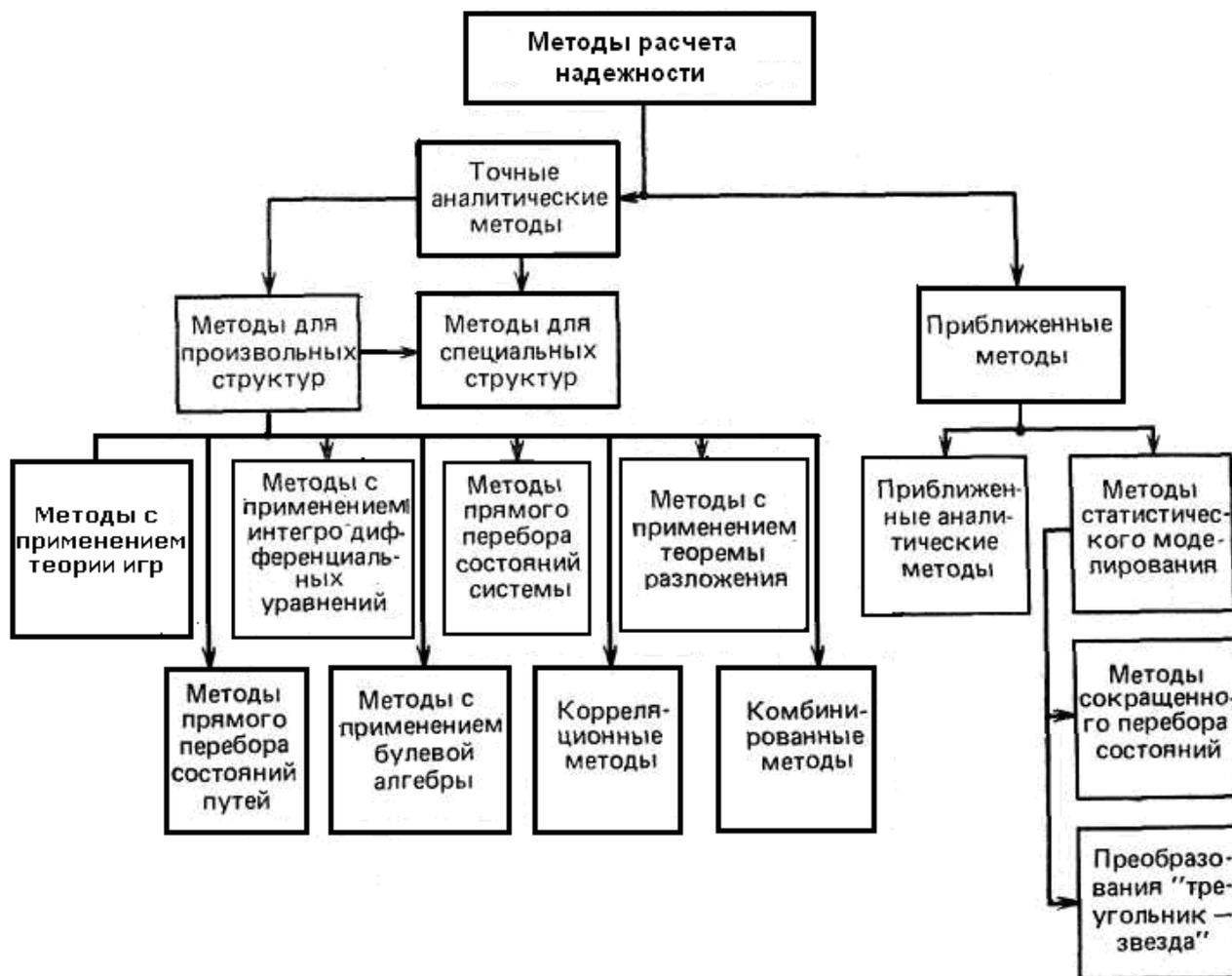


Рис. 2.1. Схема деления методов расчета надежности сетей телекоммуникации

Любой из точных методов неприемлем при достаточно большой размерности оцениваемой сети (размерность оценивается числом допустимых путей, числом элементов ДС или их суммой), поэтому зачастую оценка надежности производится приближенными методами.

Методы оценки надежности и живучести сетей телекоммуникации, в которых используются интегро-дифференциальные уравнения и теория игр, вообще не нашли практического применения прежде всего из-за их сложности.

Рассмотрим вкратце некоторые методы расчета надежности сетей телекоммуникации.

2.3.2. Методы прямого перебора состояний элементов сетей телекоммуникации

Расчет показателей надежности методами прямого перебора состояний элементов сетей телекоммуникации $G\{A, B\}$ предполагает независимость возникновения отказов ее элементов и наличие у каждого элемента двух взаимоисключающих друг друга состояний полностью исправен или полностью неисправен.

Вероятность пребывания сети телекоммуникации в состоянии, когда отказали i элементов, определяется по формуле Бернулли

$$P(N, i) = C_N^i p(\varepsilon)^{N-i} [1 - p(\varepsilon)]^i \quad (2.4)$$

Отказ какого-либо подмножества из совокупности i элементов, $i = 0, \dots, N$, сети телекоммуникации приводит к разным последствиям: в одних случаях ДС D остается связной, в других — ее связность нарушается. Для определения влияния отказа i элементов сетей телекоммуникации на состояние ДС пронумеруем возможные подмножества i отказавших элементов числами $k=1, \dots, J_i$ и введем в рассмотрение коэффициент a_k . Здесь $J_i = C_N^i$, $a_k = 0$, если при отказе k -го подмножества i элементов связность ДС нарушена, и $a_k = 1$ в противном случае. Формула (2.4) преобразуется к виду

$$P(N, i) = \sum_{k=1}^{J_i} a_k p(\Theta) \quad [1 - p(\Theta)]^{N-i} \quad (2.5)$$

Очевидно, что $P\{N, i\} \geq P'(N, i)$. Придавая i значения $0, 1, \dots, N$, вычисляя по (2.5) $P(N, i)$ и складывая их друг с другом, получаем

$$p(E) = \sum_{i=0}^N P(N, i) \quad (2.6)$$

При различных $p(\Theta_j)$, что имеет место в реальных сетях, (2.5) принимает вид

$$P(N, i) = \sum_{k=1}^{J_i} a_k \prod_{\Theta_v \notin \Theta_{отk}}^{N-i} p(\Theta_v) \prod_{\Theta_j \in \Theta_{отk}}^i [1 - p(\Theta_j)] \quad (2.7)$$

Здесь $\Theta_{отk}$ — множество отказавших элементов сетей телекоммуникации.

Пусть произвольно выбранная ДС отображается множеством путей M . Алгоритм вычисления $p(E)$ с использованием формул (2.6) и (2.5) или (2.7) имеет 2^N шагов. Существует несколько вариантов алгоритма вычисления $p(E)$ методом прямого перебора состояний. Шаг k наиболее простого алгоритма:

- формируется k -е двоичное число длиной N разрядов;
- значение «1» каждого разряда двоичного числа соответствует исправному, а «0» — неисправному состоянию элемента (двоичное число содержит $0 \leq i \leq N$ нулей и $N-i$ единиц);

- определяется значение a_{kj} для j -й ДС, $j=1, \dots, N_w$. При $a_{kj}=1$ в зависимости от условия задачи по (2.5) или (2.7) определяется $P(N, i)$ и согласно (3.6)

$$p(E_j)_k = p(E_j)_{k-1} + P(N, i)_k \quad (2.8)$$

где индекс j означает номер ДС, а k — номер шага. После этого осуществляется переход к анализу следующей ДС. При $a_{kj}=0$ переход к анализу следующей ДС осуществляется сразу.

Определение a_{kj} производится по наличию в ДС D_j хотя бы одного исправного пути. В этом случае $a_{kj}=1$. При $j=N_w$ осуществляется возврат к началу алгоритма. Алгоритм заканчивается при $k=2^N$ и $j=N_w$.

Иногда применяется модифицированный алгоритм, расширяющий область применения метода прямого перебора. Отличие его от изложенного состоит в организации перебора состояний не всех элементов МС, а для каждой ДС отдельно. При этом $p(E_j)$ вычисляются поочередно за 2^{N_j} шагов каждая, $j = \overline{1, N_w}$. Вычисление $p(E_j)$ производится в следующей последовательности:

- формируется множество путей M_j ;
- перенумеровываются элементы ДС D_j для упрощения организации перебора ее состояний (элементам ДС вместо исходных присваиваются номера $1, 2, 3, \dots, N_j$);
- формируется k -е, $k=1, \dots, 2^{N_j}$, двоичное число;
- определяется a_{kj} и по формуле типа (2.8) производится вычисление.

Достоинства модифицированного алгоритма по сравнению с первым проявляются более резко при возрастании числа элементов сети. Основную часть модуля вычисления $p(E)$ методом прямого перебора состояний элементов системы телекоммуникации составляет подпрограмма формирования двоичных чисел.

2.3.3. Методы прямого перебора состояний путей сети телекоммуникации

Вторую группу методов, в которых используется принцип прямого перебора, составляют методы перебора состояний путей ДС. Двухполюсная сеть отображается множеством путей M , и ставится задача вычисления вероятности исправности хотя бы одного из них. Если все пути ДС структурно независимы между собой, то

$$p(E) = 1 - \prod_{i=1}^h (1 - p(\ell_i)) \quad (2.9)$$

Состояния большинства путей ДС коррелированы друг с другом, поэтому (2.9) — это оценка $p(E)$ сверху. Сущность методов прямого перебора путей состоит в представлении (2.9) в виде

$$p(E) = \sum_{i=1}^{j_1} p_{\ell_i} - \sum_{i < v}^{j_2} p_{\ell_i, \ell_v} + \dots + (-1)^{h-1} p \left(\bigwedge_{i=1}^N \ell_i \right) \quad (2.10)$$

Последняя формула представляет собой вероятность суммы совместных независимых событий. Здесь $J_n = C^n h$, $n=1, \dots, h$.

Для компактной записи алгоритма вычислений преобразуем (2.10). Обозначим $I_n = \{I_{nk}\}$, где I_{nk} содержит k -ю комбинацию n путей из общего числа сочетаний из h по n , $n=1, \dots, J_n$, а $p(E^n)$ — вероятность исправности хотя бы одного подмножества I_{nk} путей, определяемая из выражения

$$p_{E_n} = \sum_{k=1}^{J_n} p_{I_{nk}}, \quad n=1, \dots, h \quad (2.11)$$

Тогда (2.10) имеет вид

$$p(E) = \sum_{n=1}^h (-1)^{n-1} p_{E^n} \quad (2.12)$$

Известны два подхода к исключению корреляции состояний путей при вычислении $p(I_{nk})$. Оба подхода обеспечивают выполнение условия, что степень любого сомножителя в слагаемых (2.12) должна быть не выше единицы. Первый подход основан на вычислении условных вероятностей исправности путей в слабых (2.12). Запишем $p_{I_{nk}} = p_{\ell_i} p_{\ell_v | \ell_i} \dots p_{\ell_i | \ell_v \dots}$. Это выражение содержит n сомножителей.

Условные вероятности

$$p_{\ell_j | \ell_i, \ell_v \dots} = \frac{p_{\ell_j}}{\prod_{\exists k \in \varepsilon} p_{\exists_k}}, \quad (2.13)$$

где ε — множество элементов ДС, общих для пути μ_j и путей μ_v, \dots , а

$$p_{\ell_j} = \prod_{\exists k \in \mu_j} p_{\exists_k} \quad (2.14)$$

При втором подходе используется свойство логического сложения Булевых переменных: $a + a + a + \dots = a$. Тогда

$$p_{I_{nk}} = \prod_{\exists i \in \delta} p_{\exists_i} \quad (2.15)$$

где δ есть объединение элементов путей $\mu_v \in I_{nk}$. Указанное свойство применяется при формировании множества δ .

Применение преобразования Булевой алгебры более экономично по сравнению с вычислением условных вероятностей. Алгоритм вычисления $p\{E\}$ методом прямого перебора состояний путей с использованием преобразования Булевой алгебры имеет 2^h шагов. Особенности алгоритма следующие. Номера разрядов двоичных чисел ДСН соответствуют номерам путей. Если v -й разряд ДСН $_k = 1$, то принято, что путь μ_v исправен.

Шаг $k, k \geq 2$. Формируется двоичное число ДСН $_k$ и определяется число n разрядов, для которых ДСН $_k = 1$. Пути μ_v составляют множество I_{nk} .

Элементы путей $\mu_v \in I_{nk}$ включаются в множество δ , и по (2.15) вычисляются $p(I_{nk})$, в соответствии с (2.11)

После выполнения 2^h шагов по (2.12) вычисляется $p(E)$.

2.3.4. Методы с применением теоремы разложения

На основе теоремы разложения построен ряд методов вычисления показателей надежности сложных систем, в том числе сетей телекоммуникации. Она читается следующим образом: функция надежности $p(E)$ системы, состоящей из N ненадежных элементов, равна произведению вероятности исправного состояния иго элемента на функцию надежности системы из $N-1$ элементов при условии, что i -й элемент замкнут накоротко, плюс произведение вероятности отказа i -го элемента на функцию надежности системы из $N-1$ элементов при условии, что i -й элемент разомкнут.

Очевидно, что к преобразованной системе из $N-1$ элементов вновь может быть применена теорема разложения, затем к системе из $N-2$ элементов и т. д. Тогда имеет место формула полной вероятности

$$p(E) = \sum_{i=0}^{N-1} P_{N-1, i} p(E') \quad (2.16)$$

В этой формуле N'' —число элементов ДС, не позволяющих производить вычисления по формулам последовательно-параллельного соединения ($N'' < N$); $P(N'', i)$ — вероятность состояния совокупности N'' элементов при одновременном отказе $i = 0, \dots, N''$ и исправности $N'' - i$ элементов; $p(E')$ — условная вероятность сохранения связности ДС при размыкании i и замыкании накоротко $N'' - i$ элементов, определяемая по формулам последовательно-параллельного соединения.

Наиболее типичный пример применения теоремы разложения для расчета надежности сетей телекоммуникации приведен на рис. 2.2. Поскольку исходный граф может быть преобразован в эквивалентный путем замены его вершин ребрами и ребер вершинами, теорема разложения применима для оценки надежности сетей телекоммуникации, состоящей из абсолютно надежных ребер и ненадежных вершин.

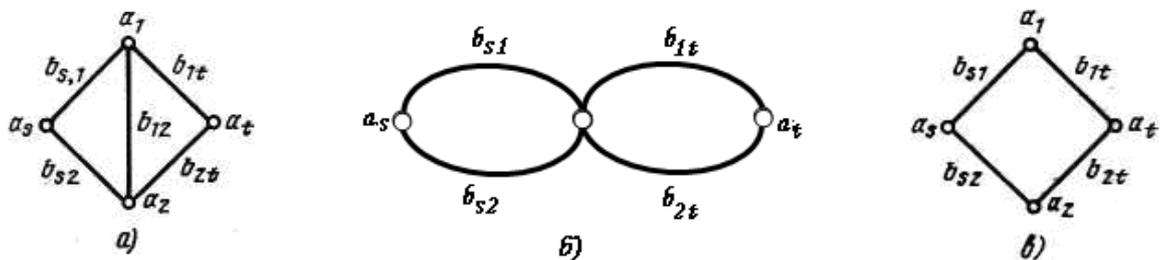


Рис. 2.2. Пример применения теоремы разложения для расчета надежности сети телекоммуникации

- а) исходная структура; б) ребро $b_{1,2}$ замкнуто накоротко;
в) ребро $b_{1,2}$ разомкнуто.

В (2.16) вероятности $P(N'', i)$ определяются по формулам, аналогичным (2.1) и (2.3) для случаев одинаковых и различных вероятностей $p(\varepsilon)$. Отказ (размыкание) i и исправность (замыкание накоротко) $N'' - i$ различных совокупностей элементов приводят; очевидно, к различным последствиям, поэтому вероятность $0 \leq p(E') \leq 1$. Она вычисляется после анализа состояния ДС D'_k , в котором она оказалась после замыкания $N'' - i$ и размыкания i элементов. Общий вид преобразованной сети показан на рис. 2.3, а выражение вероятности $p(E'_k)$ ее исправности на k -м шаге.

$$p(E)_k = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \prod_{v=1}^{h_i} \left[1 - \prod_{\vartheta_j \in \mu_{vi}} p_{\vartheta_j} \right] \right\} \quad (2.17)$$

Здесь $n = N'' - i + 1$.

Алгоритм вычисления $p(E)$ с использованием теоремы разложения состоит из трех частей: формирования множества путей M с разделением его на подмножества M и M ; выделения из структуры ДС таких элементов, которые не позволяют для расчета $p(E)$. Применить формулу последовательно-параллельного соединения элементов (2.17); вычисления вероятности $p(E)$ за $2N''$ шагов.

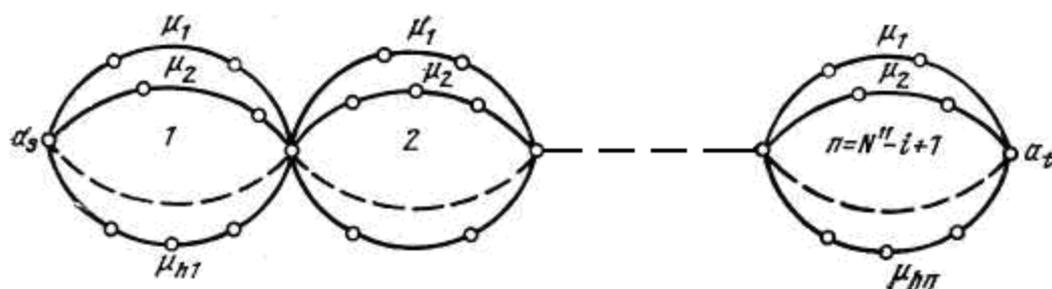


Рис. 2.3. Структура двухполюсной сети телекоммуникации на очередном шаге расчета ее надежности методом с применением теоремы разложения

Использование теоремы разложения для расчета надежности сетей телекоммуникации ограничивается для общего случая несколькими факторами, которые вытекают, во-первых, из условия формулирования самой теоремы и, во-вторых, из сложности программной реализации алгоритма преобразования структур $D'k$.

Теорема разложения сформулирована при условиях абсолютно надежных вершин и неориентированных ребер графа. В сетях и системах это не всегда выполняется. Так, если и ребра, и вершины неабсолютно надежны, то неизвестно, какой надежностью обладает эквивалентная (вершина на рис. 2.3,б. Если ребро $b_{1,2}$ на рис. 2.3,а — ориентированное, то общий результат, полученный на рис. 2.3,б и в, будет неправильным, так как при ориентированном ребре $b_{1,2}$ надежность мостовой схемы ниже. Возможность

использования теоремы разложения для таких общих случаев доказана, но требуется выполнить сложные преобразования исходного графа сети. В сложных сетях с высокой размерностью, что обычно имеет место на практике, число элементов N'' достаточно велико. Поэтому организация перебора большого (несколько десятков) числа элементов равносильна методу прямого перебора состояний элементов сети.

Кроме того, в данном случае автоматическое формирование «состояний схем для расчета по (2.17) представляет достаточно сложную задачу, алгоритмическое и программное решения которой сводят к минимуму преимущества сокращения числа переборов. Поэтому область применения теоремы разложения ограничивается структурами специального класса, как, например, лестничная схема или «решетка»—схема, элементы которой представляют собой мостовые схемы, и некоторыми другими, заранее заданными структурами.

Исследовалась сложность алгоритма вычисления $p(E)$ двух классов структур. Первый из них — лестничные схемы с произвольным числом звеньев (рис. 2.4). Алгоритм построен таким образом, что поперечные ребра могут задаваться не обязательно между каждой парой вершин, а число вершин в продольных ветвях может отличаться одно от другого. Важно, чтобы поперечные ребра не перекрещивались между собой. Алгоритм вычисления вероятности содержит блок формирования множества \mathcal{E} (поперечные ребра), блок формирования двоичных чисел и блок составления схемы расчета в соответствии с состоянием поперечных ребер и расчета вероятности $p(E'k)$.

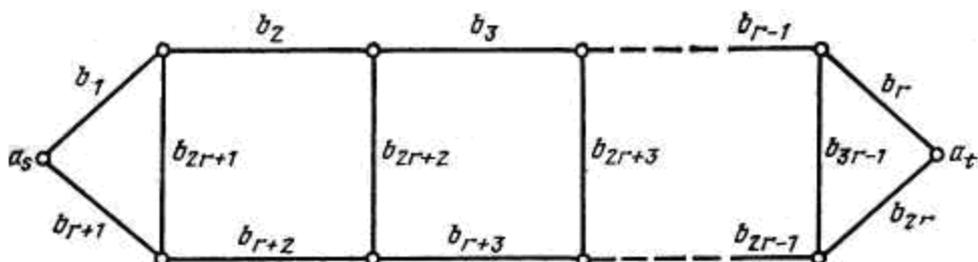


Рис. 2.4. Двухполосная сеть телекоммуникации с лестничной структурой с произвольным числом звеньев

2.3.5. Методы с применением преобразований Булевой алгебры

Изложенные в предыдущих разделах методы и алгоритмы вычисления вероятностей $p(E)$ основаны на организации полного или сокращенного перебора состояний элементов или путей системы. На каждом шаге алгоритмов проводятся операции над числами (сложение, умножение и реже деление). Вычисление $p(E)$ логическими методами производится также по шагам, но их число равно числу путей. Отличие логических методов от изложенных в том, что, во-первых, исключается принцип перебора и, во-вторых, на каждом шаге проводятся операции не с числами, а с Булевыми переменными. На последнем шаге заканчивается составление выражения $p(E)$ через исходные вероятности исправности элементов системы.

Сущность логических методов заключается в назначении соответствия между численными значениями вероятностей состояний элементов $p_{э_i}$, $q_{э_i} = 1 - p_{э_i}$ и Булевыми переменными $БП_i$, принимающими значение «ноль» или «единица». Обозначим $БВ(E)$ выражение функции $p(E)$ через Булевы переменные. Оно определяется простой формулой параллельного соединения путей ДС

$$БВ E = 1 - \prod_{k=1}^h [1 - БВ \ell_k] \quad (2.18)$$

Здесь $БВ(\ell_k)$ —выражение функции $p(e_k)$ через переменные $БП_i$. Формула (2.19) при ее разворачивании содержит 2^h слагаемых, которые в дальнейшем обозначаются $БС_i$, $i=1, \dots, N(БВ)$.

Слагаемые $БС_i$ в (2.18) вычисляются с применением свойства логического произведения

$$БП_v БП_v БП_v \dots = БП_v \quad (2.19)$$

Для упрощения преобразований по (2.18) и организации обращений к оперативной памяти ЭВМ при расчетах после формирования множества

путей M производится перенумерация элементов рассматриваемой ДС порядковыми числами $1, 2, \dots, N$. Алгоритм вычисления $p(E)$ при представлении ДС множеством M имеет h шагов. На первом шаге согласно

$$BB E_1 = BB \ell_1 = BC_1 \quad (2.20)$$

Шаг $k, k \geq 2$, выполняется в два этапа. На первом этапе производится логическое умножение каждого слагаемого выражения $BB(E)_{k-1}$ на $BB(e_k)$ с учетом (2.19). Умножение, как следует из (2.18), (2.19), заключается в дописывании к выражению $BB(E)_{k-1}$ со знаком плюс слагаемого $BB(e_k)$, а также $2N(BB)_{k-1}$ таких слагаемых BC_v , которые представляют собой логическое произведение каждого из слагаемых $BC_i \in BB E_{k-1}$ на $BB(e_k)$.

Указатель знака $a(BC_v)$ слагаемых BC_v определяется по правилу $a BC_v = a BC_i \oplus 1, i=1, \dots, N BB_{k-1}; v=N BB_{k-1}+1, \dots, 2N BB_{k-1}$

Если $a BC_v=0$, то слагаемое BC_v имеет знак «минус»; $N(BB)_{k-1}$ — число слагаемых в выражении BB на $(k-1)$ -м шаге.

На втором этапе k -го шага в полученном выражении $BB(E)_k$ проверяется существование одинаковых слагаемых $BC_i, BC_v, i=1, \dots, N(BB)_k$ с противоположными знаками. Поскольку одинаковые слагаемые соответствуют равным числам, они из выражения $BB(E)_k$ исключаются.

После выполнения h шагов вероятность

$$p E = \sum_{i=1}^{N BB} a BC_i p BC_i, \quad (2.21)$$

где $p(BC_i)$ — число, представляющее собой произведение исходных вероятностей исправности элементов, входящих в слагаемое $p(BC_i)$.

Достоинством логических методов и реализующих их алгоритмов является их простота. Однако число слагаемых выражения $BB(E)$ в сложных системах достигает больших величин, что требует значительных ресурсов, оперативной памяти.

Выводы

По второй главе можно сделать следующие выводы:

-обеспечение надежности требует принятия специальных и целенаправленных мер, проведения соответствующих исследований;

-одной из проблемных областей при переходе к NGN является надежность;

-негативно влияющим на надежность NGN, является централизация управления процессами обслуживания вызовов;

-множество методов расчета показателей надежности делится на два подмножества: точные и приближенные;

-практическое применение того или иного метода определяется постановкой задачи, степенью точности исходных вероятностей $p(z_i)$, размерностью оцениваемой сети телекоммуникации;

-некоторые точные (аналитические) методы разработаны только для заданных конкретных конфигураций сетей телекоммуникации;

-очень высокая размерность оцениваемых сетей телекоммуникации ограничивает возможности точных методов;

-приближенные методы делятся на два подмножества: приближенные аналитические методы и методы статистического моделирования;

-методы оценки надежности сетей телекоммуникации используя интегро-дифференциальные уравнения и теория игр, не нашли практического применения прежде всего из-за их сложности.