

*На правах рукописи*

**АЛЛАЕВ  
АКМАЛЬ ЭРГАШЕВИЧ**

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ ДОСТУПА**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

*АВТОРЕФЕРАТ*

*диссертации на соискание ученой степени*

*кандидата технических наук*

Санкт-Петербург

2004

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Гольдштейн Борис Соломонович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Дымарский Яков Семенович

кандидат технических наук, доцент Юркин Юрий Викторович

Ведущая организация: ОАО «Гипросвязь-СПб»

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2004 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета К 219.004.01 при Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича по адресу: 191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 61.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета,

к.т.н., доцент

В.Х. Харитонов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследований.** Происходящая в настоящее время модернизация местных телекоммуникационных сетей в направлении конвергенции сетей и услуг и переход к сетям связи следующего поколения (Next Generation Network - NGN), радикально изменяет подходы к построению современных сетей доступа (СД). От СД по-прежнему требуется высокая надежность и низкая стоимость, но уже при более широкой пропускной способности и более высоком качестве передачи информации, к тому же эти требования уже предъявляются к технологически новым средам распространения сигналов (кабель с оптоволоконными и радиоканал), что значительно влияет на принципы построения СД. Распространение новых видов услуг меняет характер нагрузки, передаваемой по линиям СД, а применение узлов предоставления услуг (Service Node) большой емкости с выносными модулями (VM), а также новых технологий и новых сред распространения сигналов существенно влияет на структуру и параметры СД. В частности, происходит расширение границ СД, переход к новым структурам и изменение качества обслуживания различных видов информации. Естественно, что при этом должна меняться количественная основа исследований, совокупность математических моделей и методов оценки эффективности, планирования и оптимизации СД. В связи с этим тема диссертационной работы, посвященной разработке таких методов, является, безусловно, актуальной и своевременной.

Вопросы, касающиеся СД, рассмотрены в большом числе работ, включая монографии (Н. Соколова, Б. Гольдштейна, Ю. Парфенова, Д. Мирошникова), статьи в научно-технических журналах и в сети Интернет, а также многочисленные доклады на конференциях. В большинстве публикаций, посвященной данной тематике, чаще приводятся только сами сценарии реализации СД на базе различного оборудования от разных производителей, или же рассматривается какая-то одна технология доступа. Тем не менее, несмотря на их обилие, практически отсутствуют аналитические исследования, направленные на изучение базовых аспектов определения возможных компонентов СД, ее структуры, анализа процессов передачи по СД интегрированной информации (данные, голос, видео), а также большого круга вопросов, касающихся планирования этих сетей. Учитывая также и тот факт, что доминирующую долю затрат на реализацию местной сетевой инфраструктуры занимает СД, то нерешенность указанных вопросов еще более определяет актуальность данной диссертационной работы.

**Цель и задачи исследования.** Цель работы состоит в *исследовании и разработке методов выбора структур СД, моделей и методов оценки ВВХ при передаче по СД разнородной нагрузки для определения необходимого ресурса цифровых линий в условиях перехода к NGN*. Поставленная цель обусловила необходимость решения следующих основных задач:

- анализ проблем и путей модернизации существующих СД;
- определение круга задач планирования, которые требуют своего решения при построении мультисервисных сетей доступа;
- развитие методов формального описания структуры сети, определение параметров, метрик и критериев оценки для сравнения между собой альтернативных вариантов компонентов и структуры СД в условиях NGN;
- разработка методов и алгоритмов выбора компонентов и структуры СД;
- разработка методов определения рациональной топологии СД;

- разработка методов, алгоритмов и программных средств синтеза структур СД при различных сетевых топологиях по критерию минимальной стоимости;
- разработка моделей и методов расчета ВВХ обслуживания нагрузки цифровых линий СД.

**Методы исследования.** Для достижения поставленных целей в качестве аппарата исследования использованы методы из теории графов, целочисленного линейного программирования, теории массового обслуживания, теории исследования операций и теории надежности.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в предложенных оригинальных методах и моделях, позволяющих эффективно вырабатывать предложения по модернизации или строительству новых СД, с учетом современных требований при переходе сетей связи к NGN. В процессе проведенных исследований были разработаны следующие объекты, характеризующиеся научной новизной:

- метод определения структуры СД, основанный на последовательном решении задач выбора топологии и синтеза структуры в рамках выбранной топологии;
- метод определения базовой топологии построения СД, учитывающий как надежностные, так и затратные критерии;
- метод минимизации затрат на линейно-кабельную инфраструктуру при построении СД на базе кольцевых топологий;
- алгоритм и программа синтеза однокольцевых структур СД;
- модель цифровой линии СД и метод определения ВВХ при передаче по ней мультисервисного трафика.

**Практическая ценность результатов работы.** Теоретические исследования, выполненные в работе, доведены до инженерных решений. Основные результаты работы внедрены ОАО «Связьинвест» и ГК «Экран» при построении мультисервисной сети абонентского доступа BroadAccess в системном проекте сети следующего поколения NGN для ОАО «Межрегиональный ТранзитТелеком» и в ряде других НИР и ОКР, выполненных при участии автора.

Представленные принципы и методы эффективного проектирования СД служат основой для создания программного обеспечения, автоматизирующего процесс проектирования. В рамках диссертации созданы программные средства, тексты которых содержатся в приложениях.

**Апробация работы.** Основные результаты докладывались на 59-й Научной сессии, посвященной Дню радио, Москва, 2004 г., а также на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов ГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича и опубликованы в «Трудах учебных заведений связи».

**Публикации.** По материалам данной диссертационной работы в научно-технических журналах и в трудах международных и всероссийских научных конференций опубликовано 9 печатных работ.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Объем пояснительной записки 140 страниц, 44 иллюстраций, список литературы насчитывает 80 наименований.

### **Основные положения**, выносимые на защиту:

- двухкомпонентный критерий эффективности, включающий стоимость компонента сети при нормальных периодах функционирования и стоимость штрафа за периоды его простоя;
- подход к оптимизации структуры СД, позволяющий свести многокритериальное решение к двухэтапному однокритериальному решению данной задачи;
- метод выбора базовой топологии сетей доступа по усредненным или предельным значениям характеристик компонентов сети;
- алгоритмы и программы синтеза сетевых структур по критерию минимальной стоимости в классе односвязных и кольцевых топологий;
- обоснование оптимальности однокольцевых структур СД и порядок рационального перехода к многокольцевым структурам;
- математическая модель цифровой линии мультисервисной сети доступа, представленная в виде СМО с комбинированной дисциплиной обслуживания с наличием и отсутствием приоритетов и методы получения ее ВВХ.

## **СОДЕРЖАНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ**

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, перечислены основные научные результаты диссертации, определены практическая ценность и область применения, приведены сведения об апробации работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** является вводной. Рассматриваются принципы построения существующих СД, их структурные характеристики, изложены достоинства и недостатки этих сетей. В данном разделе рассмотрена эволюция проблематики существующих СД, оценки возможности использования современных технологий, изложены основные требования к СД при переходе к NGN.

Главное изменение, происходящее в структурно-функциональных принципах построения СД, наблюдаемое в процессе эволюции - это расширение границ для групповой части СД, а именно транспортной (опорной) сети доступа (см. рис. 1). Эти изменения вызваны процессами применения на местных сетях связи различных узлов предоставления услуг с ВМ, которые все ближе “выносятся” в сторону пользователя услуг, и тем самым, сокращают распределительный участок СД, называемый “последней милей” до “последних метров”. Показано, что роль ВМ в СД играют различные мультиплексоры доступа, концентраторы, оптические сетевые окончания систем передач, базовые станции беспроводного доступа и многие другие средства распределения информации.

Проведенный анализ показывает, что практически незатронутыми остаются многие задачи в области планирования транспортной части СД, в частности аналитические исследования, касающиеся выбора ее компонентов и структуры, а также методов расчета ВВХ интегрированной информации, передаваемой в этих сетях.

Ввиду того, что вопросы, связанные с определением мест размещения и емкости узлов предоставления услуг и их ВМ на сегодняшний день хорошо изучены, в диссертационной работе они не рассматривались.

В соответствии с проведенными в первой главе исследованиями конкретизированы цель и задачи диссертационной работы.



где  $T_{in}$  ( $T_{in}$ ) – среднее время исправной работы (простоя)  $i$ -го компонента.

Введем коэффициент  $\kappa$ , характеризующий соотношение между величинами  $c_1$  и  $c_2$ :

$$\kappa = c_2/c_1, \quad c_2 = \kappa c_1. \quad (3)$$

Тогда для критериальной характеристики  $s$  получаем:

$$s = c_1 K, \quad (4)$$

где  $K = 1 + \kappa(1 - \kappa_2)$ . (5)

Величина  $K$  показывает, во сколько раз возрастают расходы на содержание компонента сети из-за его ненадежности. В связи с этим уместно назвать  $s$  параметром "стоимость-надежность", а  $K$  – коэффициентом возрастания стоимости. Значения  $K$  представляют самостоятельный интерес и могут (в комплексе с учетом значений  $c_1$ ) использоваться при выборе компонентов сети. Нетрудно, например, представить ситуацию, когда предпочтение будет отдано не более дешевому, а более дорогому, но обладающему большей надежностью, компоненту.

Соотношения (4) и (5) являются фундаментом для проведения подобных сравнительных исследований. Здесь могут оказаться полезными данные табл.1, содержащие ряд значений коэффициента  $K$ , вычисленных для различных величин  $\kappa_r$  и  $\kappa$ .

Таблица 1. Значения коэффициента возрастания стоимости  $K$

Значение $\kappa_r$	Значение $\kappa$							
	0,1	0,3	0,5	0,7	1	2	3	5
0,5	1,05	1,15	1,25	1,35	1,50	2,00	2,50	3,50
0,6	1,04	1,12	1,20	1,28	1,40	1,80	2,20	3,00
0,7	1,03	1,09	1,15	1,21	1,30	1,60	1,90	2,50
0,8	1,02	1,06	1,10	1,14	1,20	1,40	1,60	2,00
0,9	1,01	1,03	1,05	1,07	1,10	1,20	1,30	1,50
0,95	1,005	1,015	1,025	1,035	1,050	1,10	1,15	1,25
0,98	1,002	1,006	1,010	1,014	1,020	1,04	1,06	1,10
0,99	1,001	1,003	1,005	1,007	1,010	1,02	1,03	1,05

В действительности возможности использования введенного критерия "стоимость-надежность" не исчерпываются единичными сравнениями. Из аналитических выражений (4) и (5) можно извлечь более общие результаты. В частности, как оказывается, можно указать целые области, принадлежность к которым гарантирует предпочтение перед компонентами других областей.

Зафиксируем значения  $A = \kappa(1 - \kappa_r)$  и  $c_1$ . Тогда зависимость  $\kappa = A/(1 - \kappa_r)$  (или – что то же –  $1 - \kappa_r = A/\kappa$ ) разделяет плоскость параметров  $\kappa$  и  $1 - \kappa_r$  на две области: в первой значение коэффициента возрастания стоимости  $K$  не больше (меньше)  $1 + A$ , т.е.  $K_I \leq 1 + A$ , во второй имеет место обратное неравенство  $K_{II} > 1 + A$ . Но это означает, что компоненты, оказавшиеся со своими параметрами в области I, предпочтительнее компонентов, принадлежащих области II. В связи с этим уместно назвать область I *областью предпочтений*, а область II – *нерекомендуемой областью*. Соответственно кривую, разделяющую области I и II, назовем *границей зависимости*. Представление о граничных зависимостях дают кривые рис.2.

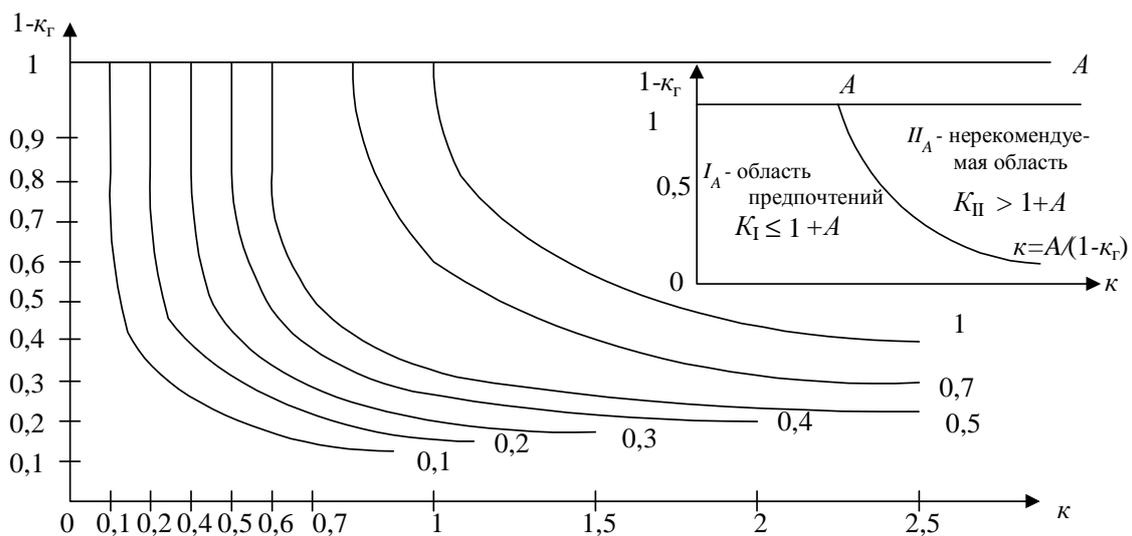


Рис. 2. Граничные зависимости  $\kappa = A/(1 - \kappa_\Gamma)$  для различных значений  $A$

Изложенный подход является приемлемым, но недостаточно эффективным. Дело в том, что использование в качестве базовой *характеристики математического ожидания* не обеспечивает должной уверенности в результате. Это связано с тем, что математические ожидания реализуются с недостаточно высокими вероятностями. В связи с этим, предлагается и (на основании строгого вероятностного подхода) выводится выражение для гарантированной (с вероятностью не меньшей 0,98) “стоимости-надежности” компонента:

$$c_\Gamma = c_1 L_\Gamma, \quad (6)$$

$$\text{где } L_\Gamma = K + 3\sqrt{\kappa_\Gamma^2 + (1 + \kappa)^2 (1 - \kappa_\Gamma)^2}. \quad (7)$$

Таблица 2. Значения  $L_\Gamma$  для различных  $\kappa_\Gamma$  и  $\kappa$

Значение $\kappa_\Gamma$	Значение $\kappa$								$\min L_\Gamma$ $\kappa$
	0,1	0,3	0,5	0,7	1	2	3	5	
0,5	3,27	3,61	3,95	4,32	4,86	6,74	8,68	12,62	3,27
0,6	3,26	3,49	3,75	4,01	4,40	5,82	7,33	10,41	3,26
0,7	3,34	3,49	3,64	3,82	4,06	5,02	6,07	8,29	3,34
0,8	3,51	3,58	3,65	3,75	3,87	4,40	4,99	6,32	3,51
0,9	3,74	3,76	3,78	3,83	3,86	4,05	4,24	4,74	3,74
0,95	3,86	3,86	3,88	3,88	3,93	3,98	4,06	4,25	3,86
0,98	3,94	3,95	3,95	3,95	3,96	3,98	4,00	4,07	3,94
0,99	3,97	3,97	3,98	3,98	3,98	3,99	4,00	4,02	3,97
$\min L_\Gamma$ $\kappa_\Gamma$	3,26	3,49	3,64	3,75	3,86	3,98	4,00	4,02	

Назовем  $L_\Gamma$  “коэффициентом возрастания гарантированной стоимости” (по аналогии с коэффициентом  $K$ , представляющим, по существу, характеристику возрастания математического ожидания стоимости). Ряд значений  $L_\Gamma$  представлен в табл. 2 и проиллюстрирован на рис. 3.

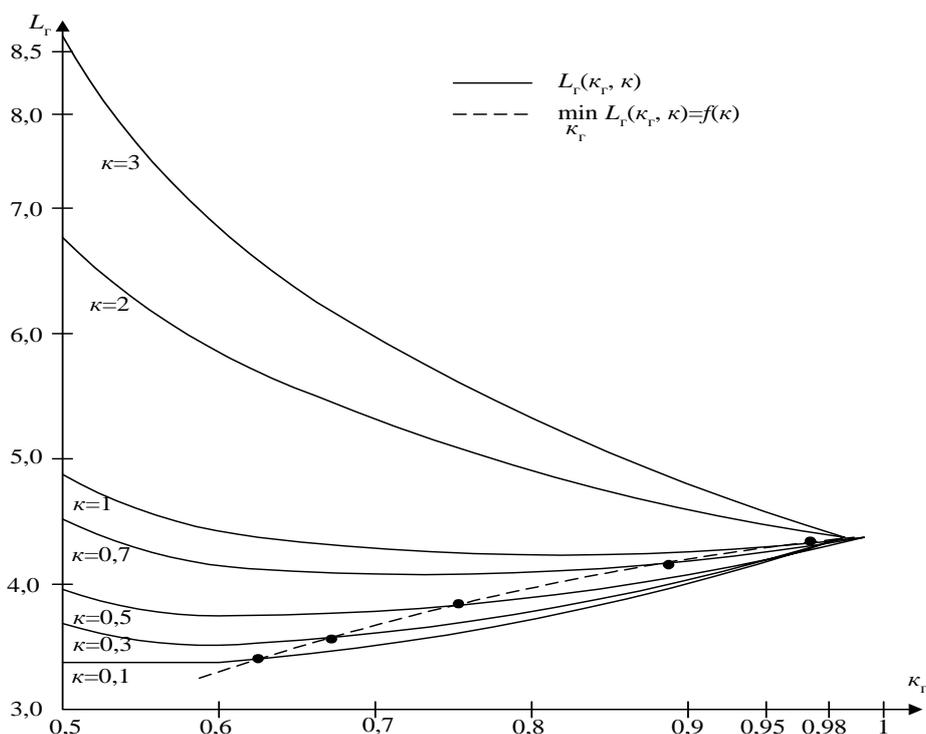


Рис. 3. Зависимости коэффициента возрастания гарантированной стоимости

Как видно из таблицы и рисунка, кривые  $L_T(k_T)$  для всех рассмотренных значений  $\kappa$  имеют минимум (в табл. 2 минимальные в столбцах значения  $L_T$  обведены прямоугольником, на рис. 3 они показаны пунктирной кривой).

Основное значение приведенных выше формул, таблиц и рисунков состоит в возможности сравнения между собой компонентов сети по параметру гарантированной стоимости, учитывающему как стоимостные, так и надежность характеристики, и реализующемуся с высокой вероятностью (порядка  $P_2=0,98$ ). Можно утверждать, что сфера применения метода шире, нежели сети связи. Он может быть использован при сравнительном анализе и выборе компонентов систем с ненадежными элементами.

Исследования показали, что критерий гарантированной стоимости  $c_T$  обладает одним существенным недостатком – он не является аддитивным. Поэтому нельзя рекомендовать его для использования при выборе структуры СД, когда необходимо оперировать некоторыми интегральными характеристиками типа суммарной стоимости. Здесь нужно пользоваться критерием "стоимость-надежность"  $s$  (см. формулы (4), (5)), который является аддитивным, как всякий показатель типа математического ожидания.

Показано, что величина общесетевых затрат на СД может определяться из выражения:

$$Z = Z_A + Z_L = \sum_{a_i \in A} \rho_i + \sum_{b_{ij} \in B^*} \rho_{ij} \quad (8)$$

где  $Z_A$  и  $Z_L$  - суммарные затраты на создание соответственно узлов и линий сети абонентского доступа;  $\rho_i, \rho_{ij}$  - весовые коэффициенты, характеризующие соответственно затраты на создание узла  $a_i$  и ребра  $b_{ij}$ ;  $B^* \in B$  - множества ребер из матрицы  $B=||b_{ij}||$ , которые могут быть включены в сеть в процессе синтеза ее структуры.

Считается, что при заданном числе узлов  $N$  суммарные затраты на создание узлов  $Z_A$  (см. формулу 8) не зависят от элементов матрицы  $B$ , следовательно минимизация суммарных затрат на построение линии  $Z_L$  обеспечивает минимум общесетевых затрат  $Z$ , т.е.  $Z_L$  является целевой функцией при выборе структуры СД. Поэтому задача сводится к выбору такого подмножества ( $B^*$ ) из множества допустимых ребер ( $B$ ), включение которых в сеть требует наименьших затрат на построение и обеспечивает надежность сети не менее заданной, т.е. в этом случае затраты являются показателем оптимальности, а надежность сети ограничивающим фактором.

Ввиду того, что оптимизация структуры СД - сложная задача комбинаторного характера, для решения которой необходимо оптимизировать как локальные (набор связей между узлами), так и интегральные характеристики (количество узлов, связность сети), в работе производится ее декомпозиция на два этапа: на первом по усредненным или предельным значениям характеристик компонентов определяется базовая топология сети, на втором этапе при фиксированной базовой топологии определяется вариант структуры, с использованием конкретных значений параметров компонентов сети.

Далее, в главе 2 решается задача, являющаяся первым этапом на пути оптимизации структуры СД, а именно задача выбора базовой топологии.

Учитывая, что главной характеристикой топологии является связность сети ( $h$ ), а переход от односвязной ( $h=1$ ) сети к топологиям с большим числом связей осуществляется добавлением на сеть новых ребер, который, с одной стороны, приводит к росту стоимости сети из-за необходимости строительства новых линий, а с другой, к увеличению надежности сети за счет организации новых связей, то оптимизационная задача выбора топологии (в первом приближении) может быть сформулирована следующим образом.

**Задача 1.** При заданных числе узлов ( $N$ ), минимальном значении надежности одного ребра ( $p = \min_{i,j} p_{ij}$ ), средней стоимости ( $s_1$ ) создания и эксплуатации одного ребра, определить такую минимально-связную топологию, которая обеспечивает заданную надежность  $P_d$  ТСД, т.е. минимизировать связность сети  $h$  при ограничениях на надежность  $P(h) \geq P_d$ . Надежность узлов полагается абсолютной.

Отметим, что значение  $s_1$  вычисляется по соотношению вида (1):

$$s_1 = c_1 p + (c_1 + c_2) (1-p) = c_1 [1 + \kappa(1-p)].$$

В качестве критерия для сравнения между собой вариантов базовой топологии сети используется характеристика “стоимость-надежность”. При расчете характеристики стоимость сети  $s(h)$  (усл. ед. стоим/ед. времени) учитываются начальные затраты  $s_1$ , связанные с капитальными вложениями на создание и эксплуатацию  $M(h)$ -реберной сети с учетом их надежностей, размер штрафных санкций  $s_2$  (усл. ед. стоим/ед. времени) за простой *всей сети* из-за нарушения ее надежности  $P(h)$ , т.е.:

$$s(h) = s_1 M(h) + s_2 [1 - P(h)], \quad (9)$$

Для оценки надежности ( $P(h)$ )  $h$ -связной  $N$ -узловой ТСД получено выражение

$$P(h) = \sum_{i=0}^{M(h)-(N-1)} C_{M(h)}^i (1-p)^i p^{M(h)-i}, \quad h = \overline{1, N-1}. \quad (10)$$

где  $C_{M(h)}^i$  - число сочетаний  $M(h)$  по  $i$ ;  $M(h)$  - минимальное число ребер для построения  $h$ -связной  $N$ -узловой сети определяется по формуле:

$$M(h) = \begin{cases} M(h-1) + N/2, & \text{если } N \text{ четно,} \\ M(h-1) + (N+1)/2, & \text{если } N \text{ и } h \text{ нечетны,} \\ M(h-1) + (N-1)/2, & \text{если } N \text{ нечетно, а } h \text{ четно.} \end{cases} \quad (11)$$

Используя рекуррентные формулы (11) и учитывая, что  $M(1)=N-1$ , а  $M(2)=N$ , можно рассчитать величины  $M(h)$  при различных значениях  $N$  и  $h$ .

В таблице 3 приведены результаты расчетов  $M(h)$  и  $P(h)$  при различных значениях  $h$  для случаев, когда число узлов  $N=5, 10$  или  $15$ , а вероятность исправного состояния ребер  $p=0,6$  и  $p=0,9$ .

Таблица 3. Значения функций  $M(h)$  и  $P(h)$

Связность $h$	Число узлов, $N$								
	5			10			15		
	$M(h)$	$p=0,6$ $P(h)$	$p=0,9$ $P(h)$	$M(h)$	$p=0,6$ $P(h)$	$p=0,9$ $P(h)$	$M(h)$	$p=0,6$ $P(h)$	$p=0,9$ $P(h)$
1	4	0,130	0,656	9	0,010	0,387	14	0,001	0,229
2	5	0,337	0,919	10	0,046	0,736	15	0,005	0,549
3	8	0,826	1	15	0,610	1	23	0,556	1
4	10	0,945	1	20	0,943	1	30	0,932	1
5				25	0,996	1	38	0,999	1
6				30	1	1	45	1	1
7				35	1	1	53	1	1
8				40	1	1	60	1	1
9				45	1	1	68	1	1
10							75	1	1
11							83	1	1
12							90	1	1
13							98	1	1
14							105	1	1

Анализ результатов расчетов показал, что увеличение связности сети  $h$  приводит к более интенсивному росту числа ребер  $M(h)$ , необходимого для построения ТСД, чем росту надежности этой сети  $P(h)$ . Кроме того, переход от односвязной ( $h=1$ ) к кольцевой ( $h=2$ ) топологии позволяет при наименьших затратах (за счет включения в сеть только одного дополнительного ребра) обеспечить существенный прирост надежности ТСД. При  $N=5$  этот прирост является и максимальным, при  $N=10$  и  $15$   $P(h)$  возрастает примерно в 5 раз, но по абсолютной величине остается малым. Здесь наибольший относительный (приходящийся на одно ребро) прирост наблюдается при переходе от кольцевой к трехсвязной структуре.

Используя данные табл. 3, можно решать сформулированную выше задачу предварительного (в первом приближении) выбора базовой топологии. Для этого достаточно, продвигаясь вниз по одному из столбцов таблицы, выбрать два соседних значения  $h_1$  и  $h_1+1$  таких, что

$$P(h_1) < P_d < P(h_1+1) \quad (12)$$

Результаты такого элементарного анализа приведены в табл. 4. Отметим, что в большинстве случаев включение в рекомендуемые значения связности левой границы (например, включение связности "2" в рекомендацию "2-3" для  $P_d=0,8$ ,  $N=5$  и  $p=0,6$ ) базируется на замечании о том, что реальное значение надежности сети превышает оценку  $P(h)$  по формуле (10).

Для  $p=0,6$  преобладающей является рекомендация трехсвязной сети, для  $p=0,9$  – двухсвязной, т.е. кольцевой. Это означает, что повышение надежности ребер позволяет строить более простые сети.

Таблица 4. Рекомендуемые значения связности  $h_I$  по надежности

Требуемое значение надежности сети $P_d$	Число узлов, $N$					
	5		10		15	
	Надежность ребра, $p$					
	0,6	0,9	0,6	0,9	0,6	0,9
0,7	2-3	1-2	3-4	1-2	3-4	2-3
0,8	2-3	1-2	3-4	2-3	3-4	2-3
0,9	3-4	2	3-4	2-3	3-4	2-3

Проведенные вычисления позволили решить задачу выбора базовой топологии в более полной постановке, включив в ее формулировку стоимостной критерий в явном виде.

$$\text{Задача 2. } s(h) \Rightarrow \min_{\{h\}}, \quad (13)$$

$$P(h) \geq P_d, \quad (14)$$

$$h = 1, 2, \dots \quad (15)$$

Это - задача дискретного программирования, решение которой  $h_I$  в первом приближении получено ранее из условий (12). Фактически речь идет об уточнении этого решения, а именно: необходимо найти значения  $h_{II}$ , минимизирующие функцию  $s(h)$ , и сопоставить их со значениями  $h_I$ . Синтез  $h_I$  и  $h_{II}$  и даст искомое решение задачи (13) – (15).

Пусть параметры  $N$  и  $p$  принимают те же значения, что и ранее, параметр  $s_2$  - одно из четырех возможных значений 0,1; 0,5; 1 или 2, а для вычисления  $s_1$  используются такие исходные данные:

$$\kappa = 1, \quad c_1 = \begin{cases} 0,0381 \text{ усл.ед./час для каналов с } p = 0,6, \\ 0,0484 \text{ усл.ед./час для каналов с } p = 0,9. \end{cases}$$

Тогда  $s_1 = c_1[1 + \kappa(1 - p)] = 0,0533$  для любых каналов. При таком значении  $s_1$  за  $T=15$  лет = 131400 час на содержание одного канала будет истрчено 7000 усл.ед.

Результаты определения  $h_{II}$  приведены соответственно в табл. 5; зависимости  $s(h)$ , кроме того, показаны на рис. 4 и 5.

Таблица 5. Рекомендуемые значения связности  $h_{II}$  по стоимости

Значение $s_2$ усл.ед/час	Число узлов, $N$					
	5		10		15	
	Надежность ребра, $p$					
	0,6	0,9	0,6	0,9	0,6	0,9
0,1	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
0,5	3-4	2	2-4	2	1-2	1-2
1	3-4	2	3-4	2-3	2-4	2-3
2	4	2-3	4	3	4	3

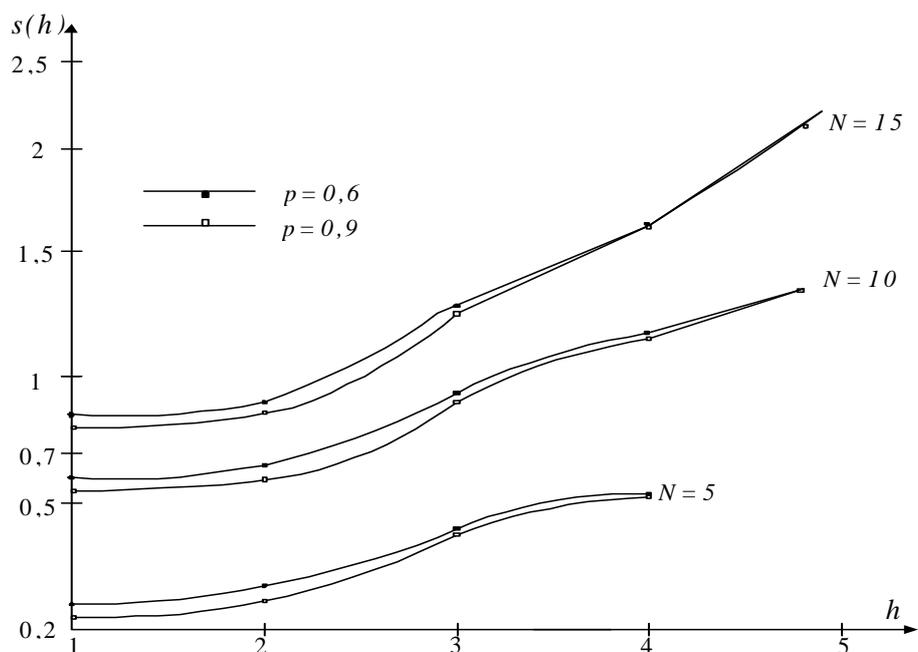


Рис. 4. Зависимости  $s(h)$  при  $s_2=0,1$

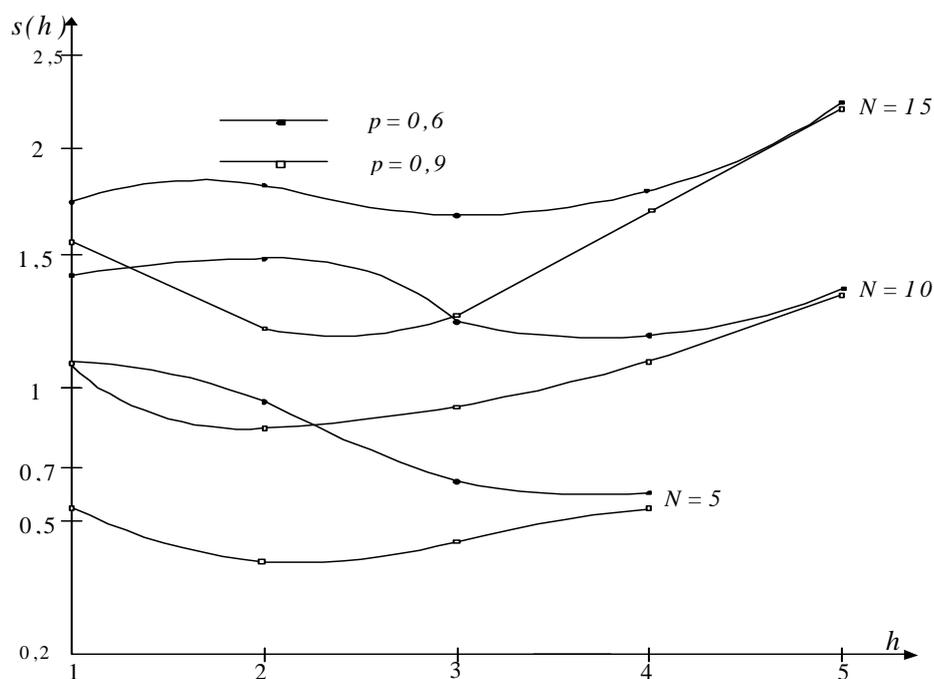


Рис. 5. Зависимости  $s(h)$  при  $s_2=1$

Анализ результатов расчетов позволяет сделать следующие выводы:

- характер зависимостей  $s(h)$  существенно зависит от значения штрафной функции  $s_2$ . При малых штрафах ( $s_2=0,1$ ) функции  $s(h)$  монотонно возрастают с увеличением связности сети независимо от значений  $N$  и  $p$ . Фактически это означает, что критерий  $s(h)$  "рекомендует" в этом случае минимально возможные значения связности – *односвязную* и *кольцевую* топологии (см. первую строку табл.5). С возрастанием штрафов  $s_2$  положение кардинально меняется. В частности, уже при  $s_2=0,5$  только одна зависимость (для  $N=15$  и  $p=0,6$ ) сохраняет монотонное возрастание, у всех остальных появляется *минимум* – преимущественно при

кольцевой топологии. При дальнейшем росте  $s_2$  ( $s_2=1$  и  $2$ ) все зависимости  $s(h)$  приобретают минимум

$$s_0 = \min_h s(h) = s(h_{II}). \quad (16)$$

Наряду с  $h_{II}$  рекомендуется одно или два ближайших значения связности, для которых выполняется условие

$$|s(h) - s_0|/s_0 \leq 0,10 - 0,11; \quad (17)$$

- увеличение числа узлов ужесточает требования к сети, заставляет повышать связность, усложнять ее структуру. Аналогичное влияние оказывает уменьшение надежности ребер. Этот вполне очевидный результат получает количественное выражение в рекомендуемых значениях связности  $h_{II}$ . Важно отметить, что при этом ни для одной из исследованных комбинаций значений параметров  $N$ ,  $p$  и  $s_2$  рекомендуемое значение связности не превышает четырех ( $h_{II} \leq 4$ ).

Таблица 6. Рекомендуемые значения связности по надежности и стоимости ( $h_{11}$  и  $h_{12}$ )

Параметр	Количество узлов, $N$					
	5		10		15	
	Надежность ребра, $p$					
	0,6	0,9	0,6	0,9	0,6	0,9
$h(N, p)$	2-4	1-3	3-4	2-3	3-4	2-3
$h_1(N) - h_2(N)$	1-4		2-4		2-4	
$h_{11} - h_{12}$	1-2					

Таблица 7. Рекомендуемые значения связности по надежности и стоимости ( $h_{31}$  и  $h_{32}$ )

Параметр	Надежность ребра, $p$					
	0,6			0,9		
	Количество узлов, $N$					
	5	10	15	5	10	15
$h(N, p)$	2-4	3-4	3-4	1-3	2-3	2-3
$h_3(N) - h_4(N)$	2-4			1-3		
$h_{31} - h_{32}$	1-2					

Заключительная часть главы 2 посвящена выработке окончательных рекомендаций

$$h(N, p) = h_I \cap h_{II} \quad (18)$$

совмещением данных табл. 4 и 5.

Значения  $h(N, p)$  приведены в табл. 6 и 7. Там же содержатся результаты обобщения этих данных. Цель обобщения – выполненное особым образом усреднение функций  $h(N, p)$  по параметрам  $N$  и  $p$ . Последовательность усреднения в табл. 6 следующая:

I этап. "Усреднение" по  $p$ :

$$h_1(N) = \min_p h(N, p), \quad h_2(N) = \max_p h(N, p). \quad (19)$$

II этап. Исключение  $N$  – получение минимаксных оценок

$$h_{11} = \min_N h_1(N); \quad h_{12} = \max_N h_1(N). \quad (20)$$

В табл. 7 последовательность такая:

$$\text{I этап. "Усреднение" по } N: h_3(p) = \min_N h(N, p), \quad h_4(p) = \max_N h(N, p). \quad (21)$$

$$\text{II этап. Исключение } p \text{ – получение минимаксных оценок} \\ h_{31} = \min_p h_3(p); \quad h_{32} = \max_p h_3(p). \quad (22)$$

Таким образом, проведенный анализ показал, что в качестве базовых рекомендуются *односвязные* и *кольцевые* топологии.

**Третья глава** посвящена рассмотрению новых методов и алгоритмов, являющихся следующим этапом на пути оптимизации структуры СД. При этом основной задачей данного этапа является географическая трассировка каналов (ребер) сети, которая ставится как задача структурного синтеза по минимуму двухкомпонентного затратно-надежностного критерия в классе односвязных и кольцевых структур.

Математическая формулировка задачи синтеза при односвязной структуре СД следующая. На заданных множествах узлов  $A = \{a_i\}, i = \overline{1, N}$ , допустимых трассах строительства линий между узлами сети в виде матрицы допустимых ребер  $B = \|b_{ij}\|$ ,

$$i, j = \overline{1, N}, \quad b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{трасса возможна} \\ 0, & \text{трасса запрещена} \end{cases} \quad \text{и значений весовых коэффициентов ребер}$$

$$\rho = \|\rho_{ij}\| \quad \text{найти множество } B^* \text{ ребер, которые необходимо включить в сеть, такое,} \\ \text{что: } \rho(B^*) = \sum_{b_{ij} \in B^*} b_{ij} \rho_{ij} \Rightarrow \min_{B^*}, \quad (23)$$

$$B^* \in B, \quad (24)$$

$$h(B^*) = 1. \quad (25)$$

В качестве  $\rho_{ij}$  используется введенный в гл. 2 критерий “стоимость-надежность” (см. формулы (4) и (5)).

Рассматриваемая задача, в принципе, может быть решена методом построения кратчайшего дерева, известного из теории графов, на основе которого был разработан алгоритм и написана программа, текст которой приведен в приложении.

Далее, в главе 3, обсуждаются вопросы определения оптимального числа колец при построении СД на базе кольцевой топологии. На основе двух лемм (здесь не приводятся) доказывается, что минимум критерия (“стоимость-надежность”) обеспечивает однокольцевая структура. Однако, учитываются также и различные ограничения (например, систем передачи) на максимальное число узлов в одном кольце или необходимость повышения надежности (в смысле числа обходных трасс), которые могут иметь место в реальной практике проектирования таких сетей. Для примера, число узлов SDH кольца при применении протокола защиты MS-SPRing не должно превышать 16 узлов (рекомендация МСЭ G.841), а для обеспечения устойчивой синхронизации сети - не более 20 узлов (рекомендации МСЭ G.803, G.812, G.813). В таких случаях диктуется необходимость применения многокольцевых структур.

Результаты исследований показали, что сопряжение колец в “центральном” узле (структура типа “ромашка”, “пропеллер” и т.п.) которое часто встречается при проектировании СД, не только не решает вопрос повышения потенциальной надежности  $P(h)$  сети, но и повышает общесетевые затраты на построение СД.

Предложен иной метод построения многокольцевой структуры, сущность которого заключается в следующем. Первоначально синтезируется минимальная по стоимости однокольцевая структура. Затем с учетом технических ограничений и требований к надежности сети определяется необходимое число колец и количество узлов в каждом из них. На заключительном этапе осуществляется переход от полученной ранее однокольцевой структуры на структуру с необходимым числом колец путем рационального соединения в соответствующих несмежных узлах однокольцевой сети.

Заключительная часть главы 3 посвящена решению задачи синтеза однокольцевой структуры СД, математическая формулировка которой аналогична оптимизационным задачам (23), (24), с заменой условия (25) на  $h(B^*) = 2$ . Показано, что к ней применимы методы решения задачи коммивояжера (ЗК) известной из теории исследования операций. Комбинаторный характер задачи предопределяет трудности их реализации.

Проанализированы наиболее известные методы решения ЗК. В частности, метод лексического (полного) перебора позволяет оптимизировать лишь простейшие сети с числом узлов 5...12. Метод ветвей и границ расширяет этот диапазон до сетей с 40-50 узлами. При дальнейшем усложнении сетей применение точных методов (лексический перебор и метод ветвей и границ) становится бесперспективным. Поэтому важной является разработка приближенных методов. В работе предложен один из таких методов - метод последовательного расширения кольца (разработаны алгоритм и программа). Сравнение его с точными методами показало существенные преимущества по времени вычислений и числу операций и не выявило расхождений с точными решениями.

Предложена общая схема выбора структуры СД в виде двух функциональных блоков, позволяющие синтезировать односвязную и кольцевую сети. Схема поддержана разработанными алгоритмами и программным обеспечением, т.е. представляет в совокупности с ними программный продукт, как практический выход диссертационной работы.

**Четвертая глава** посвящена инженерным способам оценки характеристик качества совместной передачи по линиям СД разнородной нагрузки, вызванной мультисервисностью этих сетей.

Известно, что потоки нагрузки, порожденные новыми услугами (речь, данные, видеоинформация), предоставляемые действующими и перспективными СД, могут сильно различаться по своим свойствам: объему используемого канального ресурса, требуемой скорости передачи, потерям, задержкам и т.д.

Проведенная процедура формализации процесса совместной передачи разнородной нагрузки по линии СД приводит к достаточно сложной по структуре модели. Предполагается, что на цифровую линию СД с  $V$  обслуживающими приборами, поступают  $n$  потоков Пуассона с интенсивностями  $\lambda_k$ ,  $k=1, \dots, n$ . Предположение о пуассоновском характере поступающего потока обосновывается на результатах книги В. Лагутина и С. Степанова «Телетрафик мультисервисных сетей связи». Принимая во внимание, что такие типы нагрузки как голос и видеоинформация требуют обслуживания в реальном масштабе времени, а другие допускают некоторую задержку, и в СД обслуживаются все эти нагрузки, то ее моделью будет СМО с комбинированной дисциплиной обслуживания. Пусть потоки сообщений с номерами  $1, \dots, m$  обслуживаются по дисциплине с явными потерями, а сообщения потоков с номерами  $m+1, \dots, n$  - с ожиданием. Необходимость учета наличия двух классов потоков, обслуживаемых на базе различных дисциплин требует

рассмотрения СМО с двумя входящими потоками с параметрами  $\Lambda_1 = \sum_{i=1}^m \lambda_i$

и  $\Lambda_2 = \sum_{i=m+1}^n \lambda_i$ . Каждая поступающая заявка  $k^{zo}$  потока для своего обслуживания требует наличие  $b_k$  передаточных единиц (свободных каналов), которые занимают одновременно на случайное время, распределенное по показательному закону с параметром  $\mu_k$ . Исследование модели в таком виде для получения явных аналитических выражений потребовало принятия некоторых упрощающих предположений относительно процесса обслуживания заявок, а именно:  $b_1 = b_2 = \dots = b_n = 1$  и  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n = 1$ .

Обозначая стационарные вероятности состояния системы через  $P_i$  ( $i=0,1,\dots$ ) и принимая во внимание, что  $\Lambda_1/\mu = Y_1$ ,  $\Lambda_2/\mu = Y_2$  и  $(\Lambda_1 + \Lambda_2)/\mu = Y$  получено следующее выражение для расчета вероятности потерь для заявок потоков первого класса и вероятности ожидания для заявок потоков второго класса:

$$P = P(\gamma > 0) = \sum_{i=V}^{\infty} P_i = \frac{E_V(Y)}{1 - \frac{Y_2}{V} [1 - E_V(Y)]}, \text{ где } E_V(Y) = \frac{Y^V / V!}{\sum_{j=0}^V Y^j / j!}. \quad (26)$$

Выражение для расчета функции распределения времени ожидания для заявок потоков второго класса имеет вид:

$$P(\gamma > t) = P(\gamma > 0) e^{-(V - Y_2)t}. \quad (27)$$

Для количественной оценки ВВХ потока заявок второй группы также используют функцию распределения времени ожидания задержанных заявок:

$$P_3(\gamma > t) = \frac{P(\gamma > t)}{P(\gamma > 0)} = e^{-(V - Y_2)t} \quad (28)$$

ВВХ сообщений потоков второй группы кроме вышеприведенных может характеризоваться также средним временем ожидания произвольной заявки -  $\gamma_{cp}$  или средним временем ожидания задержанных заявок -  $\gamma_{cp}^3$ . Значение этих величин определяется по формулам:

$$\gamma_{cp} = -\int_0^{\infty} t P(\gamma > t) dt = \frac{P(\gamma > 0)}{V - Y_2}, \quad \gamma_{cp}^3 = \frac{1}{V - Y_2} \quad (29)$$

Для расчета потребных ресурсов (числа каналов или скорости передачи) отдельных ребер ТСД вначале следует определить величину нагрузки, создаваемой сообщениями  $k$ -го потока. Величина этой нагрузки определяется как:  $y_k = b_k \left( \frac{\lambda_k}{\mu_k} \right)$ .

(30)

Используя значения  $y_k$  ( $k=1,2,\dots,n$ ) определяется поступающая нагрузка от потоков первого класса  $Y_1$  и потоков второго класса  $Y_2$  в виде

$$Y_1 = \sum_{i=1}^m y_k, \quad Y_2 = \sum_{i=m+1}^n y_k. \quad (31)$$

Полученные выражения позволяют выбрать ресурс линий СД для обеспечения нормированного качества обслуживания заявок разнородных потоков. Следует отметить, что упрощающие предположения, на основе которых получены расчетные формулы, не приводят к большим погрешностям при определении пропускной способности ТСД. Это связано тем, что потребные ресурсы линии в большей степени определяются общим объемом поступающего трафика и в меньшей степени зависят от распределения этого трафика по отдельным потокам, т.е. переход от многомерного потока к двумерному можно считать оправданным.

Далее анализируется эффективность использования приоритетов в условиях нехватки ресурсов сети для улучшения качества обслуживания информационных потоков чувствительных к задержкам (первый класс), если дать им преимущество в передаче перед потоками, допускающими некоторую задержку (второй класс). Предполагается что заявки потоков с номерами  $1, \dots, m$  имеют абсолютный приоритет перед заявками с номерами  $m+1, \dots, n$  и при отсутствии достаточного числа свободных каналов поступающие заявки потоков первого класса прерывают обслуживание заявок потоков второго класса. Прерванные заявки этих потоков ставятся на очередь, а выбор заявки из очереди на обслуживание производится в порядке их поступления. Показано, что наиболее реальным способом анализа таких моделей является применение метода декомпозиции, т.е. в раздельном и независимом изучении процессов обслуживания заявок потоков первого и второго классов. Предложенный подход существенно упрощает осуществлять расчет ВВХ сложной СМО с комбинированной дисциплиной обслуживания и с приоритетами на базе характеристик отдельных бесприоритетных систем.

Предполагая, что  $b_1=b_2= \dots =b_m=1$  и  $\mu_1=\mu_2= \dots =\mu_m$  показано, что распределение числа занятых линий заявками потоков первого класса и вероятности их потерь соответственно, определяются по известному распределению Эрланга и по первой формуле Эрланга, т.е.

$$P_i = E_{i,v}(Y_1) = \frac{Y_1^i / i!}{\sum_{j=0}^v Y_1^j / j!}, \quad i = 0, 1, \dots, v, \quad P = E_v(Y_1) = \frac{Y_1^v / v!}{\sum_{j=0}^v Y_1^j / j!}. \quad (32)$$

В связи с тем, что заявки потоков второго класса обслуживаются только в те моменты времени, когда имеется достаточный объем ресурса линии, свободный от заявок первого класса потоков, то для расчета ВВХ заявок второго класса потоков получены выражения:

$$P(\gamma > 0) = \sum_{i=0}^v P_i P(\gamma > 0 / V - i), \quad P(\gamma > t) = \sum_{i=0}^v P_i P(\gamma > t / V - i), \quad (33)$$

где  $P_i$  - вероятность состояния системы, определяемая из (32);  $P(\gamma > 0 / V - i)$ ,  $P(\gamma > t / V - i)$  - соответственно, вероятность ожидания и функция распределения времени ожидания для заявок потоков второго класса при условии доступности для их обслуживания  $V-i$  каналов.

Для расчета величин  $P(\gamma > 0 / V - i)$  и  $P(\gamma > t / V - i)$  предполагается, что по линии СД передаются только заявки потоков второго класса, а также  $b_{m+1}= \dots =b_n=1$  и  $\mu_{m+1}= \dots =\mu_n$ , то процесс обслуживания этих заявок, представляется как СМО с  $C$  обслуживающими приборами, на которые поступают заявки потоков с параметром  $\Lambda_2$ , т.е. применяются известные формулы Эрланга для систем с ожиданием:

$$P(\gamma > 0/C) = \frac{E_c(Y_2)}{1 - \frac{Y_2}{C}(1 - E_c(Y_2))}, \quad P(\gamma > t/C) = P(\gamma > 0/C) \exp^{-(C-Y_2)t}. \quad (34)$$

Анализ показал, что величина вероятности потерь (ожидания) существенно зависит от соотношения нагрузок потоков первого и второго классов, а введение приоритетов существенно улучшает характеристики качества обслуживания для заявок потоков первого класса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследований получены следующие основные результаты:

1. Проведенный анализ эволюции сетей в направлении мультисервисных NGN показывает, что применение в телекоммуникационных сетях различных узлов предоставления услуг с ВМ приводит к появлению ярко выраженной части сети в виде транспортной сети доступа. Это в свою очередь вносит существенные изменения в принципы построения СД, требует разработки новых методов планирования и оптимизации, а разнородный трафик, циркулирующий в этих сетях, требует разработки новой модели расчета ВВХ линий СД.
2. Использование традиционных стоимостных и надежностных критериев оптимальности при синтезе структуры СД приводит к необходимости решения многокритериальных оптимизационных задач. Разработан единый интегральный показатель оптимальности для сравнения между собой компонентов СД и ее структур в целом, учитывающий как стоимостные, так и надежностные характеристики этих компонентов.
3. Разработан метод выбора базовой топологии СД по усредненным или предельным значениям характеристик сети. Обоснована целесообразность применения на СД односвязных и кольцевых топологий.
4. Разработаны алгоритмы и программные средства синтеза СД в классе односвязных и однокольцевых структур, позволяющие существенно снизить объем вычислений, необходимый для решения подобного рода задач и минимизировать затраты на реализацию СД. Предложена общая схема выбора структуры СД позволяющая синтезировать односвязную и кольцевую сети. Схема поддержана разработанными алгоритмами и программным обеспечением, т.е. представляет в совокупности с ними программный продукт, как практический выход диссертационной работы.
5. Обоснована оптимальность однокольцевых структур СД и рациональный переход к многокольцевым структурам СД.
6. Разработана модель и предложена методика расчета ВВХ СМО с комбинированным способом обслуживания заявок, адекватно характеризующие процесс передачи по линиям СД мультисервисной нагрузки при наличии и отсутствии приоритетов в обслуживании. Полученные в явном виде аналитические выражения позволяют выбрать ресурс линий СД так, чтобы обеспечивались нормированные характеристики качества обслуживания вызовов.

## СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. А.Э. Аллаев, В.В. Саморезов. Мультисервисный доступ: от теории к практике.// InfoCOM.UZ, №3, 2004.
2. А.Э. Аллаев. Выбор топологии построения сетей абонентского доступа.// Электросвязь, №5, 2004.
3. А.Э. Аллаев. О потенциальной надежности сетей абонентского доступа// 58-я НТК: Тез. докл./ СПбГУТ.- СПб, 2004.
4. А.Э. Аллаев. Структурная оптимизация сетей абонентского доступа при конвергенции сетей и услуг// 59-я научная сессия, посвященная Дню радио: Тез. докл./МТУСИ.- М, 2004.
5. А.Э. Аллаев. Об оптимальном числе колец в транспортной сети доступа// Техника и технологии, №4, 2004.
6. А.Э. Аллаев. Модель и метод расчета пропускной способности сетей доступа при обслуживании мультисервисного трафика// Техника и технологии, №4, 2004.
7. А.Э. Аллаев. Синтез односвязной структуры сети абонентского доступа// 58-я НТК: тез. докл./ СПбГУТ.- СПб, 2004.
8. А.Э. Аллаев. Построение минимальной по общей длине сети для односвязных структур// Свидетельство №DGU 00724 на программу/Государственное Патентное Агентство Руз. - Ташкент, 2004.
9. А.Э. Аллаев. Об одной модели цифровой линии мультисервисной сети доступа// Проблемы информатики и энергетики, №4, 2004.

---

Подписано к печати \_\_. \_\_ 2004.

Объем 1 печ.л. Тираж 70 экз. Зак.

---

Тип. СПбГУТ, 191186 СПб, наб. р. Мойки, 61