

Узбекское агентство связи и информатизации
Ташкентский университет информационных технологий

На правах рукописи

ШАРАФУТДИНОВ РУСТАМ ЗАКИРОВИЧ

«Исследование и анализ живучести транспортных сетей»

Специальность: 5А522202 Сети, узлы связи и распределение информации

Диссертация

На соискание степени магистра телекоммуникаций

Работа рассмотрена
и допускается к защите
Зав.кафедрой
ТС и СК, к.т.н, доцент

Эшмурадов А.М. _____

«__» _____ 2008 г.

Научный руководитель
к.т.н., доцент

Сидиков С.Х. _____

Ташкент 2008

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Общие принципы построения транспортных телекоммуникационных сетей.....	9
1.1. Транспортные сети и их модели.....	9
1.2. Топология транспортных сетей.....	16
1.3. Различия понятий надежности и живучести систем (сетей) связи.....	20
1.4. Показатели живучести системы (сети) связи.....	24
1.5. Различие понятий и количественных характеристик надежности и живучести элементов систем и сетей связи.....	27
Выводы.....	31
2. Методы оценки живучести элементов систем и сетей связи.....	32
2.1. Способы оценки живучести элементов сетей связи.....	32
2.2. Пути повышения живучести элементов систем и сетей связи.....	42
2.3. Живучесть транспортных телекоммуникационных сетей: основные проблемы и способы решения.....	51
2.3.1. Основные причины и факторы, вызывающие повреждения или разрушение элементов транспортных телекоммуникационных сетей.....	51
2.3.2. Различие понятий и количественных характеристик живучести и надежности транспортных телекоммуникационных сетей.....	58
2.4. Пути повышения живучести элементов транспортных телекоммуникационных сетей.....	62
Выводы.....	67
3. Обеспечение живучести транспортной телекоммуникационной сети.....	69

3.1 Определение живучести вторичных сетей связи с адаптивной маршрутизацией на основе надежных показателей транспортных сетей.....	69
3.2. Динамика нагрузки дуг и живучести транспортных сетей.....	78
3.3 Оценка живучести транспортных телекоммуникационных сетей.....	88
Выводы.....	91
4. Оценка живучести транспортных сетей на моделях.....	93
4.1 Принцип оценки живучести транспортных сетей.....	93
4.2. Аналитический метод определения живучести транспортны сетей.....	97
4.3. Линейная транспортная сеть.....	98
Выводы.....	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	105
ЛИТЕРАТУРА.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	109

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, на нашей планете строится общество нового типа – на сей раз информационные. Его создание неимоверно ускорилось благодаря всемирной сети Интернет и наложенным на нее информационными технологиями. Доставка информационных услуг посредством услуг телекоммуникационных занимает сегодня значительную часть мирового рынка, хотя окончательно и бесповоротно информация пока ещё не стала собственностью, товаром и прочее.

Одной из доминирующих мировых тенденций развития телекоммуникационных сетей является образование на базе физического слоя волоконно-оптического кабеля полностью транспортных телекоммуникационных сетей. Причем это не любая полностью транспортная телекоммуникационная сеть, а сеть, построенная по определенным законам и отвечающая специальной группе рекомендаций сектора Телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ – Т).

Перспективной технологией магистрального уровня транспортных телекоммуникационных сетей по мнению большинства исследователей является DWDM, а сети ATM с поддержкой MPLS будут технологической основой транспортного уровня магистральных сетей на региональном уровне. По такому пути идет развитие телекоммуникационных сетей во многих развитых странах.

К основным требованиям, предъявляемым к технологиям построения мультисервисных сетей, операторы относят наличие механизмов обеспечения: качества услуг для всех видов трафика, совместимости оборудования различных производителей, сквозного управления сетью, взаимодействия различных сетей и возможности масштабирования сети.

Наряду с этим следует спланировать мероприятия по нейтрализации негативных внешних воздействий, к которым относятся защита от пожаров,

грозовых разрядов, несанкционированных действий персонала, атак хакеров, обеспечение бесперебойного электроснабжения. Причем не только внешняя среда оказывает негативные воздействия, отказ может произойти впоследствии износа, умышленной или неумышленной порчи оборудования.

Важнейшим аспектом обеспечения работоспособности транспортных сетей являются отказоустойчивость. Понятие "отказоустойчивость" тесно переплетается с понятием "живучести". "Живучесть" применительно к транспортным телекоммуникационным сетям понимается в мировом значении некоего показателя устойчивости, характеризующего интенсивность работы сети в условиях нарушения работы её отдельных элементов, и включает собственно живучесть, а также надежность и помехоустойчивость.

Актуальность работы. Транспортные телекоммуникационные сети обеспечивают доставку узла сети другой узел сети. В отличие от первичных сетей связи, которые в основном поставляли потребителям аналоговые каналы тональной частоты, современные транспортные телекоммуникационные сети поставляют для специализированных сетей только цифровые тракты со скоростями передачи 2 Мбит/с, 155Мбит/с, 622.08 Мбит/с, 2.5 Гбит/с и выше. Функции транспортной телекоммуникационной сети на много сложнее, они включают в себя: компьютерное управление сетью, контроль сети, резервирование трактов, синхронизацию сети.

Одним из важных вопросов при эксплуатации транспортных телекоммуникационных сетей является определение их живучести. Живучесть характеризует устойчивость транспортной сети против действия причин, лежащих вне сети и приводящих к разрушениям или значительным повреждениям некоторой части её элементов – узлов, терминалов, станций и линейные тракты. Живучесть же элемента транспортной телекоммуникационной сети – это его способность выполнять свои функции в заданном минимальном объеме в условиях воздействия на него стихийных

или искусственных факторов. Количественной мерой живучести элемента является вероятность того, что в случае воздействия по нему соответствующего поражающего фактора он сохранит работоспособность.

Исследования показателей живучести транспортных телекоммуникационных сетей следует провести в двух направлениях. Первое направление связано с анализом основных показателей живучести транспортной сети. Второе направление – это исследование принципа оценки живучести транспортной сети аналитически или на электронной модели. В настоящее время считаем необходимым провести исследования по обоим направлениям, учитывая основные принципы построения и особенности, которые характерны для транспортных телекоммуникационных сетей на базе технологии SDH.

На этапе создания полностью оптических транспортных сетей, изложенные выше, определяют актуальность задач исследования и анализ живучести транспортных телекоммуникационных сетей.

В научной литературе широко представлен математический и инженерный аппарат по теории надежности сложных технических объектов. Однако для анализа живучести технических систем обычно применяют методы надежности, что приемлемо лишь в частных случаях. Такое утверждение касается когда необходимо провести анализ живучести телекоммуникационных сетей.

Цель работы: Целью магистерской диссертации является исследование и анализ живучести транспортных телекоммуникационных сетей с учётом показателей их надёжности.

Методы исследования. Поставленных в диссертации задач использовались методы теории вероятностей и математической статистики.

Научная новизна работы. Состоит в следующем:

1. Определены принципы построения современных транспортных телекоммуникационных сетей. Сформулирована следующая задача анализа живучести транспортных телекоммуникационных сетей.

2. Выявлены различия между понятием надёжность и живучесть в целом телекоммуникационной системы. Разработан методический подход к оценке живучести элементов систем и сетей связи. Выработаны пути повышения живучести транспортных сетей связи.

3. Определены основные причины и факторы, вызывающие повреждения или разрушение элементов транспортных телекоммуникационных сетей. Дано определение понятий и количественных характеристик живучести и надёжности транспортных телекоммуникационных.

4. Определены живучести вторичных сетей связи с адаптивной маршрутизацией на основе надёжных показателей транспортных сетей. Вычислены основные показатели живучести транспортной сети на базе выявления динамики нагрузки дуг.

5. Проведена оценка живучести транспортных сетей на моделях. Дан аналитический метод определения живучести транспортных сетей. Полученные результаты для анализа состояния транспортных телекоммуникационных сетей во время технической эксплуатации. Личный вклад. Результаты магистерской диссертации получены автором самостоятельно.

Практическая ценность результатов. Основные практические результаты – использование методик и способов оценки живучести транспортных телекоммуникационных сетей при технической эксплуатации транспортных телекоммуникационных сетей на базе технологии SDH.

Использование результатов работы. Результаты магистерской диссертации могут использоваться при анализе состояний эксплуатируемых транспортных телекоммуникационных сетей АК “Узбектелеком” и предприятий мобильных сетей связи.

Апробация работы: Практически ориентированная часть диссертации доложена на курсах повышения квалификации инженерно-технических дочернего предприятия “Узнефтьгазсвязь”.

В данной магистерской диссертации делается попытка исследовать и анализировать живучесть транспортных телекоммуникационных сетей с применением аналитических методов.

1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

1.1. Транспортные сети и их модели

Транспортные сети предназначены для передачи высокоскоростных широкополосных потоков информации без остановок и накопления.

Информация в транспортную сеть предоставляется специализированной сетью доступа и является различной. Эта информация может быть часовой, видео (теле) изображения.

Транспортная сеть обеспечивает доставку информации по назначению из одного узла сети другой узел сети. В транспортной сети для передачи информации могут использоваться разные технологии: асинхронный способ передачи (АТМ) основанный на адресном принципе передачи крупных пакетов информации; организация временного разделения цифровых потоков высокой скорости с помощью цифровой синхронной иерархии SDH.

Основными элементами транспортной сети телекоммуникаций являются высокоскоростные ВОЛС (от 155- 622 Мбит/с до 2,5 -10 Гбит/с), мощные автоматические междугородные телефонные станции (АМТС) с ёмкостью до сотен тысяч каналов, кросс - коннекторы, обеспечивающие постоянную и полупостоянную коммутацию цифровых каналов и трактов, мультиплексоры ввода-вывода, операционные системы, источники синхронизации.

В отличие от первичных сетей, которые поставляли потребителями аналоговые каналы тональной частоты, современные транспортные сети поставляют для специализированных сетей только цифровые тракты со скоростями передачи 2 Мбит/с, 155 Мбит/с, 622,080 Мбит/с.

Кроме того, функции транспортной сети намного сложнее. Они включают в себя: компьютерное управление сетью, контроль сети, резервирование трактов сети, синхронизацию сети.

К современным транспортным сетям предъявляют следующие основные требования, обеспечивающие возможность не только гарантировать необходимое качества обслуживания, но и дальнейшее развитие сети:

- необходимая полоса пропускания;
- расширяемость и масштабируемость сети;
- управляемость сети;
- совместимость сети;
- резервирование трафика, трактов и каналов;
- наивысшая заданная надежность, живучесть, а также готовность.

Для оценки надежности таких сложных систем, какими являются транспортные, применяют понятие готовности или коэффициента готовности. Готовность сети может быть повышена путем аппаратного резервирования элементов (узлов) сети, резервирование трафика, трактов и каналов за счет соответствующей организации архитектуры всей сети, её топологии, управления и синхронизации сети, включая сети доступа к ЦПС.

Расширяемость и масштабируемость сети иногда используют как синонимы, но это несколько различные понятия. Расширяемость означает возможность сравнительно легкого (в ограниченных пределах) добавления отдельных элементов сети (пользователей, служб), наращивания сегментов сети доступа и замен существующей аппаратуры более мощной. Масштабируемость означает, что сеть позволяет наращивать количество сетевых узлов и протяженность трактов в очень широких пределах без снижения пропускной способности транспортных магистралей. Для обеспечения хорошей масштабируемости сети приходится применять специальное телекоммуникационное оборудование и определенным образом структурировать топологию сети. Управляемость сети подразумевает возможность централизованно осуществлять конфигурацию, наблюдение, контроль и управление, как каждым сетевым элементом, так и всей сетью в целом, включая управление трафиком и планированием развития сети.

Развитие транспортной сети приведет к постепенному отходу от жесткого иерархического принципа построения междугородной сети. С этой целью в транспортных сетях широко используются более надежные структуры -кольцевые структуры, типа используемых в локальных сетях передачи данных, в которых нет коммутационных станций в общепринятом смысле.

Кольцевая структура основана на использовании ВОЛС и широкополосной системы передачи с мультиплексорами и интерфейсами (портами) для подключения к кольцу потребителей. Дальнейшее развитие кольцевых структур будет иметь место на региональных сетях передачи данных и на межрегиональных сетях, объединяющих несколько зон, в том числе зоны телефонной нумерации. Применение АТМ коммутаторов и кросс-коннекторов позволит создать кольцевую транспортную сеть с широкой полосой пропускания и высокими скоростями передачи.

Для описания структуры транспортной сети можно использовать трехуровневую модель, показанную на рис 1.1. Такая модель может помочь при выборе сетевой топологии и методов управления. Для описания структуры сети в модели используются три уровня: магистральная сеть, региональная сеть и местная сеть доступа.

На данном рисунке показана архитектура транспортной сети типа «кольцо- кольцо». Каждый уровень данной модели транспортной сети состоит из: узловых станций (Уз), оконечных пунктов (Оп), пунктов управления сетью (ПУ), которые соединены ВОЛС.

Узлы транспортной сети по своему назначению можно разделить на следующие:

Оконечный пункт, в котором установлено терминальное оборудование транспортной сети, обеспечивающее доступ в транспортную сеть от сетей доступа различного назначения. Этот оконечный узел (пункт) формирует из сигналов сетей доступа линейный сигнал, который передается по линейному тракту транспортной сети другому узлу (пункту).

Промежуточный узел (пункт) транспортной сети может быть двух видов:

а) промежуточный узел с вводом/выводом цифровых трактов из линейного тракта, где цифровые тракты ввода/вывода обслуживают сети доступа данного населенного пункта.

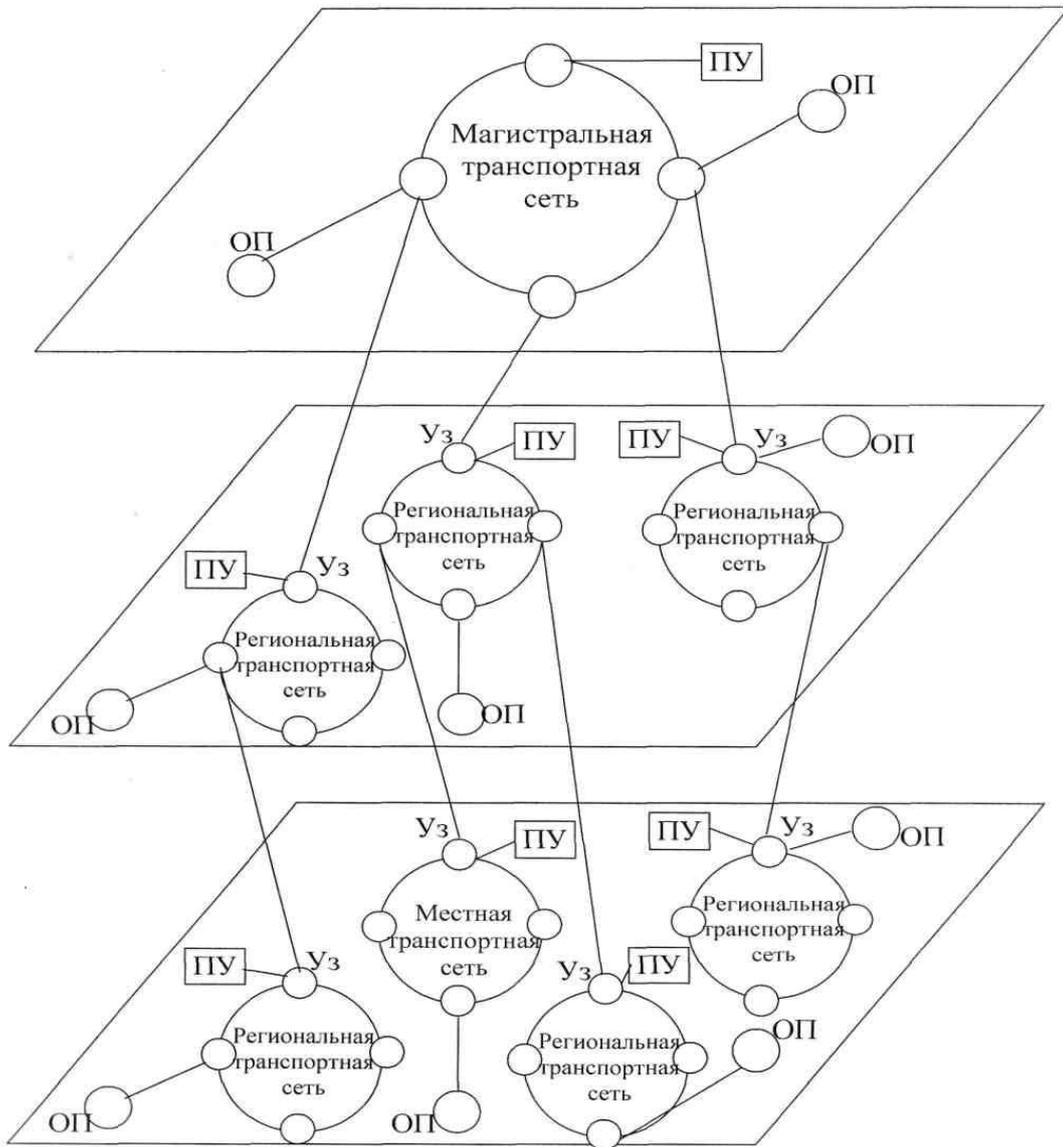


Рис.1.1. Модель транспортной сети.

б) промежуточный узел без ввода (вывода цифровых трактов / транзитный узел (пункт)).

Узловые станции содержат в себе мультиплексор ввода/вывода (ADM), а также оборудование климатехники и источники бесперебойного питания. Мультиплексор ADM осуществляет ввод / вывод цифровых трактов по которым передаются цифровые потоки. В конечных же пунктах вместо ADM устанавливаются терминальные мультиплексоры (ТМ) - конечные устройства с некоторым числом каналов доступа, соответствующим определенному уровню иерархий PDH и SDH.

Для нормального функционирования транспортной сети необходимо создание сети управления. С этой целью на каждом уровне транспортной сети, в каждом кольце создаются пункты управления (ПУ), осуществляющие функции управления, тестирования, аварийного переключения, резервирования, сбора статистики о прохождении сигнала и аварийных ситуациях. Каждый пункт управления (ПУ) осуществляет управления телекоммуникационными ресурсами возделанного региона.

Основной транспортной сети на любом участке являются линии телекоммуникаций, которые соединяют между собой оборудование транспортной сети, расположенное в различных узлах этой сети. Линейный тракт транспортной сети предназначен для передачи линейных сигналов и представляет собой совокупность технических устройств (регенераторов или оптических усилителей, участков оптического кабеля, соединительных и разветвительных муфт, станционных, оптических шнуров, оптических кроссов.) Линейные тракты в транспортной сети также могут быть организованы с использованием ЦРРЛ (цифровых радиорелейных линий).

К конечным пунктам (ОП) и узлам (Уз) транспортной сети подключаются системы коммутации специализированных сетей и из сигналов специализированных сетей формируются линейные сигналы, которые передаются по линиям телекоммуникаций и другим узлам или ОП транспортной сети.

Национальный уровень (магистральная транспортная сеть). Используется для передачи информации с высокой пропускной

способностью между регионами. Соединяет областные центры и крупные города, республиканские центры (рис. 1.2.).

Региональный уровень (внутризоновая транспортная сеть). На этом уровне сети осуществляется транспортировка трафика в регионах, например, между областным центром и райцентрами.

Местный уровень (местная телефонная сеть). Является самым низшим уровнем транспортной сети, в котором осуществляется перенос трафика в пределах одного населенного пункта.

В качестве примера рассмотрим один уровень вышеприведенной модели транспортной сети. Транспортная сеть одного уровня, приведенная на рис. 1.2, состоит из 3-х узлов. При этом предлагается, что эти узлы находятся в разных населенных пунктах.

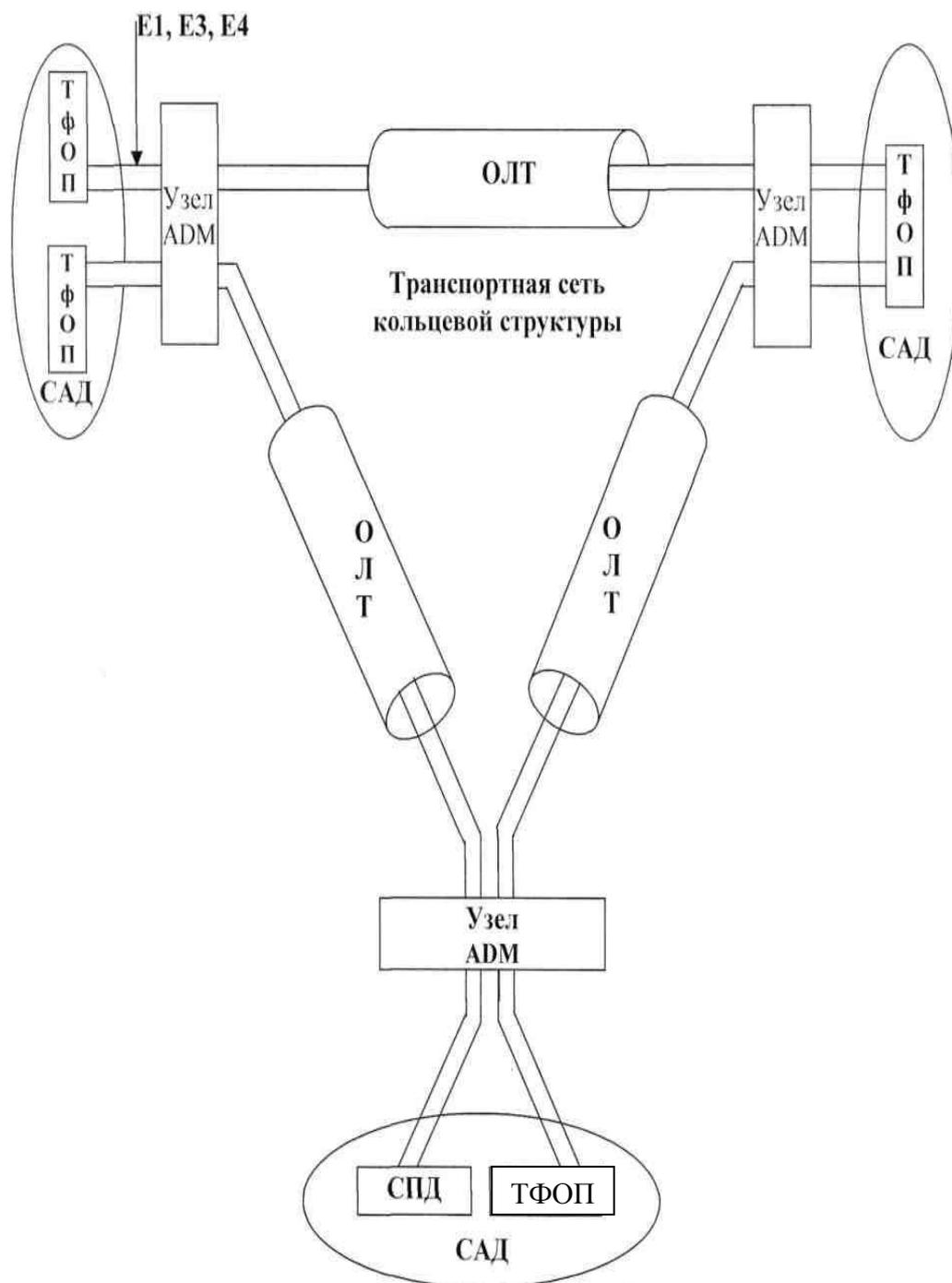


Рис.1.2. Модель 3-х узловой транспортной сети на информационном уровне.

1.2. Топология транспортных сетей

Топология - это тема транспортных сетей с указанным географическим расположением УК и ОП. Самая сложная топология может быть реализована с использованием простейших, базовых топологий. Рассмотрим эти топологии:

1. Топология «точка-точка» (рис.1.3. а.)

Два ОП транспортной сети в них установлены ТМ 1 и ТМ 2. Мультиплексоры соединены через ВОН с использованием двух оптических волокон.

2. Топология «линейная цепь» (рис.1.3. б.)

В данной сети имеется два от в которых установлены ТМ 1 и ТМ 2, имеется также промежуточный пункт, в котором установлен ADM, поэтому этот пункт с выделением цифровых трактов.

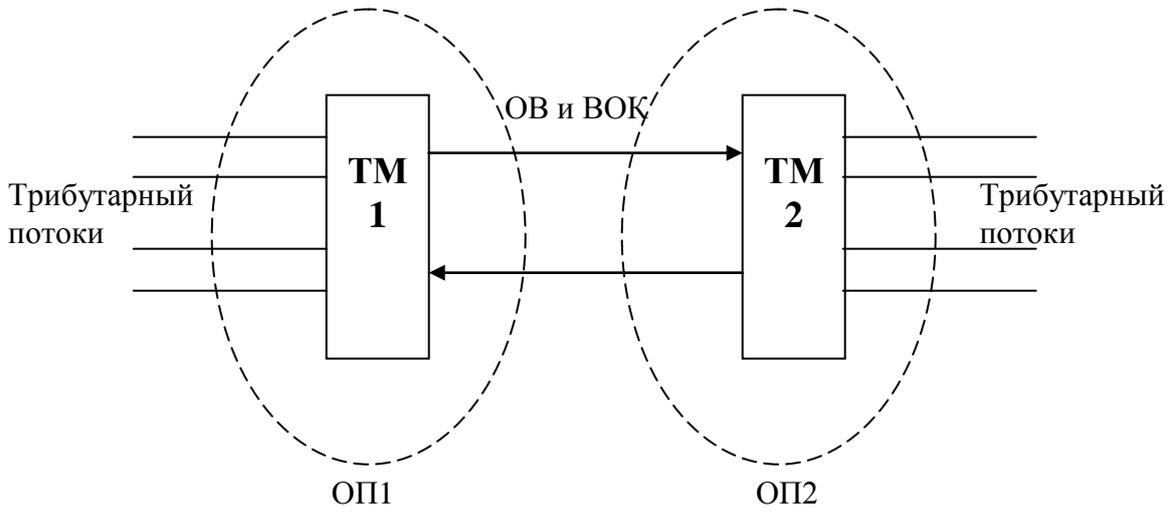
3. Топология «линейная сеть с регенератором». В этом варианте для увеличения дальности связи установлен регенератор в промежуточном пункте без выделения тракта .

4. Топология и «кольцо» (рис 1.3. в.)

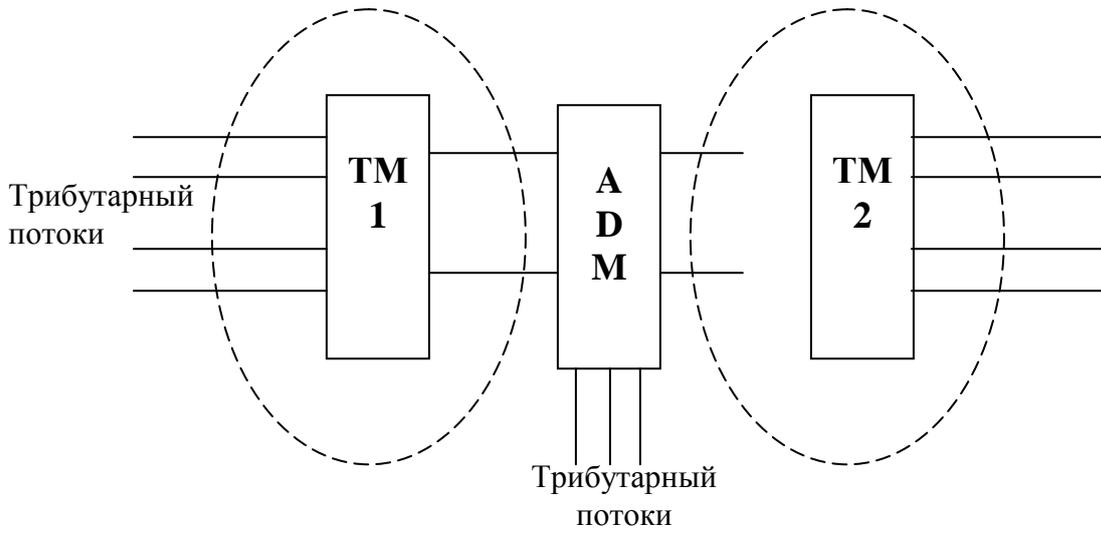
Все ADM соединены между собой двумя оптическими кабелями, создавая замкнутую кольцевую структуру. Фактически в данной транспортной сети имеется два кольца по которым передается одна и та же информация по следующему принципу: в первом (внешнем) кольце информация передается только по часовой стрелке, например информация от ADM 1 и ADM 4 будит предаваться так: ADM 1, ADM 2 транзит, ADM 3 транзит, ADM 4.

Во втором (внутреннем) кольце информация передается только против часовой стрелке по такому же принципу.

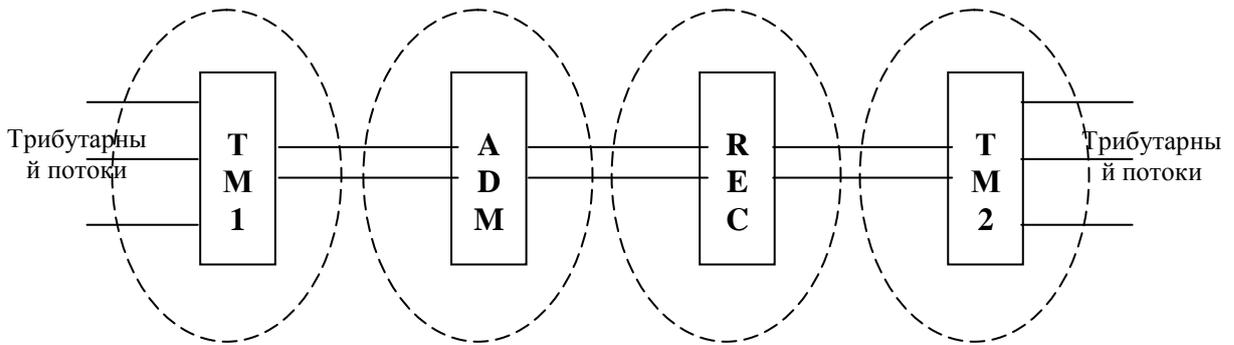
Такая схема организации связи значительно повышает надежность транспортной сети и позволяет всегда обеспечить связью все транспортные узлы в случае обрыва транспортной сети.



а)



б)



в)

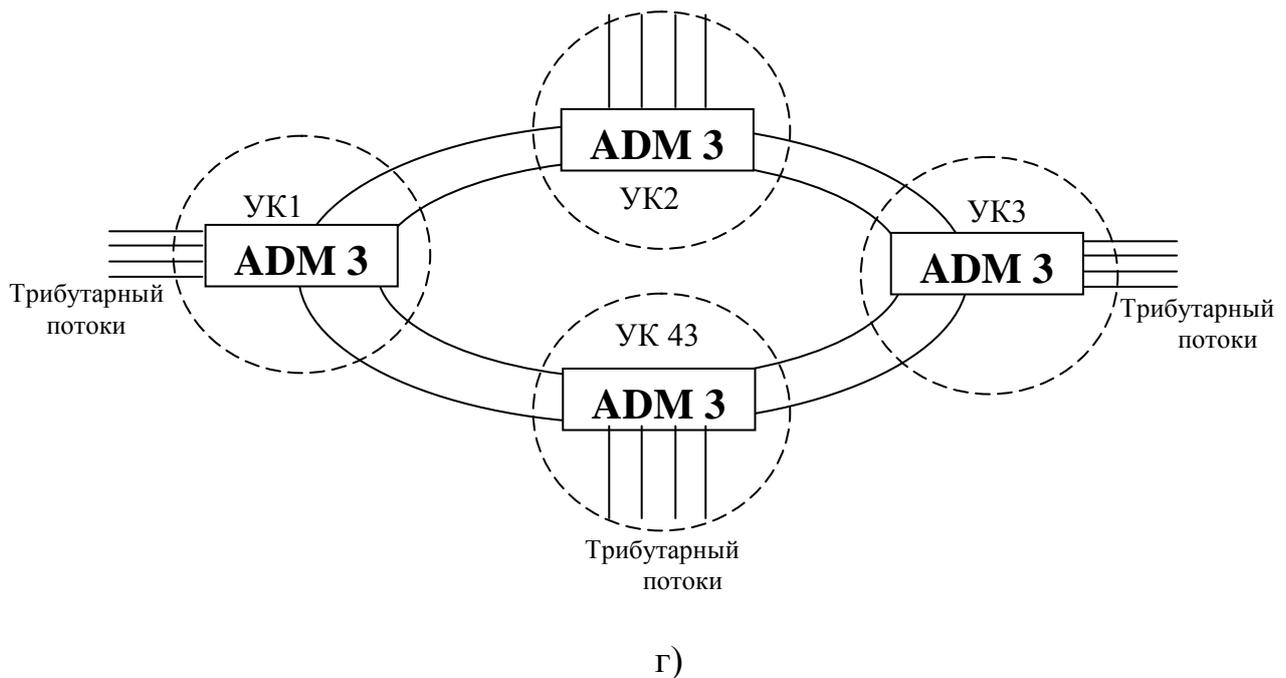


Рис 1.3. Схема базовых топологий

Количество модулей STM разных уровней иерархии SDH. (рис.1.4). синхронный транспортный модуль STM - это цифровой сигнал, длительностью 125 мкс, имеющий определенную структуру и содержащий в себе заголовок и полезную нагрузку. В заголовке модуля STM-N передается служебная информация, а также информация управления, синхронизации и контроля ошибок. Назначения заголовка может заключаться и в том, что он может быть использован для управления всей сетью на базе стандарта TMN. В этом случае все свободные байты заголовка полностью отводятся под задачи управления

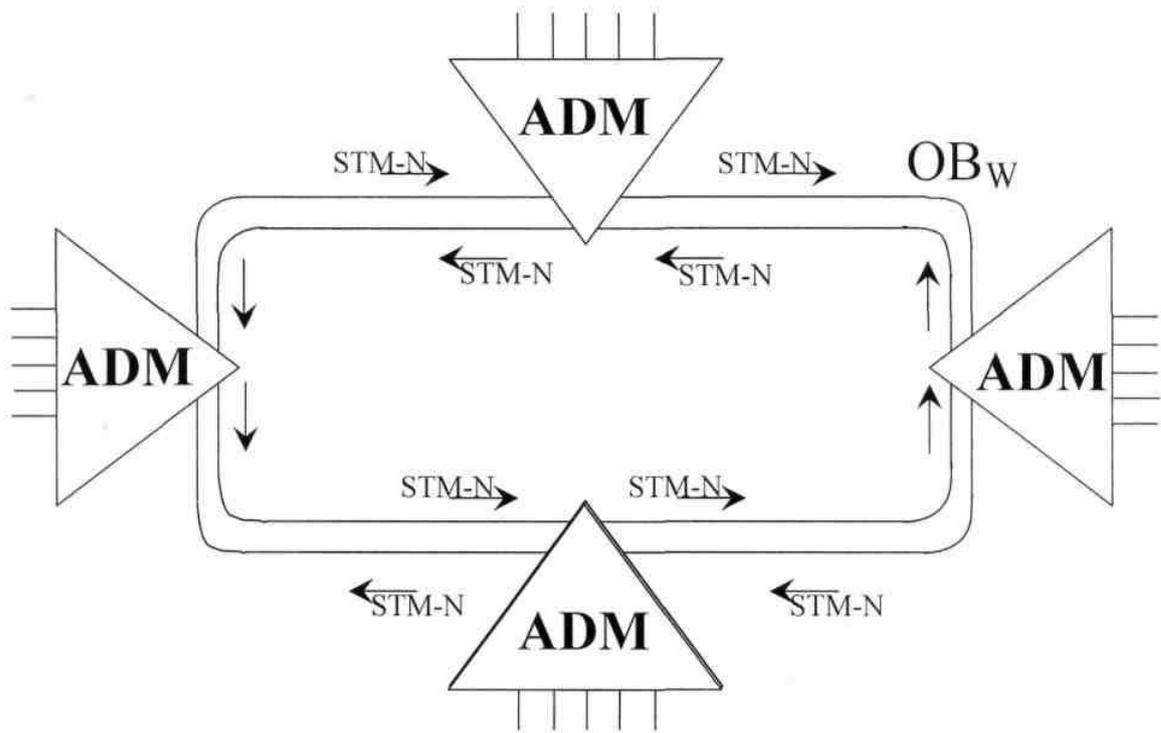


Рис 1.4. Информационная модель транспортной сети SDH.

Информационная сеть состоит из сети цифровых трактов низкого уровня E1 (скорость передачи 2048 Кбит/с) и цифровых трактов высокого уровня E3 и E4 (скорость передачи данных 34 Мбит/с и 140 Мбит/с). Информация от каждого мультиплексора ввода / вывода ADM передаётся по одному кольцу (OB_w) по часовой стрелке, а по другому кольцу (OB_p) против часовой стрелки, при этом OB_w - основное оптическое волокно, OB_p - резервное оптическое волокно.

На уровне цифровых трактов при соединении узлов коммутации специализированных сетей между собой (схема на рис.1.4), трансформируется в топологию цифровых трактов по схеме «каждая АТС с каждой» (рис1.5.).

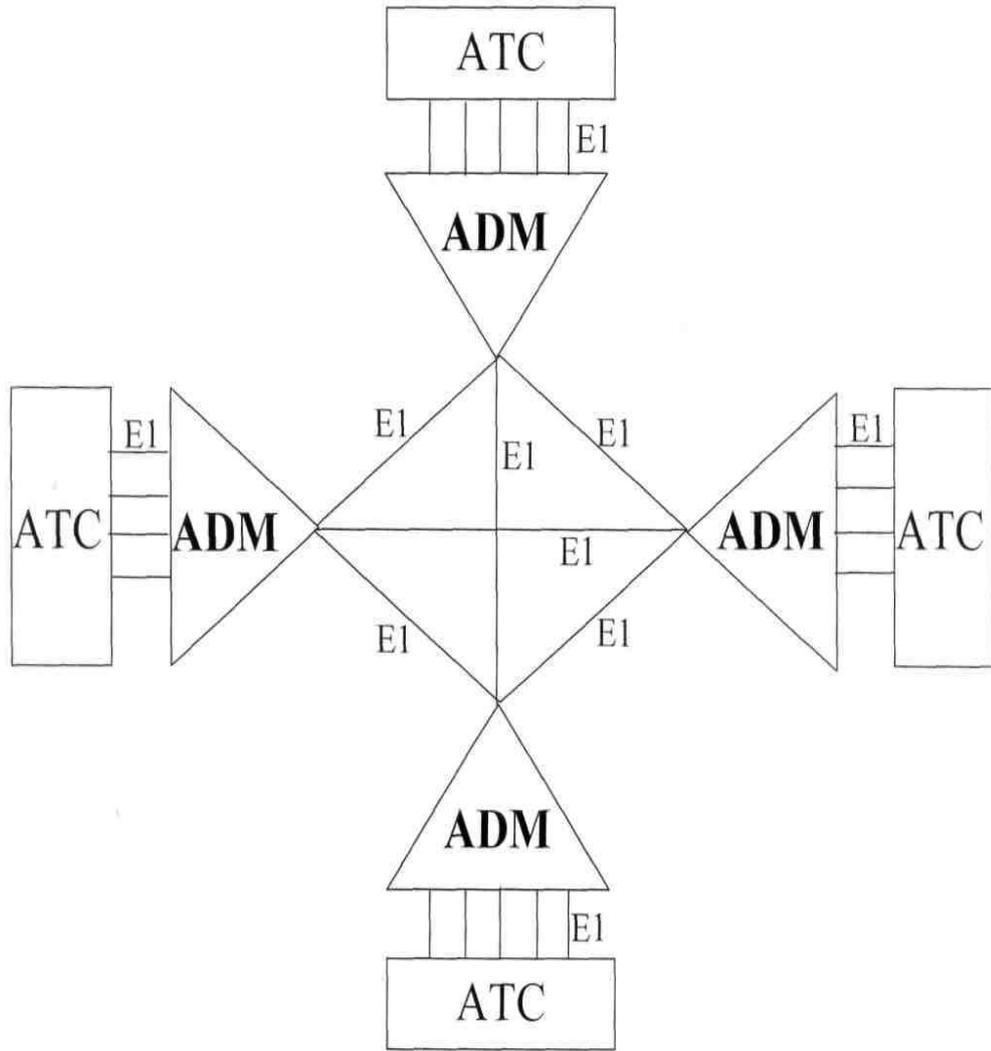


Рис.1.5. Информационная модель транспортной сети SDH на уровне цифровых трактов

1.3. Различия понятий надежности и живучести систем (сетей) связи

Оба понятия связаны с работоспособностью системы связи во времени, т. е. выполнением заданных функций в установленном объеме на требуемом уровне качества в течение определенного периода ее эксплуатации или в произвольный момент. Различия этих понятий обусловлены прежде всего различиями причин или факторов, нарушающих нормальное функционирование системы, и характером нарушений.

Надежность системы связи 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.

Живучесть же характеризует устойчивость системы и приводящих к разрушениям или значительным повреждениям некоторой части ее элементов - узлов, пунктов, станций и линий связи. Все причины можно разделить на два класса: стихийные и преднамеренным - огневые, в том числе и ракетно-ядерные, удары противника в условиях войны, вражеские диверсионные действия и др.

Различия в причинах нарушения связи обуславливают существенные отличия в их проявлении, характере и масштабности нарушений связи, их продолжительности, путях и способах их устранения и повышения устойчивости системы. Если поток случайных отказов техники приводит к нарушению лишь отдельных связей и обладает свойством ординарности (малая вероятность одновременного отказа нескольких связей), то нарушения работы системы указанными выше факторами живучести обладают существенно иными свойствами. Особенно это характерно для преднамеренного поражения системы, когда одновременно может выводиться из строя значительная часть или даже вся система связи. Интервалы между воздействиями факторов живучести на систему связи не подчиняются экспоненциальному закону, что характерно для случайных отказов аппаратуры, а преднамеренные воздействия противника, кроме того, не являются и случайными. Нарушения работы отдельных связей из-за случайных отказов и ошибок обслуживающего персонала обычно кратковременны, так как они в большинстве случаев быстро устраняются, что же касается нарушений связи из-за разрушения отдельных ее элементов -

узлов, линий, то они несравненно более продолжительны. Если первые исчисляются обычно минутами или десятками минут, то вторые - часами и сутками, поскольку это связано с большим объемом восстановительных работ.

В силу небольших перерывов связи из-за случайных отказов многие даже весьма важные связи могут обходиться без резервирования. С учетом же аспекта живучести без резерва не обойтись, так как обслуживаемые процессы управления, как правило, не допускают столь длительного отсутствия связи.

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

Поражающие факторы могут выводить из строя одновременно несколько элементов узла и даже системы. Так, если воздействию подвергается узел связи, то могут оставаться непораженными лишь вынесенные его пункты и станции. Поскольку аппаратура систем передачи обычно размещается в составе ядра узла связи, при поражении узла с большой вероятностью выходят из строя и подходящие к нему кабельные линии связи. Соответственно могут быть нарушены все связи, осуществляемые данным узлом. В период массированного ядерного удара противника взаимная зависимость событий-поражений распространяется на все элементы системы. Естественно, что эти особенности нельзя не учитывать при расчете живучести систем и сетей связи.

Следует иметь в виду и неодинаковую степень погрешности исходные данных для оценки надежности и живучести систем. По эксплуатационно-техническим отказам техники и линий связи имеется обширный

статистический материал. Новые средства связи проходят испытания на надежность, а проектируемые - оцениваются расчетным путем. И хотя достоверность исходных данных по надежности техники связи представляет пока что известную проблему, достигнутая их точность несравненно выше точности исходных данных для анализа живучести системы связи. К этому меру, еще нет достаточных научных основ прогнозирования землетрясений. Естественно не может быть сколько-нибудь точной необходимая для расчетов живучести вероятность того, что в течение определенного периода в интересующем районе землетрясения не будет, нельзя достоверно описать его параметры. Весьма проблематично также и прогнозирование поражающего воздействия противника.

Из этого факта следует, что в настоящее время и в обозримом будущем оценка живучести системы (сети) связи может быть лишь грубо приближенной, ориентировочной. Поэтому и методы ее расчета могут быть приближенными, лишь бы вносимая ими погрешность не превосходила неточности исходных данных.

Методы расчета показателей надежности, к которым обычно предъявляются высокие требования по точности, в некоторых случаях могут использоваться для оценки живучести системы связи, одного для сокращения трудоемкости расчетов, исходя из изложенного выше, они могут быть при этом существенно упрощены. Если же для анализа и синтеза живучести системы разрабатываются специальные методы, то излишнее их усложнение во имя повышения точности было бы неоправданно.

Неодинаковы также и критерии отказов связи между полюсами системы. Если при оценке надежности связь между парой полюсов может считаться отказавшей при наличии $k < n$ заданных связей ($n=1,2,\dots$), то при оценке живучести критерием отказа связи между двумя полюсами обычно является полное отсутствие связи любого вида.

Таким образом, надежность и живучесть - существенно различные понятия и самостоятельные проблемы, требующие своих решений при разработке и совершенствовании систем и сетей связи.

Вместе с тем иногда встречаются попытки толковать понятие надежности системы связи как ее способность противостоять отказам ее элементов независимо от их причин. В этом случае понятия надежности поглощает понятия живучести и вместо двух понятий используется одно более широкое - надежность. Возникает вопрос: целесообразно ли это? Существование двух более узких категорий качества системы облегчает их теоретическую разработку, по показателям каждого из них можно более определенно судить о причинах недостаточной устойчивости связи и о путях ее повышения. В то же время понятно стремление авторов подобных попыток иметь такое понятие, которое отражало бы влияние на связь всех факторов, приводящих к ее отказам. Между тем такое понятие есть - это «устойчивость» системы связи. Она учитывает все многообразие факторов, включая эксплуатационно-технические отказы, повреждения элементов системы стихийными факторами и преднамеренным воздействием противника, случайные и преднамеренные радиопомехи. Применение этой интегральной категории не предполагает ликвидации сети, участвующей в обеспечении связи на данном информационном направлении. Разумеется, такие двухполюсные сети связи информационных направлений, как правило, включают в себя часть общих элементов, т.е. по надежности и живучести являются взаимозависимыми (рис 1.4, 1.5). Это обстоятельство следует учитывать и при выработке типовых показателей надежности и живучести систем связи, и при выборе математического аппарата для их расчета.

1.4. Показатели живучести системы (сети) связи

Учитывая, что показатели живучести, надежности и помехоустойчивости системы (сети) связи являются аргументами функции ее

устойчивости, то, естественно, следует стремиться к тому, чтобы все они были однотипными или хотя бы аналогичными. В некоторых случаях это требование выполнимо. Так, если поражающие факторы приводят к относительно кратковременным нарушениям работы двухполюсной системы (сети) связи, то для оценки ее живучести целесообразно применять такие же по форме показатели ее надежности, т.е. коэффициент готовности, наработку на отказ и среднее время восстановления системы.

Для отличия показателей живучести от показателей надежности в соответствующих символах проставляются буквы «ж» и «н». например, $K_{гж}$ - коэффициент готовности двухполюсной системы (сети) по факторам живучести; $K_{гн}$ - аналогичный показатель по факторам надежности.

Примерами факторов, действие которых на систему (сеть) связи может оцениваться по аналогии с надежностью, являются грозы, повреждения линий и узлов связи от эпизодических ударов противника (обычным оружием) по близко расположенным от них объектам и т.п.

В этих случаях по аналогии с надежностью может оцениваться живучесть и многополюсной системы (сети) связи - по средней (средневзвешенной) доле сохраняемых связей в произвольный момент или по матрице живучести, элементами которой являются показатели живучести связи между полюсами системы.

Двухполюсные сети связи могут выходить из строя в результате действия таких локальных факторов, как оползни, землетрясения, разливы рек и т.п. После принятия должных мер по обеспечению живучести такие случаи могут быть достаточно редкими, хотя восстановление связи при этом занимает обычно большое время. Если в ранее рассмотренных случаях процесс функционирования двухполюсной системы связи представляет чередование периодов исправной работы и перерывов (восстановлений) связи, то здесь в течение длительного времени может быть единственное проявление соответствующего фактора. Ясно, что такой процесс нельзя характеризовать коэффициентом готовности (вероятностью связности). Для

обслуживаемой системы управления (потребителя) важно иметь представление о том, что будет с данной связью при воздействии того иного поражающего фактора или их совокупности. Такое представление можно получить с помощью вероятности выживания p_v двухполюсной системы (сети) в случае воздействия на нее поражающих факторов, а также прогнозируемой длительности восстановления связи T_v .

Что же касается многополюсной системы (сети) связи, то она в общем случае целиком не выходит из строя при воздействии предполагаемых поражающих факторов. Поэтому для оценки ее живучести двоичная система показателей неприемлема. Вместе с тем удовлетворительными показателями ее живучести являются по аналогии с надежностью средняя доля или математическое ожидание доли пар полюсов, связь которых выживает в течение заданного периода в условиях воздействия соответствующих факторов.

Если живучесть связи между всеми парами взаимодействующих полюсов системы примерно одинакова, то ее можно охарактеризовать средним значением вероятности выживания связи между одной парой полюсов. Численно она будет равна средней доле выживаемых пар полюсов данной МС.

В противном случае, т.е. при существенно различной живучести связи между полюсами системы, вычисляются средние доли выживаемых связей по каждой из двух-трех групп, на которые они могут быть сгруппированы по признаку равно живучести d_L . В случае необходимости сравнения вариантов систем по живучести определяется средневзвешенная доля выживаемых связей $D_{B.C}$ по

Требование заказчика по живучести проектируемой системы может быть выражено через среднюю долю выживаемых связей в виде

$$D_{B.C} \geq D_{B.C}^0 \quad \text{или} \quad \overset{0}{D}_{B.C} \geq \overset{0}{D}_{B.C3} \quad (1.1)$$

Другой формой требования является вероятность того, что доля выживаемых связей в системе будет не менее заданной, т.е.

$$p(\overset{o}{D}_{B.C.} \geq \overset{o}{D}_{B.C3}) \geq p_3 \quad (1.2)$$

Разумеется, живучесть систем связи, как и ее надежность, может характеризоваться также и качественными показателями. Примерами таких показателей могут быть: среднее число пространственно-разнесенных трактов связи между каждой парой полюсов, степень защиты кабельных магистралей от грозových разрядов и т.п.

1.5. Различие понятий и количественных характеристик надежности и живучести элементов систем и сетей связи

Очевидно, что если элементом системы (сети) связи являются станция, устройство или линия, при функционировании которых можно четко сформулировать понятие отказа, то в качестве показателей их надежности следует применять закрепленные ГОСТ технические показатели надежности. В месте с тем среди элементов систем (сетей) связи есть и такие, что двоичная система оценки (Да - Нет) состояния их работоспособности явно недостаточна. К ним относятся крупные узлы, центры, пункты связи и другие элементы. Нет нужды доказывать, что было бы нерационально считать узел связи или его элемент, например телеграф, отказавшим, если из-за отказа его отдельных устройств нарушена часть обеспечиваемых связей. По аналогии с многополюсными системами (МС) состояние работоспособности таких элементов следует определять многоуровневой мерой. Соответственно и понятие их надежности и показатели целесообразно иметь аналогичными тем, которые рекомендуются для МС, а именно: под надежностью элемента системы (сети) связи, состояние работоспособности которого оценивается

многоуровневой мерой, подразумевается его свойство, обусловленное эксплуатационно-технической надежностью его компонентов, структурой, качеством управления и специальными мерами выполнять заданные функции в установленном объеме по обеспечению связи .

Из определения следует, что надежность сложных элементов систем (сетей) связи зависит не только от устойчивости работы входящих в них аппаратуры и технических комплексов, но также и от структуры элемента, наличия в нем необходимой избыточности, технического уровня системы управления - системы контроля , выработки и реализации решений по восстановлению связи при отказах аппаратуры элемента. Под специальными мерами повышения надежности элемента предполагаются такие, как создание регламентно - ремонтной службы, выделение резерв средств и т.п.

С учетом этих замечаний в качестве показателей надежности таких элементов систем (сетей) связи целесообразно принять математическое ожидание или среднее значение сохраняемой доли своих возможностей по обеспечению связи в произвольный момент интересующего периода времени в заданных условиях эксплуатации . Так если телеграф общего пользования при исправном состоянии всего его оборудования способен обеспечивать совместно с другими элементами узла и системы связи n_0 связей, а реально из-за отказов техники обеспечивает в наблюдаемый период в среднем n_p связей, то его надежность в произвольный момент данного периода равна $H_3 = n_p / n_0$.

Для большой определенности оценки наряду со средним значением сохраняемой доли возможностей целесообразно вычислять также среднеквадратическое отклонение или коэффициент вариации этой величины.

В отличие от показателей надежности МС, здесь мы не можем принимать в качестве критерия надежности элемента «сохраняемые связи», поскольку каждая из них обычно обеспечивается не одним, а несколькими элементами. Разумеется, при практической оценке надежности того или

иного элемента системы понятие «возможности элемента по обеспечению связи» должно конкретизироваться, исходя из его роли в системе и структурно- функциональной схеме. В одних случаях решающим может быть сохранение исправными оконечных устройств, в других - каналобразующих средств и т.п. Отметим также ту особенность, что необходимая надежность элемента (доля сохраняемых возможностей) при разработке системы не задаётся из вне, что характерно для МС, а вычисляется как производная величина, вытекающая из заданных показателей надежности системы (сети).

Таковы понятия и показатели надежности элементов системы (сети) связи. А что следует понимать под их живучестью и какой количественной мерой ее оценивать?

Выше было показано, что как стихийные факторы, так и преднамеренные поражающие воздействия на элементы системы связи приводят если не к полному их разрушению, то выводят из строя на длительное время. Одним воздействием, например землетрясением или ядерным взрывом, может быть поражен весь даже сложный элемент системы - узел связи, его элемент или любой другой объект. Отсюда следует, что живучесть элемента системы связи - это его способность выполнять свои функции в заданном минимальном объеме в условиях воздействия на него стихийных или искусственных факторов. Обращает на себя внимание и то, что в требованиях по живучести элемента системы (сети) связи необходимо указывать «минимальный» объем его функции («возможностей по обеспечению связи»), являющийся критерием его работоспособности. Количественной мерой живучести элемента является вероятность его выживания, т.е. вероятность того, что в случае воздействия по нему соответствующего поражающего фактора он сохранит работоспособность. Из приведенных определений следует, что вероятность выживания элемента может быть как условной, так и безусловной.

Условной она будет в том случае, когда вычисляется в предположении, что воздействие поражающего фактора состоялось, т.е.

$$P_B(\Theta_i) = p[U_3(\Theta_i) > U_3(\Theta_i)] \quad (1.3)$$

где $U_3(\Theta_i) > U_3(\Theta_i)$ - сохранившийся и минимальный заданный уровни работоспособности элемента соответственно.

Безусловная вероятность того, что в течение Δt элемент подвергнется предполагаемому поражающему воздействию.

Если поражающий фактор, например гроза, приводит к частичному повреждению узла связи или его элемента, то в качестве показателя его живучести целесообразно применять среднее значение или математическое ожидание доли сохраняемых возможностей узла связи (элемента) по аналогии с надежностью. В качестве показателя только структурной живучести сложного элемента системы (сети) связи без учета его степени защиты целесообразно применять коэффициент относительной живучести

$$K_{ж.э} = n_{\min} / N_э \quad (1.4)$$

где n_{\min} - минимальное число структурных частей элемента, повреждение которых приводит к полному отказу элемента; $N_э$ - общее число структурных частей элемента.

Как видим, этот показатель достаточно наглядно характеризует чувствительность элемента к отказам его составных частей.

Важным показателем живучести элемента системы связи является также длительность его восстановления до заданного минимального уровня. Она может выражаться средним временем с допустимыми отклонениями или функцией распределения.

Выводы

1. Анализ архитектуры и топологии транспортных сетей показывает, что наиболее экономичным вариантом является топология “кольцо”.

2. Понятие живучести является относительно новым понятием, оно впервые используется для оценки общего технического состояния транспортной сети характеризующая её устойчивости.

3. Оценить живучесть транспортной сети может быть лишь приближённой, ориентированной. Отсюда следует, что методы её расчета также могут быть приближенными.

4. Основными показателями живучести является: средняя доля выживаемых связей и вероятность того, что доля выживаемых связей в сети будет не менее заданной.

5. Основными факторами, вызывающие повреждения транспортной сети является: наводнения, пожары, сильные электромагнитные поля.

2. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ И СЕТЕЙ СВЯЗИ

2.1. Способы оценки живучести элементов сетей связи

Выше было показано, что на элементы системы связи может действовать ряд поражающих факторов. В определенных условиях они могут проявляться примерно в одно и то же время. Поэтому представляет интерес устойчивость элемента системы как против отдельных факторов, так и в случае их совместного действия. Частные оценки необходимы для выявления причин уязвимости элемента, выработки и оценки эффективности мер по повышению его живучести. Частная оценка элемента связи ведется отдельно для обслуживающего персонала, здания и техники связи, в том числе антенно-фидерных устройств и кабельных или любых других проводных линий связи. На основе частных показателей осуществляется интегральная оценка рассматриваемого элемента по совокупности учитываемых факторов - Ф.В. последующем она используется непосредственно в расчетах живучести системы (сети) связи.

Выше отмечалось, что живучесть элемента связи может быть условной и безусловной. Условная оценка производится в предположении, что действие отдельного фактора или их совокупности свершилось, требуется определить вероятное состояние каждой из его составных частей. Для этой оценки требуются исходные данные о структуре элемента и взаимном удалении частей его, о степени защиты по каждому фактору для каждой составной части, расстояний их от центра взрыва или внешнего воздействующего фактора, характеристиках поражающего действия каждого фактора, а иногда и о точных географических координатах объекта и центра воздействующего внешнего фактора (в том числе взрыва).

Если живучесть элемента системы оценивается вероятностью его выживания, то первоначально она вычисляется по каждому из

анализируемых факторов - Φ , , а затем по формуле суммы вероятностей совместных событий находится интегральная вероятность выживания элемента

$$P_B(\dot{Y}, \Delta t) = \sum_{v\hat{o}_i \in \hat{o}} \hat{o}_i - \sum_{v\hat{o}_i, \hat{o}_j \in c^2 \hat{o}} \prod_{i \neq j} \hat{o}_i \hat{o}_j + \dots + (-1)^{\hat{o}} \prod_{i=1}^{\hat{o}} \hat{o}_i \quad (2.1)$$

По предварительным исследованиям и расчетам проектировщику может быть известно, что последствия воздействия некоторых факторов на рассматриваемый элемент с учетом принятых мер по защите несущественны в сравнении с другими. Тогда такие факторы относятся к категории второстепенных и из расчета исключаются. Расчет может быть дифференцирован также по отдельным группам, например по группе факторов мирного или военного времени или по другим показателям.

В условиях современной войны наиболее сильное поражение системах связи могут причинить ядерные взрывы, примененные в большом количестве (массированно). Поэтому оценка устойчивости элемента связи против поражающих факторов ядерного взрыва может быть принята в качестве показателя его живучести в период войны. Таким образом, находится условная вероятность выживания элемента. Применительно к нему она является главной. Между тем для оценки живучести системы (сети) связи надо знать безусловную вероятность выживания каждого ее элемента. Она меньше условной, так как вероятность того, что данный элемент в рассматриваемый период будет подвергнут воздействию соответствующего фактора в большинстве случаев меньше единицы. Прогнозирование этой вероятности - сложная задача и одна из главных проблем оценки живучести систем связи. И хотя на сегодняшний день она еще не имеет приемлемого общедоступного решения по многим факторами как мирного, так и военного

времени, по некоторым из них прогнозирование возможно. Наибольший интерес представляет прогнозирование возможности воздействия на элементы системы связи ядерных взрывов. Эта задача решается, как правило, методами машинного моделирования массивов и групповых ядерных взрывов, что достаточно трудоемко и посильно только соответствующим организациям. С их помощью могут быть получены необходимые данные для оценки живучести системы (сети) связи.

Ниже излагаются отдельные методические приемы по оценке воздействия на элементы систем связи поражающих факторов ядерного оружия и некоторых других упоминаемых выше явлений.

В зависимости от площади, занимаемой элементом, вида и мощности ядерного взрыва, а также других условий элементы системы могут быть объектами точечными, площадными или линейными. При этом точечный и площадной элементы могут выполнять простые или сложные функции, быть простыми или сложными по структуре. Обычно элемент системы связи относят к точечным объектам, если его линейные размеры не превышают 0,2 радиуса поражающего действия внешнего воздействующего фактора, в том числе ядерного взрыва, а его состояние после возденет-' вия может иметь только два значения: либо он сохранил работоспособность, либо полностью вышел из строя. Для площадного» и линейного элементов кроме упомянутых выше вероятностных оценок вычисляется также величина нанесенного ущерба отдельного каждому компоненту.

Вероятность поражения точечного элемента, являющей; целью, определяется по формуле

$$P_n = 1 - e^{-p \frac{R^2 i}{A^2}} \quad (2.2)$$

где $p = 0,477$ - постоянная нормального закона; R_n - радиуса вращения воздействующего фактора; E - вероятное отклонение центра взрыва боеприпаса от центра цели (объекта).

Получили упомянутую выше условную вероятность поражения. Безусловная вероятность поражения элемента системы связи одним зарядом определяется равенством

$$D_n = D_a D_{\dot{a}} \left(1 - e^{-p \frac{2R^2 \dot{i}}{A^2}} \right) \quad (2.3)$$

где $0 < P_b < 1$ —вероятность применения данного боеприпаса элементу; $P_{\dot{a}}$ - вероятность доставки боеприпаса до элемента связи с учетом технической надежности пуска-полета средства доставки и преодоления им различного рода противодействий.

Элемент системы связи сохранится («выживет») с вероятностью

$$P_B = 1 - P_n = P_o P_{\dot{a}} \left(1 - e^{-p \frac{2R^2 \dot{i}}{A^2}} \right) \quad (2.4)$$

С учетом возможного воздействия по элементу связи нескольких $|n|$ боеприпасов в течение рассматриваемого периода вероятность его выживания

$$P_B(y_i \Delta t) = \prod_{j=1}^n \left[1 - D_{\dot{a}_j} D_{\dot{a}_j} \left(1 - e^{-p \frac{2R^2 \dot{i}}{A^2}} \right) \right] \quad (2.5)$$

Вероятность выживания рассчитывается отдельно для обслуживающего персонала, зданий (сооружений) и используемой техники связи. В качестве интегральной оценки живучести элемента: принимается минимальное

значение, которое в условиях ядерного воздействия определяется в основном сохранением обслуживающего персонала, т. е.

$$P_B(\Xi, \Delta t) = \min\{P_{b.o.n.}, P_{v.m.e.}, P_{B.\dot{\alpha}d.}\} \quad (2.6)$$

Так, если вероятность выживания составляет: обслуживающего персонала с учетом здания, в котором расположен элемент связи, $P_{b.o.n.,зд} = 0,5$, техники связи $P_{e.m.c} = 0,8$, то для всего элемента связи принимаем $P_e(\Xi) = 0,5$.

Площадной элемент системы связи может представлять собой несколько точечных. В этом случае при оценке его живучести вычисляются по изложенной выше методике вероятности выживания его составных частей; затем они анализируются и оценивается состояние элемента в целом. Если же площадной элемент не : может быть разделен на взаимонезависимые (по живучести) части, то его состояние определяется следующим образом. Если центр взрыва совпадает с центром площадного объекта, то вероятность попадания в него определяется из выражения

$$P_{i.i.e.} = \hat{O}\left(\frac{\dot{a}}{2\dot{A}\tilde{\sigma}}\right) \hat{O}\left(\frac{b}{2\dot{A}y}\right) \quad (2.7)$$

где Φ — приведенная функция Лапласа; a, b -размеры объекта, км; E_x, E_y - вероятные отклонения в направлении осей x, y (оси параллельны сторонам объекта). Если рассеивание круговое ($E_x = E_y$), то

$$P_{i.i.e.} = \hat{O}\left(\frac{\dot{a}}{2\dot{A}}\right) \hat{O}\left(\frac{b}{2\dot{A}}\right) \quad (2.8)$$

Относительный ущерб площадному объекту может определен из выражения

$$M = \frac{\overline{B \cdot \hat{A}y}}{\overline{\hat{O} \cdot \hat{O}y}} = \hat{I} \hat{O} \hat{I} \hat{O} \quad (2.9)$$

где B_x, B_y —линейные размеры очага поражения объекта в направлении осей x, y ; C_x, C_y — линейные размеры объекта; M_x, M_y — относительные длины перекрытия контура объекта и контура очага поражения в направлениях осей x, y .

Формулы для определения M_x и M_y довольно громоздки, поэтому задачи по определению степени поражения площадных целей решаются с помощью ЭВМ или специальных таблиц, графиков. Для приближенных расчетов математического ожидания относительного ущерба площадного элемента, если его размеры много больше радиуса поражения и рассеивание является круговым, что справедливо для ядерного оружия и бомбометания, можно использовать выражение

$$\hat{I} = \left(\frac{R_o}{R_c} \right)^2 \left(1 - \hat{a} \left(\frac{R_o - R_c}{A} \right) \right)^2 \quad (2.10)$$

где R_n - радиус круга, равновеликого площади объекта.

Безусловная вероятность выживания площадного элемента связи приближенно может быть определена из выражения

$$P_B(\Xi_{inn}, \Delta t) = 1 - P_{oi} P_{di} \left(\frac{S_{ni}}{S_{yi}} \right) \quad (2.11)$$

где S_{ni} - площадь поражения, определяемая как $S_{ni} = nR_{ni}^2$; S_{yi} - площадь элемента связи, определяемая как $S_{yi} = \pi R_{ci}^2$. Отсюда выражение (10.16) принимает вид

$$P_B(\Theta_{\text{inn}}, \Delta t) = 1 - P_{\text{бi}} P_{\text{дi}} \left(\frac{R_m^2}{R_{yi}^2} \right) \quad (2.12)$$

Указанное выражение справедливо для случая, когда $S_{ni} < S_{ci}$ или $R_n > R_{ui}$. Если $S_{ni} > S_{ci}$ (или $R_{ni} > R_{ci}$ и площадь поражения полностью перекрывает площадь объекта, то считается, что безусловная вероятность выживания для данного компонента (обслуживающего персонала, здания или техники связи) элемента связи равна нулю и ущерб составляет 100%. В общем случае величина ущерба зависит от удаления центра (эпицентра) ядерного взрыва от центра элемента и соотношения между радиусами поражения и собственно элемента.

В зависимости от степени поражения составных частей или всего элемента в целом, а также от математического ожидания ущерба площадной элемент может оцениваться несколькими состояниями функционирования, «возможностями по обеспечению связи». Следует установить «минимальный объем функционирования», который необходимо обеспечивать в любых условиях эксплуатации. Это может быть или среднее снижение производительности элемента по объему передаваемой (принимаемой) информации, или число обеспечиваемых направлений связи, или «доля сохраняемых возможностей»; - или другие принятые показатели. При этом с течением времени принятые пороговые «минимальные» значения ущерба и соответствующие им оценки могут изменяться.

Рассмотренные методические приемы применяются в тех случаях, когда элемент связи является целью или размещается на территории объекта, который может быть такой целью ядерного воздействия. Между тем большинство элементов систем; связи ядерными целями, по всей вероятности, не будет. И тем не менее многие из них могут подвергнуться ядерному воздействию вследствие нахождения вблизи объектов, по которым планируется нанесение ядерных ударов. Такое попутное поражение элемента связи является косвенным. В принципе оно может определяться через величину возможного отклонения E . Если обозначить расстояние между центром объекта и центром взрыва через

индекс d , то условно можно считать - объект является целью, когда $d < 4E$, и не является целью, когда $d > 4E$.

Расчеты косвенного поражения элементов систем связи ведутся по всем факторам ядерного взрыва для всех компонентов элемента, в том числе и по радиоактивному заражению местности для обслуживающего персонала объекта. Методика этих расчетов зависит от постановок задач.

Наиболее характерны две формулировки задач определения косвенного поражения элемента связи, различающиеся исходными данными: в первой из них известны цели возможных ударов вблизи объекта связи, прогнозируемые виды, мощности и центры ядерных взрывов; во второй — только цели, прогнозируемые виды и мощности ядерных взрывов по обширной территории (зоне, району), на которой находятся также один или несколько элементов системы связи.

Расчет косвенного поражения элемента системы связи в первой постановке производится исходя из сравнения расстояний от центра каждого ближнего ядерного взрыва до центра элемента d . При этом выбираются данные, соответствующие конкретным условиям расположения

обслуживающего персонала, степени защиты зданий и техники связи на элементе. Если $d > R_n$, то считается, что данный компонент элемента или элемент в целом не поражен (не поврежден). Если $d < R_n$, то возможно поражение (повреждение) компонента элемента или элемента в целом с вероятностью, а при известных значениях R_u , R_n , d может быть определен нанесенный элементу (компоненту) связи ущерб в процентах.

При втором варианте постановки задачи вероятность косвенного поражения (повреждения) элемента связи в течение непродолжительного времени определяется с помощью соотношения

$$P_{n(\text{э})}^{(k)} = \frac{\sum_{a=1}^n \alpha S_{na}}{K_p S_p} = \frac{\sum_{a=1}^n \alpha \pi R_{na}^2}{K_p S_p} \quad (2.13)$$

где $a=1, 2, 3, \dots, n$ — число ядерных взрывов K -го вида i -й мощности в рассматриваемом районе (зоне). При этом учитываются только такие взрывы, центры которых не попадают в соседние площади поражения, т. е. площади поражения взрывов взаимно не пересекаются, отсюда и ограничение по времени. Если это выполнить затруднительно, то учитывается тот взрыв, радиус поражения которого больше, а из всего рассматриваемого числа ядерных взрывов в данном районе (зоне) снимается порядка 10—15% ядерных боеприпасов меньшей мощности, полагая, что площади поражения от них входят в площади поражения взрывов большей мощности; S_n — площадь поражения от ядерного взрыва K -го вида мощности для элемента системы связи или его компонента при определенной степени защиты и определенных условиях расположения людей и техники связи; R_n — радиус поражения элемента или отдельного его компонента, определяемый по таблицам, номограммам; K_p — коэффициент использования района (зоны) объектами народного хозяйства. Обычно $K_p \ll 1$; S_p — общая площадь района (зоны).

Если известны прогнозируемые значения $P_{\dot{a}a}$ $P_{\dot{a}a}$ Для каждого ядерного взрыва в течение Δt в данном районе (зоне), то вероятность косвенного поражения элемента системы связи может быть определена с помощью соотношения

$$D_{\dot{a}a}^{(k)}(\dot{y}, \Delta t) \sum_{a=1} P_{\dot{a}a} P_{\dot{a}a} S_{na} / K_p S_p \quad (2.14)$$

Вероятности косвенного поражения элемента связи могут быть рассчитаны на ЭВМ для двух рассмотренных вариантов задач.

Косвенное поражение обслуживающий персонал элемента системы связи может получить от радиоактивного заражения местности наземными ядерными взрывами, произведенными на значительном удалении от объекта. Так, при наземном ядерном взрыве мощностью 10 Мт уровень радиации в 3000 Р/ч распространяется до 120 км от места взрыва, в 1000 Р/ч — до 190 км, в 500 Р/ч — на 260 км.

Расчет полученных доз радиации обслуживающим персоналом ведется по формуле

$$D = \frac{P_{cp}}{K_{\text{инэ}}} t \quad (2.15)$$

$$P_{cp} = \frac{P_H + P_K}{2} \quad (2.16)$$

где P_{cp} — средний уровень радиации за время пребывания в зоне, определяемый из выражения

P_H — уровень радиации в начале работы в районе (зоне), Р/ч;
 P_K — уровень радиации в конце работы, Р/ч; $K_{осл}$ — коэффициент ослабления доз радиации средствами защиты.

Для оценки радиационной обстановки применяется дозиметрическая линейка. С её помощью определяются зоны заражения с различной интенсивностью излучения, полученная доза, допустимое время пребывания ремонтной бригады в зоне и другие данные, необходимые для организации работ на элементе связи в условиях радиоактивного заражения. Следует иметь в виду, что на величину дозы излучения существенное влияние оказывают рельеф местности, время года, суток и другие условия. В городах из-за наличия большого числа построек суммарная доза излучения может быть на 25—30% ниже, чем на открытой местности.

Важным элементом системы связи являются магистральные кабельные линии связи. Следует полагать, что непосредственное поражение их ядерными зарядами не планируется и повреждаться они могут только вследствие прохождения вблизи возможных целей воздействия. Считается, что если воздействию ядерного оружия подвергся элемент связи, к которому

подходят кабельные линии связи, то в зоне поражения его, в том числе смежного здания на объекте, кабельные линии выходят из строя из-за ЭМИ и

волны сжатия в грунте, а на участке от данного элемента связи до ближайшего необслуживаемого усилительного пункта — из-за ЭМИ. На этом участке возможны многочисленные пробои изоляции и без замены кабеля невозможна последующая эксплуатация этого участка линии.

Помимо ядерного воздействия кабельные линии связи могут быть повреждены токами короткого замыкания высоковольтных линий или эл. ж. д. и грозowymi разрядами. Вероятность поражения линии связи при аварии на ВЛ или эл. ж. д. зависит от длины их параллельного следования, кратчайшего взаимного удаления, мест возникновения токов короткого замыкания, их величины и длительности, времени года и значения a вдоль трассы линии, типа кабеля связи и других условия. При невозможности выполнить требования по разнесу трасс линий и сокращению длины их параллельного пробега следует принимать специальные меры защиты, предусмотренные действующими руководствами.

2.2. Пути повышения живучести элементов систем и сетей связи

Живучесть систем и сетей связи может быть повышена осуществлением комплекса организационных и инженерно-технических мероприятий. К основным организационным мероприятиям относятся:

- введение в систему структурной и функциональной избыточности;
- повышение удельного веса в системе более устойчивых линейных средств;
- реализация принципа интеграции существующих систем различных ведомств;
- создание возможности обхода крупных промышленных центров;
- повышение коэффициентов структурной живучести элементов системы;
- создание мобильных резервов сил и средств связи.

Структурная и функциональная избыточность системы может быть создана путем увеличения числа сетевых узлов и магистралей. При этом на каждом направлении связи следует использовать не менее трех разнородных средств связи. Повышение живучести системы может быть достигнуто также за счет пространственного разнесения используемых направлений связи из однотипных средств связи.

Интеграция существующих систем связи различных ведомств создает возможность использования, различных путей для организации обходных связей в особо сложных условиях, т. е. повышает структурную избыточность системы. Особое внимание должно быть обращено на возможность сопряжения различных систем связи, так как в отдельных случаях они могут оказаться взаимно несовместимыми.

Повышение живучести системы связи обеспечивается путем оборудования на подходе к крупным промышленным центрам усилительных пунктов, которые создают возможность транзита магистральных связей без ввода их в пункт, который может быть подвергнут ядерному воздействию. Для организации транзита могут быть использованы мобильные средства тропосферной или радиорелейной связи. Заблаговременное создание и рассредоточенное размещение мобильных резервов сил и средств связи в различных районах, в том числе вблизи крупных центров, позволит восполнить возможные потери элементов и обеспечит более быстрое восстановление нарушенной системы связи.

Наряду с этим должны осуществляться и инженерно-технические мероприятия, к которым прежде всего относятся: повышение степени защиты зданий (сооружений) к воздействию поражающих факторов ядерного оружия; защита от пожаров и других вторичных факторов поражения; мероприятия по защите от ЭМИ, грозовых разрядов и опасного влияния ВЛ и эл. ж. д.

Мы уже подчеркивали, что живучесть элемента связи определяется сохранением обслуживающего персонала. Особое внимание обращается на

обеспечение его защиты в условиях современной войны. С этой целью элемент связи должен располагаться в зданиях с повышенной стойкостью к воздействию всех поражающих факторов, чтобы обеспечить нормальные условия обслуживающему персоналу и используемой технике связи. Так, если повысить устойчивость здания элемента связи с 0,1 до 0,2 кгс/см², т. е. только на 0,1 кгс/см², радиус поражения от наземного ядерного взрыва мощностью в 1 Мт уменьшится в 1,6 раза, а при воздушном — в 1,9 раза. По площади поражения это соответствует уменьшению в 2,5 и 3,0 раза соответственно. А если стойкость повысить еще больше?

Для защиты людей от воздействия поражающих факторов ядерного взрыва необходимо использовать различные защищенные сооружения, в том числе подземные. Степень защиты людей определяется стойкостью сооружения, используемого для оборудования элемента связи. Аналогичную стойкость к воздействию поражающих факторов должна иметь и используемая техника связи. Применение различного рода укрытий и убежищ в значительной мере ослабит поражающее воздействие проникающей радиации, светового излучения и радиоактивного заражения местности. Так, даже обычный подвал обеспечивает ослабление дозы радиации от 40 до 400 раз, а защищенное убежище обеспечивает уменьшение в 800 раз и более.

Исходя из вышеизложенного элемент системы связи должен быть размещен в здании, имеющем повышенную стойкость к ударной волне, световому излучению, проникающей радиации и обеспечивать защиту от радиоактивного заражения местности. В помещении должны быть, оборудованы устройства для обеспечения людей воздухом, водой, запасами продуктов и другими условиями жизнедеятельности, а техника связи — автономным энергопитанием. Особое внимание должно быть обращено на обеспечение защиты людей в первые часы после ядерного воздействия, так как за первый час набирается до 55% предельной дозы излучения, в то время как за последующие три часа она возрастает только до 70%, далее рост ее

существенно замедляется, что объясняется существенным снижением излучения именно в первые часы.

Вблизи здания, антенных устройств и фидеров не должно быть посторонних предметов, которые под воздействием скоростного напора воздуха могут перемещаться и служить причиной повреждения здания или антенн. Чтобы предохранить элемент связи от пожара, от него должны быть удалены возможные источники вторичных факторов в виде резервуаров и емкостей с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями и газами, взрывчатыми веществами и другими горючими материалами. Элементы связи должны также быть расположены вдали от внешних источников вторичных факторов, к которым относятся химические и нефтеперерабатывающие заводы, промыслы, гидросооружения и другие возможные цели ядерного воздействия, и источники образования сплошных пожаров.

Для защиты от ЭМИ аппаратура связи должна быть оборудована на узле специальными устройствами типа грозозащиты, длина кабельных вводов должна быть минимальной, особенно в вертикальной плоскости. Аппаратура на микросхемах, полупроводниках должна быть размещена в экранированном помещении или специальном экранированном блоке для защиты ее от опасного воздействия электрического и магнитного полей ЭМИ. Особенно это касается аппаратуры с магнитной памятью.

Уменьшение опасного воздействия ЭМИ и грозовых разрядов по проводным линиям связи может быть обеспечено использованием специальных грозостойких кабелей или кабелей, обладающих меньшим сопротивлением экрана и большей импульсной электрической прочностью изоляции. При этом в местах оборудования муфт электрическая прочность изоляции жил должна быть не хуже, чем собственно на линии. Считается, что кабельная линия связи надежно защищена от ЭМИ и грозовых разрядов, если она способна противостоять току молнии до 100 кА [6].

Большой эффект для защиты от грозовых разрядов и в некоторой степени от ЭМИ дает применение тросов, прокладываемых над кабелем.

Снижение вероятности повреждения кабеля грозowymi разрядами и другими факторами достигается также выполнением следующих мероприятий трасса должна быть удалена от опушки леса в сторону поля на расстояние, при котором вероятность повреждения близка к нулю, т. е. быть в пределах $(1 - 1,5)I$, где I — средняя высота деревьев леса;

- кабель не следует прокладывать по дну ущелий и глубоких лощин, вблизи и параллельно руслам горных ручьев и рек;

- в поле прокладку кабеля производить на удалении не менее 25 м от отдельно стоящего высокого местного предмета (дерева, мачты и т. п.);

- не прокладывать кабель через антенные поля;

- пересечение трассы кабеля с ВЛ следует производить под прямым углом посередине пролета;

- выполнять рекомендации, изложенные в соответствующих руководствах по защите трасс кабельных линий связи от грозowych разрядов.

Для защиты кабеля связи от опасного влияния ВЛ при аварийном режиме на них следует строго соблюдать предусмотренные меры эксплуатационного обслуживания, в необходимых случаях ставить вопрос о переносе трассы или принятия мер защиты на ВЛ: ограничение времени действия тока короткого замыкания или ограничение несимметричного режима работы и другое.

При переводе питания эл. ж. д. с постоянного на переменный ток возникает необходимость удаления трассы связи от полотна дороги на такое расстояние, при котором в жилах кабеля и экране индуцированное напряжение будет иметь опасного характера. В зависимости от величины a и типа кабеля связи это удаление может составлять до 15 км для кабелей типа МКС или уменьшено за счет применения специальных кабелей, обладающих лучшим экранирующим эффектом, но дорогостоящих. Помимо этого на эл. ж. д. следует включать отсасывающие трансформаторы, которые являются эффективной мерой ограничения их опасного влияния. Кроме того, на кабельных линиях осуществляются следующие мероприятия: экранирование

внешних электромагнитных полей, т. е. применение кабелей, обладающих большим экранирующим эффектом; применение разрядников повышенной пропускной способности по току; использование редуцированных или разделительных трансформаторов; включение защитных контуров и фильтров и др.

Выполнение действующих правил и норм проектирования, строительства и эксплуатации по защите каналов, кабелей и аппаратуры связи от мешающих и опасных влияний ВЛ, эл. ж. д. и грозových разрядов позволит обеспечить нормальную работу сети проводной связи в мирных и военных условиях.

Из изложенного видно, что при проектировании систем связи нельзя не учитывать многочисленных факторов, которые могут нарушать работу или выводить из строя элементы системы связи как в мирное, так и особенно в военное время. Приведенные в главе данные и методические приемы по оценке живучести элементов систем связи с учетом основных поражающих факторов являются одной из первых попыток анализа и обобщения имеющихся по этим вопросам результатов исследований.

Введения. Средняя длина пути сообщений (СДПС) - важнейший эксплуатационный показатель сети. Чем СДПС меньше, тем сеть лучше, прежде всего, с точки зрения потребителя услуг связи. Чем меньше СДПС, тем меньше надо платить за услуги, меньше времени требуется на передачу данных.

Кроме того, из примеров линейной и звездообразной сетей известно, что относительная СПДС являются одновременно показателями их уязвимости. Под уязвимостью будем понимать долю потерь соединений, т.е. отношения числа прерванных соединений при вредном воздействии на сеть к общему числу соединений в нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) сети. Живучесть напротив, это доля действующих соединений, т.е. отношения числа выживших соединений общему числу соединений в НУЭ сети. В сумме уязвимость и живучесть равны единице.

Постановка задачи. Принимаем, что исследуемая сеть является полнодоступной (связь осуществляется между каждой парой узлов) и развивающейся, т.е. одна или несколько ее топологических характеристик получают положительное приращение. В процессе развития структура сети не меняется. Сеть остается однородной. Длина дуг одинакова, междуузловые потоки равны. Дуги, узлы сети могут находиться только в двух состояниях: есть или нет. Необходимо установить, как меняются средняя длина пути сообщения и уязвимость сетей разных структур в зависимости от их размера и числа радиальных линий.

Линейная сеть. В основе построения любых сетей лежит линейная сеть. В линейной полно доступной сети сумма длин путей между всеми парами узлов

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n-1} Dy = n \frac{(n^2 - 1)}{6} \quad (2.17)$$

где l - средняя длина дуги; n - размер (число узлов) сети. Число вариантов соединений пар узлов в НУЭ сети $y = n(n-1)/2$. Средняя длина пути сообщения

$$Dy = l(n+1)/3, \quad l = \text{const} \quad (2.18)$$

при постоянной длине дуг СДПС прямо пропорциональна одной трети размера сети .

Уязвимость линейной сети при разрыве одной дуги или средняя относительная длина пути

$$D(\beta) = D_{ij}/L_c = (n+1)/3(n-1), \quad (2.19)$$

где $L_c = l(n-1)$ - длина сети.

С увеличением размера линейной сети ее уязвимость при разрыве одной дуги уменьшается от 1 до $1/3$ в пределе (рис.2,1), а живучесть возрастает от 0 до $2/3$ в пределе при $n \rightarrow \infty$.

Звездообразная сеть. В основе построения радиально-узловых сетей лежат линейная и звездообразная сети. В последней сумма длин путей от центра до периферийных узлов составляет $l(n-1)$. Сумма длин путей от периферийного узла до всех остальных составит

Сумма длин путей между всеми парами узлов:

$$l+2/(n-2)=l(2n-3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n-1} Dy = 2(n-1)^2 \quad (2.20)$$

Средняя длина пути сообщений в звездообразной сети (рис. 2.1)

$$D_{ij}=2/(n-1)/n, \quad l=\text{const}; \quad \lim_{n \rightarrow \infty} D_{ij} = 2l. \quad (2.21)$$

С увеличением размера звездообразной сети СДПС возрастает, но не более чем до двух дуг $-2l$. Уязвимость звездообразной сети или средняя относительная длина пути $D(\beta) = D_{ij}/L_c=2/n$. С увеличением размера звездообразной сети ее уязвимость при разрыве одной дуги уменьшается, стремясь в пределе к 0, живучесть возрастает, стремясь в пределе к 1 (рис. 2.2).

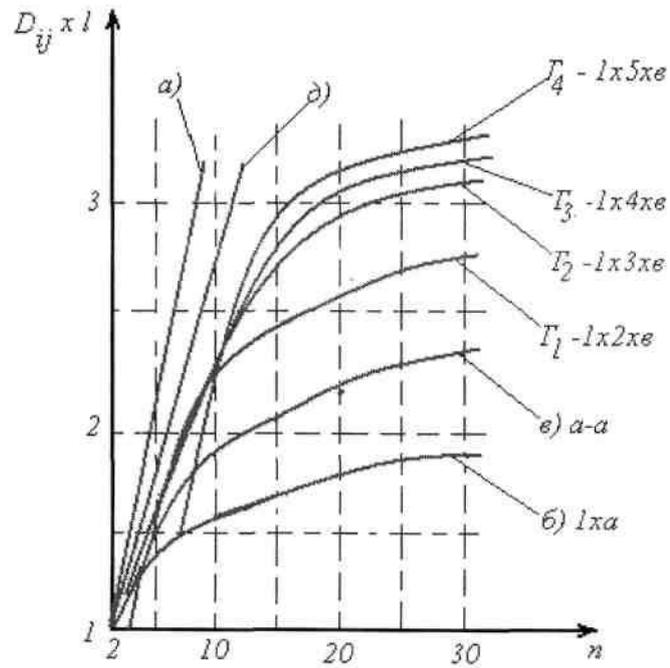


Рис 2.1. График средняя относительная пути

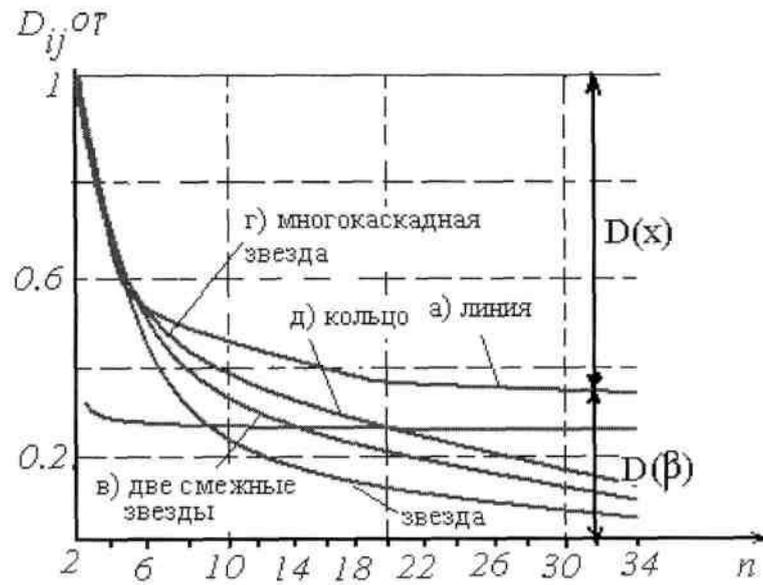


Рис 2.2. График звездобразной сети

Значения структуры сети

<i>Структура сети</i>	<i>Размер n</i>	L_c	Y	$\sum \sum D_y$	$D(\beta)$
1 x 2 x k	$2k+3$	$2l(k+1)$	$2(k+1)(2k+3)$	$4l(k+1)(3k+2)$	$D_i/2l(k+1)$
1 x 3 x k	$3k+4$	$3l(k+1)$	$3(k+1)(3k+4)$	$6l(k+1)(5k+3)$	$D_i/3l(k+1)$
1 x 4 x k	$4k+5$	$4l(k+1)$	$4(k+1)(4k+5)$	$8l(k+1)(7k+4)$	$D_i/4l(k+1)$
1 x 5 x k	$5k+6$	$5l(k+1)$	$5(k+1)(5k+6)$	$10l(k+1)(9k+5)$	$D_i/5l(k+1)$
.....
1 x g x k	$gk+g+1$	$gl(k+1)$	$g(k+1)(gk+g+3)$	$2lg(k+1)(2g-1)(k+g)$	$D_i/l(k+1)g$

Из ряда древовидных сетей одинакового размера наибольшей уязвимостью обладает линейная сеть, наименьшей - звездообразная. Однако в «звезде» все 100% соединений проходят через центр. Таким образом, работоспособность всей сети зависит от вероятности поражения центра.

2.3. Живучесть транспортных телекоммуникационных сетей: основные проблемы и способы решения

2.3.1. Основные причины и факторы, вызывающие повреждения или разрушение элементов транспортных телекоммуникационных сетей

Повреждения или разрушение элементов транспортных телекоммуникационных сетей происходит от воздействия факторов естественного и искусственного происхождения. К фактором естественного

происхождения относятся землетрясения, тайфуны, цунами, наводнения, оползни и другие стихийные явления, предсказать которое задолго до их начала настоящее время не представляется возможным. Невозможно также прогнозировать ущерб, причиняемый ими элементам систем связи. Возможен некоторый прогноз только по грозовым явлениям. Факторы искусственного происхождения, имеющие место при аварии на высоковольтной линии, а также при ведении военных действий, в определенной мере поддаются прогнозированию времени их начала и возможного ущерба элементам транспортной телекоммуникационной сети. Возможно сочетание факторов, когда искусственный фактор вызывает естественный. Например, наводнение, лавины, камнепады и другие естественные явления могут быть вызваны применением современного мощного оружие.

Среди факторов искусственного происхождения важное место занимают так называемые влияющие системы - электрические железные дороги, мощные радиостанции, высоковольтные линии и др. Они создают большое разнообразие гармоник, которые индуцируют в линиях телекоммуникации помехи. Электрические железные дороги (Эл. ж. д.) постоянного и переменного тока создают гармоники в диапазоне 0,150-100 кГц, причем в диапазоне телефонного и радиовещательного каналов НЧ гармоники индуцируют значительные помехи, а в диапазоне 20-30 кГц имеет место максимум, достигающий 24 дБ. Радиостанции, работающие в диапазонах СДВ, ДВ, СВ и КВ при мощности передатчиков от десятков до несколько тысяч киловатт, создают в каналах связи помехи, превышающие нормы в несколько раз. Высоковольтные линии (ВЛ) постоянного и— переменного тока при нормальном режиме работы оказывают мешающее влияние на отдельные каналы на отдельные каналы тональной и высокой частот. В целом мешающее влияние не нарушает работу всей телекоммуникационной сети, а сказывается только на работе отдельных ее каналов и их групп на некоторых направлениях связи, и если приняты

соответствующие меры защиты как на влияющих, так и на подверженных влиянию системах (линиях) телекоммуникации, то связь не нарушается.

Работа телекоммуникационной сети в отдельных направлениях может нарушаться при авариях на ВЛ, переводе питания тяговой сети эл. ж. д (электрофицированные железные дороги). С постоянного на переменный ток, а также при грозовых разрядах. В этих случаях под воздействием внешних электромагнитных полей или растекающихся в земле токов в жилах и металлических покровах кабелей (экранах) связи индуцируются напряжения и токи, которые могут превысить электрическую прочность изоляции жил кабеля и включенной в его цепь аппаратуры.

На ВЛ аварийный режим возникает в результате обрыва одного или двух проводов и падения их на землю или повреждения изоляции. При этом на продолжительное время возникает ток короткого замыкания. Такие аварии происходят как в обычных условиях эксплуатации, так и в период войны. Аналогичное положение может быть и эл. ж. д. При обрыве проводов или случайном заземлении тяговой сети.

При грозовых разрядах наиболее опасен разряд молнии вблизи линии телекоммуникации. При этом кабель повреждается от места разряда на расстоянии от десятков метров до десятков километров. Если учесть, что ежедневным над земным шаром бушует около 45 тыс. гроз, при которых около 8 млн. раз сверкают молнии, то можно понять, какой ущерб может быть нанесен телекоммуникационным сетям без принятия мер защиты. Число и масштаб повреждений линии телекоммуникаций зависят от интенсивности и продолжительности грозовой деятельности в районе трассы, импульсной электрической прочности изоляции жил кабеля, сопротивления экрана и конструкции его внешнего покрова (шланга), геологического строения рельефа местности вдоль трассы, удельной проводимости почвы (а) по длине линии, времени года и метеорологических факторов на трассе, наличия вблизи линии местных предметов и т.д.

В зависимости от величины « a » ток в канале молнии может составлять от единиц до несколько сотен килоампер. (Наибольший зарегистрированный ток канала молнии составляет 220 кА.) при этом в одном канале может быть от одного до трех следующих друг за другом импульсов.

В целом интенсивность грозовой деятельности оценивается продолжительностью ее в часах в году. Данные о грозовой деятельности и о сроках ее в конкретном районе при проектировании трасс линий телекоммуникации можно получить в органах агентства связи и информатизации или гидрометеослужбы соответствующего вилаята или тумана.

Наиболее разрушительное и опасное воздействие на систему телекоммуникации может оказать современное мощное оружие, в том ядерное. Известно, что основными поражающими факторами ядерного взрыва являются: воздушная ударная волна (избыточное давление, скоростное напор, волна сжатия в грунте); световое излучение; проникающая радиация и радиоактивное заражение местности, воды и воздушного пространства; электромагнитный импульс. Рассмотрим коротко воздействие их на обслуживающий персонал элементов транспортной телекоммуникационной сети, здания (сооружения).

Поражающее действие ударной волны занимает промежуток времени порядка нескольких сотен миллисекунд. Однако помимо непосредственного поражения избыточным давлением и скоростным напором воздуха она создает возможность косвенного поражения людей, наносимого летящими с большой скорости предметами в виде обломков зданий, вызванных с корнем деревьев, камней осколков стекол и т. п. При этом возможны поражения: легкие, средние, тяжелые и крайне тяжелые.

Световое излучение ядерного взрыва по времени действия составляет от долей секунды до нескольких десятков секунд. Оно вызывает ожоги открытых участков кожи человека и поражение незащищенных глаз (слепота), особенно в ночное время суток. Рассматриваются три степени

поражения (ожога кожи): первая, вторая и третья. Тяжесть поражения зависит также от размеров обожженных участков тела.

Проникающая радиация оказывает вредное биологическое действие на живые клетки организма. Она действует в первые десятки секунд (до 30 с) с момента взрыва и представляет поток гамма-лучей и нейтронов, излучаемых из зоны взрыва. Поражающее действие зависит от величины полученной за это облучения, определяемой условиями расположения обслуживающего персонала, а также видом и мощностью ядерного взрыва.

Радиоактивное заражение местности, воды и воздушного пространства возникает в результате выпадения радиоактивных продуктов из облака ядерного взрыва, которое ветром может распространяться на значительное удаление от места взрыва, (до нескольких сотен километров). Эти вещества излучают альфа, бета и гамма-лучи. Наиболее сильный характер заражения местности носит при наземном взрыве. Характеризуется уровнем радиации в рентген/часах (Р/ч). Безопасной является доза однократного облучения в течение четырех суток до 50 Р или систематического облучения до 100 Р в течение 10-30 дней. Дозы однократного облучения свыше 100 Р вызывают лучевую болезнь. Различают три степени болезни: легкую, среднюю и тяжелую.

Следует отметить, что обслуживающий персонал элемента телекоммуникационной сети может быть выведен из строя радиоактивным заражением местности, хотя ядерный взрыв произведен на удалении от него до 100 км.

В качестве критериев работоспособности обслуживающего персонала принято: по ударной волне - не более легкого поражения; по световому излучению - получение ожогов кожи не более первой степени при импульсе до 4 кал/см²; по проникающей радиации - получение дозы облучения не более 100 Р; по радиоактивному заражению местности - получение общей дозы облучения не более 200 Р. При более тяжелом поражении хотя бы по одному из факторов следует считать, что обслуживающий персонал на элемента

телекоммуникационной сети выведен из строя и требуется его замена, если собственно сооружение и техника связи сохранились. Радиусы опасного воздействия поражающих факторов ядерного взрыва определяются по соответствующим таблицам или номограммам.

Здания (сооружения) могут получать полные, сильные, средние и слабые разрушения.

При полном и сильном разрушениях повторное использование зданий невозможно и весь обслуживающий персонал в них полностью погибает, а техника телекоммуникационной сети выходит из строя.

При среднем разрушении восстановление возможно. Однако обслуживающей персонал находящийся в здании, полностью поражен, а

техника телекоммуникационной сети выведена из строя. Обслуживающий персонал, находившийся в подвале здания, может сохраниться и после разборки завалов над входами быть использован по назначению, если полученная доза облучения меньше 100 Р и психологическое состояние его нормальное.

Слабое разрушение можно ликвидировать силами обслуживающего персонала. Однако при этом люди могут получить легкие травмы и после оказания им медицинской помощи быть использованы по назначению, а техника связи после устранения на месте незначительных повреждений может быть применена для восстановления связи. Под воздействием светового излучения и ударной волны ядерного взрыва в населенных пунктах, лесах, степях, горах возникают отдельные, массовые и сплошные пожары (огневые штормы), в лесах и городах помимо этого образуются завалы, а в горных местностях возникают массовые лавины, оползни, камнепады и образуются запруды. Все это значительно затрудняет ведение работ по устранению последствий применения ядерного оружия, особенно при наземных ядерных взрывах, характерных сильным заражением местности радиоактивными веществами.

На здания (сооружения) проникающая радиация и радиоактивное заражение местности поражающего действия не оказывают, однако металлические каркасы аппаратуры становятся источниками радиоактивного излучения, что оказывает вредное воздействие на находящихся вблизи людей, а также приводит к изменению параметров элементов и нарушению работоспособности аппаратуры в целом. Особенно это относится к аппаратуре с использованием современной элементной баз, полупроводниковых приборов, некоторых типов конденсаторов, резисторов и газонаполненных приборов. Под действием проникающей радиации темнеют стекла оптических приборов, увеличивается затухание Волоконно-оптических линий, а фотоматериалы, находящиеся светонепроницаемой упаковке, засвечиваются.

Элементы телекоммуникационной транспортной сети типа кабельной линии или антенного фидера, а также электронная аппаратура и устройства с магнитной памятью могут быть повреждены электромагнитным импульсом (ЭМИ) ядерного взрыва, хотя собственно здание (сооружение, укрытие) и обслуживающий персонал элемента телекоммуникационной сети полностью сохранились. В отличие от разрядов молнии, токи ЭМИ проникают в кабель не в одной точке, а сквозь поверхность больших размеров по длине линии. В последующем их действие аналогично протеканию тока молнии в кабеле. Ток, протекающий по экрану, индуцирует напряжение между жилами и экраном, и если величина этого напряжения превышает электрическую прочность изоляции, то происходит ее нарушение. Распространяясь вдоль линии телекоммуникации это напряжение может привести к выводу из строя (повреждению) оконечной или промежуточной аппаратуры, включенной в цепи кабеля или антенного фидера, так как прочность изоляции аппаратуры на порядок ниже.

Опасному воздействию ЭМИ подвержены все полупроводниковые, газоразрядные, вакуумные приборы, конденсаторы и некоторые типы резисторов. Транзисторы могут быть повреждены сравнительно небольшой

волной тока, а устройства магнитной памяти - импульсами магнитного поля, создаваемого ЭМИ. В отдельных случаях радиус поражения от ЭМИ может превышать радиус поражения кабеля, фидера или аппаратуры, установленной в сооружении, от ударной волны, что наиболее характерно для ядерных боеприпасов малой мощности.

Территория, на которой под воздействием поражающих факторов возникают разрушения зданий и поражения людей, называется очагом ядерного поражения. Условно она делится на четыре зоны. Площадь поражения z' -й зоны условно принимается за площадь круга и вычисляется по формуле

$$S_i = \pi R_{ii}^2 \quad (2.22)$$

где R_{ni} - радиус избыточных давлений z' -й зоны, определяемый для рассматриваемого боеприпаса.

Можно считать, что незащищенный элемент телекоммуникационной сети, попавший в очаг поражения, сохраняется, если он оказался в четвертой зоне ($\Delta p_f < 0,2$ кгс/см), а обслуживающий персонал сохраняет работоспособность, если он находился в убежищах даже в третьей зоне ($\Delta p_f < 0,3$ кгс/см²).

2.3.2. Различие понятий и количественных характеристик живучести и надежности транспортных телекоммуникационных сетей

Очевидно, что если элементом сети связи являются станция, устройство или линия, при функционировании которых можно четко сформулировать понятие отказа, то в качестве показателей их надежности следует применять закрепленные ГОСТ [8] технические показатели надежности. Вместе с тем среди элементов телекоммуникационных сетей

есть и такие, что двоичная система оценки (Да - Нет) состояния их работоспособности явно недостаточна. К ним относятся крупные узлы, центры, пункты связи и другие элементы. Нет нужды доказывать, что было бы нерационально считать узел связи или его элемент, например мультиплексор отказавшим, если из-за отказа его отдельных устройств нарушена часть обеспечиваемых связей. По аналогии с многополюсными системами (МС) состояние работоспособности таких элементов следует определять многоуровневой мерой. Соответственно и понятие их надежности, и показатели целесообразно иметь аналогичными тем, которые рекомендуются для МС, а именно: под надежностью элемента телекоммуникационной сети, состояние работоспособности которого оценивается многоуровневой мерой, подразумевается его свойство, обусловленное эксплуатационно-технической надежностью его компонентов, структурой, качеством управления и специальными мерами выполнять заданные функции в установленном объеме по обеспечению связи.

Из определения следует, что надежность сложных элементов телекоммуникационных сетей зависит не только от устойчивости работы входящих в них аппаратуры и технических комплексов, но также и от структуры элемента, наличия в нем необходимой избыточности, технического уровня системы управления - системы контроля, выработки и реализации решений по восстановлению связей при отказах аппаратуры элемента. Под специальными мерами повышения надежности элемента предполагаются такие, как создание регламентно - ремонтной службы, выделение резерва средств и т.п.

С учетом этих замечаний в качестве показателей надежности таких элементов телекоммуникационных сетей целесообразно принять математическое ожидание или среднее значение сохраняемой доли своих возможностей по обеспечению связи в произвольный момент интересующего периода времени в заданных условиях эксплуатации. Так, если телефонная сеть общего пользования при исправном состоянии всего ее оборудования

способна обеспечивать совместно с другими элементами узла и системы передачи связей, а реально из-за отказов техники период в среднем n_p связей, то её надёжность в произвольный момент данного периода равна

$$H = n_p / n_o \quad (2.23)$$

Для большей определенности оценки наряду со средним значением сохраняющей доли возможностей целесообразно вычислять также среднеквадратическое отклонение или коэффициент вариации этой величины.

В отличие от показателей надежности МС, здесь мы не можем принимать в качестве критерия надежности элемента «сохраняемые связи», поскольку каждая из них обычно обеспечивается не одним, а несколькими элементами. Разумеется, при практической оценке надежности того или иного элемента системы понятие «возможности элемента по обеспечению связи» должно конкретизироваться, исходя из его роли в системе и структурно-функциональной схемы. В одних случаях решающим может быть сохранение исправными оконечных устройств, в других - каналообразующих средств и т.п. Отметим также ту особенность, что необходимая надежность элемента («доля сохраняемых возможностей») при разработке системы не задается извне, что характерно для МС, а вычисляется как производная величина, вытекающая из заданных показателей надежности телекоммуникационной сети.

Таковы понятия и показатели надежности элементов телекоммуникационной сети. А что следует понимать под их живучестью и какой количественной мерой ее оценивать?

В параграфе 2.1. было показано, что как стихийные факторы, так и преднамеренные поражающие воздействия на элементы телекоммуникационные сети приводят если не к полному к их разрушению, то выводят из строя на длительное время. Одним воздействием, например

землетрясением или ядерным взрывом, может быть поражен весь даже сложный элемент любой другой объект. Отсюда следует, что живучесть элемента телекоммуникационной сети это её способность выполнять свои функции в заданном минимальном объеме в условиях воздействия на ней стихийный или искусственных факторов. Обращает на себя внимание и то, что в требованиях по живучести элемента телекоммуникационной сети необходимо указывать «минимальный» объем её функций («возможностей по обеспечению связи»), являющиеся критерием его работоспособности. Количественной мерой живучести элемента является вероятность его выживания, т. е. вероятность того что в случае воздействия по нему соответствующего поражающего фактора он сохранит работоспособность. Из приведенных определений следует, что вероятность выживания элемента может быть как условной, так и безусловной.

Условной она будет в том случае, когда вычисляется в предположении, что воздействие поражающего фактора состоялось, т.е.

$$P_B(\Theta_i)y = P[U_p(\Theta_i) > U_z(\Theta_i)] \quad (2.24)$$

где $U_p(\Theta_i)$, $U_z(\Theta_i)$ - сохранившийся и минимальный заданный уровни работоспособности элемента соответственно.

Безусловная вероятность выживания элемента телекоммуникационной сети характеризует ее живучесть в течение определенного периода

$$P_B(\Theta_i, \Delta t) = P_{ПВ}(\Theta_i, \Delta t) P_B(\Theta_i)y, \quad (2.25)$$

где $P_{ПВ}(\Theta_i, \Delta t)$ -вероятность того, что в течение Δt элемент подвергнется предполагаемому поражающему воздействию.

Если поражающий фактор, например гроза, приводит к частичному повреждению узла связи или его элемента, то в качестве показателя его

живучести целесообразно применять среднее значение или математическое ожидание доли сохраняемых возможностей узла связи (элемента) по аналогии с надежностью. В качестве показателя только структурной живучести сложного элемента телекоммуникационной сети без учета его степени защиты целесообразно применять коэффициент относительной живучести Δt :

$$K_{ж.э} = n_{\min} / N_э \quad (2.26)$$

Где n_{\min} -минимальное число структурных частей элемента, повреждение которых приводит к полному отказу элемента; $N_э$ - общее число структурных частей элемента.

Как видим, этот показатель достаточно наглядно характеризует чувствительность элемента к отказам его составных частей.

Важным показателем живучести элемента транспортной телекоммуникационной сети является также длительность его восстановления до заданного минимального уровня. Она может выражаться средним временем с допустимыми отклонениями или функцией его распределения [9].

2.4. Пути повышения живучести элементов транспортных телекоммуникационных сетей

Живучесть систем и сетей телекоммуникаций может быть повышена осуществлением комплекса организационных и инженерно-технических мероприятий. К основным организационным мероприятиям относятся:

- введение в систему структурной и функциональной избыточности;
- повышение удельного веса в системе более устойчивых линейных средств;

-реализация принципа интеграции существующих систем телекоммуникаций различных ведомств;

-создание возможности обхода крупных промышленных центров; - повышение коэффициентов структурной живучести элементов системы и сети телекоммуникаций; -создание мобильных резервов сил и средств телекоммуникаций;

Структурная и функциональная избыточность телекоммуникационной сети может быть создана путем увеличения числа сетевых узлов и магистралей при этом на каждом направлении связи следует использовать не менее трех разнородных средств телекоммуникаций. Повышение живучести телекоммуникационной сети может быть достигнуто также за счет пространственного разноса используемых направлений связи из однотипных средств телекоммуникаций.

Интеграция существующих систем и сетей телекоммуникаций создает возможность использования различных путей для организации обходных связей в особо сложных условиях, т.е. повышает структурную избыточность системы. Особое внимание должно быть обращено на возможность сопряжения различных систем телекоммуникаций, так как в отдельных случаях они могут оказаться взаимно несовместимыми.

Повышение живучести транспортных телекоммуникационных сетей обеспечивается путем оборудования на подходе к крупным промышленным центрам мультиплексоров ввода-вывода, которые создают возможность транзита магистральных связей без ввода их в пункт, который может быть подвергнут ядерному воздействию. Для организации транзита могут быть использованы мобильные системы связи или радиорелейной связи. Заблаговременное создание и рассредоточенное размещение мобильных резервов сил и средств связи в различных районах, в том числе вблизи крупных центров, позволит восполнить возможные потери элементов и обеспечит более быстрое восстановление нарушенной системы связи.

Наряду с этим должны осуществляться и инженерно-технические мероприятия, к которым прежде всего относятся: повышение степени защиты зданий (сооружений) к воздействию поражающих факторов ядерного оружия; защита от пожаров и других вторичных факторов поражения; мероприятия по защите от ЭМИ, грозových разрядов ВЛ и эл.ж.д.

Мы уже подчеркивали, что живучесть элемента телекоммуникационной сети определяется сохранением обслуживающего персонала. Особое внимание обращается на обеспечение его защиты в условиях современной войны. С этой целью элемент телекоммуникационной сети должен располагаться в зданиях с повышенной стойкостью к воздействию всех поражающих факторов, чтобы обеспечить нормальные условия обслуживающему персоналу и используемой технологии телекоммуникации. Так, если повысить устойчивость здания элемента телекоммуникационной сети с 0,1 до 0,2 кгс/см², т.е. только на 0,1 кгс/см², радиус поражения от наземного ядерного взрыва мощностью в 1 Мт уменьшится в 1,6 раза, а при воздушном в 1,9 раза. По площади поражения это соответствует уменьшению в 2,5 и 3,6 раза соответственно. А если стойкость повысить еще больше?! [43]

Для защиты людей от воздействия поражающих факторов ядерного взрыва необходимо использовать различные защищенные сооружения, в том числе подземные. Степень защиты людей определяется стойкостью сооружения, используемого для оборудования элемента связи. Аналогичную стойкость к воздействию поражающих факторов должно иметь и используемая техника связи. Применение различного рода укрытий и убежищ в значительной мере ослабит поражающее воздействие проникающей радиации, светового излучения и радиоактивного заражения местности. Так, даже обычный подвал обеспечивает ослабление дозы радиации от 40 до 400 раз, а защищенное убежище обеспечивает уменьшение в 800 раз и более.

Исходя из вышеизложенного элемент телекоммуникационной сети должен быть размещен в здании, имеющем повышенную стойкость к

ударной волне, световому излучению, проникающей радиации и обеспечивать защиту от радиоактивному заражению местности. В помещении должны быть оборудованы устройства для обеспечения людей воздухом, водой, запасами продуктов и другими условиями жизнедеятельности, а техника и технология связи -автономным энергопитанием. Особое внимание должно быть обращено на обеспечение защиты людей в первые часы ядерного воздействие, так как за первый час набирается до 55% предельной дозы излучения, в то время как за последующие три часа она возрастает только до 70%, далее рост ее существенно замедляется, что объясняется существенным снижением излучения именно в первые часы.

Вблизи здания, антенных устройств и фидеров не должно быть посторонних предметов, которые под воздействием скоростного напора воздуха могут перемещаться и служить причиной повреждения здания или антенн . Чтобы предохранить элемент телекоммуникационной от пожара , от него должны быть удалены возможные источники вторичных факторов в виде резервуаров и емкостей с легко воспламеняющимися и горючими жидкостями и газами, взрывчатыми веществами и другими горючими материалами. Элементы телекоммуникационной сети должны также быть расположены вдали от внешних источников вторичных факторов, к которым относятся химические и нефтеперерабатывающие заводы, промыслы , гидросооружения и другие возможные цели ядерного воздействия и источники образования сплошных пожаров.

Для защиты от ЭМИ аппаратура телекоммуникационной сети должна быть оборудована на узле специальными устройствами типа грозозащиты, длина кабельных вводов должна быть минимальной, особенно в вертикальной плоскости. Аппаратура на микросхемах, полупроводниках должна быть размещена в экранированном помещении или специальном экранированном блоке для защиты ее от опасного воздействия электрического и магнитного полей ЭМИ. Особенно это касается аппаратуры с магнитной памятью.

Уменьшение опасного воздействия ЭМИ и грозовых разрядов на линиях телекоммуникации может быть обеспечено использованием специальных грозостойких кабелей или кабелей, обладающим меньшим сопротивлением экрана и большей импульсной электрической прочностью изоляции жил должна быть не хуже чем собственно на линии. Считается, что кабельная линия телекоммуникации надежно защищена от ЭМИ и грозовых разрядов, если она способна противостоять току молнии до 100 кА [9,10].

Большой эффект для защиты от грозовых разрядов и в некоторой степени от ЭМИ дает применение тросов, прокладываемых над кабелем. Снижение вероятности повреждения кабеля грозовыми разрядами и другими факторами достигается также выполнением следующих мероприятий [11,12].

-трасса должна быть удалена от опушки леса в сторону поля на расстояние, при котором вероятность повреждения близка к нулю, т.е. быть в пределах $(1-1,5)h$, h -средняя высота деревьев леса;

-кабель не следует прокладывать по дну ущелий и глубоких лощин, вблизи и параллельно руслам горных ручьев и рек;

-в поле прокладку кабеля производить на удалении не менее 25 м от отдельно стоящего высокого местного предмета (дерева, мачты и т.п.);

-не прокладывать кабель через антенные поля;

-пересечение трассы кабеля с ВЛ следует производить под прямым углом посередине пролета;

-выполнять рекомендации, изложенные в соответствующих руководствах по защите трасс кабельных линий связи от грозовых разрядов.

Для защиты кабеля линии телекоммуникации от опасного влияния ВЛ при аварийном режиме на них следует строго соблюдать предусмотренные меры эксплуатационного обслуживания, в необходимых случаях ставить вопрос о переносе трассы или принятия мер защиты на ВЛ: ограничение времени действия тока короткого замыкания или ограничение несимметричного режима работы и другое.

При переводе питания эл. ж. д. с постоянного на переменный ток возникает необходимость удаления трассы связи от полотна дороги на такое расстояние, при котором в жилах кабеля и экране индуцированное напряжение не будет иметь опасного характера. В зависимости от величины ω и типа кабеля связи это удаление может составлять до 15 км для кабелей типа МКС или уменьшено за счет применения специальных кабелей, обладающих лучшим экранирующим эффектом, но дорогостоящих. Помимо этого на эл. ж. д. следует включать отсасывающие трансформаторы, которые являются

Эффективной мерой ограничения их опасного влияния. Кроме того, на кабельных линиях телекоммуникации осуществляются следующие мероприятия: экранирование внешних электромагнитных полей, т.е. применение кабелей, обладающих большим экранирующим эффектом; току; использование редукционных или разделительных трансформаторов; включение защитных контуров и фильтров и др.

Выполнение действующих правил и норм проектирования, строительства и эксплуатации по защите каналов, кабелей и аппаратуры связи от мешающих и опасных влияний ВЛ, Эл. ж. д. и грозových разрядов позволит обеспечить нормальную работу сети проводной связи в мирных и военных условиях.

Из изложенного видно, что при проектировании телекоммуникационной сети нельзя не учитывать многочисленных факторов, которые могут нарушать работу или выводить из строя элементы системы телекоммуникаций как в мирное, так и особенно в военное время, приведенные в разделе данные и методические приемы по оценке живучести элементов телекоммуникационной сети с учетом основных поражающих факторов являются одной из первых попыток анализа и обобщения

имеющихся по этим вопросам результатов исследований магистерской диссертации.

Выводы

1. Разработаны методические приемы по оценке воздействия на элементы транспортной сети внешних факторов.

2. Проведен анализ путей повышения, живучести элементов транспортной сети, определены способы обеспечения защиты технического персонала в условиях сильного поражающего фактора.

3. Рассчитана средняя длина пути сообщений для разной структуры транспортной сети и определена её влияние на живучесть.

4. Установлена, что работоспособность транспортной сети зависит от вероятности поражения её центра управления.

3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЖИВУЧЕСТИ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

3.1. Определение живучести вторичных сетей связи с адаптивной маршрутизацией на основе надежных показателей транспортных сетей

Адаптивная маршрутизация сообщений (АМС) во вторичных сетях связи предполагает обновление планов маршрутизации сообщений в узлах коммутации при изменениях топологической структуры сети, вызванных отказами и восстановлением исправности элементов, а также при изменениях загрузки узлов коммутации и ветвей связи сети. АМС позволяет полностью реализовать потенциальную надежность, живучесть и пропускную способность сети связи, достичь наибольшей оперативности ее функционирования за счет выбора для каждого сообщения наилучшего на данный момент пути передачи. Использование АМС связано с необходимостью постоянного контроля за изменениями топологической структуры сети и загрузкой ее элементов.

Во вторичных сетях связи с ячеистой топологической структурой между любой парой узлов существуют как независимые, так и зависимые пути. Зависимыми являются те из них у которых есть один и более общих элементов путей передачи сообщений. Отказ такого элемента приводит к отказу всех проходящих через него зависимых путей. Аналитические соотношения теории вероятностей для вычисления вероятности наступления зависимых событий при учете даже трех событий настолько сложны, что пользование ими затруднительно.

При вычислении вероятностей связности пар узлов сети (ВСПУС) с ячеистой топологической структурой (имеет большое число узлов и ветвей), использующей АМС, необходимо учитывать существование между этими узлами большого числа как независимых, так и зависимых путей.

Следовательно, аналитическими формулами теории вероятностей невозможно пользоваться для анализа надежности и живучести сетей связи, в которых применяется АМС.

Вычисление ВСПУС методом статистического моделирования. С помощью этого метода может быть решена задача определения ВСПУС с любой топологической структурой. Достоинство метода заключается в том, что он позволяет учитывать как независимые, так и зависимые отказы, а также восстановление элементов сети. При вычислении ВСПУС методом статистического моделирования проводится N испытаний сети, во время которых определяется исправность каждого ее элемента в соответствии с заданными вероятностями их исправных состояний.

После завершения каждого очередного статистического розыгрыша состояний Элементов сети проверяется наличие путей передачи сообщений между интересующими парами узлов и эта информация запоминается. После завершения всех N статистических испытаний сети подсчитывают число M испытаний, в которых между интересующей парой узлов имелись пути передачи сообщений. Вычисление отношения $P=M/N$ дает с некоторой статистической погрешностью математическое ожидание искомой вероятности связности интересующей пары узлов сети.

Количество N проводимых статистических испытаний сети зависит от требуемой доверительной вероятности получаемого результата, от его желаемого доверительного интервала и определяется через интеграл ошибок

Существенный недостаток вычисления ВСПУС методом статистического моделирования большая затрата машинного времени при получении результата с малым доверительным интервалом и высокой доверительной вероятностью.

Логико-вероятностный метод (ЛВМ) вычисления ВСПУС. Кроме метода статистического моделирования для определения ВСПУС применяют и аналитические методы построенные на комплексном использовании булевой алгебры и теории вероятностей. Одним из таких методов является

ЛВМ. Он применим для ВСПУС любой топологической структуры при задании для каждого элемента сети его собственной вероятности исправного состояния.

Однако применение ЛВМ возможно в тех случаях, когда допустимо предположение о независимости событий отказов и восстановлении всех элементов сети. В большинстве практических случаев события отказа и восстановления исправности узлов и ветвей сетей связи могут считаться независимыми. Поэтому данный недостаток ЛВМ при вычислении ВСПУС на практике редко проявляется.

При небольшом числе узлов (до 20-30 шт.) и ветвей сети (до 40-50 шт.) современные персональные ЭВМ позволяют получать точный результат при определении ВСПУС с помощью ЛВМ. При анализе надежности и живучести более крупных сетей этот метод пригоден для проведения приближенных вычислений. Данное ограничение обусловлено недостаточностью, как производительности ЭВМ, так и объема оперативной памяти. Но отмеченный недостаток присущ не только ЛВМ. Другие известные аналитические методы вычислений ВСПУС также не позволяют получить точный результат, если сеть содержит большое число узлов и ветвей.

Из практического опыта использования ЛВМ при вычислении ВСПУС следует, что из всего множества возможных путей передачи сообщений (их число для больших сетей может достигать десятков и даже сотен) достаточно учесть существование только десяти путей с наименьшим числом транзитных ветвей. При этом относительная погрешность получаемых результатов! не превышает десятых или сотых долей процента.

Обычно возможность получения только приближенного результата не является существенным недостатком ЛВМ, поскольку исходные данные о вероятностях исправных состояний элементов сетей всегда известны с определенной погрешностью. Относительная погрешность этих данных обычно составляет от единиц до десятков процентов. Поэтому не имеет

смысла требовать от метода вычисления большей потенциальной точности используемого алгоритма, чем у исходных данных о вероятностях исправных состояний узлов и ветвей анализируемой сети.

Главное достоинство данного метода - малые затраты времени ЭВМ для вычисления вероятности связности одной пары узлов сети, содержащей 50 узлов и 100 ветвей составляет 1 мс.

Алгоритм ЛВМ вычисления ВСПУС реализуется в три этапа. На первом составляется булева функция F , описывающая условия существования в сети связи между парой ее узлов. Хотя бы одного исправного пути из множества путей, имеющих в сети при полной исправности ее элементов. На втором проводят эквивалентные преобразования булевой функции F составленной на первом этапе, к виду, допускающему переход от нее к алгебраической формуле для вычисления ВСПУС.

На третьем этапе осуществляется замена булевых переменных и эквивалентно преобразованной функции F на вероятности исправных или неисправных состояний соответствующих элементов сети связи. Получившиеся алгебраическое выражение используется затем при вычислении вероятности связности интересующей пары узлов сети связи.

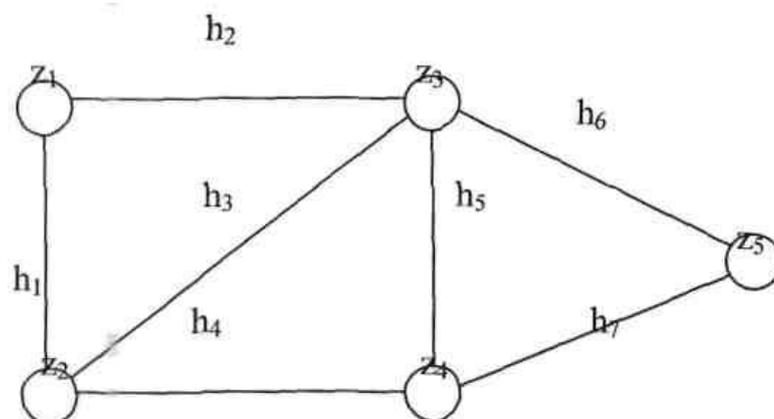


Рис.3.1 Структура многополюсной сети

При ЛВМ вычисления ВСПУС без использования ЭВМ удобно задавать топологическую структуру сети графом $G(N, Z)$, где N - множество ветвей, а Z - множество узлов. В такой модели сети связи узлы графа $Z_j=1, \dots, n$ соответствуют узлам сети, а ветви графа $h_j, j = 1, \dots, m$ - ветвям сети. При использовании ЭВМ для вычислений ВСПУС топологическую структуру сети удобно задавать матрицей смежности [1-4].

Рассмотрим на конкретном примере алгоритм вычислений ЛВМ на всех трех его этапах. Составим аналитическое выражение для определения вероятности связности первого и пятого узлов сети связи, топологическая структура которой представлена графом.

При составлении булевой функции F будем использовать булевы переменные z_i — $1, 2, \dots, 5$ и h_j — $1, 2, \dots, 7$ единичные и нулевые значения которых соответствуют исправным и неисправным состояниям узлов и ветвей сети связи.

Логические условия пребывания в исправном состоянии каждого из семи путей, находящихся между первым и пятым узлами анализируемой сети, могут быть представлены следующими булевыми выражениями:

$$f_1 = z_1 h_2 z_3 h_6 z_5; \quad f_2 = z_1 h_2 z_3 h_5 z_4 h_7 z_5;$$

$$f_3 = z_1 h_1 z_2 h_3 z_3 h_6 z_5; \quad f_4 = z_1 h_1 z_2 h_4 z_4 h_7 z_5;$$

$$f_5 = z_1 h_2 z_3 h_3 z_2 h_4 z_4 h_7 z_5; \quad f_6 = z_1 h_1 z_2 h_3 z_3 h_5 z_4 h_7 z_5;$$

$$f_7 = z_1 h_2 z_2 h_4 z_4 h_5 z_3 h_6 z_5;$$

Тогда условие пребывания в исправном состоянии хотя бы одного пути из множества семи перечисленных выше путей может быть записано в виде логической функции F , представляющей собой логическую сумму приведенных выше семи конъюнкций:

$$F = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7 \quad (3.1.)$$

В любой из семи слагаемых функции F можно заменить булевы переменные Z_j и h_j на вероятности p_{z_i} и p_{h_j} исправных состояний соответствующих узлов и ветвей сети связи, а булевы операторы конъюнкции - на операторы алгебраического умножения. Получим известные из теории вероятности аналитические выражения для вычисления вероятностей исправных состояний отдельных путей между первым и пятым узлами сети связи. Например, выражение для вычисления вероятности исправного состояния первого пути между первым и пятым узлами может быть найдено из логического выражения для f_1 следующим образом:

$$P_1 = P(f_1 = 1) = P_{z1} P_{h2} P_{z3} P_{h6} P_{z5} \quad (3.2)$$

Однако, если таким же способом попытаться определить ВСПУС после аналогичной замены булевых, переменных и операторов во всех логических слагаемых функции F то получим неверный результат, значение которого может превышать единицу. Прокомментировать этот результат можно следующим образом. Из теории вероятностей известно, что выполнять сложение вероятностей наступления отдельных событий для определения вероятности наступления сложного события, являющегося их логической суммой можно лишь в случае суммирования вероятностей наступления несовместных событий.

Для некоторого гипотетического набора исходных данных можно графически представить на единичной поверхности E вероятности наступления каждого из семи отмеченных, выше совместных событий соответствующими им площадками. Тогда вероятность наступления хотя бы одного из них будет графически представлена площадкой, границы которой проходят по внешним границам всех семи накладывающихся друг на друга площадок.

Для нахождения верного значения искомой вероятности существования мечет парой узлов графа хотя бы одного исправного пути из множества возможных путей, существующих в графе при полной исправности его элементов, необходимо в булевой функции F перед заменой ее булевых операторов на алгебраические и булевых переменных на вероятности исправных состояний элементов графа выполнить эквивалентные преобразования функции F к виду, при котором все пары ее логических слагаемых соответствовали попарно несовместным событиям.

Два события, описываемые булевыми выражениями, несовместны в том случае, когда их булево произведение равно нулю, что соответствует условию ортогональности этих булевых выражений.

Представленная выше в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ) булева функция F , описывающая условие существования между парой узлов графа хотя бы одного исправного пути может быть эквивалентно преобразована в совершенную ДНФ, в которой все пары слагаемых попарно ортогональны. Но процесс преобразования булевой функции из ДНФ в совершенную ДНФ весьма трудоемок из-за необходимости выполнения больше о числа операции и чрезмерной громоздкости получаемого нулевого выражения.

Алгоритмы эквивалентного преобразования булевой функции, пригодные для ортогонализации всех ее логических слагаемых, приводятся в [8-13], причем наиболее простой алгоритм преобразования рассмотрен. Однако и этот метод довольно громоздок, поскольку в нем не учитывается специфика структуры преобразуемой булевой функции, и сами преобразования проводятся до тех пор пока функция не будет приведена к совершенной ДНФ.

Предлагаемый здесь метод эквивалентного преобразования булевой функции F значительно проще угнанных выше по числу выполняемых операции и требует меньшего объема памяти ЭВМ для хранения исходных

данных и всех промежуточных результатов. Суть метода заключается в поэтапной ортогонализации всех булевых слагаемых функции. После каждого очередного этапа ортогонализации упрощается структура функции F и определяется необходимость выполнения следующего этапа ортогонализации ее слагаемых. Упрощение алгоритма вычислений достигается за счет того, что структура булевой функции F в процессе ее эквивалентных преобразований не доводится до совершенной ДНФ. Преобразования завершаются на том этапе ортогонализации, когда вес получившиеся логические слагаемые в составе функции F станут непарно ортогональны что соответствует несовместным событиям описываемых логическими выражениями.

После каждого этапа ортогонализации для уменьшения громоздкое Γ и функции F по возможности упрощают ее структуру по следующему правилу поглощения членов:

$$A \cdot AB \cdot ABC \cdot ADCD \cdot \dots = A \quad (3.3)$$

Упрощения желательно проводить среди конъюнкции S_{km} дописанных со знаками инверсии к каждой функции $f_m, m = 2, \dots, n$. После упрощений по описанному выше правилу поглощения членов определяют надо ли проводить очередной этап ортогонализации функции F .

Любое логическое слагаемое функции, которое после проведенной ортогонализации и упрощения его структуры не имеет среди дописанных к нему конъюнкций S_{km} с пересекающимися множествами переменных, может не подвергаться дальнейшим эквивалентным преобразованиям.

Следующий этап ортогонализации функции F выполняют только для тех ее слагаемых f_m в которых после упрощения структуры еще остались дописанные со знаками инверсии конъюнкции S_{km} имеющие пересекающиеся множества переменных. И в таких слагаемых f_m функции F достаточно

проводить ортогонализацию только среди дописанных со знаками инверсии конъюнкций S_{km} имеющих пересекающиеся множества переменных.

Пусть, например, после некоторого очередного этапа ортогонализации функции F и упрощения ее структуры по описанному выше правилу поглощения членов в ее составе образовалось логическое слагаемое:

$$f_7 = f_7 S_1 S_2 S_3 S_4 S_5 S_6 \quad (3.4)$$

в котором конъюнкции S_2 и S_4 имеют множества переменных, не пересекающихся с множеством переменных во всех другие дописанных со знаками инверсии конъюнкциях. Тогда, перед очередным этапом ортогонализации выражение для f_7 приводится к виду:

$$f_7 = f_7 S_2 S_4 (S_j + S_3 + S_5 + S_6) \quad (3.5)$$

Для образовавшегося выражения функции f - очередной этап ортогонализации выполняется по описанному выше правилу только в отношении логической суммы конъюнкций, стоящих в скобках под общим знаком инверсии. Последним будет тот этап ортогонализации функции F после которого ни одно из логических слагаемых $f_m, m=i, \dots, 7$ в ее составе не будет иметь дописанных со знаками инверсии конъюнкций с пересекающимися множества переменных.

После окончания эквивалентных преобразований функций F осуществляется замена ее булевых переменных и операторов на алгебраические переменные и операторы по следующим правилам. Операторы конъюнкции заменяются операторами умножения, операторы дизъюнкции - операторами суммирования. Отдельно стоящие булевы переменные заменяются вероятностями исправных состояний соответствующих им элементов сети связи, отдельно стоящие будут

переменные со знаком инверсии вероятностью неисправного состояния хотя бы одного элемента из соответствующей группы элементов сети связи.

Заключение. Описанный алгоритм вычисления вероятностей связности пар узлов графа логика - вероятностным методом можно использовать при анализе надежности или живучести сетей связи с произвольной топологической структурой. Достоинством метода являются малые затраты времени ЭВМ, необходимые при решении задачи выбора рациональной топологической структуры сети связи методом перебора большого числа ее вариантов (1-4). Если не требуется анализировать большое число вариантов топологической структуры сети, то для анализа надежности или живучести сетей связи можно пользоваться методами статистического моделирования. Этот метод имеет более простой вычислительный алгоритм, но требует больших затрат времени ЭВМ.

3.2. Динамика нагрузки дуг и живучести транспортных сетей

Нагрузка дуг является важнейшим эксплуатационным показателем сети. Чем она меньше, тем сеть лучше. Малую нагрузку имеют дуги полносвязной сети. Каждая пара узлов в ней связана отдельной дугой и обслуживает одно прямое соединение. Известна масса примеров, когда между парой узлов может быть проложено несколько дуг, обеспечивающих их сверхсвязность и распределяющих межузловую нагрузку по каждой из дуг. Например, на участке между двумя мегаполисами (Москва -С.-Петербург) важными в экономическом, политическом и культурном отношении рентабельность сверхсвязности достигается благодаря обслуживанию мощного потока информации.

В нашей стране есть территории, на которых прокладка и эксплуатация дуг требует огромных затрат. Поэтому вполне оправдано стремление к их снижению путем создания древовидных сетей, число дуг в которых равно n

Затраты на линейные сооружения в древовидной сети наблюдается наложение межузловых потоков. Нагрузка дуг зависит от вида, размера и структуры сети. Поиск сетей с минимальной нагрузкой дуг означает не только снижение затрат на организацию передачи информации (на линию надо устанавливать меньше телекоммуникационных средств), но и уменьшение их уязвимости, повышение живучести сетей.

В действующих сетях для определения нагрузки дуг применяется статистический метод. Так, например, в Московском метрополитене один раз в 5-6 лет проводятся исследования, во время которых каждому пассажиру на входе вручается талон с указанием станции и времени прибытия. Затем талоны распределяются по станциям отправления, что позволяет создать матрицу межузловых потоков на определенный промежуток времени [12].

Матрица служит основанием для определения ряда эксплуатационных показателей, в том числе нагрузки дуг. Максимальная из них на маршруте позволяет выбрать количество пар поездов на маршруте, т.е. пропускную способность линии. Однако этот метод (помимо своей огромной трудоемкости) привязан только к одной сети и прошедшему отрезку времени, что не позволяет в будущем распространить результаты обследования на другие сети.

Более простым, но тоже опирающимся на статические данные о входящих и исходящих потоках в узлах линейных и кольцевых маршрутов сетей, является метод динамических вероятностей, в котором сумма входящих потоков с одной стороны разреза дуги умножается на вероятность их стока с другой [13]. Этот метод, как и первый, относится действующим сетям, что затрудняет выбор оптимальных вариантов построения и проектирования сетей с минимальной нагрузкой дуг. Поэтому необходимо искать альтернативные, аналитические методы определения нагрузки дуг на стадии изыскания, проектирования сетей, а также обучения и подготовки специалистов сетевиков.

Цель настоящего параграфа -установить аналитические зависимости и сравнить нагрузки дуг и живучесть развивающихся линейных, звездообразных, радиально-узловых, кольцевых и радиально-кольцевых сетей от их размера, чтобы еще на стадии изысканий и проектирования определить возможности сетей по нагрузке дуг и объему передаваемых сообщений.

Постановка задачи. Пусть сеть формализована графом, состоящим из p узлов и $g=p-1$ дуг между узлами. Сеть связана и полнодоступна. Последнее означает, что сообщения могут передаваться из каждого узла во все остальные. Таким образом, сеть обслуживает $u_c = n(n-1)$ соединений. Под соединением понимаем составляющую потока, исходящего из i -го узла в j -й. Соединение имеет определенную интенсивность, а также характеризуется направлением и длиной от i -го узла до j -го.

Принимаем, что длины дуг 1 в сети одинаковы, а интенсивности λ_{ij} равны. Нагрузку дуг будем характеризовать числом соединений в сечении дуги. Планируемая пропускная способность дуг известна. Определим, как меняется уязвимость сети и нагрузка дуг по числу соединений в зависимости от вида и размера сети, местоположения дуги? Чему равна максимальная нагрузка дуг и где они находятся?

Взаимосвязь характеристик потоков сообщений и живучести сетей. Потоки сообщений характеризуется общим числом соединений, в нормальных условиях эксплуатации (НУЭ), нагрузкой дуг по числу соединений, средней длиной пути сообщения, объемом перевозок по сети, интенсивностью исходящих, входящих и межузловых потоков и др.

Живучесть древовидной сети зависит от числа или доли выживших соединений. Вместе с тем потери соединений после разрушительного воздействия на сеть можно охарактеризовать уязвимостью, оцениваемой как в условных, так и в относительных единицах.

Уязвимость (число разорванных соединений) древовидной сети в условных единицах численно равна нагрузке прерванной дуги по количеству

соединений. Чем меньше нагрузка дуг сети, тем меньше ее уязвимость и выше живучесть. В полнодоступной древовидной сети сумма числа прерванных соединений и числа выживших соединений равна общему числу соединений в НУЭ.

Уязвимость сети в относительных единицах -это отношения числа прерванных соединений, равное сумме нагрузки поврежденных дуг, к общему числу соединений в НУЭ сети. Живучесть равна отношению числа выживших соединений к общему числу соединений к общему числу соединений в НУЭ сети.

Уязвимость сети в относительных единицах также численно равна средней относительной длине пути сообщения и определяется из отношения суммы нагрузок всех дуг к произведению общего числа соединений в НУЭ на длину сети. Чем меньше средняя относительная длина сети, тем меньше ее уязвимость и больше живучесть.

Сумма живучести и уязвимости сети в относительном виде всегда равна единице. Таким образом поиск древовидных сетей с минимальными значениями нагрузки дуг и средней относительной длины пути одновременно означает повышение их живучести, уменьшение уязвимости, снижение затрат на организацию перевозки.

Линейная сеть. Пусть линейная сеть находится в развитии, т.е. n принимает значения 2,3 и т.д. (рис.3.2). Узлы в сети соединены однонаправленными дугами. Линии со стрелками обозначают дуги, пунктирные линии-соединения, числа над дугами -количество соединений, проходящих через сечение дуги. Для случая $n=5$ (рис. 3.2г) соединения не показаны, но приведено их число в сечении каждой дуги. В общем случае $\beta_j=i(n-i)$.

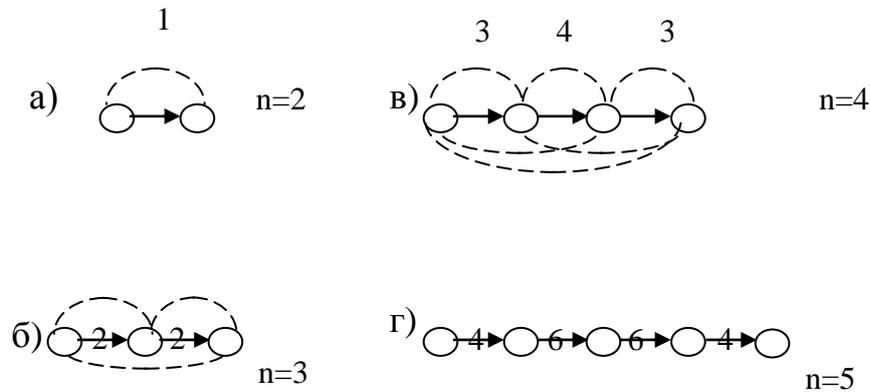


Рис. 3.2. Пример структуры сети связи для расчета их живучести

Уязвимость, как и нагрузка любой дуги, определяются по правилу произведения сумм относительно разреза i -й дуги: на стороне, откуда идут сообщения, суммируется* условная мощность истоков; на стороне, куда сообщения поступают, суммируется условная мощность стоков. Так при $n=5$ нагрузка второй дуги $\beta_2=2-3$, где 2-число истоков, 3-число стоков. Живучесть сети при разрыве одной дуги $a=n(n-1)-2i(n-1)$.

Для выбора числа каналов и транспортных средств, обеспечивающих обслуживание всех соединений, важно знать максимальную нагрузку и местонахождение дуги с максимальной нагрузкой. В случае четного n максимальная нагрузка $\beta_{\max}=n^2/4$ приходится на дугу, находящуюся в середине линейной сети. Живучесть $a_{\min}=(n^2-2n)/2$.

На рис. 3.2 приведено распределение нагрузок по дугам для разных сетевых структур: а-линейная сеть ($n=10$); б -звезда; в- кольцевая однонаправленная сеть; г- кольцевая двунаправленная сеть.

При нечетном n максимальная нагрузка $\beta_{\max}=(n^2-1)/4$ приходится на две смежные дуги, находящиеся в середине линейной сети. Общее число соединений, обслуживаемых линейной однонаправленной сетью $u_c=n(n-1)/2$.

Однако линейная однонаправленная сеть обладает существенным недостатком: полностью доступен в ней только первый узел, у остальных

количество стоков уменьшается по мере удаления от начала сети. Эти соотношения полностью характеризует и симплексную линейную сеть.

Если в линейной сети узлы соединены дуплексными линиями, то по параллельно линии будут наблюдаться аналогичные встречные потоки. Зависимость максимальной нагрузки дуг β_{\max} от n показана на рис. 3.2. (а- линейная сеть, б- звезда, в -кольцевая однонаправленная сеть; г- кольцевая двунаправленная сеть, д- звезда в кольце).

В общем случае сумма элементов β , (см. рис. 3.3.) составляет $n(n^2-1)/6$. Поскольку $u_c > \beta_{\max}$, то в линейной сети объем перевозок (сообщений) больше, чем пропускная способность дуги.

Звездообразная сеть независимо от размеров имеет диаметр равный двум дугам. При $n=2$ или 3 звезда вырождается в линию, поэтому нагрузка дуг совпадает со случаем линейной сети и равна одному или двум соединениям соответственно. При $n=4$ нагрузка каждой из трех дуг равна трем соединениям, а при $n=5$ четырем. В общем случае когда размер звезды равен n узлов, загрузка любой из $n-1$ дуги будет одинакова: $VJ = n-1$ (рис. 2,6).

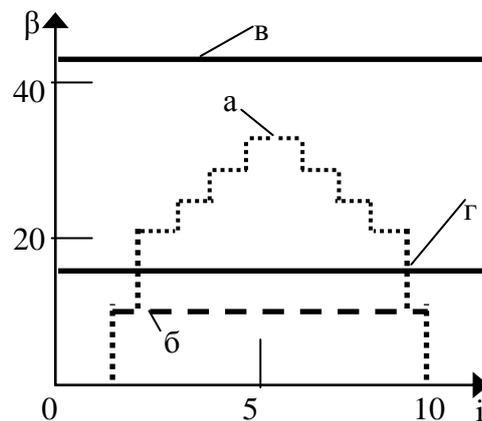


Рис. 3.3. Зависимость коэффициента живучести от длине линии

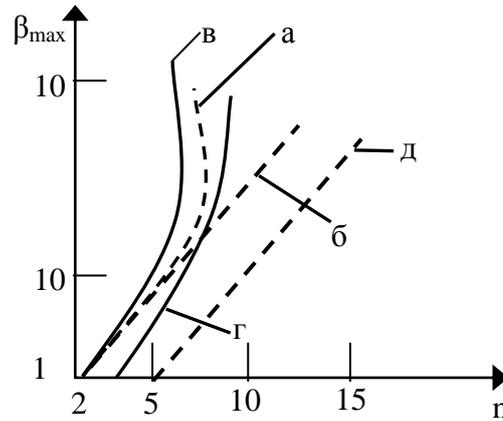


Рис. 3.4. График зависимости обобщенной живучести от числа участков линии

Зависимость нагрузки дуги звездообразной сети от ее размеров показана на рис. 3,4. Живучесть звезды при разрыве одной дуги $\alpha=(n-1)(n-2)$.

Кольцевая сеть. В сети такого вида число дуг и узлов совпадает. Рассмотрим случай, когда все узлы соединены однонаправленными дугами. Сеть полностью доступна, если все узлы являются обменными. Поэтому общее число соединений $\gamma=n(n-1)$. В вырожденном случае при $n=2$ через единственную дугу проходит одно соединение, при $n=3$ по каждой из трех дуг - по три соединения, при $n=4$ - по шесть, при $n=5$ по каждой из пяти дуг - по десять. В общем случае через каждую из n дуг проходит по $3=(n-1)/2$ соединений. При $n=10$ нагрузка каждой дуги однонаправленного кольца равна $3j=45$ (рис. 3.4.). Этот вид сетевой структуры дает максимальную нагрузку на дуги (рис. 3.4.).

В кольцевой двунаправленной сети можно оптимизировать длину пути - выбрать кратчайший путь - меньший или равный $1(n-1)/2$, причем, если n четное, то максимальная длина пути равна $n/2$. Она одинаково в обе стороны движения, поэтому соединения, может направляются одновременно в противоположные стороны.

Для кольца с нечетным n нагрузка дуг $\beta=(n^2-1)/8$, для кольца с четным n нагрузка $\beta=n^2/8$ (на рис. 3.2.г показан случай $n=10$). Зависимость β_{\max} от n

для двунаправленного кольца приведена на рис. 3.2.г. Таким образом, нагрузка дуг кольцевой сети с двунаправленными дугами в два раза меньше, чем в середине линейной сети, почти в четыре раза меньше, чем в однонаправленном кольце. При $n < 7$ нагрузка дуг двунаправленного кольца меньше нагрузки дуги звезды.

Живучесть сетей сообщений оценивают средним числом аи долей $O(a)$ выживших соединений при заданной силе повреждения m . Однако, если в сети имеются избыточные (по сравнению древовидной сетью) дуги, то эти показатели становятся неэффективными, нечувствительными к удалению избыточных дуг. Простейшим примером сети с одной избыточной (по сравнению с древовидной сетью) дугой является кольцевая сеть. При размере сети n узлов «кольцо» имеет $r = n$ дуг, тогда как в древовидной их $n-1$.

При разрыве любой дуги кольца «кольца» создается впечатление, что в сети ничего не происходит. Она остается связной (также полностью доступной) не меняется число выживших соединений, поэтому $\alpha = \gamma = n(n-1)$. Живучесть равна единице, а число и доля прерванных соединений, т.е. уязвимость равны нулю.

Однако после разрыва одной дуги сеть превращается в линейную, меняется нагрузка дуг максимальное значение которой становится больше нагрузки дуги кольца. Так, в кольцевой сети, узлы которой соединены ненаправленными дугами, нагрузка дуг одинакова и пропорциональна $n/8$ при четных n . Максимальное значение нагрузки наблюдается в середине выжившей части кольцевой сети: $P_{\max} = n^2/4$, где n -четное; $\beta_{\max} = (n^2 - 1)/4$, где n -нечетное. Таким образом, нагрузка дуг в середине выжившей части кольца возрастает вдвое. И, если дуги не имеют двойного запаса по пропускной способности, то часть соединений не обслуживается.

В общем случае любое повреждение древовидной сети, будь то разрыв одной или более дуг, гибель одного или более узлов, приводят к разделению сети на части, потерям соединений, уменьшению нагрузки на дуги. В лучшем случае наблюдается задержка в продвижении трафика.

Другой вариант повреждения кольцевой сети заключается в том, что прекращается одно из направлений движения по кольцу. Подобные случаи иногда происходят в работе кольцевых сетей связи. Последствиями таких неисправностей становятся резкое увеличение длительности маршрута и времени доставки пользовательского сообщения. Кольцо из двунаправленного превращается в однонаправленное, а нагрузка дуги становится пропорциональной $\beta = n(n-1)/2$. Таким образом, нагрузка дуг возрастает почти в четыре раза, а средняя длина и время пути увеличиваются приблизительно в 2 раза.

Сеть вида «звезда в кольце»-частный случай радиально-кольцевой сети (РКС), имеющий $(n-1)$ дополнительную дугу по сравнению с древовидной. Нагрузка дуг кольца не превышает нагрузки радиальных дуг при условии, что затраты на пути в узлы, удаленные от выбранного узла на две дуги, равноценны как по кольцу, так и через центр. Нагрузка радиальной линии в одном из направлений равна $(n-4)$ соединениям (рис. 3.4). Однако, маловероятно. Чтобы в РКС вводилось в эксплуатацию такое количество диаметров. Скорее всего, сначала в кольце вводится одна диаметрально-линия или хорда, такая сеть по сравнению с древовидной имеет две дополнительные дуги. Сеть вида «восьмерка». Число вариантов построения сети вида восьмерка (рис.3.5) зависит от числа узлов на диаметре или хорде. Длина диаметра может быть равна нулю. В этом случае хорда стягивается в точку, восьмерка симметрична, т.е. получаем РКС в виде восьмерка с одной сопряженной точкой. Если размер диаметрально-линии или хорды равен двум узлам, то имеем восьмерку с одной смежной дугой. «Восьмерки» с диаметрально-линией имеют две оси симметрии, а с хордой одну. Нагрузки дуг в сети вида восьмерка (рис.3.5) неодинаковы в отличие от звездообразной и кольцевых сетей (рис.3.6), в которых максимальная и минимальные нагрузки дуг равны.

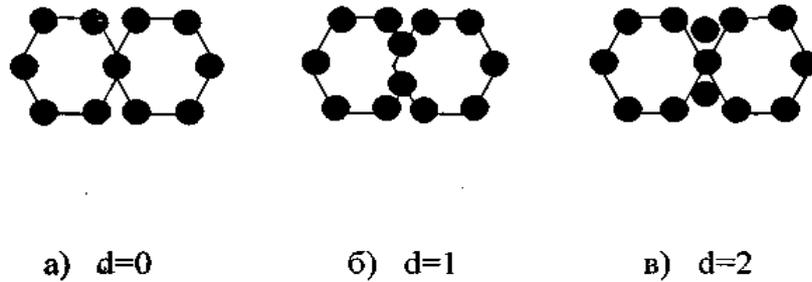


Рис.3.5. Нагрузки дуг в виде восьмерок

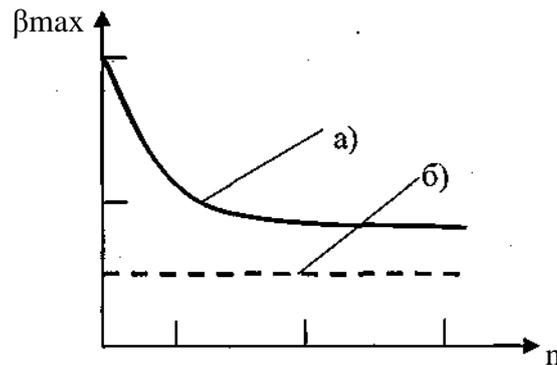


Рис.3.6. Неодинаковы в отличие от звездообразной и кольцевых сетей

Примем, что РКС имеет один диаметр, разделяющей сеть на две равные части, длины дуг равны, межузловые потоки одинаковы. Размер диаметральной линии меняется от одного и более узла. Размер сети возрастает с каждым шагом, сохраняя симметричность относительно диаметра. Необходимо установить, как изменяется нагрузка дуг при удалении избыточных дуг РКС. При удалении каких дуг нагрузка меняется больше (меньше)?

Для сети с одним смежным узлом на диаметре кольцо является условным. Для сети, диаметр которой равен одной дуге, кольцо создается при разрыве диаметральной линии. При этом сеть остается связной и это пожалуй, единственный случай, когда максимальная нагрузка дуг уменьшается, становится одинаковой и равной нагрузке дуги кольца.

3.3 Оценка живучести транспортных телекоммуникационных сетей

Во многих программных документах по развитию сетей и средств связи отмечается необходимость обеспечения живучести как при проектировании, строительстве новых сетей связи, так и при эксплуатации действующих [14]. Практика показывает, что существующие сети не всегда в полном объеме отвечают этим требованиям, а стремление улучшить их состояние, оказывается запоздалым и неприемлемым по затратам. Поэтому одним из основных направлений обеспечения живучести на ранних стадиях разработки сетей и, более того, подготовки специалистов -сетевиков является поиск структур, устойчивых к возмущениям и вредным воздействиям и оцененных доступными и наглядными показателями живучести.

Вероятность связности сети как мера живучести сетей сообщений непригодно при силе возмущения, приводящей к распаду сети на несколько несвязанных частей, каждая из которых тем не менее продолжает действовать. Наглядным подтверждением этого являются крупные аварии, стихийные бедствия, террористические действия.

Неявная взаимосвязь между средней длиной пути (СДП) и живучестью сети рассмотрена в частности, было установлено, что линейная сеть с СДП, равной $1(n+1)/3$, имеет минимальную живучесть по сравнению со звездообразной, у которой СДП не превышает длины двух дуг. Однако прямая взаимосвязь между деревом кратчайших путей от одного из узлов (корня) сети до всех остальных [6]. При этом корень ДКП- исток, все остальные узлы-стоки. В полнодоступной сети общее число путей от каждого корня до всех остальных узлов имеет вид:

$$y=n(n-1) \quad (3.6)$$

Постановка задачи. Принимаем, что сеть формализовано графом, состоящим из множества вершин-узлов и множества ребер-дуг. Длины дуг радиальных линий равны, межузловые потоки одинаковы. При этих ограничениях проявляются свойства симметричности сетей. В симметричной сети симметричные друг другу узлы имеют одинаковые ДКП, а симметричные дуги-одинаковую нагрузку.

В качестве показателей живучести рассматриваются математическое ожидание числа и средняя доля выживших соединений при известной вероятности p выживания дуг или узлов.

Узлы полнодоступны, т.е. связь осуществляется между каждой парой узлов. Состояние дуг, узлов сети -бинарное (есть или нет). После разрыва дуги, выхода из строя узла самостоятельное существование и действие расчлененных частей сети возможно, если число выживших узлов, связанных дугами, больше или равно двум.

Вторая составляющая задачи -как влияет ДКП на живучесть сети, какая взаимосвязь существует между ДКП, вероятностью выживания дуг или узлов и живучестью сети?

Звездообразная сеть. Независимо от числа узлов n «звезда» (рис. 3.6) имеет два вида ДКП-с корнем в центре (рис. 3.5) и с корнем в периферийном узле (рис. 3.6). ДКП с корнем в любом периферийном узле одинаковы и число их $-(n-1)$.

Из первого ДКП получаем $p(n-1)$, из второго $p+(n-2)p^2$. Коэффициент $(n-1)$ показывает число соединений в первом ДКП, длина каждого из них соответствует одной дуг, и связь по ней осуществляется с вероятностью p (узлы неязвимы). Из второго ДКП, корень которого находится на периферии, следует, что наряду с соединением длиной в одну дугу существует $(n-2)$ соединения длиной в две дуги и вероятностью p^2 . Учитывая, что периферийных узлов $(n-1)$, получаем

$$M(\alpha p) = p(n-1) + (n-1)[p+(n-2)p^2] = 2p(n-1) + (n-2)p^2 = (n-1)[2p+(n-2)p^2] \quad (3.7)$$

где $M(\alpha_p)$ - математическое ожидание числа выживших соединений при разрыве ребер.

Средняя доля выживших соединений $D(\alpha_p) = M(\alpha_p) / \gamma$.

После подстановки (3.2) и (3.1) в (3.3) получаем

$$D(\alpha_p) = [2p + (n-2)p^2] / n \quad (3.8)$$

Зависимости $D(\alpha_p)$ от вероятности p и числа узлов n «звезды» показаны на рис 3.6. Установлено, что при одинаковой вероятности p живучесть «звезды» с увеличением ее размеров уменьшается.

При воздействии на узлы связь смежных узлов осуществляется с вероятностью p^2 . соотношение для расчета математического ожидания *числа* выживших соединений при «гибели» узлов принимает вид:

$$M(\alpha_p) = p M(\alpha_p), \quad (3.9)$$

Средняя доля выживших соединений

$$D(\alpha_p) = p D(\alpha_p), \quad (3.10)$$

Таким образом, живучесть звездообразной сети при «гибели» узлов в p раз меньше, чем при разрыве дуг.

Линейная сеть. При $n=2$ или 3 звездообразная сеть вырождается в линейную, поэтому зависимости $D(\alpha) = f(p, n=2;3)$ не меняются. Поскольку линейная сеть имеет одну ось симметрии, число разных ДКП в ней равно $n/2$. И если n стремится к бесконечности, то и число ДКП также стремится к бесконечности. Вследствие этого пойдём от простого к сложному.

При $n=4$ число ДКП с корнем на концах линии (рис. 3,6) равно 2. Число ДКП с корнем в середине линии (рис. 3,6) также равно 2. Из первого дерева имеем: $p + p^2 + p^3$, из второго $2p + p^2$. В целом

$$M(a_p) = 6p + 4p^2 + 2p^3 \quad (3.11)$$

Средняя доля выживших соединений после подстановки (3.9) и (3.5) в (3.7)

$$D(a_p) = p(3 + 2p + p^2)/6 \quad (3.12)$$

При «гибели» узлов средняя доля выживших соединений $D(\alpha_y) = p$
 $D(\alpha_p)$.

Рассмотрев другие значения $n > 2$ и применив метод индукции, получим данные, приведенные в табл. 1, и соотношение для $M(\alpha_p)$ линейной сети в общем виде:

$$M(a_p) = (n-1)p + (n-2)p^2 + (n-3)p^3 + \dots + 2p^{n-2} + p^{n-1} \quad (3.13)$$

Зависимости $M(\alpha_a) = f(p, n)$ для линейной сети при разрыве дуг и «гибели» узлов показаны на рис. 4. В табл. 1 коэффициент при p показывает число соединений определенной длины, а степень при p — длину соединения.

Выводы

Древья кратчайших путей позволяют установить число соединений от минимальной до максимальной длины и связать их соотношением, в котором степень при p показывает длину соединения в дугах, а коэффициент при p определяет их число.

Математическое ожидание числа выживших соединений равно сумме произведений числа каждого из них на вероятности в степени, равной длине соединения.

Коэффициенты при ρ определенной степени в математическом ожидании числа выживших соединений, расположенные в порядке возрастания размера сети, образуют арифметические ряды, например, коэффициенты при ρ^3 или ρ^2 двух смежных звезд образуют арифметические ряды второго порядка.

Средняя длина пути по древовидной сети является прямым отражением ее уязвимости при разрыве одной дуги. Чем меньше средняя длина пути, тем меньше уязвимость сети и напротив, тем больше ее живучесть.

4. ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ НА МОДЕЛЯХ

4.1 Принцип оценки живучести транспортных сетей

Для оценки живучести транспортных сетей могут быть использованы два вида моделей – математические и физические. Математические модели основаны на идентичности уравнений, описывающих процессы, притекающие в оригинале и модели, отличающиеся по своей физической природе. Наряду со многими неоспоримыми достоинствами – такими, как возможность использования универсальных вычислительных средств, высокая точность получаемых результатов, математические модели обладают недостатком: математический аппарат при моделировании больших сетей получается достаточно громоздким, а объем вычислений резко возрастает с увеличением числа элементов рассматриваемых телекоммуникационных сетей.

Физическое моделирование основано на улучшении явлений на моделях одной или подобной природы с оригиналом. При физическом моделировании сохраняются необходимые особенности поведения объекта исследования, что существенно облегчает требуемых результатов. Для таких моделей выбирают наиболее удобные, подобные оригиналу физические процессы, геометрические размеры и диапазон изменения физических величин.

Вычислительные средства, построенные на базе физических моделей, по сравнению со средствами математического моделирования обладают рядом существенных достоинств. Это, как правило, высокое быстродействие и способность работать в реальном масштабе времени, что особенно важно для оперативного управления сетями связи [14]. Наглядный ввод исходных данных и вывод результатов непосредственно в моделях исследуемых

элементов телекоммуникационной сети позволяет интенсивно использовать их в системе

“Человек - машина”, когда машина рекомендует решение на основе введенных в нее исходных данных, а окончательное решение с учётом своих эвристических способностей принимает человек. Во многих случаях физические модели имеют небольшую стоимость и более простую конституцию по сравнению терминалами компьютерных сетей.

К недостаткам физических моделей следует отнести их узкую специализацию, направленную на решение ограниченного класса задач и относительно высокую погрешность получаемого результата (порядка $0,1 \div 10\%$).

Для физического моделирования телекоммуникационных сетей удобно использовать электронные модели сетей, представляющие собой совокупность электронных элементов (генераторов, счетчиков, источников тока, резисторов и др.), соединенных между собой согласно топологии исследуемой телекоммуникационной сети.

Одним из способов решения вероятностных задач в сложно - разветвленной сети является использование стохастических автоматов – электронных устройств, в состав которых входят датчики случайных сигналов, электронные ключи, счетчики и другие элементы. Однако созданные стохастические автоматы позволяют моделировать только не большие по размеру телекоммуникационные сети (до семи - десяти узлов). По этой причине стохастические автоматы целесообразно использовать для моделирования телекоммуникационных сетей небольшого объёма.

При решении вероятностных задач аналитическими методами используемая телекоммуникационная сеть представляется графом $G(A, B)$, элементам которого присваивается “веса”, равные математическому ожиданию рассматриваемого параметра.

Такой подход позволяет при оценке живучести телекоммуникационных сетей перейти от статического и аналогового моделирования.

На практике в большинстве случаев для оценки живучести телекоммуникационных сетей высокая точность не нужна ввиду значительной неопределённости исходных данных: значение выживаемости линий и узлов связи известны с погрешностью, превышающей 20-30%. Поэтому представляет практически интерес приближенная экспресс-оценка живучести на простых электронных модулях телекоммуникационных сетей с погрешностью до 15-20%. При этом реализуются те характерные преимущества, которыми обладают физические модели телекоммуникационных сетей по сравнению с математическими.

Математически задачу определения живучести сложно разветвленной телекоммуникационной сети можно сформулировать так: даны параметры графа $G(A;B)$;

-матрица связанности $M = |m_{ij}|$ и матрица вероятностей выживания элементов телекоммуникационной сети при известном воздействии на сеть $P = |p_{ij}|$, определённая на элементах графа G .

Определить живучесть информационного направления в сети между узлами k и e ;

$$P_{k,e} = f(P, M) \quad (4.1)$$

При такой постановке в [15] для оценки живучести сеть связи представляется в виде электронной модели сети, в которой линиям связи становятся в соответствии переменные резисторы, а узлами связи совокупность одинаковых резисторов, соединенных между собой согласно топологии исследуемой сети связи. При этом получается упрощенная электронная модель сети, состоящей только из моделей линий связи сети.

Однако такая модель не полностью характеризует процессы происходящие в самой сети связи.

В [16] приведена методика определения структурной живучести направлений связи на электронной модели сети. В ней последовательность оценки живучести на электронной модели сети определяется следующим алгоритмом:

1. По исходной матрице P оцениваются границы изменения исходных данных P_{ij} и выбирается значение постоянного логарифма в функции аналогового перехода.

2. Из потенциометров (переменных резисторов) собирается электронная модель сети, аналогичная по топологии исследуемой сети в соответствии с исходной матрицей связности M .

3. По функции аналогового перехода или по графику изменения этой функции определяют значения сопротивлений резисторов R_{ij} ребер сети и R_i узлов сети.

4. Для упрощенной модели сети определяют пересчитанные значения сопротивлений моделей ребер сети R_{ij} .

5. С помощью омметра устанавливают значения сопротивлений переменных резисторов R_{ij} (R_{ij} , R_i).

6. К узлам k и l , между которыми (рис.4.1.) определяет живучесть направлений связи, подключают амперметр и измеряют сопротивление R_{ke} .

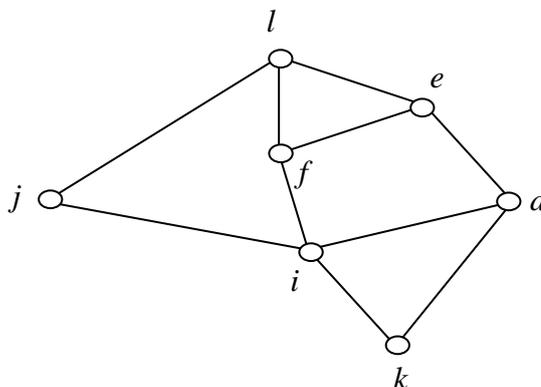


Рис 4.1. График фрагмента сети связи.

7. Для упрощенной модели определяют суммарные значение сопротивления в направлении R_{ke} с учетом узлов k и l :

$$R'_{ij} = R_{ij} + \frac{R_k}{2} + \frac{R_l}{2} \quad (4.2)$$

8. По функции аналогового перехода

$$R_{ij} = \frac{\log_a P_{ij} + \log_2 P_{ij}}{2} \quad (4.3)$$

или

$$R_i = \frac{\log_a P_i + \log_2 P_i}{2} \quad (4.4)$$

или по графику этой функции значение сопротивления R_{ke} (для упрощенной модели R'_{ke}) переводят к значению R_{ke} .

В этой работе также оценка живучести направлений связи на электронной модели сводится к измерению сопротивления между заданными узлами этой модели.

4.2. Аналитический метод определения живучести транспортных сетей

В предыдущем параграфе изложен принцип оценки живучести сетей связи с помощью физического моделирования. в данном параграфе предлагается аналитический метод, предназначенный главным образом для оценки живучести транспортных сетей.

В нормальных условиях эксплуатации транспортной сети живучесть это доля действующих соединений, т.е. отношение числа выживших соединений к общему числу соединений. Аналитический метод определения живучести транспортной сети средняя длина пути сообщения. Известно, что чем меньше надо платить за услуги, также меньше времени требуется на передачу данных.

Принимаем, что исследуемая транспортная сеть является полностью доступной (связь осуществляется между каждой парой узлов) развивающейся, т.е. одна или несколько топологических характеристик получают положительное приращение. В процессе развития структура транспортной сети не меняется. Сеть остается однородной. Длина дуг одинакова, межузловые потоки равны. Дуги, узлы сети могут находиться только в двух состояниях: есть или нет. Необходимо установить важнейший момент, как меняется средняя длина сообщения и живучесть транспортных сетей разных структур в зависимости от их размера и числа радиальных линий.

4.3. Линейная транспортная сеть

Известно, что в основе построения любых сетей лежит линейная структура сети. В линейной полностью доступной транспортной сети сумма длин путей между всеми парами узлов определяется как

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n-1} D_{ij} = l \cdot n \frac{(n^2 - 1)}{6}, \quad (4.5)$$

где l -средняя длина дуги; n -размер (число узлов) сети. Число вариантов со соединений пар узлов в нормальных условиях эксплуатации транспортной сети $\gamma = n(n-1)/2$.

для такой структуры сети средняя длина пути сообщения равна

$$D_{ij} = l(n+1)/3. \quad (4.6)$$

при $D_{ij} = f(n)$.

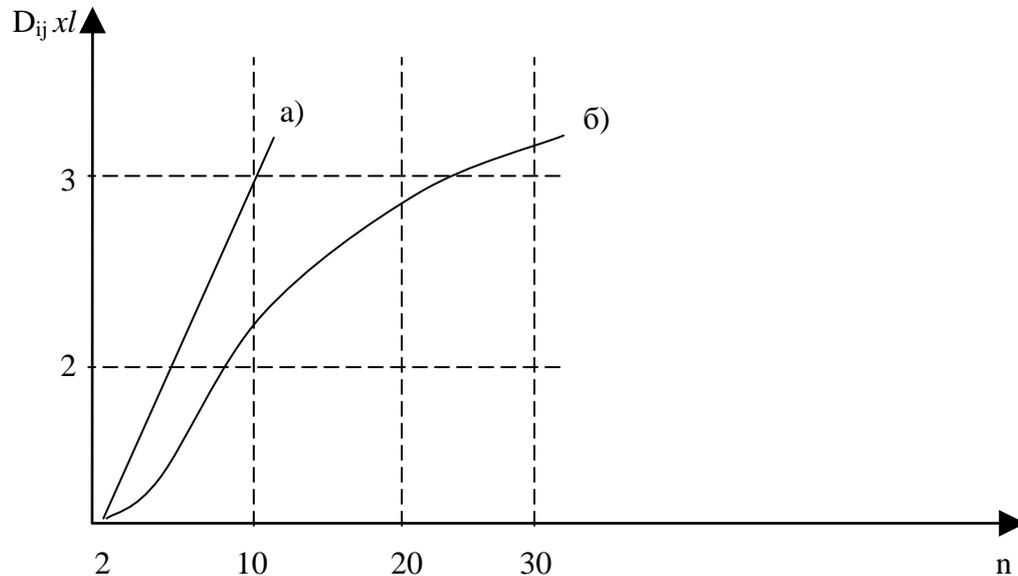


Рис 4.2. Зависимость среднее длины пути от числа узлов

Для полного понимания сути методе здесь нужно увязать, что из примеров линейной и звездообразный сетей известно, что относительная средняя длина пути сообщения является одновременно показателем их уязвимости. Под уязвимости будем понимать долю потерь соединений, т.е. отношение числа прерванных соединений при вредном воздействии на сеть к общему числу соединений в нормальных условиях эксплуатации транспортной сети.

В работе показана, что уязвимость линейной транспортной сети при разрыве одной дуги или средняя относительная длина пути равна:

$$D(\beta) = \frac{D_{ij}}{L_c} = (n+1)/(n+1)/3(n-1), \quad (4.7)$$

где $L_c = l(n-1)$ - длина транспортной сети.

Логично, что с увеличением размера линейной транспортной сети её уязвимость при разрыве одной дуги уменьшается при $n \rightarrow \infty$, а живучесть наоборот возрастает.

Живучесть данной сети при разрыве дуги равна:

$$\alpha = n(n-1) - 2i(n-i) \quad (4.8)$$

Пусть линейная транспортная сеть находится в развитии, т.е. «n» принимает значения 2,3 и т.д. (n-число узлов) узлы в сети соединены однонаправленными дугами. Линии со стрелками обозначают дуги, пунктирные линии соединения, числа на дугах – количества соединений, проходящих через сечение дуги. Для случая $n=5$ (рис.4.3г) соединения не показаны, но приведено их число i сечения каждой дуги в общем случае $\beta_i = i(n-i)$.

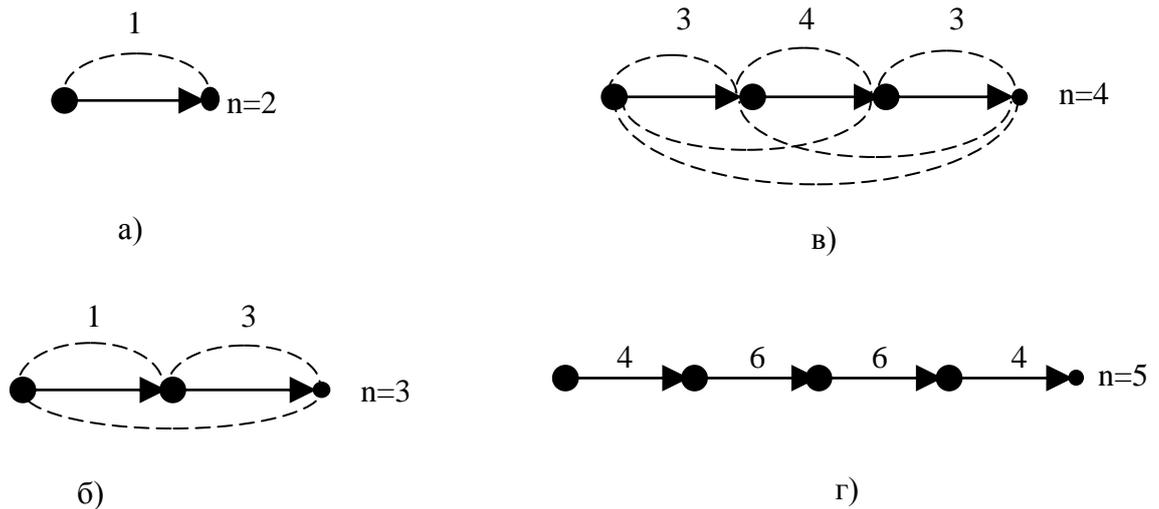


Рис.4.3 Графический способ определения показателя живучести сети

Для выбора числа каналов и транспортных средств, обеспечивающих обслуживание всех соединений, важно знать максимальную нагрузку и местонахождение дуги с максимальной нагрузкой, в случае четного n

максимальная нагрузка $\beta_{\max} = n^2 / 4$ приходится на дугу, находящуюся в середине линейной транспортной сети.

Живучесть при этом равна

$$\alpha_{\min} = \frac{n^2 - 2n}{2}. \quad (4.9)$$

На рис 4.4. приведено распределение нагрузок по дугам для , разных сетевых структур: а-линейная сеть (n=10); б-звездообразная сеть; в-кольцевая однонаправленная сеть; г-кольцевая двунаправленная сеть.

При нечетном n максимальная нагрузка $\beta_{\min} = \frac{n^2 - 2n}{2}$ приходится на две смежные дуги, находящиеся в середине линейной сети. общее число соединений, обслуживаемых линейной однонаправленной сетью равно

$$\gamma_c = \frac{n(n-1)}{2} \quad (4.10)$$

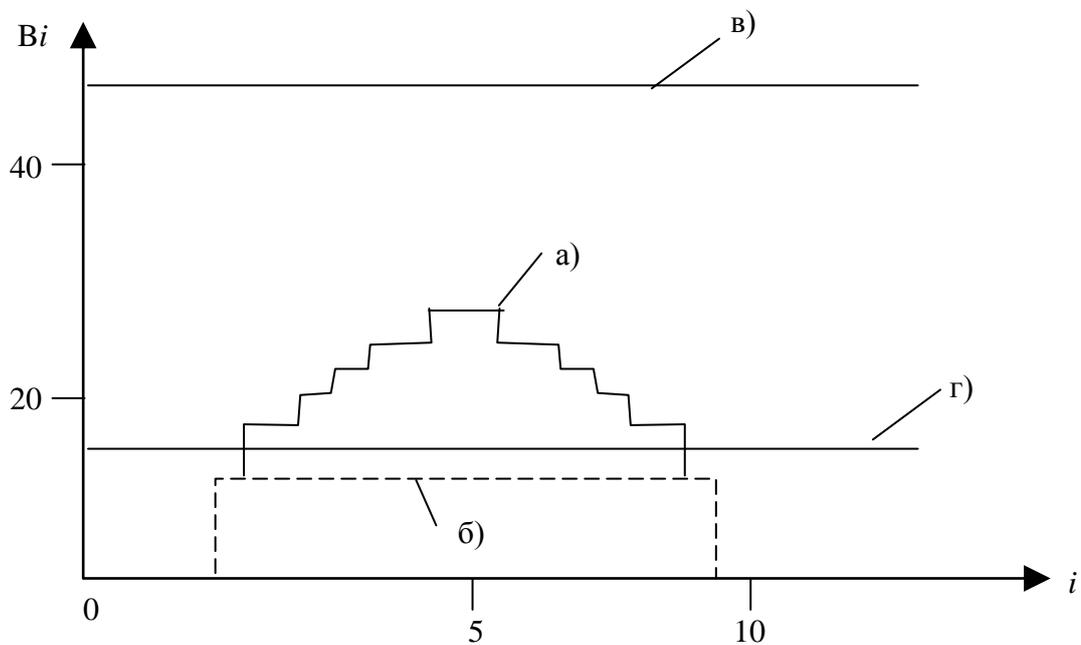


Рис 4.4. Распределение нагрузок по дугам

Однако линейная однонаправленная сеть обладает существенным недостатком: полнодоступный в ней только первый узел, у остальных количество стыков уменьшается по мере удаления от начала сети.

Звездообразная сеть независимо от размеров имеет диаметр равный двум дугам. При $n=2$ или 3 звезда выражается в линию, поэтому нагрузка дуг совпадает со случаем линейной сети и равна одному или двум соединениям соответственно. В общем случае, когда размер звезды равен n узлов, загрузка любой из $n-1$ дуги будет одинаково:

$\beta_i = n-1$ (рис.4.4). Зависимость нагрузки дуги звездообразной сети от её размеров показана на рис.4.5. Живучесть звезды при разрыве одной дуги равно

$$\alpha = (n-1)(n-2). \quad (4.11)$$

Зависимость максимальной нагрузки β_{\max} от n показана на рис.4.5 (а-линейная сеть; б-звезда; в-кольцевая однонаправленная сеть; г-кольцевая двухнаправленная сеть)

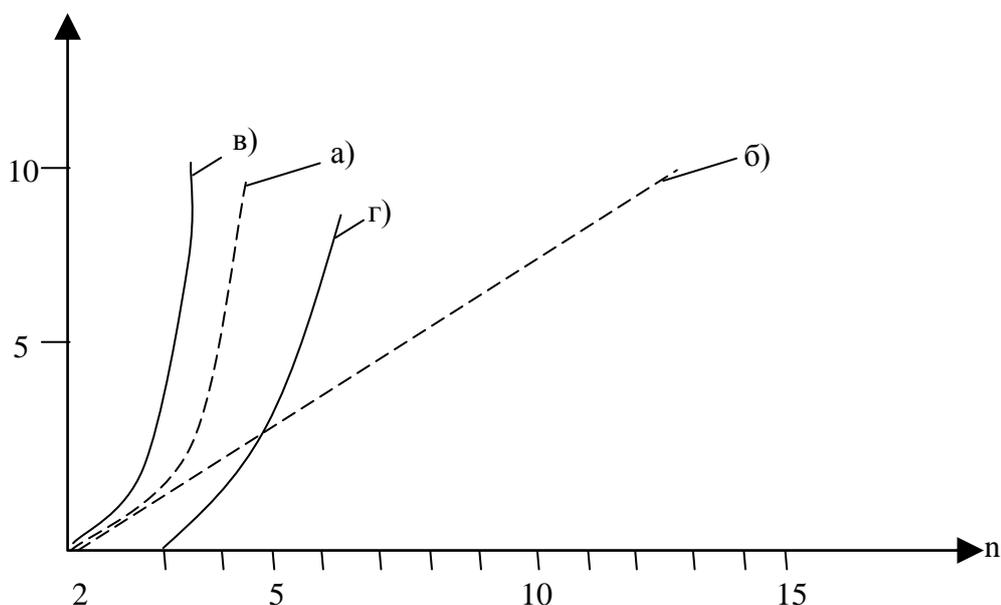


Рис 4.5. Зависимость максимальной нагрузки β_{\max} от n

Кольцевая сеть. В сети такого вида число дуг и узлов совпадает. Рассмотрим случай, когда все узлы соединены однонаправленными дугами. Сеть полностью доступна, если все узлы являются обменными. Поэтому общее число соединений $\gamma = n(n-1)$. В выраженном случае при $n=2$ через единственную дугу проходит одно соединение, при $n=3$ по каждый из трех дуг – по три соединения, при $n=4$ – по шесть, при $n=5$ по каждой из пяти дуг – по десять. В общем случае через каждую из n дуг проходит по $\beta = \frac{n(n-1)}{2}$ соединений. При $n=10$ нагрузка каждой дуги однонаправленного кольца равна $\beta_i = 45$ (рис.3в). Этот вид сетевой структуры дает максимальную нагрузку на дуги (рис.4.5)

Для кольца с нечетным n и нагрузка дуг $\beta = (n^2 - 1)/8$, для кольца с четным n нагрузка $\beta = (n^2)/8$ (на рис.3г показан случай $n=10$). Зависимость β_{\max} от n для двунаправленного кольца приведена на рис.4г. Таким образом, нагрузка дуг кольцевой сети с двунаправленными дугами в два раза меньше, чем в середине линейной сети и почти в четыре раза меньше чем в однонаправленном кольце. При $n < 7$ нагрузка дуг двунаправленного кольца меньше нагрузки дуги звезды.

Живучесть сетей сообщений оценивают средним числом α и долей $D(\alpha)$ выживших соединений при заданной силе повреждения m .

При разрыве любой дуги «кольцо» создается впечатление что в сети ничего не происходит. Она остается союзной (также полностью доступной) не меняется число выживших соединений, поэтому $\alpha = \gamma = n(n-1)$. При этом живучесть равна единице, а число и доля прерванных соединений, т.е. уязвимость равны нулю.

В общем случае, любое повреждение древовидной сети, будь то разрыв одной или более дуг, гибель одного или более узлов, приводит к разделению сети на части, потерям соединений, уменьшению нагрузки на дуги. В лучшем случае наблюдается задержка в продвижении трафика.

Другой вариант повреждения кольцевой сети заключается в том, что прекращается одно из направлений движения по кольцу. Подобного случаи иногда происходит в работе кольцевых транспортных телекоммуникационных сетей. Последствие таких неисправностей становится резкое увеличение длительности маршрута и времени доставки пользовательского сообщения.

Выводы

1. Установлена аналитическая зависимость нагрузки дуг и живучесть линейных, звездообразных и кольцевых транспортных сетей от их размера.

2. Свойствами живучих структур является минимальные значения нагрузки дуг, средней длины пути сообщения, диаметра сети, объёма транзитных этапов через узел, а также максимальное значение количества узлов с минимальной связностью.

Полученные результаты могут - быть использованы при предпроектном проектировании транспортных сетей регионального и местных уровней. При этом надо учитывать, что эти результаты получены для транспортных сетей кольцевой структуры.

3. В настоящее время в сетях телекоммуникации АК.Узбектелеком при проектировании телекоммуникационных сетей вопросах живучести в основном учитывая производители аппаратуры оборудования поэтому основные результаты настоящей диссертации могут – быть использованы операторами связи нашей республики.

4.Практический аспект результатов считаем необходимым использовать в регионах республики где сильно проявляется внешнее воздействие транспортную телекоммуникационную сеть.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей магистерской диссертации можно сделать следующие выводы:

1. Живучесть транспортных телекоммуникационных сетей является основным показателем их функционирования. Требования эксплуатационного предприятия по живучести проектируемой транспортной сети может быть выражено через среднюю долю выживаемых связей и вероятность того, что доля выживаемых связей в сети не менее заданной. Живучесть характеризуется такими качественными показателями как: среднее число пространственно – разнесенных трактов связи между каждой парой полюсов, число разнородных линий связи, используемых между каждой парой полюсов, степень защиты кабельных магистралей от грозových разрядов и т.п.

2. Важным показателем живучести элемента транспортной сети является длительность его восстановления до заданного минимального уровня. В качестве показателя только структурной живучести сложного элемента транспортной сети следует использовать только коэффициент относительной живучести.

3. Рассмотренные методы оценки живучести элементов транспортных сетей показывает, что основным показателем по которой необходимо оценивать их является вероятность выживания технического персонала, зданий и используемой техники связи.

4. Основными способами повышения живучести транспортных сетей является:

-реализация принципа интеграции существующих телекоммуникационных систем различных ведомств;

-создание возможности обхода крупных промышленных центров;

-повышение коэффициентов структурной живучести элементов сети;

-создание мобильных резервов сил и средств связи.

Из изложенного выше видно, что при проектировании транспортных телекоммуникационных сетей нельзя не учитывать многочисленных факторов, которые могут нарушать работу или выводить из строя элементы транспортной сети в любое время, особенно при чрезвычайных ситуациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория сетей связи // В.Н.Рогинский, А.Д. Харкевич, М.А Шнепс и др.; Под ред. В.Н. Рогинского.-М.: Радио и связь.,1981г.-192с.
2. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьёв А.Д. Математические методы в теории надёжности. - М.: Наука, 1965г.- 524-с.
3. Богатырёв В.А. К расчету надёжности сетей связи по совокупности путей.- Электросвязь, 1981г., №2, с.42-44.
4. Гладкий В.С., Гуревич И.М., Кириченко Т.В. Характеристики связности сетевых систем из ненадежных элементов // Коммутация и управление потоками в сетях связи. - ТУИС, ЛЭИС. – 1990г. - Вып. 148. - С. 57-64.
5. Надежность и живучесть систем связи / Под ред. Б.Я. Дудника. - М.: Радио и связь. 1984г.
6. Воробьев Б.В., Мешковский К.А. Способ определения живучести сетей связи ; Электросвязь. – 1988г. - № 12.
7. Филин Б.П. Методы анализа структурной надежности сетей связи. М.: Радио и связь, 1988г.
8. Войлоков В.И., Птицын Г.А. Сравнение сетей сообщений по живучести У Электросвязь. – 1991г. - № 4.
9. Птицын Г.А. Анализ строения деревьев кратчайших путей развивающихся сетей Электросвязь. - 1996. -№3.
10. Холин А.В. Физическое моделирование сетей связи. - В кн.Автоматы и управления сетями.-М.: Наука,198, с133 - 137
- 11.Дудник Б.Я., Филин Б.П. применение метода двудольных графов для оценки надёжности сложных систем. – Автоматика и телемеханика, 1981г., №12, с.154 -168
12. Малинов В.М. Способы расчета загрузки перегонов линий метрополитенов. // Вестник ВНИИЖТ. – 1982г.- №3. – с.50 – 52

13. Птицын Г.А. Динамика характеристик потоков сообщений при развитии сетей – Новосибирск.: Международная НТК, “проблемы функционирования, Информационных сетей.” (ПФИС-91) // Тезисы докладов. 1991.- с. 255-262
14. Флейшман Б.С. О живучести сложных систем. ТК,1966,№5
15. Е.А. Кучерявы. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет // СПб, Наука и Техника. 2004г.
16. Р.Кох, Г.Т. Яковский. Эволюция и конвергенция в электросвязи // М., Радио и связь. 2001г.
17. Парфёнов Ю.А. Последняя миля на медных кабелях. М.: Радио и связь, 2001г.
18. Захаров Г.П. Исследование сетей передачи данных. М.: Радио и связь 1982г.
19. Соколов Н.А. Эволюция телефонных сетей. Пермь. 2001г.
20. Бычков И.Д., Гольдштейн Б.С. Мифы и реальность в эксплуатационном управлении системы доступа // Вестник связи, 2007.№2.
21. Мальков А.А. Оценка экономической эффективности внедрения автоматизированной CRM - системы // Информационный портал CRM.
22. Башилов Т.В. VDSL 2, или как превратить медь в стекло - в золото// Вестник связи, 2006, №4, с.58-62.
23. McDysan. QoS and Traffic Management in IP and ATM Networks // McGraw – Hill. 2000.
24. L.Zhang, R.Braden/ Resource reservation Protocol // RFC – 2205, September 1997.
25. S.Blake et al. Architecture for Differentiated Services // RFC – 2475, December 1998.

ПРИЛОЖЕНИЕ