

Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра Автоматическая электросвязь
Специальность: Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Допущен к защите
Зав. кафедрой АЭС
Чежимбаева К.С. к.т.н., доцент
(Ф.И.О.) _____ подпись

« _____ » _____ 2014г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
пояснительная записка

Тема исследования методов расчета вероятностных характеристик алгоритмов обслуживания абонентов в резервированном

Магистрант Жураев Р.А.
подпись (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации Чежимбаева К.С.
подпись (Ф.И.О.)

Рецензент _____
подпись (Ф.И.О.)

Консультант по ВТ Жураев Р.А.
подпись (Ф.И.О.)

Нормоконтроль Жураев Р.А.
подпись (Ф.И.О.)

Алматы 2014г.

Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Факультет Радиотехники и связи
Специальность: Радиотехника, электроника и телекоммуникации
Кафедра Автоматическая электросвязь

ЗАДАНИЕ
на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Жамбаевой Дине Юлькисовне
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации Исследование методов расчета вероятностных характеристик мультисервисных систем с резервированием
утверждена Ученым советом университета № от « »

Срок сдачи законченной диссертации « »

Цель исследования исследовать эффективность методов расчета вероятностных характеристик мультисервисных систем с резервированием, провести сравнительный анализ новых наиболее эффективных методов и предложить методы в диссертационной работе.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

Исследовать вероятностные характеристики мультисервисных систем с резервированием, моделирование систем массового обслуживания с резервированием каналов. Сравнительный анализ методов анализа вероятности нагрузки методов более численного метода.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей) Схемы структурного вида мультисервисной системы с резервированием ресурсов, график вероятности функции $f_p(t, n)$, структурная схема системы массового обслуживания с резервированием каналов, график времени выполнения структуры для системы при заданной нагрузке M , зависимость функции вероятности вероятности выполнения от нагрузки P , график функции для системы с резервированием каналов.

Аңдатпа

Бұл диссертациялық жұмыс резервтелген мультисервистік жүйелердің ықтималды сипаттамаларын есептеу әдістерін зерттеуге арналған. Бірінші бөлімде мультисервисті қол жетімділік, мультисервисті жүйенің моделі және оның ықтималды сипаттамалары қарастырылған.

Екінші бөлімде арналарды резервтейтін жаппай қызмет көрсету жүйесі модельденді, рекурентті әдіс және тікелей жұмыс арасында саластырмалы талдау жүргізілді.

Диссертациялық жұмыстың үшінші бөлімінде Монте-Карло және жүктеме әдістерін зерттеуге бағытталған есептік эксперимент жүргізілген. Сонымен қатар, зерттелінген әдістерді қолдану салалары үшін қорытынды жасалынды

Аннотация

Данная диссертационная работа посвящена исследованию методов расчета вероятностных характеристик мультисервисных систем с резервированием. В первой главе рассмотрен мультисервисный доступ, модель мультисервисной системы и ее вероятностные характеристики.

Во второй главе смоделирована система массового обслуживания с резервированием каналов, проведен сравнительный анализ рекуррентного метода и метода прямого перебора.

В третьей главе диссертационной работы проведен численный эксперимент, направленный на исследование метода Монте-Карло и метода просеянной нагрузки. Также подведен итог для области применения исследуемых методов.

Abstract

This thesis is devoted to the study of methods of calculation of probability characteristics of multi-redundant systems. At the first chapter examined a multiservice access, multi-model system and its probabilistic characteristics.

At the second chapter is modeled queuing system with redundant channels, analyzed comparison of the recurrence method and the brute force method.

At the third chapter of the thesis presents a numerical experiment aimed to the study of the Monte Carlo method and sifted load method. Also summarized for application for the test methods.

Содержание

Введение	6
1 Стратегия доступа мультисервисных систем	7
1.1 Мультисервисный доступ	7
1.2 Управление доступом. Стратегия резервирования каналов	9
1.3 Вероятностные характеристики модели звена мультисервисной системы	12
2 Методы расчета вероятностных характеристик мультисервисных систем с Резервированием	18
2.1 Мультисервисная сеть с резервированием и ее модель	18
2.2 Моделирование системы массового обслуживания с резервированием каналов	27
2.3 Рекуррентный метод и метод прямого перебора для мультисервисных систем с резервированием	29
3 Анализ методов расчета вероятностных характеристик	36
3.1 Проведение численного эксперимента	36
3.2 Численный анализ вероятностей блокировок звена мультисервисной сети связи	42
3.3 Статистический метод и метод просеянной нагрузки	47
3.4 Область применения исследуемых методов	56
Заключение	58
Список литературы	59
Приложение А	65
Приложение Б	66

Введение

На сегодняшний день основной тенденцией развития рынка телекоммуникационной отрасли является переход к сетям следующего поколения (NGN). Построенные на основе концепции NGN, мультисервисные сети связи предоставляют пользователю новый расширенный спектр услуг – инфокоммуникационные услуги. К ним относятся: передача речи и данных, мультимедийных данных. Услуги, предоставляемые мультисервисными сетями связи, имеют отличие друг от друга требованиями к объему сетевых ресурсов, составу, и самое главное - к ширине полосы пропускания звена системы. Предоставление подобного рода услуг требует соблюдения надлежащей степени качества обслуживания, что требует обеспечения достаточного наличия ресурсов для передачи данных на звеньях мультисервисной сети связи. Для решения данной проблемы эффективным считается применение технологии мультимедиа. Такой механизм мультимедиа позволяет сократить ширину полосы пропускания узлов системы, при одновременной передаче данных нескольким получателям. Минимизирование задержки передачи данных – немаловажное требование, которое следует соблюдать при предоставлении таких услуг, как: теле- и радиовещание, телефония, телеконференция.

Одним из главных показателей качественного обслуживания в мультисервисной сети связи принято считать вероятность блокировки запроса, которая появляется по причине недостатка ресурсов. Например, такого, как отсутствие необходимого количества незанятых единиц ширины полосы пропускания на звеньях системы, через которые происходит установка соединений. Предоставление современных инфокоммуникационных услуг без гарантии качества значительно уменьшает их привлекательность для потребителя, что ведет к снижению прибыли оператора связи. Критерием внедрения услуг является соответствие достигнутых показателей качества их нормативным значениям. Высокая конкуренция, наблюдаемая на рынке услуг связи вынуждает обратить внимание на проблему предоставления требований к показателям качественного сервиса в мультисервисных сетях связи.

Разработка методов расчета вероятностных характеристик мультисервисных систем является актуальной задачей, которая позволит рассмотреть специфику применяемых в них технологий, таких как передачи с многоадресными соединениями, резервирование ресурсов. В диссертационной работе решены задачи по развитию метода просеянной нагрузки, рассмотрены алгоритмы рекуррентного метода и метода прямого перебора.

Исходя из выше написанного, цель данной работы сводится к исследованию существующих методов расчета вероятностных характеристик, к их сравнительному анализу, для выявления наиболее эффективного.

1 Стратегии доступа мультисервисных систем

1.1 Мультисервисный доступ

Современные требования потребителей связи требуют от рынка телекоммуникационных услуг все более новых технологических внедрений, что ставит перед ними цель улучшения качества предоставляемых услуг, а также увеличение спектра инфокоммуникационных услуг. Основными изменениями можно считать внедрение технологии all-over-IP, повышение скорости передачи данных на всех узлах сети. Важно учитывать тот факт, что потребительский спрос на новейшие телекоммуникационные услуги растет и многие готовы платить за использование высокоскоростного доступа в Интернет. То есть, для победы на телекоммуникационном рынке любому оператору необходимо модернизировать свою сеть.

С течением времени выясняется, что доступ пользователей к сетям вызывает некоторые проблемы у операторов данной сети. Для решения данной проблемы обсуждаются различные технологии, например, такие, как xDSL, технологии радиодоступа, Optical Access Networks (технологии оптического доступа) и т.д. Современная сеть доступа является одним из важных элементов, который позволяет донести до потребителя инфокоммуникационные услуги.

Концепции сетей NGN (Next Generation Networks) предусматривает использование IP- технологий, коммутаторов Softswitch для управления вызовами. Современные сети доступа очень часто превышают по капиталовложениям множество других. Разработанная на сегодняшний момент концепция сети следующего поколения позволили сформулировать главные принципы создания перспективной инфокоммуникационной системы. Данная концепция предъявляет ряд требований к сети доступа. Основные из них:

- оборудование, используемое в сети доступа, должно обслуживать все виды трафика;
- унификация протоколов передачи, коммутации и обработки информации стимулирует постепенный переход к IP-технологии;
- требования потенциальных клиентов к качеству передачи и обслуживания трафика, а также к надежности сети будут постоянно повышаться.

Положения, изложенные выше, представляют эволюционную стратегию построения NGN. Она может считаться основной для операторов, которые уже создали сеть доступа на основе проводных средств электросвязи. В частности, эта стратегия подходит для операторов ТФОП. Для операторов, которые не имеют своей сети доступа, то есть для новых эксплуатационных компаний, возможна революционная стратегия построения NGN. Это означает, что на «голом месте» создается сеть доступа, использующая только IP-технологии и отвечающая всем требованиям концепции NGN. Следует подчеркнуть, что речь

идет о теоретической возможности построения такой сети доступа без анализа риска технического и экономического характера. [46]

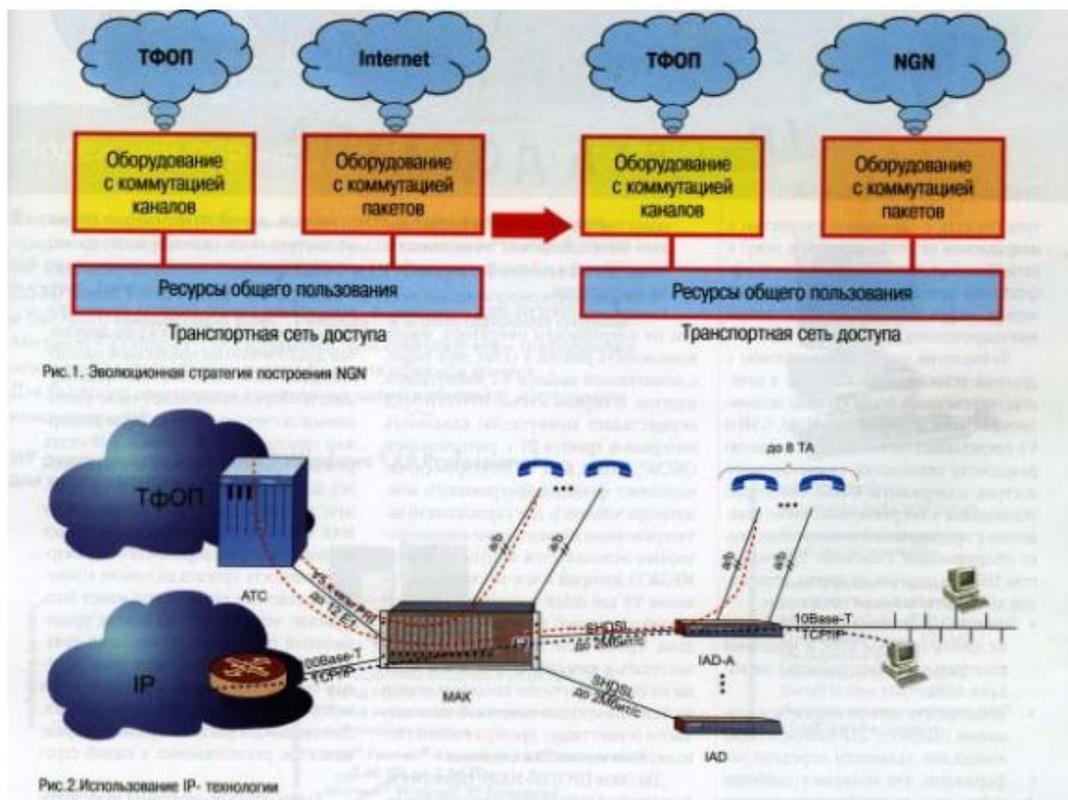


Рисунок 1 – Возможная реализации эволюционной стратегии перехода к NGN

На рисунке 1 изображена возможная реализация эволюционной стратегии за счет применения новых аппаратно-программных средств. В данном случае используется оборудование с технологиями коммутации каналов и пакетов. На рисунке показано, что трафик речи обслуживается в режиме коммутации каналов, а трафик данных – в режиме коммутации пакетов.

Правая часть рисунка показывает предпоследний этап перехода к сетям следующего поколения, при котором основная часть всей нагрузки обслуживается с использованием технологии коммутации пакетов. Доля оборудования, которые используют технологию коммутации пакетов, становится доминирующей. Пропускная способность транспортных сетей растет за счет увеличения трафика данных, предоставления новых широкополосных услуг.

На рисунке 2 изображен концентратор ПРОТЕЙ-МАК, позволяющий предоставить абонентский доступ к традиционным телефонным сетям общего пользования (ТфОП), к сетям передачи данных, а также к мультисервисным сетям. Для этого он имеет в наличии интерфейсы V5 и PRI для доступа в ТфОП, а также H.323, SIP, H.248/ MEGACO для взаимодействия с сетью NGN[63].



Рисунок 2 – Концентратор доступа ПРОТЕЙ-МАК для ТфОП

1.2 Управление доступом. Стратегия резервирования каналов

В теории СМО первоначально предполагалось, что вновь поступившая заявка принимается на обслуживание, когда в системе имеется достаточно ресурсов для этого. В системах связи без мест для ожидания основными ресурсами являются каналы (приборы), а в системах с местами для ожидания – как каналы, так и емкость выделенной памяти (места для ожидания). Стратегия, при которой вновь прибывшая заявка принимается, когда объем требуемого ей ресурса меньше или равен объему свободного в этот момент ресурса, называется полнодоступной.

Эта стратегия проста в реализации, но обладает рядом недостатков.

1. Полнодоступная стратегия является несправедливой, т.к. некоторые классы заявок могут монополизировать каналный ресурс системы.

2. Полнодоступная стратегия может привести к слабому использованию ресурса.

3. Если доход (плата) за использование ресурса зависит от типа заявок, то полнодоступная стратегия может привести к уменьшению среднего дохода системы. Поэтому естественным является построение таких стратегий доступа, которые могут ограничивать доступ в систему (СМО), даже если она обладает достаточным объемом свободного ресурса (числом свободных каналов).

Для этого необходимо, во-первых, построить алгоритмы, которые эффективно оценивают производительность системы при заданной стратегии доступа, и, во-вторых, построить алгоритмы эффективного определения оптимальной стратегии доступа.

Рассмотрим мультисервисную СМО с блокировкой поступающих заявок при отсутствии требуемого числа свободных каналов $M/M/C/0$. Ее функционирование описывает ступенчатый МП $X(t)$, $t \geq 0$, в пространстве

состояний $S = \{n : 0 \leq b^T n \leq C\}$ [1, гл. 3]. Введем теперь стратегию доступа, определяемую посредством функции управления доступом $f=(f_1, \dots, f_K)$, где:

$$f_k(n) = \dots \quad (1.1)$$

При сделанных предположениях СтМП $X(t)$, $t \geq 0$, останется марковским при любой стратегии доступа f типа (1.2), а $S(f)$ будет его множеством возвратных состояний, причем $0 \in S(f) \subseteq S$. Нетрудно показать, что ступенчатый МП $X(t)$, $t \geq 0$, со стратегией доступа f является стационарным, эргодическим и имеет финальные вероятности, которые удовлетворяют СУР:

$$p^T A = 0^T, p > 0, \dim p = \dots \quad (1.2)$$

и условию нормировки. Здесь A – матрица интенсивностей переходов рассматриваемого процесса. Поэтому в приложениях вместо СП $X(t)$, $t \geq 0$, при $t \rightarrow \infty$ можно говорить о случайном векторе X с распределением:

$$P\{X = n\} := p_f(n) \quad (1.3)$$

В приложениях (1.3) часто называют равновесным распределением вероятностей. Стратегия резервирования каналов (Trunk Reservation Policy, TRP) для СМО задается с помощью K дополнительных параметров резервирования $t = (t_1, \dots, t_k)$ и K функций доступа:

$$\dots \quad (1.4)$$

Обозначая через π_k вероятность блокировки при поступлении k -заявок, мы видим, что с ростом как b_k , так и t_k , при фиксированных значениях остальных параметров π_k также растет.

Это означает, что t_k служит резервом не для k -заявок, а для заявок остальных типов.

Пусть $C=6$, $K=2$, $b_1 = b_2 = 1$, $t_1 = 2$, $t_2 = 0$. Тогда:

$$\dots \quad (1.5)$$

$$\dots \quad (1.6)$$

При таких функциях доступа пространство S , пространство $S(f)$ состояний СМО, а также множества $S_1(f)$ и $S_2(f)$ приема и множества и блокировки 1- и 2-заявок имеют вид:

$$\begin{aligned}
S &= \{(n_1, n_2) : 0 \leq n_1 + n_2 \leq 6\}; \\
S(f) &= \{(n_1, n_2) \in S : 0 \leq n_1 + n_2 \leq 6, n_1 \leq 4\} = S \setminus \{(5,0), (5,1), (6,0)\}, \\
&= 25; \\
S_1(f) &= \{(n_1, n_2) \in S(f) : n_1 + n_2 \leq 3\}, S_1(f) = 10; \\
&= S(f) \setminus S_1(f) = \{(n_1, n_2) \in S(f) : 3 < n_1 + n_2 \leq 6\}, \quad = 15; \\
S_2(f) &= \{(n_1, n_2) \in S(f) : n_1 + n_2 \leq 5\}; S_2(f) = 20; \\
&= S(f) \setminus S_2(f) = \{(n_1, n_2) \in S(f) : n_1 + n_2 = 6\}, \quad = 5; \\
\text{Пусть } C=6, K=2, b_1=1, b_2=2, t_1=1, t_2=0. \text{ Тогда}
\end{aligned}$$

, (1.7)

(1.8)

В этом примере пространства S , $S(f)$, множества $S_1(f)$ и $S_2(f)$, и имеют вид:

$$\begin{aligned}
S &= \{(n_1, n_2) : 0 \leq n_1 + 2n_2 \leq 6\}, \quad = 16; \\
S(f) &= \{(n_1, n_2) \in S : 0 \leq n_1 + 2n_2 \leq 6, n_1 \leq 5\} = S \setminus \{(6,0)\}, \quad = 15; \\
S_1(f) &= \{(n_1, n_2) \in S(f) : 0 \leq n_1 + 2n_2 \leq 4\} = S_2(f), \quad = 9; \\
&= S(f) \setminus S_1(f) = \{(n_1, n_2) \in S(f) : \\
4 < n_1 + 2n_2 \leq 6\} &= \{(0,3), (1,2), (2,2), (3,1), (4,1), (5,0)\} = 6;
\end{aligned}$$

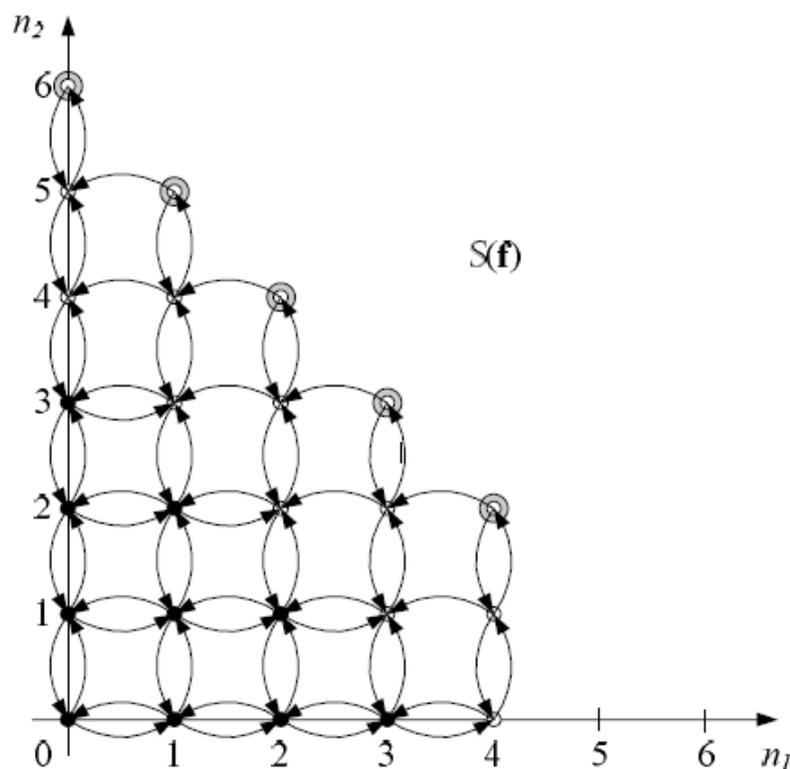


Рисунок 3 - Диаграмма интенсивностей переходов

На рисунке 3 приводится пространство $S(f)$ и отмечены множества A и B . Полые точки обозначают пространство A , а полые точки, обведенные серым цветом, – пространство B . Мы видим, что не все переходы являются парными. Отсюда следует, что равновесное распределение не является мультипликативным.

На рисунке 4 приводится пространство $S(f)$ и отмечены множества A и B . Полые точки обозначают пространство A , а полые точки, обведенные серым цветом, – пространство B .

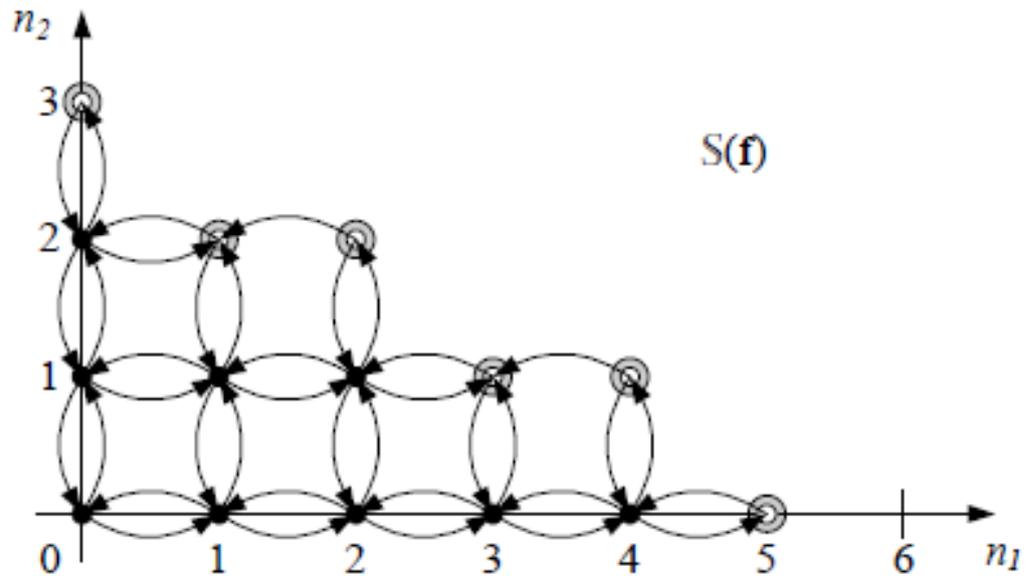


Рисунок 4 – Диаграмма интенсивностей переходов

В этом примере $b_1 + t_1 = b_2 + t_2 = 2$ и $f_1(n_1, n_2) = f_2(n_1, n_2)$. Это должно привести к выравниванию вероятностей блокировок, но, как и в предыдущем примере, не все переходы являются парными.

1.3. Вероятностные характеристики модели звена мультисервисной системы

Предположим, что в модели сети все звенья, кроме некоторого звена l^* , имеют неограниченные ресурсы для обслуживания запросов пользователей, то есть для $l \neq l^*$. Задача анализа блокировок в такой системе сводится к анализу сети, состоящей из одного звена l^* , с одним источником, который предоставляет услуги из множества K^* и множеством классов одноадресных соединений l^* . Для удобства записи далее в этом разделе индексы K^* и l^* опускаются.

Функционирование звена МСС с двумя типами соединений будем

описывать с помощью многопоточковой мультисервисной системы массового обслуживания, схематично изображенной на рисунке 5.

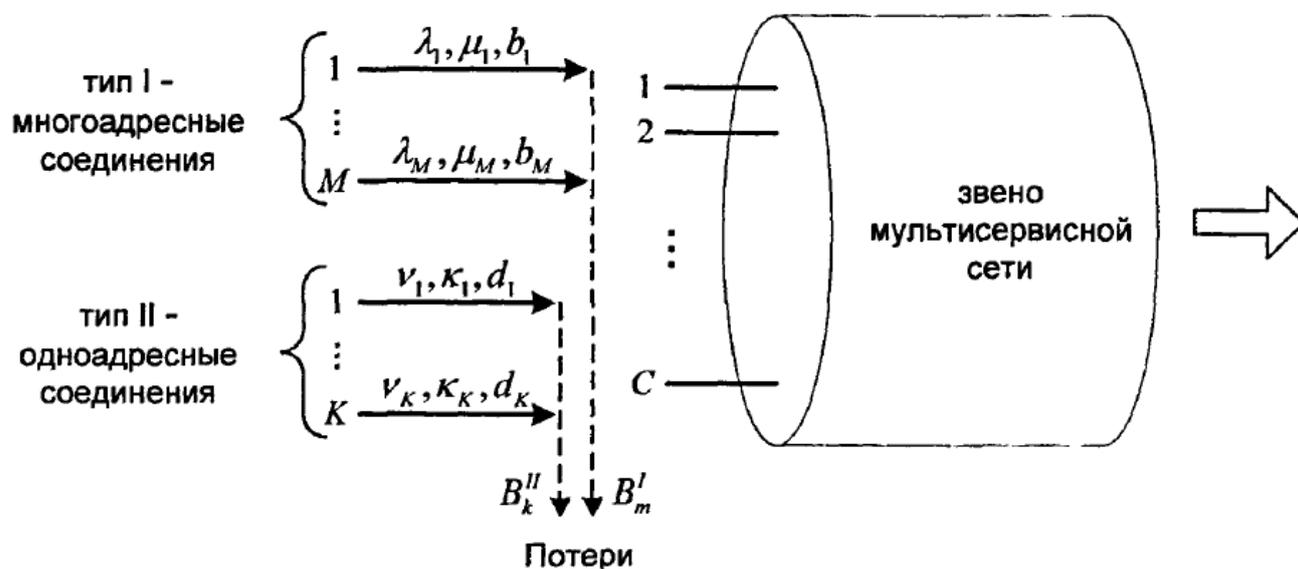


Рисунок 5 – Схема модели отдельного звена мультисервисной сети

На полнодоступную систему, состоящую из b_m приборов (единиц емкости звена сети) и не имеющую накопителя, поступают M потоков заявок типа I и $K = |K|$ потоков типа II. Будем считать, что все $M + K$ поступающих в систему потоков являются пуассоновскими и независимы в совокупности.

Первая группа потоков (1-потоки) моделирует поступление запросов на установление многоадресных соединений. Если на момент поступления (I, m) -заявки в системе нет ни одной заявки этого потока, то поступившая заявка принимается при условии наличия b_m свободных приборов и занимает их на случайное время, распределенное экспоненциально с параметром μ_m и не зависящее ни от длительности обслуживания заявок других потоков, ни от процессов поступления.

Все поступившие в течение этого интервала времени (I, m) -заявки принимаются на обслуживания без выделения дополнительных приборов, а по истечении указанного интервала одновременно покидают систему и b_m приборов освобождаются. Потеря заявки типа I происходит только в том случае, если при ее поступлении в системе нет заявок того же потока, а также нет достаточного количества свободных приборов.

Обозначим ρ_m , где $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ – интенсивности входящих I – потоков [37]. Заметим, что согласно [56] параметры ρ_1, \dots, ρ_m связаны с интенсивностями потоков запросов пользователей на включение соответствующих логических путей в сети соотношением:

$$(1.9)$$

Потоки второй группы (Π -потоки) соответствуют потокам запросов пользователей на установление через звено l^* одноадресных соединений.

Поступившая (Π, k)-заявка принимается на обслуживание, если на момент ее прихода в системе имеется d_k свободных приборов. Принятая заявка занимает это число приборов на случайное время, распределенное по экспоненциальному закону с параметром κ_k и также не зависящее ни от длительности обслуживания заявок других потоков, ни от процессов поступления, после чего заявка покидает систему, освобождая d_k приборов.

Если на момент поступления заявки достаточного количества свободных приборов не оказывается, заявка теряется. Интенсивности входящих потоков этого типа совпадают с интенсивностями соответствующих потоков запросов пользователей, —

Положим $C = \infty$, в этом случае все поступившие в систему заявки принимаются на обслуживание и потери отсутствуют. Пусть случайный процесс $\{Y_m(t), t \geq 0\}$, $m = 1, \dots, M$, находится в состоянии 1, если в момент времени $t \geq 0$ в системе обслуживается хотя бы одна (I, m)-заявка, и в состоянии 0 в противном случае. В [56] показано, что $\{Y_m(t), t \geq 0\}$ является ОМП со стационарным распределением:

$$\text{—} \tag{1.10}$$

Введем также случайный процесс, характеризующий Π -потоки. Пусть $N_k(t)$ - число (Π, k) - заявок в системе в момент времени $t \geq 0$, $k = 1, \dots, K$. Известно [43], что процесс $\{N_k(t), t \geq 0\}$ также является ОМП, а его стационарное распределение имеет вид:

$$\text{—} \tag{1.11}$$

Рассмотрим составной случайный процесс $\{Z(t) = (Y_1(t), \dots, Y_m(t), N_1(t), \dots, N_k(t)), t \geq 0\}$. По построению $\{Z(t), t \geq 0\}$ является ОМП на множестве и имеет стационарное распределение:

$$\text{—} \tag{1.12}$$

где функция $G(\Omega)$ аналогично предыдущему разделу, для любого множества определяется соотношением:

$$\tag{1.13}$$

нормирующая константа $G(Z)$ распределения процесса $\{Z(t), t \geq 0\}$ равна:

(1.14)

Процесс $\{Z(t), t \geq 0\}$ с пространством состояний Z и распределением вероятностей (1.10) описывает состояний рассматриваемой системы при $C = \infty$.

Обозначим $c(z)$ число занятых приборов системы в состоянии z и заметим, что эта величина представима в виде:

(1.15)

где $b(y)$ и $d(n)$ – число приборов, занятых в состоянии $z(y, n)$ заявками I и II – потоков соответственно. Пусть теперь $C < \infty$ и, следовательно, возможны потери заявок. Будем считать, что потерянные заявки обоих типов не оказывают влияние на интенсивность породившего их потока, то есть система функционирует с явными потерями. В этом случае функционирование системы описывает случайный процесс $\{Z(t), t \geq 0\}$, являющийся сужением процесса $\{Z(t), t \geq 0\}$ на множество:

(1.16)

Как сужение обратимого процесса он также обратим [74], и, следовательно, справедлива следующая теорема.

Теорема 1.2. Стационарное распределение вероятностей состояний процесса $\{Z(t), t \geq 0\}$ имеет мультипликативный вид:

— (1.17)

где $G(Z)$ – нормирующая константа.

Как и для сети в целом, ряд микрохарактеристик отдельного звена могут быть выражены с использованием функции $G(\Omega)$ от соответствующего подмножества пространства состояний посредством соотношения:

— (1.18)

К таким характеристикам, в частности, относятся вероятность потерь заявок потоков обоих типов, вероятность того, что (I, m) – заявок в системе нет, но если такая заявка поступит, то будет принята на обслуживание.

Напомним, что условием потери заявки I – потока помимо недостаточного числа свободных приборов является отсутствие в системе заявок данного потока. Следовательно, множество потерь (I, m) – заявок имеет вид формулы (1.19).

Заявки II – потоков теряются в том случае, если в системе недостаточно свободных приборов для их обслуживания. Таким образом, множество потерь

(Π, k) – заявок имеет вид формулы (1.20).

$$, \quad (1.19)$$

$$(1.20)$$

Значения вероятностей β и δ соответствуют вероятностям блокировки на звене многоадресных и одноадресных соединений, а в рассматриваемой системе дают вероятности потерь заявок по времени.

Множество таких состояний, что (I, m) – заявка находится в системе, имеет вид:

$$(1.21)$$

тогда как множество состояний, что (I, m) – заявок в системе нет, но если заявка поступит, то будет принята на обслуживание, принимает вид:

$$(1.22)$$

Физический смысл первого события состоит в том, что соответствующие m – услуге данные передаются через рассматриваемое звено. Во втором случае m -услуга через звено не предоставляется, но ресурсов достаточно, чтобы по запросу пользователя инициировать ее предоставление.

Легко видеть, что и здесь для любого $m=1, \dots, M$ система множеств B_m, F_m, H_m является разбиением пространства состояний Z . Следовательно, вероятности данных событий связаны соотношением:

$$(1.23)$$

При анализе отдельного звена МСС большой интерес представляют характеристики дискретных СВ β, δ, γ которые принимают значения $b(z), d(z)$ и $c(z)$ соответственно. Здесь I является случайной величиной занятых приборов в рассматриваемой системе и соответствует случайному числу занятых единиц емкости звена мультисервисной сети.

Если за единицу емкости принять величину одной передаточной единицы, то γ представляет собой СВ ширины полосы пропускания, занятой на звене сети при обслуживании установленных через него соединений обоих типов.

Аналогично интерпретируются СВ β и δ , для многоадресных и одноадресных соединений соответственно. В частности, среднее значение занятой ширины полосы пропускания, то есть среднее число занятых приборов в рассматриваемой модели, можно найти как математическое ожидание $c^{(1)}$ СВ γ , а именно:

(1.24)

Заметим, что величина $c^{(1)}/C$ представляет собой коэффициент использования звена.

Необходимо заметить, что вычисление введенных вероятностных характеристик представляет собой непростую задачу, поскольку подразумевает перебор всего пространства состояний Z , имеющего комбинаторный характер и, при решении практических задач, большую размерность. Более эффективный метод численного анализа рассматриваемой системы предложен в [29].

Данный метод использует функции

(1.25)

—

и

(1.26)

Функция $h(n)$, заданная формулой (1.25), применяется в алгоритме Кауфмана - Робертса [70,93], более общий случай см. 5], предназначенном для вычисления вероятности блокировки в модели стохастического ранца [95], и дает ненормированную вероятность того, что в системе рассматриваемого типа при $M = 0$ занято ровно n приборов. На функции $g\{m,n\}$, заданной формулой (1.26), основан метод вычисления вероятности блокировки на звене сети мультимедиа, предложенный в [56].

Полученные результаты позволяют реализовать эффективные алгоритмы для расчета вероятностных характеристик отдельного звена МСС. Таким образом, построена модель отдельного звена МСС и предложен эффективный метод численного анализа ее вероятностных характеристик.

Данная модель предполагает, что разделение передаточного ресурса звена производится по полнодоступной схеме. Однако на практике в телекоммуникационных системах нередко применяется резервирование части ресурсов для некоторых классов трафика, являющихся приоритетными.

2 Методы расчета вероятностных характеристик мультисервисных систем с резервированием

2.1 Мультисервисная сеть связи с резервированием и ее модель

В разделе 1.3 данной диссертации разработана модель звена мультисервисной сети, где доступ к ресурсам звена организован по полнодоступной схеме. То есть, для обслуживания поступившей заявки выделяются любые из имеющихся C приборов, но с учетом того, что эти приборы свободны от обслуживания заявок. Данное правило распространяется на соответствующие одноадресные соединения заявок Π -поток и на заявки I -поток, которые поступили в систему, где отсутствуют заявки того же потока. Следует отметить, что если на момент поступления заявки I -потока в системе уже обрабатывается хотя бы одна заявка такого же потока, то поступившая заявка принимается на обслуживание без выделения дополнительного ресурса.

Наряду с полнодоступной схемой на практике в телекоммуникационных и компьютерных системах применяются различные неполнодоступные схемы разделения ресурсов, направленные на повышение эффективности использования ресурсов системы. Известны [2-4,11,66] пять основных схем разделения ресурсов, предложенных для организации доступа к буферной памяти:

- полное разделение (англ. Complete Partitioning, CP);
- полнодоступная схема (англ. Complete Sharing, CS);
- полнодоступная схема с индивидуальными потолками (англ. Sharing with Maximum Queue Length, SMQ);
- неполнодоступная схема (англ. Sharing with Minimum Allocation, SMA);
- неполнодоступная схема с индивидуальными потолками (англ. Sharing with Maximum Queue Length and Minimum Allocation, SMQMA).

В случае организации доступа к ресурсам канала связи ее также называют резервированием канальных ресурсов (trunk reservation, bandwidth reservation) [15,75]. Хотя необходимо заметить, что полного единообразия терминологии здесь нет, и, например, авторы монографий [21,95] для модели цифровой линии с резервированием определяют схему доступа к ресурсу, по сути близкую к схеме 4, но формально отличную от нее.

Резервирование каналов как метод гарантирования обслуживания (service protection) в телефонных сетях и сетях ISDN определено в рекомендации E.525 МСЭ-Т [59]. Суть метода состоит в следующем. Неприоритетные вызовы принимаются на рассматриваемый пучок линий, только если число свободных на момент поступления вызова линий в пучке превышает установленное минимальное значение. Если число свободных линий меньше или равно пороговому значению, то некоторая доля (возможно 100%) неприоритетных вызовов получают отказ в обслуживании. Приоритетные вызовы принимаются

на обслуживание всегда, когда в пучке имеются свободные линии. Подобный механизм позволяет организовать приоритетный доступ к ресурсам канала тому трафику, для которого данный маршрут является основным при маршрутизации, а также дает возможность оператору предоставлять приоритетное обслуживание более дорогим классам трафика.

Применительно к звену мультисервисной сети связи суть схемы состоит в том, что каждому классу (или группе классов) поступающего на звено трафика выделяется некоторая часть емкости звена, на которую не допускается трафик остальных классов. При этом часть емкости звена отводится для совместного использования всеми классами.

В терминах представленной в разделе 1.3 модели неполнодоступную схему доступа определим следующим образом. Разобьем множества M и K соответственно на J^I и J^{II} непересекающихся подмножеств:

при $i \neq j$, и $J^I \cap J^{II} = \emptyset$, $M = J^I \cup J^{II}$. Пусть соответствующие подмножеству M_j I-потoki заявок образуют нагрузочную группу с порогом резервирования r_j . Аналогично, пусть II-потoki заявок, соответствующие подмножеству K_j , образуют нагрузочную группу с порогом резервирования r_j . Будем считать, что доступное всем потокам количество приборов C .

Количество приборов доступных заявкам потоков одной нагрузочной группы складывается из значения порога резервирования данной группы и величины C^0 . Если поступившая заявка не находит ресурсов в доступной ей зоне, она теряется.

Очевидно, что если каждая нагрузочная группа имеет доступ к неограниченному числу приборов, то есть при $r_j = 0$, $C^0 = C$ и $C^0 > 0$, потери заявок в неполнодоступной системе отсутствуют и ее функционирование описывает введенный в разделе 1.3 ОМП с множеством состояний Z и распределением вероятностей состояний мультипликативного вида (1.24).

Введем обозначения для количества приборов, занятых заявками потоков одной нагрузочной группы: n_j для I – потока и

m_j для II-потоков. Заметим, что

и

Величина $\max\{n_j, m_j\}$ равна числу приборов, зарезервированных под обслуживание заявок I-потоков нагрузочной группы u и занятых заявками этих потоков в общей зоне, если таковые имеются. Следовательно, сумма $\max\{n_j, m_j\}$ задает число приборов, недоступных заявкам II-потоков, когда система находится в состоянии $z=(y,n)$.

Аналогично, величина $\max\{n_j, m_j\}$ равна числу приборов,

зарезервированных под обслуживание заявок II- потоков нагрузочной группы u и занятых этими заявками в общей зоне, и сумма $\max\{ \dots \}$ равна числу приборов, недоступных заявкам I-потоков, когда система находится в состоянии $z=(y,n)$. Таким образом, количество приборов, которые поступившая (I, m) - заявка застаёт недоступными по причине резервирования или занятости другими заявками (без учета того факта, что если в системе уже обслуживается заявка потока (I, m) , то поступившая заявка будет принята на обслуживание на те же приборы - эти приборы так же считаются занятыми) равно:

(2.1)

где $\delta_{z, (I, m)}$ - индикаторная функция, принимающая значение 1, если $z \in Z_{(I, m)}$ и 0, если, напротив. Величина $c_{z, (I, m)}$ равна количеству свободных приборов в доступной (I, m) - заявкам зоне, когда система находится в состоянии z . Аналогичная величина для заявок II-потоков имеет вид:

(2.2)

Здесь индикаторная функция принимает значение 1, если $z \in Z_{(II, k)}$ и 0 в противном случае. Величина $c_{z, (II, k)}$ равна количеству свободных приборов в доступной (II, k) -заявкам зоне, когда система находится в состоянии z . Введем также величину:

(2.3)

Заметим, что величина $C - c^0(z)$ равна количеству свободных приборов в общей зоне, когда система находится в состоянии z .

Пусть теперь количество приборов ограничено и возможны потери заявок. Помимо ограничения на общее число занятых приборов $c(z) < C$, на состояния неполнодоступной системы накладываются ограничения, обусловленные резервированием, а именно:

Таким образом, пространство состояний неполнодоступной системы:

что представимо с использованием обозначения (2.3) в виде:

(2.4)

Описывающий функционирование неполнодоступной системы случайный процесс $\{Z(t), t \geq 0\}$ представляет собой сужение процесса $\{Z(t), t \geq 0\}$ на множество Z , заданное соотношением (2.4).

Как сужение ОМП этот процесс также является ОМП [74], и для него справедлива теорема 1.2, если принять, что пространство состояний Z задано

формулой (2.4).

Найдем выражения для некоторых вероятностных характеристик неполнодоступной системы. (I, m) -заявка принимается на обслуживание в том случае, когда в системе уже обслуживается заявка того же потока или имеется b_m свободных приборов среди доступных заявке приборов, Таким образом, потеря (I, m) -заявки происходит в таких состояниях систем S_m , где $y_m = 0$ и выполнено хотя бы одно из следующих условий:

(2.5)

или

$$c(z) + b_m > C \quad (2.6)$$

Объединяя эти условия, мы можем записать множество потерь (I, m) -заявок с использованием выражения (2.1) в виде:

(2.7)

Для заявок II-потоков условием потери является недостаточное число свободных приборов в доступной зоне. Поэтому множество потерь (II, m) - заявок имеет вид:

(2.8)

Для заявок I-потоков введем множество таких состояний, что (I, m) -заявка находится в системе:

(2.9)

и множество таких состояний, что (I, m) - заявок в системе нет, но если заявка поступит, то будет принята на обслуживание:

(2.10)

Зная вид пространства состояний системы и множеств состояний, соответствующих искомым характеристикам (2.7)-(2.10), вероятности событий можно получить по формуле (1.12).

Выражения для среднего числа занятых приборов и коэффициента корреляции между СВ числа приборов, занятых заявками потоков разных типов, приведенные для полнодоступной системы в разделе 1.3, остаются верны для неполнодоступной системы с поправкой на вид пространства состояний.

Однако, как уже было отмечено, вычисление вероятностных характеристик звена напрямую по представленным формулам допустимо лишь для небольшого диапазона значений структурных параметров модели - прежде всего, для малой емкости звена.

Поэтому далее в данном разделе разработан эффективный метод расчета для актуального для практики случая, когда осуществляется резервирование ресурсов для некоторого подмножества услуг мультивещания, например набора приоритетных телевизионных каналов или услуг конференцсвязи.

В модели звена с резервированием канальных ресурсов для подмножества услуг мультивещания структурные параметры принимают следующие значения. Имеется две нагрузочные группы I-потоков, то есть $J^I = 2$, причем ненулевой порог резервирования задан только для одной из них $0 < \dots < C$, $\dots = 0$.

Вся совокупность II-потоков составляет одну нагрузочную группу с нулевым порогом резервирования: $J^{II} = 1$, $\dots = 0$. Для краткости записи обозначим $R = \dots$.

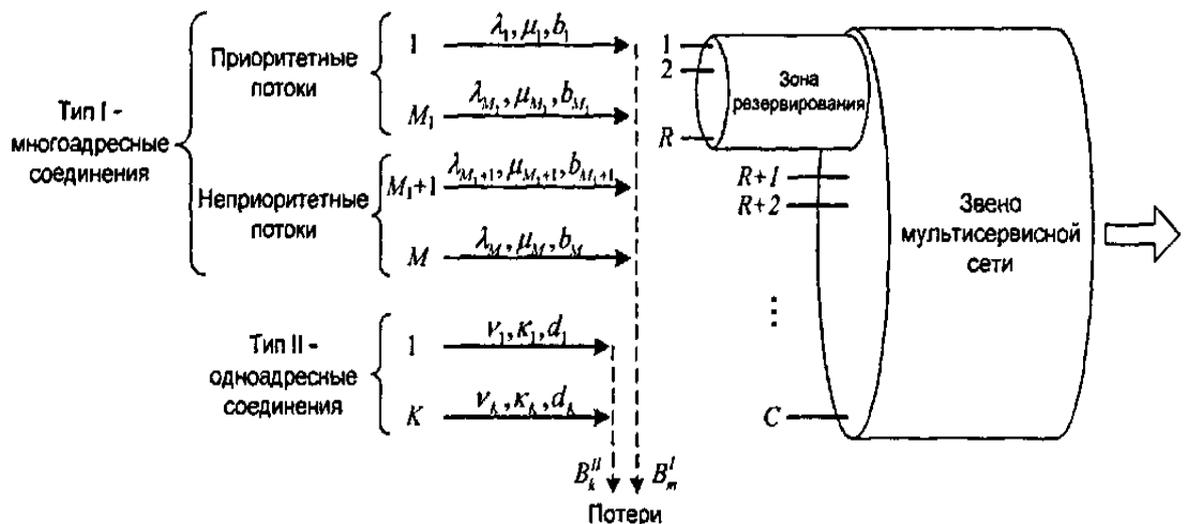


Рисунок 6 - Модель звена МСС с резервированием ресурсов

Таким образом, резервирование осуществляется для услуг мультивещания из множества $M_1 \dots M$, или в терминах ТМО, имеет место резервирование приборов для заявок первых \dots I-потоков. Схема такой модели изображена на рисунке 6.

Пространство состояний модели принимает вид:

$$(2.11)$$

Множество потерь заявок приоритетного I-потока имеет вид:

$$(2.12)$$

при $m \dots M_2$ для любого состояния сети \dots , поэтому

множество потерь заявок неприоритетного I-потока равно:

(2.13)

Поскольку для любого , множество потерь (II, k)-заявок имеет вид:

(2.14)

Введем разбиение пространства состояний (2.11) по числу занятых приборов: и распределение числа занятых приборов:

(2.15)

Также нам потребуется разбиение пространства состояний по значению функции $s^0(z)$: и соответствующее распределение вероятностей:

(2.16)

Отметим, что функция $s^0(z)$ принимает значения из множества $\{R, \dots, C\}$, поэтому и для всех $n = 0, \dots, R-1$. Через вероятности событий и выражаются основные вероятностных характеристики системы. Среднее число занятых приборов выражается через вероятности событий следующим образом:

(2.17)

Множество потерь (II, k)-заявок (2.14) представимо в виде , а вероятность их потери определяется формулой:

(2.18)

Множество потерь (I, m) - заявок имеет более сложную структуру по сравнению с множеством потерь заявок II-потоков.

Выражения для вероятностей потерь (I, m)-заявок имеют вид:

(2.19)

(2.20)

Также через $C(n)$ и $C^0(n)$ можно записать выражение для множества H_m , что представимо формулой (2.21)

(2.21)

Соответствующая вероятность равна

(2.22)

Разделение ресурсов в общей зоне между неприоритетными потоками происходит в соответствии с полноступенчатой схемой и описывается моделью звена, представленной в разделе 1.3.

При отсутствии резервирования, то есть если $M_1 =$ и вычислить вероятность события $R(n)$ можно посредством свертки $f_0(i,n)$:

Введем функцию $f_m(i,n)$, удовлетворяющую соотношениям

(2.23)

(2.24)

(2.25)

где функция $g(m,n)$ задана формулой (1.26).

Проиллюстрируем предложенный метод вычисления вероятностей событий $C(n)$ и $C^0(n)$ на простом примере.

Пусть имеется неполнодоступная система рассматриваемого типа из 6 приборов. На систему поступают два приоритетных I-потока, один неприоритетный I-поток и два II-потока со следующими параметрами: $b = (1,2,1)$, $p = (p_1, p_2, p_3)$, $d = (1, 2)$, $a = (a_1, a_2)$.

Под заявки приоритетных потоков зарезервировано 2 прибора. Таким образом, структурные параметры системы имеют значения: $C = 6$, $R = 2$, $C^0 = 4$, $M_1 = \{1,2\}$, $M_2 = \{3\}$, $M = 3$, $M_1 = 2$, $K = \{1,2\}$, $K = 2$.

На рисунке 7 разобран ход вычисления функции $f_0(m,n)$ при $m = 1$ и $n = 6$.

На схеме видно, что при $m = 3 = M_1 + 1$ значения $f_0(3,6)$ и $f_0(3,5)$ обращаются в 0, так как второй аргумент функции $n > C^0$.

Таким образом, суммирование осуществляется лишь по таким состояниям сети, в которых заявки неприоритетных потоков занимают C^0 или меньше, при этом общее число занятых приборов равно 6.

Состояния сети, по которым в итоге производится суммирование, подписаны под соответствующими ветвями дерева.

На рисунке 8 для рассматриваемого примера представлен ход вычисления функции при тех же значениях аргументов: $m = 1$ и $n = j = 6$. Здесь

если при $m = 3 = M_1 + 1$ второй аргумент функции $j > n - R$, в качестве аргумента берется $j = n - R$.

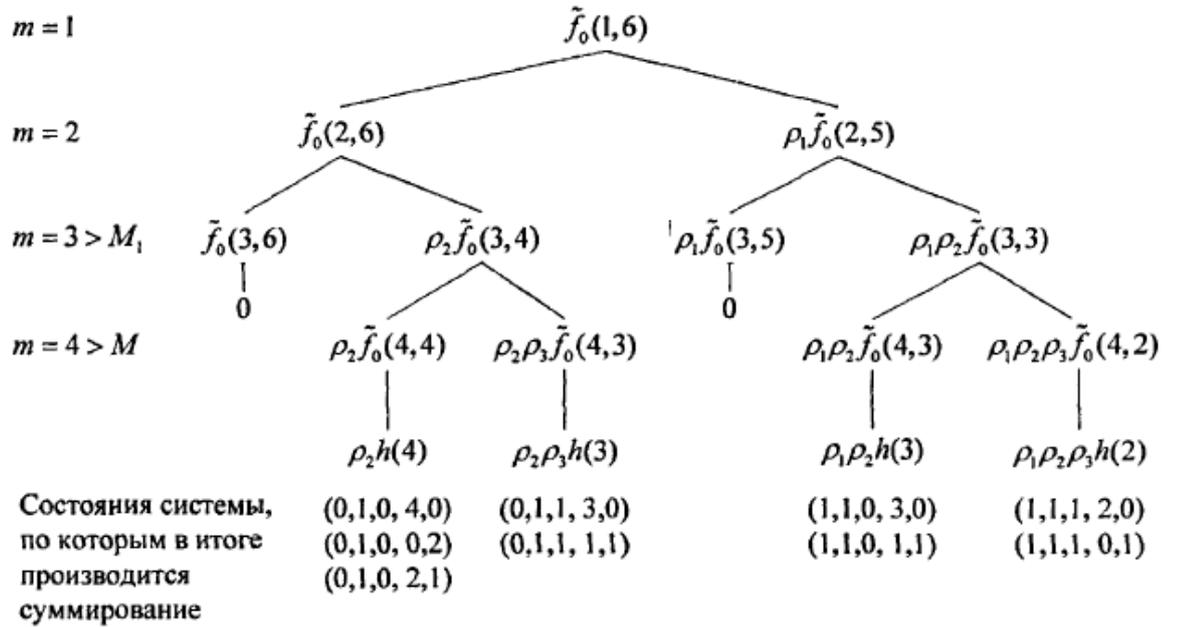


Рисунок 7 – Иллюстрация вычисления функции

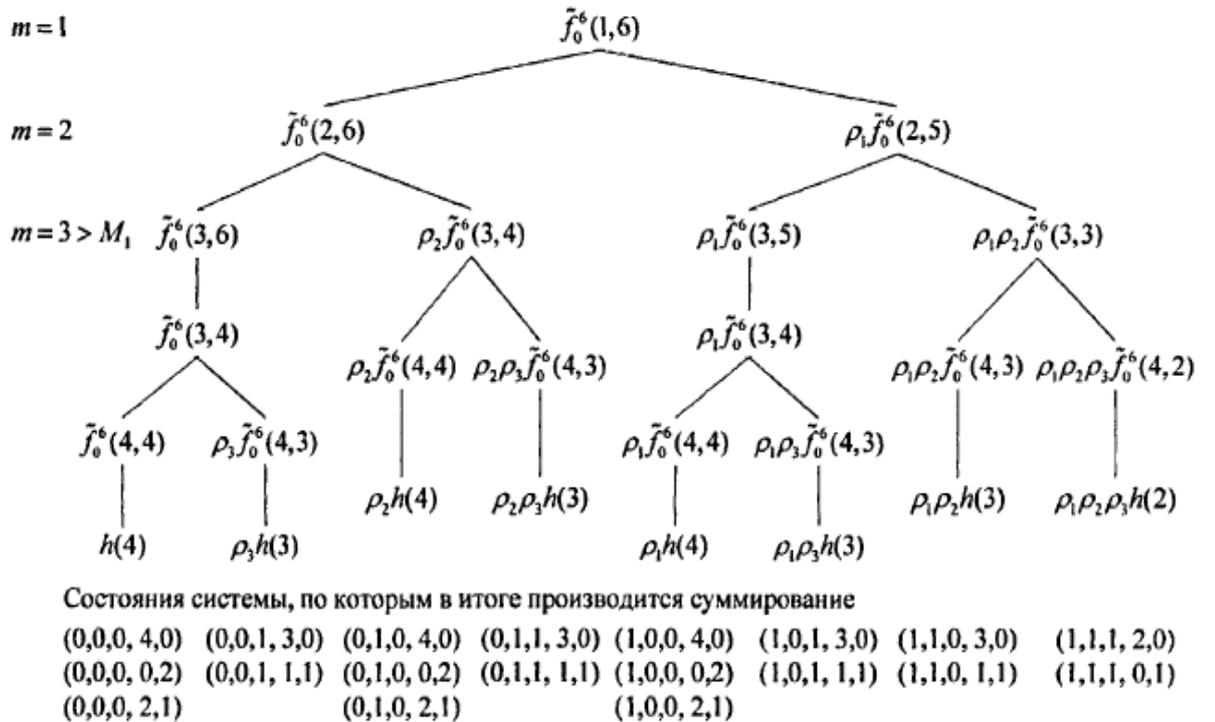


Рисунок 8 – Иллюстрация вычисления функции

Таким образом, значения функции и преобразуются в

. В итоге суммирование осуществляется по всем состояниям сети, в которых в свободной зоне занято $n - R$ приборов, при этом число приборов, занятых в резервной зоне заявками приоритетных потоков, может быть любым в пределах от 0 до R .

Это видно из списков состояний, приведенных на рисунке под соответствующими ветвями дерева. Функции \dots и \dots позволяют получить эффективные алгоритмы для вычисления вероятностных характеристик системы. Нетрудно убедиться, что из формул (2.17), (2.18) и (2.19)-(2.22), а также соотношений (2.23) и (2.24) вытекают следующие утверждения.

Предложение 2.1. Нормирующая константа $G(Z)$, где множество Z имеет вид (2.11), вычисляется по формуле:

$$(2.26)$$

Предложение 2.2. Среднее число занятых приборов (2.17) вычисляется по формуле:

$$(2.27)$$

Замечание. Здесь, как в модели для полнодоступной схемы, величина $c^{(1)}/C$ представляет собой коэффициент использования звена МСС.

Предложение 2.3. Вероятностные характеристики (2.18)-(2.22) вычисляются по формулам (2.28-2.30).

Полученные в данном разделе результаты позволяют реализовать эффективные алгоритмы для расчета вероятностных характеристик отдельного звена мультисервисной сети с резервированием ресурсов для подмножества многоадресных соединений.

Заметим, что важным частным случаем рассмотренной системы является звено, на котором резервируются ресурсы для многоадресных соединений, тогда как одноадресные соединения выступают как неприоритетные. Важность данного случая объясняется тем, что снижение качественных характеристик многоадресного соединения отражается на целой группе пользователей сети, поэтому такие соединения целесообразно назначать приоритетными.

$$(2.28)$$

$$(2.29)$$

2.2 Моделирование системы массового обслуживания с резервированием каналов

Математические модели сложных систем, которые представляют собой систему массового обслуживания (СМО), состоят из обслуживающих аппаратов и обслуживаемых заявок – транзактов. Состояние системы массового обслуживания характеризуется состояниями обслуживающих аппаратов, транзактов и очередей к обслуживающим аппаратам.

Состояние обслуживающих аппаратов может принимать лишь два значения: занят и свободен. Состояние транзакта может принимать значение: обслуживание и ожидания. Состояние очереди характеризуется количеством находящихся в ней транзактов.

Смоделируем работу системы массового обслуживания с резервированием каналов. Напомним, что при данной стратегии, неприоритетные вызовы принимаются на рассматриваемый пучок линий, только если число свободных на момент поступления вызова линий в пучке превышает установленное минимальное значение.

Если число свободных линий меньше или равно пороговому значению, то некоторая доля неприоритетных вызовов получают отказ в обслуживании. Приоритетные вызовы принимаются на обслуживание всегда, когда в пучке имеются свободные линии.

Подобный механизм позволяет организовать приоритетный доступ к ресурсам канала тому трафику, для которого данный маршрут является основным при маршрутизации, а также дает возможность оператору предоставлять приоритетное обслуживание более дорогим классам трафика.

Применительно к звену мультисервисной сети связи суть схемы состоит в том, что каждому классу (или группе классов) поступающего на звено трафика выделяется некоторая часть емкости звена, на которую не допускается трафик остальных классов. На рисунке 9 представлена структурная схема исследуемой модели по заданному алгоритму.

Структурная схема представлена тремя основными устройствами: накопитель, основной канал и резервный канал. В соответствии с полученной структурной схемой модели на рисунке 10 представлена система массового обслуживания. В нашей модели приоритет транзактов, согласно заданию, разный.



Рисунок 9 – Структурная схема рассматриваемой модели

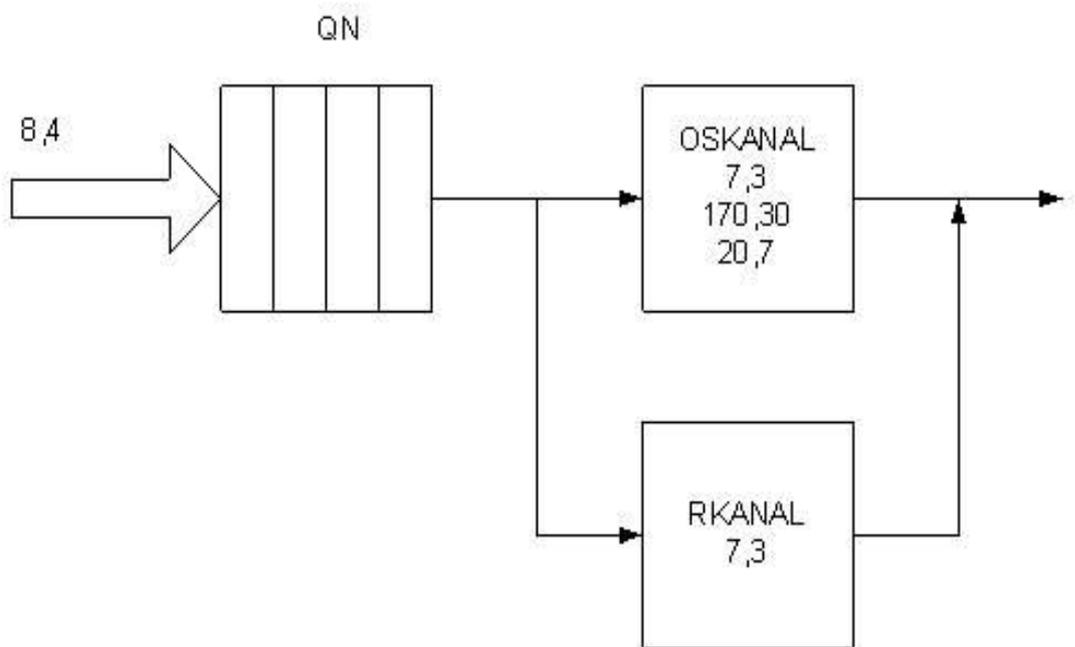


Рисунок 10 – Модель в виде системы массового обслуживания

Листинг программы, разработанной в программе GPSS World представлен в приложении А. Листинг результатов моделирования, исследуемой системы массового обслуживания представлен в приложении Б.

2.3 Рекуррентный метод и метод прямого перебора для расчета вероятностных характеристик мультисервисных систем с резервированием

Как уже отмечалось выше, вычисление вероятностных характеристик модели, представленной в разделе 1.2 диссертации, непосредственно по формулам (1.12)-(1.14) подразумевает перебор пространства состояний (1.9), мощность которого N , где N - наибольшее число одноадресных соединений одного класса, которые могут быть одновременно установлены в сети: $N = \sum_{i=1}^M n_i$. В общем случае для сети с одноадресными и многоадресными соединениями значение нормирующей константы $G(Z)$ можно получить путем прямого перебора пространства состояний в соответствии с алгоритмом 2.1.

Алгоритм 2.1 (расчет нормирующей константы методом прямого перебора пространства состояний).

Шаг 1. $G \leftarrow 0$

Шаг 2. Для всех $Z \in \mathcal{Z}$ выполнять

Шаг 3. Если для всех $i \in \mathcal{I}$

Шаг 4. То $G \leftarrow G + \dots$

Шаг 5. Возвратить G

Алгоритм 2.1 применим лишь для ограниченного диапазона значений структурных параметров сети, и для полноценного анализа модели требуется разработка более эффективных вычислительных алгоритмов.

В случае, когда в сети мультивещания имеется только один источник рассылки, задача анализа сети сводится к исследованию одного многоадресного соединения, имеющего, как было отмечено в разделе 1.2, древовидную структуру. Подобная сетевая топология делает возможным построение рекуррентных методов вычисления, таких как метод свертки, предложенный в [89] для марковской по аппроксимации модели сети многоадресной передачи, и рекурсивный метод расчета нормировочной константы, предложенный для марковской модели сети мультивещания с одним источником рассылки в [24].

Модель сети мультивещания с одним источником, для которой разработан метод рекуррентного вычисления нормирующей константы в [24], является частным случаем модели МСС, предложенной в разделе 1.2, при $S=1$ и $K=0$. Для такой модели вычисление нормирующей константы методом прямого перебора имеет временную сложность порядка $O(2^{MP}MPL)$ для сети произвольной топологии и порядка $O(2^{MP}MP^2)$ - для бинарного дерева с ветвями одинаковой длины.

Разработанный далее в данном разделе диссертации рекуррентный алгоритм при применении к модели сети мультивещания опирается на метод [24] и имеет временную сложность порядка $O(2^{3M}MP)$, линейно зависящую от числа физических путей. Данный алгоритм позволяет выполнять расчеты для

существенно большего класса сетевых топологий, что подтверждают графики на рисунке 11. Здесь для модели сети мультивещания показана зависимость от количества услуг (рисунок 11(а)) и физических путей (рисунок 11(б)) времени вычисления нормирующей константы двумя методами: методом прямого перебора и с помощью рекуррентного алгоритма.

На первом графике (рисунок 11(а)) видно, что хотя рекуррентный алгоритм и является несколько более эффективным, чем метод прямого перебора, кривые демонстрируют схожий характер, поскольку сложность обоих алгоритмов экспоненциально зависит от количества услуг. Расчеты были выполнены для дерева высоты 3 (четыре физических пути) со следующими значениями параметров: $b_m = 1$, ; $p_{mp} = 1$, ; $C_6 = M - 1$ и $C_1 = 10$,

Топология такой сети соответствует построенному от единственного источника дереву мультивещания, когда соединение установлено со всеми пользователями. Подобная древовидная топология, где в корне дерева располагается источник, а в остальных концевых вершинах - пользователи, допускает применение рекуррентного метода расчета вероятностных характеристик, к разработке которого мы и переходим.

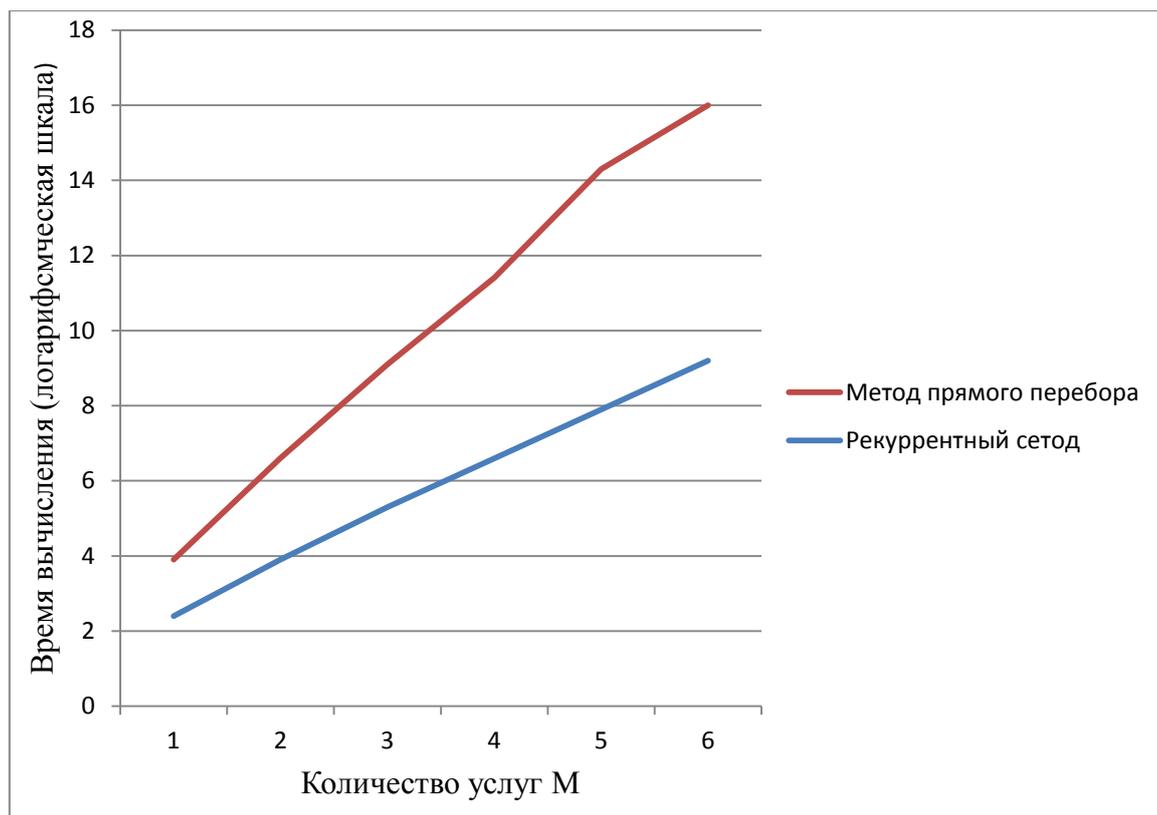


Рисунок 11(а) – Зависимость времени вычислений нормирующей константы от числа услуг M

Во втором случае (рисунок 11(б)) экспоненциальный рост показывает только кривая, соответствующая методу прямого перебора, тогда как время

выполнения рекурсивного алгоритма растет линейно. Расчеты были выполнены для последовательности деревьев высоты от 1 до 6 (то есть для сетей с 1, 2, 4, 8, 16 и 32 физическими путями), при этом $M = 5$; $b_m = 1$, ; $p_{mp} = 1$, ; $C_{l-1} = M-1$ и $C_l = 10$, . Рассмотрим модель МСС, в которой имеется один источник многоадресной рассылки, а одноадресные соединения моделируют фоновый трафик на звеньях сети. Такая модель полезна при исследовании вероятностных характеристик многоадресной передачи ' данных при наличии в сети фонового трафика, порождаемого одноадресными соединениями. Положим $S = 1$, $K = L$, $d_k = 1$ и $\varphi_k = \{k\}$, то есть через каждое звено сети могут быть установлены одноадресные соединения, маршрут которых ограничивается данным звеном, а требования к емкости составляют одну единицу.

Перенумеруем множество звеньев сети так, чтобы вершина, соответствующая узлу подключения источника, была инцидентна звену с номером 0, и введем некоторые дополнительные обозначения. Пусть A^l - множество детей l-звена, а D^l - множество звеньев поддерева, исходящего из l-звена, включая само l-звенo.

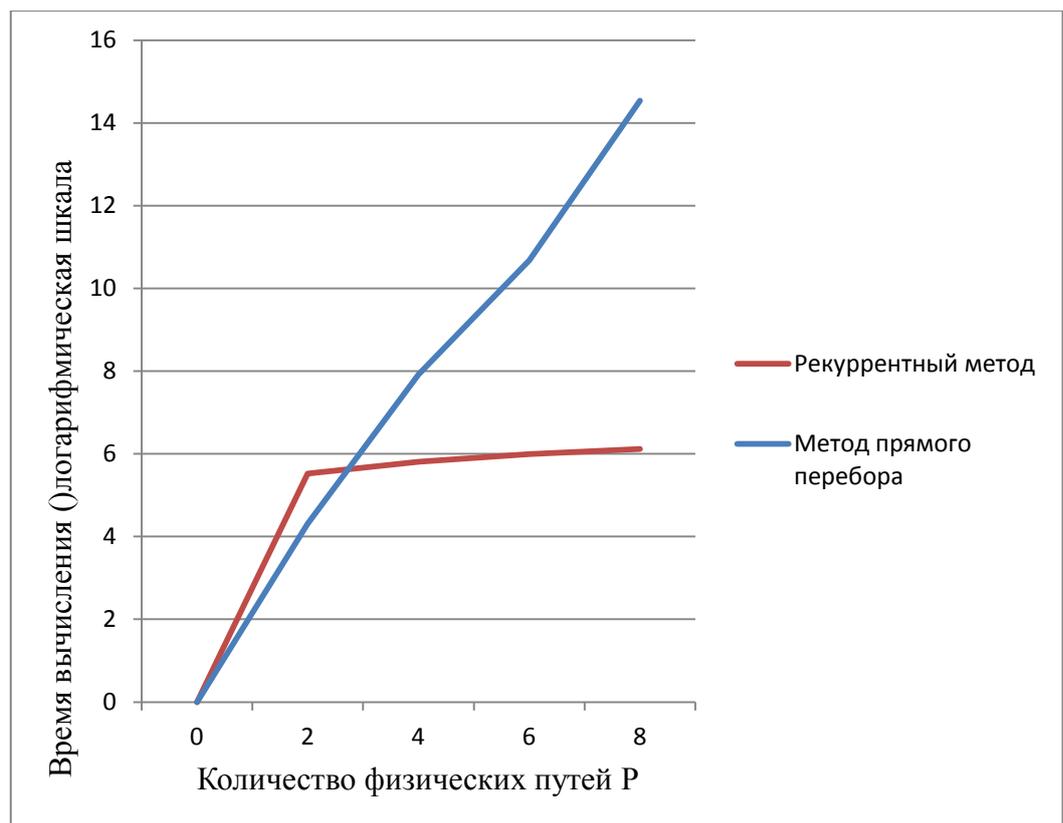


Рисунок 11(б) – Зависимость времени вычисления нормирующей константы от количества физических путей P

Введенные обозначения иллюстрирует схема на рисунке 12. Обозначим множество услуг, предоставляемых по l-звену. Далее в данном разделе диссертации будем опускать для краткости индекс s и использовать там, где это

возможно, индекс l вместо k , так как в рассматриваемом случае имеет место взаимнооднозначное соответствие между множеством звеньев φ , и множеством классов одноадресных соединений K .

Состояние дерева мультिवещания в сети с одним источником определяется совокупностью состояний всех логических путей, проходящих через корневое звено дерева (звено с индексом 0).

Рекурсивный алгоритм расчета функции $g^l(y)$ для $y \in \varphi$ имеет следующий вид.

Алгоритм 2.2 (рекурсивное вычисление функции $g^l(y)$ для $y \in \varphi$)

Шаг 1.

Шаг 2. Если $A^l = \emptyset$

Шаг 3. То

Шаг 4. Иначе для всех $y \in A^l$ выполнять

Шаг 5.

Шаг 6. Для всех $y \in A^l$ выполнять

Шаг 7.

Шаг 8.

Шаг 9.

Шаг 10. Возвратить g

Сложность вычисления нормирующей константы $G^0(Z)$ с помощью алгоритма 2.2 зависит от числа предоставляемых источником услуг, количества физических путей, а также емкости звеньев сети. Вид этой зависимости характеризует следующее утверждение.

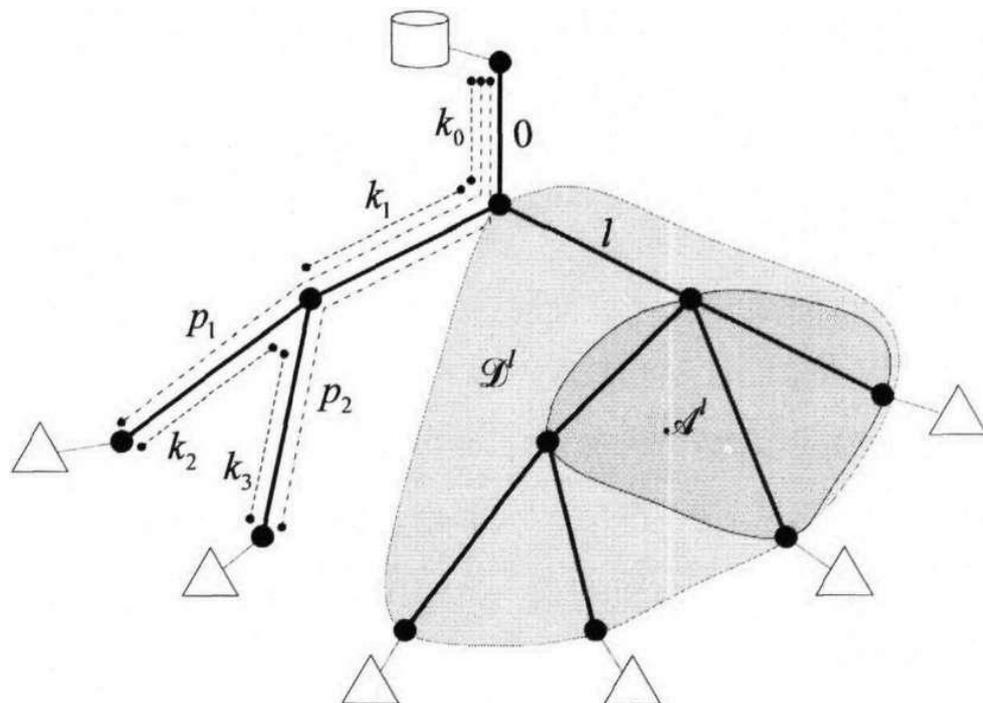


Рисунок 12 - Схема модели МСС с одним источником многоадресной рассылки.

Предложение 2.4. Временная сложность вычисления константы $G^0(Z)$ с помощью алгоритма 2.2 для бинарного дерева с ветвями одинаковой длины в наихудшем случае имеет порядок $O(2^m \text{Pmax}\{2^{2M} M, C\})$.

Для сравнения, временная сложность вычисления нормирующей константы методом прямого перебора в случае бинарного дерева с ветвями равной длины и фоновым трафиком имеет порядок $O(2^{MP} C^{2p+1} MP^2)$. Таким образом, представленный рекуррентный алгоритм позволяет избавиться от экспоненциальной зависимости временной сложности вычислений от числа физических путей в сети.

Алгоритм 2.3 (рекурсивное вычисление функции для

Шаг 1.

Шаг 2. Если

Шаг 3. То

Шаг 4. Иначе если

Шаг 5. То если $y_m=0$

Шаг 6.

Шаг 7. Иначе для всех выполнять

Шаг 8.

Шаг 9. Если $y_m=0$

Шаг 10.

Шаг 11. Иначе

Шаг 12. Для всех выполнять

Шаг 13.

Шаг 14.

Шаг 15. Возвратить g

Алгоритм 2.3 служит для рекуррентного расчета ненормированной вероятности блокировки логического пути. Нормировка производится согласно соотношению (2.62) посредством константы $C^0(Z)$, для рекуррентного вычисления которой можно воспользоваться алгоритмом 2.2.

Временная сложность алгоритма 2.3 также не имеет экспоненциальной зависимости от числа физических путей в сети, что позволяет использовать данный алгоритм для анализа ряда значимых для практики сетевых топологий.

Таким образом, разработан метод и рекуррентные алгоритмы для эффективного вычисления вероятностных характеристик предложенной в разделе 1.2 диссертации модели МСС в случае древовидной топологии сети, то есть в случае одного источника многоадресной рассылки и фонового одноадресного трафика на звеньях.

В следующем разделе предложен метод приближенного анализа вероятностных характеристик модели МСС, основанный на известном по работам [21,51,72] методе просеянной нагрузки (англ. reduced load approximation), или методе неподвижной точки (англ. fixed point approximation).

Оказывается, что чем больше и сложнее структура сети, тем проще во

многим становится ее анализ [72], поскольку в этом случае можно допустить, что установление соединения блокируется независимо на различных звеньях маршрута.

На этом предположении базируется метод просеянной нагрузки. При этом считается, что прежде чем поступить на звено сети, созданная запросами пользователей предложенная нагрузка уменьшается за счет потерь от блокировок на других звеньях, через которые проходит данный маршрут. Если принять предположение о независимости блокировок на различных звеньях сети, получим для вероятности блокировки (m, p, s) - пути

$$(2.31)$$

и для вероятности блокировки установления соединения k -класса

$$(2.32)$$

Здесь $P_{m,s}$ и P_k представляют собой соответственно вероятности блокировок (m, s) -услуги и одноадресного соединения k -класса на звене i . Поскольку блокировки на различных звеньях сети происходят независимо, каждое звено можно рассматривать отдельно, пользуясь моделью отдельного звена МСС, разработанной в разделе 2.1, причем параметры резервирования могут различаться от звена к звену.

Для каждого звена сети $P_{m,s}$ и P_k являются функциями от фиксированных структурных параметров i -звена: емкости C_i , требований к ресурсам $r_{m,s}$ и r_k параметров резервирования, а также от нагрузочных параметров: величины поступающего на i -звено трафика многоадресных $\lambda_{m,s}$ и одноадресных λ_k соединений и λ .

Нагрузочные параметры для каждого звена зависят от исходных нагрузочных параметров логических путей и классов одноадресных соединений, а также от вероятностей блокировок на остальных звеньях соответствующих маршрутов.

Таким образом, вероятности блокировок находятся как решение системы уравнений:

$$(2.34)$$

Поскольку величина поступающей на звено просеянной нагрузки в свою очередь зависит от вероятностей блокировки на остальных звеньях сети, система (2.66) является системой уравнений неподвижной точки. Существование решения вытекает из теоремы Брауэра [34], поскольку

необходимо найти неподвижную точку непрерывного отображения выпуклого компактного множества на себя. Для решения системы удобно воспользоваться методом последовательных приближений с некоторым начальным приближением.

Добавим, что в общем случае решение системы (2.34) не является единственным [51]. Этот факт может отразиться на сходимости метода последовательных приближений при решении системы и на точности оценки вероятностей блокировок. Точность метода подробно обсуждается в разделе 3.4 на основе результатов численного анализа системы.

Пока лишь заметим, что точность оценки зависит, главным образом, от того, насколько правомерно делать предположение о независимости блокировок на звеньях для данной конкретной сети. В [73] отмечено, что свойства модели рассматриваемого типа во многом становятся проще при рассмотрении больших сетей сложной топологии, когда велико количество звеньев и не совпадающих друг с другом маршрутов соединений. В этом случае предположение о независимости блокировок на различных звеньях хорошо отражает характер функционирования системы и метод просеянной нагрузки демонстрирует высокую точность.

3 Анализ методов расчета вероятностных характеристик

3.1. Проведение численного эксперимента

При проведении численного эксперимента, направленного на оценку сферы применимости и эффективности методов анализа мультисервисных сетей связи, особое значение приобретает выбор исходных данных. Сложность состоит в необходимости нахождения разумного компромисса между реальными телекоммуникационными системами, расчет которых в большинстве случаев является длительным и трудоемким процессом, и идеализированными сетевыми моделями, которые в случае чрезмерного упрощения рискуют оказаться существенно оторванными от практики.

Для разработанных в диссертации моделей МСС исходными данными являются:

- топология сети;
- емкость звеньев сети;
- требования одноадресных соединений различных классов и услуг мультимедиа к емкости звеньев;
- маршруты одноадресных и многоадресных (физические пути) соединений;
- интенсивности поступления запросов пользователей на установление соединений и средние времена занятия соединений.

Для оценки эффективности приближенного метода просеянной нагрузки и метода Монте-Карло выбрана типовая городская вычислительная сеть (англ. Metropolitan Area Network, MAN) на базе технологии Gigabit Ethernet, схематически изображенная на рисунке 13. Ядро сети состоит из четырех высокопроизводительных коммутаторов и имеет полносвязную топологию (схема соединения «каждый с каждым»).

Уровень агрегации совмещен с ядром, что встречается на практике при построении небольших городских или крупных корпоративных сетей рассматриваемого типа. Уровень доступа имеет звездообразную схему, а производительность коммутаторов данного уровня зависит от размера и потребностей подключаемой группы пользователей. К коммутаторам ядра могут быть подключены серверы и специальное оборудование, предназначенные для теле- и радиовещания, предоставления видео по требованию и других услуг МСС. Сеть имеет выход в ТфОП и Интернет.

Хотя номинальная скорость передачи данных в сети на базе технологии Gigabit Ethernet составляет 1 Гбит/с, фактическая пропускная способность звена зависит от применяемых протоколов и размеров пакета. Максимальная пропускная способность звена определяется в ходе тестирования в каждом конкретном случае и для сетей Ethernet в среднем составляет около 60 % от заявленной скорости передачи данных. Если коэффициент использования

канала превышает эту величину, происходит резкое увеличение задержки передачи'. Таким образом, в предложенном примере пропускная способность звеньев сети составляет около 600 Мбит/с.

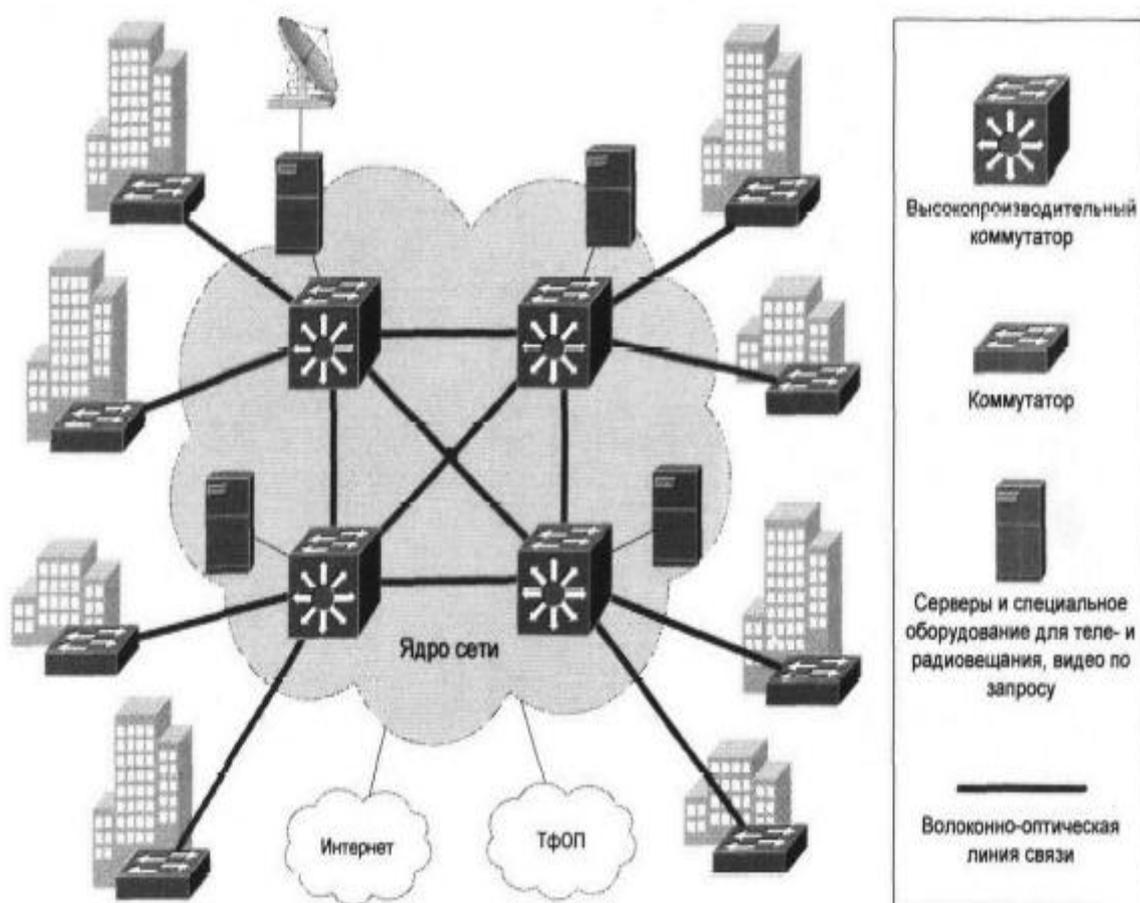


Рисунок 13 – Схема сети Ethernet масштаба города

Для того чтобы определить требования соединений к емкости звеньев, обратимся к таблице 1, в которой представлен набор услуг современной мультисервисной сети, использующих потоковую передачу данных, и их требования к скорости передачи.

Из таблицы видно, что наиболее ресурсоемкими оказываются услуги передачи видеоданных. Так, предоставление в МСС услуг телефонии требует обеспечения передачи между двумя абонентами потокового трафика со скоростью 8 кбит/с, предоставление услуг аудио по требованию - передачи со скоростью порядка 256 кбит/с, а для телевидения необходима скорость передачи около 4 Мбит/с.

Из услуг, предназначенных для домашнего пользователя, наиболее требовательной к емкости канала на сегодняшний день является телевидение высокой четкости, для передачи сигнала которого в сжатом виде необходима скорость порядка 30 Мбит/с.

Т а б л и ц а 1 - Требования услуг мультисервисных сетей связи к скорости передачи данных [46].

Услуга		Технология кодирования	Скорость передачи
Передача речи	Телефония (очень высокое качество)	ITU G.711	64 кбит/с
	Телефония (высокое качество)	ITU G.729	8 кбит/с
	Телефония (качество от высокого до удовлетворительного)	ITU G.723.1	5,3/6,4 кбит/с
Передача аудиоданных	Потоковое аудио	MP3	32-320 кбит/с
	Музыкальный компакт-диск	CD-DA	1441 кбит/с
	Музыкальный компакт-диск	MPEG с БПФ	192-256 кбит/с
	Аудиозапись профессионального качества	MPEG с БПФ	384 кбит/с
	Система долби	Dolby Digital 5.1 (AC-3)	640 кбит/с
Передача видеоданных	Видеоконференция	ITU H.261	100 кбит/с
	Потоковое видео	MPEG-4	0,005-10 Мбит/с
	Традиционное телевидение	MPEG-2	2-4 Мбит/с
	Цифровое телевидение профессионального качества	ITU-R BT.601	166 Мбит/с
	DVD	MPEG-2	3-6 Мбит/с
	HDTV	SMPTE 292M	1,5 Гбит/с
	HDTV	MPEG-2	25-34 Мбит/с

На рисунке 14 для услуг МСС сопоставляются требования к скорости передачи и продолжительности соединений. Эти данные позволяют сделать предположения о среднем времени занятия соединений различных классов и услуг мультивещания.

На рисунке 14 видно, что телефонный разговор в среднем может продолжаться от 2 до 25 минут, тогда как продолжительность просмотра телеканала лежит в диапазоне от 10 минут до 3 часов.

Исходя из вышеизложенного, для численного анализа отдельного звена сети выбраны следующие исходные данные. Пусть через звено Gigabit Ethernet

устанавливаются одноадресные соединения для потоковой передачи данных со скоростью 1 Мбит/с, предоставления видео по требованию качества DVD со скоростью 5 Мбит/с, информационных голосовых услуг и телефонии со скоростью 8 кбит/с, а также многоадресные соединения для просмотра 25 каналов DDTV в формате MPEG-2 со скоростью передачи 30 Мбит/с. При этом пусть 5 телеканалов пользуются большей популярностью у пользователя по сравнению с остальными, а доступ к еще пяти из менее популярных 20 каналов предлагается по более высокой цене.

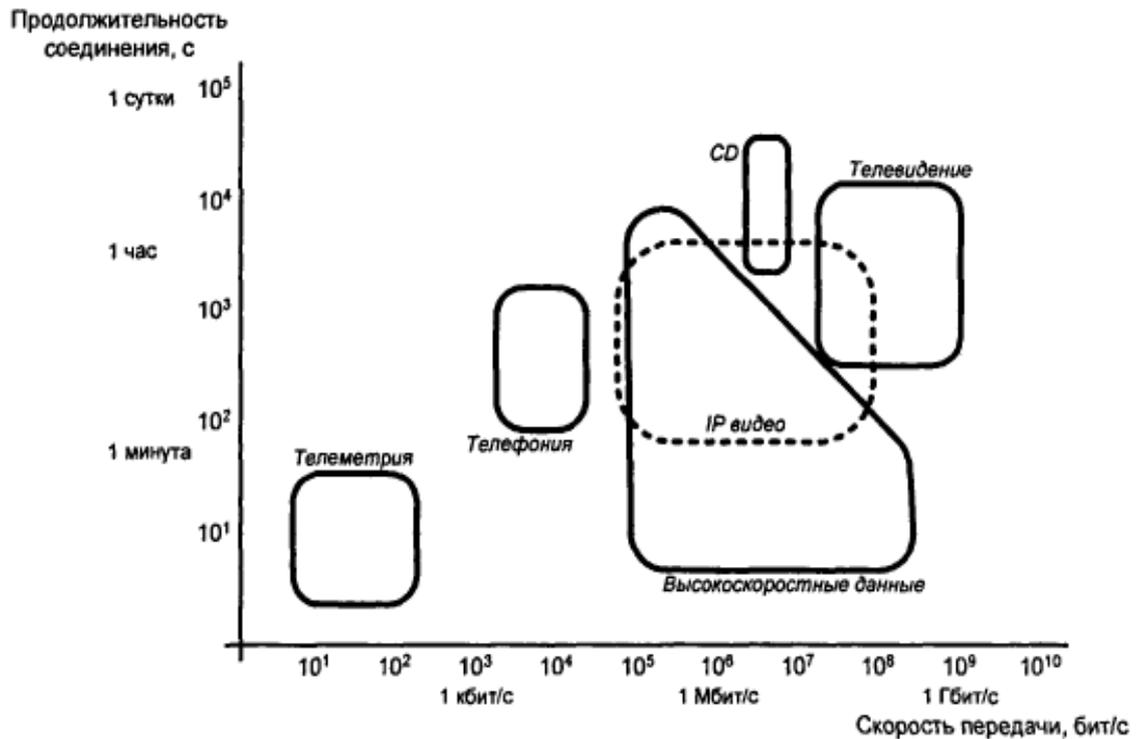


Рисунок 14 - Скорость передачи и продолжительность соединения при предоставлении услуг МСС [46].

Примем 8 кбит/с за одну передаточную единицу. Тогда емкость звена C равна $600 \cdot 10^3 / 8 = 75000$ единиц. Источник мультимедиа предоставляет 25 соответствующих телеканалам HDTV услуг, $M = \{1, \dots, 25\}$, для которых $b_m = b = 3750$. Пусть последние пять каналов ($m = 21, \dots, 25$) являются более популярными и интенсивность потоков запросов на них выше. Пусть также первые пять каналов ($m = 1, \dots, 5$) являются приоритетными по причине более высокой цены. Вследствие этого возникает необходимость повышения качества обслуживания при предоставлении доступа к ним, что может быть достигнуто путем резервирования ресурсов звена. Поэтому, помимо полностью доступной системы, мы рассмотрим случаи, когда для первых пяти каналов на звене резервируются 80 Мбит/с и 120 Мбит/с, что дает следующие значения параметров для предложенной в разделе 2.1 диссертации модели звена с резервированием: $M_r = 5$, $R = 10^4$ в первом случае и $R = 15 \cdot 10^3$ - во втором

случае. Помимо многоадресных соединений, на звене имеется 4 класса одноадресных соединений, $M = \{1, \dots, 4\}$, соответствующих потоковой передаче данных, видео по требованию, информационным голосовым услугам и телефонии. Параметры услуг мультивещания и классов одноадресных соединений представлены в таблице 3.2. Нагрузочные параметры класса, соответствующего телефонии, при расчетах варьируются. Результаты численного анализа отдельного звена сети представлены в разделе 3.2.

Т а б л и ц а 2 - Параметры соединений для численного анализа отдельного звена МСС.

Услуги мультивещания				
Трафик	M	b_m	(сек.)	—
HDTV, 30 Мбит/с	1, ..., 20	3750	3600	1
HDTV(популярные каналы), 30 Мбит/с	21, ..., 25	3750	3600	10
Классы одноадресных соединений				
Трафик	K	d_k	(сек.)	—
Передача данных 1 Мбит/с	1	125	900	1
Видео по требованию, 5 Мбит/с	2	625	4320	1.2
Информационные голосовые услуги, 8 кбит/с	3	1	180	50
Телефония, 8 кбит/с	4	1	180	$[0; 10^5]$

Для численного анализа сети методами Монте-Карло и просеянной нагрузки выбраны следующие исходные данные. Схема исследуемой мультисервисной сети, соответствующая изображенной на рисунке 13 структурной схеме, показана на рисунке 15.

Сеть имеет четырнадцать звеньев, пронумерованных от 1 до 14 (на каждом звене надписан его номер), следовательно $\varphi = \{1, 2, \dots, 14\}$. Серверам услуг соответствуют четыре источника многоадресной рассылки, изображенных на рисунке цилиндрами, то есть $\varphi = \{1, 2, 3, 4\}$.

Коммутаторам уровня доступа соответствуют восемь узлов подключения пользователей, отмеченных треугольниками. Маршруты одноадресных соединений и физические пути мультивещания определяются взаимным

расположением пользователей и источников рассылки, а также применяемой схемой маршрутизации. Будем считать, что от каждого источника по кратчайшему маршруту проходит физический путь к каждому узлу подключения пользователей.

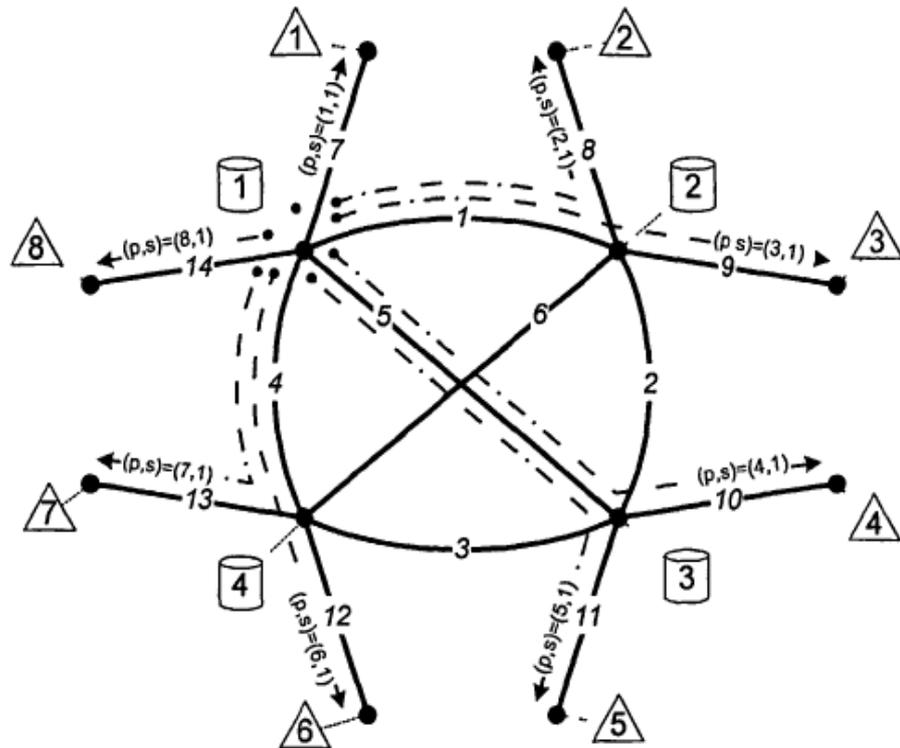


Рисунок 15 - Схема МСС с физическими путями к 1-источнику.

Физические пути от первого источника показаны на рисунке 15 штрихпунктирными линиями, физические пути от остальных источников строятся аналогично - по кратчайшему маршруту до каждого пользователя, и не показаны на рисунке.

Одноадресные соединения могут быть установлены между любыми двумя пользователями, то есть узлами, соответствующими висячим вершинам изображающего сеть графа. Таким образом, всего в сети имеется 28 классов одноадресных соединений: $K = \{1, 2, \dots, 28\}$.

Будем считать, что одноадресные соединения всех классов требуют скорости передачи 5 Мбит/с, и примем эту величину за одну передаточную единицу (в отличие от рассмотренного выше случая отдельного звена, где за одну передаточную единицу принято 8 кбит/с): $d_k = 1$. Тогда емкости звеньев сети, пропускная способность которых составляет 600 Мбит/с, равны между собой и составляют 120 единиц: $C_1 = 120$.

Каждый источник предоставляет по две услуги, состоящие в передаче сигнала HDTV со скоростью 30 Мбит/с, следовательно $M_s = \{1, 2\}$, и $b_m = 6$. Результаты расчетов сети методом Монте-Карло получены в разделе 3.3, методом просеянной нагрузки - в разделе 3.4.

3.2. Численный анализ вероятностей блокировок звена мультисервисной сети связи

На рисунках 16(а,б) представлены графики различных вероятностных характеристик звена МСС как функций от интенсивности предложенной нагрузки трафика телефонии a_4 . Расчеты выполнены для значений параметров, предложенных в предыдущем разделе. Результаты получены с помощью программного средства, специально разработанного на языке С++ с использованием библиотеки для вычислений произвольной точности GMP версии 4.2.1'.

На рисунке 16 изображены графики вероятностей блокировок установления соединения для модели звена без резервирования. Вероятности блокировок одноадресных соединений классов 3 и 4 совпадают между собой и вынесены на отдельный график (рисунок 16(б)), так как их значения на несколько порядков меньше вероятностей блокировок остальных соединений.

Тот факт, что эти вероятности совпадают, демонстрирует, что вероятности блокировок одноадресных соединений определяются только своими требованиями к емкости и общей загрузке звена и не зависят от нагрузочных параметров классов.

Вероятности же блокировок многоадресных соединений, имеющих одинаковые требования к емкости звена, отличаются, если значения их нагрузочных параметров различны, как это видно из рисунка 16(а): вероятности блокировки доступа к популярным каналам, $m = 21, \dots, 25$, растут значительно медленнее, чем вероятность блокировки менее популярных каналов, $m = 1, \dots, 20$, интенсивность запросов пользователей на которые ниже.

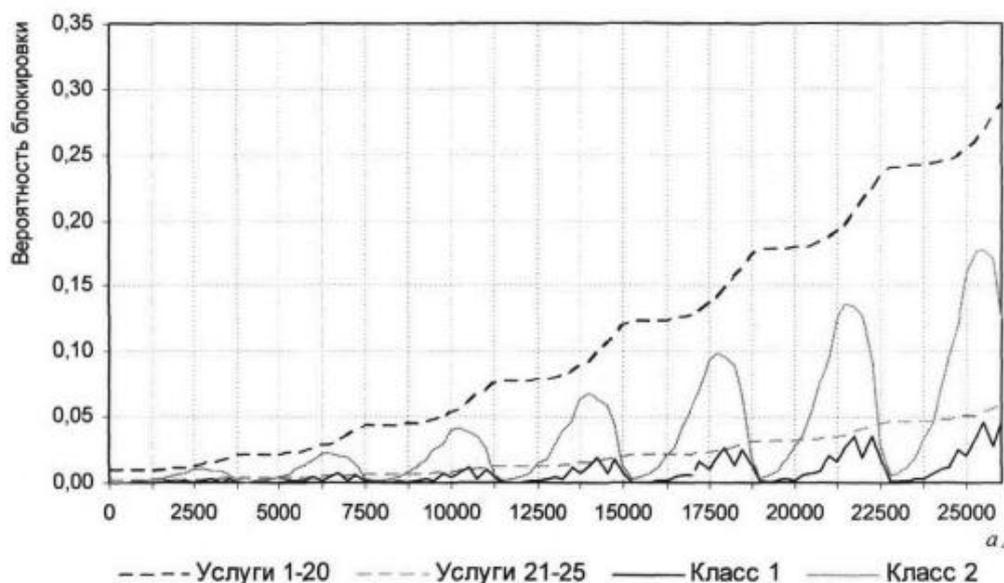


Рисунок 16 (а) - вероятности блокировок логических путей и соединений классов 1 и 2

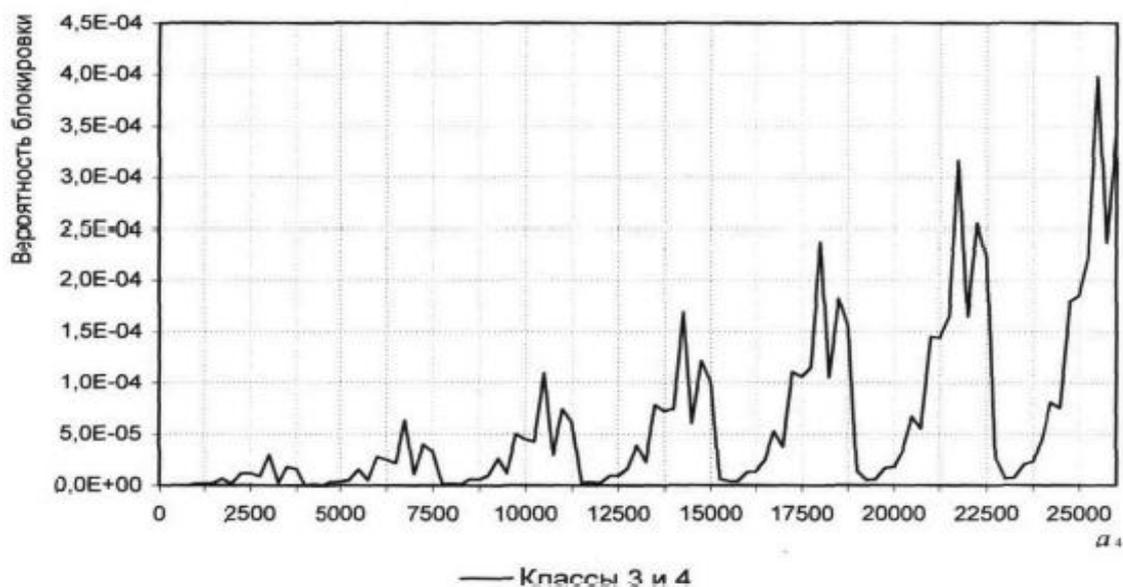


Рисунок 16(б) - вероятности блокировок соединений классов 3 и 4

График величины ——— представлен на рисунке 17(а) (значения отложены по оси справа), где для сравнения также даны вероятности блокировок , $m = 1, \dots, 20$, и (значения по оси слева).



Рисунок 17(а) - периодичность колебаний в сравнении с графиком

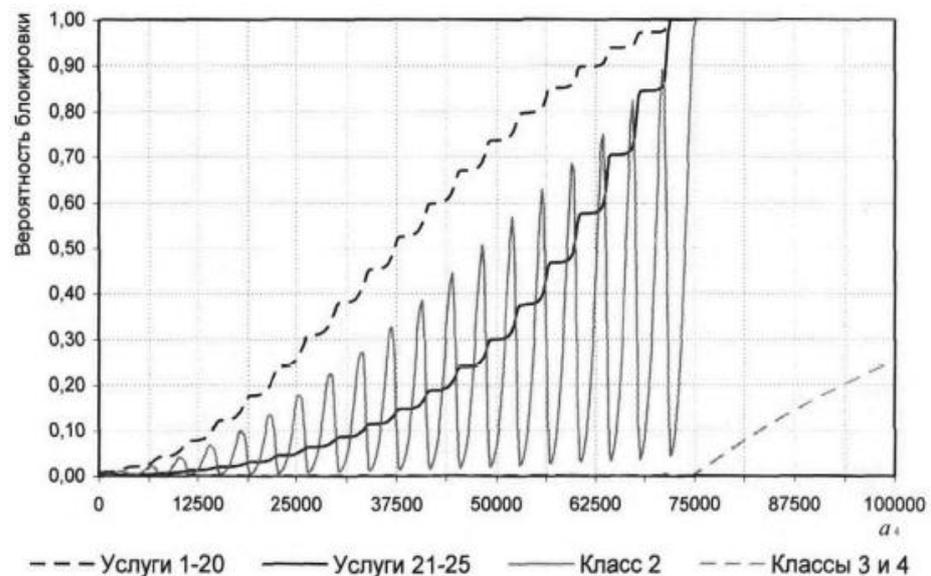


Рисунок 17(б) - поведение при значениях a_4 , близких к $C = 75000$

Периодические колебания вероятностей блокировок объясняются следующим образом. Равномерный рост интенсивности предложенной нагрузки 4-класса a_4 влечет равномерный рост среднего числа единиц емкости звена, занятых одноадресными соединениями, что подтверждает коэффициент использования звена одноадресными соединениями $d^{(1)}/C$ график которого изображен на рисунке 18.

Следовательно, с ростом a_4 равномерно уменьшается величина $C \cdot d^{(1)}$ - доля емкости звена, доступная многоадресным соединениям. Однако требуемая каждому такому соединению емкость $b = 3750$ достаточно велика по сравнению с $d_4 = 1$, и количество — многоадресных соединений, которые можно установить на доступной для них емкости звена, уменьшается с ростом a_4 скачкообразно, причем скачок происходит через каждые 3750 единиц.

Легко видеть, что период колебаний вероятностей блокировок составляет $b = 3750$. Окрестность каждой точки скачка величины — характеризуется тем, что в ней вероятность блокировки многоадресных соединений ускоряет свой рост, а вероятность блокировки одноадресных соединений, напротив, меняет направление и от роста переходит к снижению.

Рассмотрим, например, точку $a_4 = 14000$, в окрестности которой величина — совершает скачок с 16 до 15. При приближении к точке скачка слева рост величины — плавно ускоряется, около самой точки $a_4 = 14000$ график претерпевает перегиб, и к $a_4 = 56250$ рост почти прекращается и возобновляется только начиная с $a_4 = 16250$ при приближении к следующей точке скачка величины —. Вероятность — достигает в окрестности точки $a_4 = 14000$ локального максимума, после чего резко падает почти до нуля приблизительно

при $a_4 = 15250$, то есть там, где останавливается рост , затем растёт до очередного локального максимума в точке следующего скачка —.

Действительно, при $a_4 = 14000$ вероятность того, что через звено будет предоставлять 15 услуг мультивещания, начинает преобладать над вероятностью предоставления 16 услуг, что освобождает для одноадресных соединений, требования к емкости звена которых значительно ниже, $b = 3750$ единиц ресурса.

При $a_4 = 15250$ вероятность предоставления 16 услуг приближается к нулю и освободившихся 3750 единиц емкости оказывается достаточно для обслуживания почти всей нагрузки, создаваемой одноадресными соединениями, вследствие чего вероятности блокировки этих соединений падают.

При дальнейшем увеличении a_4 трафик телефонии загружает указанную емкость и вероятности блокировки одноадресных соединений растут, до тех пор пока одноадресный трафик не вытеснит еще одну услугу мультивещания,

На рисунке 17(б) представлены вероятности блокировок при изменении интенсивности нагрузки, создаваемой трафиком телефонии, в диапазоне от 0 до 10^5 . На графике видно, что ступенчатый рост вероятностей блокировок многоадресных соединений и периодические колебания с увеличивающейся амплитудой вероятности продолжаются до тех пор, пока параметр a_4 не достигнет значения $C = 75000$, начиная с которого данные вероятности равны единице.

С указанной точки также начинается существенный рост вероятностей и , причем, как и следовало ожидать, графики этих вероятностей уже лишены колебаний.

На рисунке 18 изображен график зависимости коэффициента использования звена $c^{(1)}/C$ интенсивности предложенной нагрузки трафика телефонии. Коэффициент использования звена $c^{(1)}/C$ находится как сумма величин $b^{(1)}/C$ и $d^{(1)}/C$, представляющих собой коэффициенты использования звена многоадресными и одноадресными соединениями соответственно. На графике видно, что увеличение нагрузки a_4 приводит к росту величины $d^{(1)}/C$, и при $a_4 = C$ одноадресные соединения полностью вытесняют со звена многоадресные.

На рисунке 18 представлены результаты вычисления вероятности блокировки приоритетных услуг $m = 1, \dots, 5$ на звене без резервирования (сплошная линия), на звене, где под предоставление этих услуг резервируются $R = 10000$ единиц емкости, (пунктирная линия) и на звене, где резервируются $R = 15000$ единиц емкости (штрихпунктирная линия). Колебания графика вероятности блокировки при $R = 10000$ объясняются аналогично колебаниям вероятностей блокировок одноадресных соединений.

Дело в том, что если при $R = 15000$ резервируемого числа единиц емкости достаточно для предоставления ровно четырех услуг мультивещания ($3750 \times 4 = 15000$), то при $R = 10000$ резервируемая емкость покрывает требования двух

многоадресных соединений полностью и еще одного - на $2/3$: $3750 \times 2(2/3) = 10000$. Таким образом, для предоставления еще одной приоритетной услуги требуется 1250 единиц емкости звена в общей зоне.

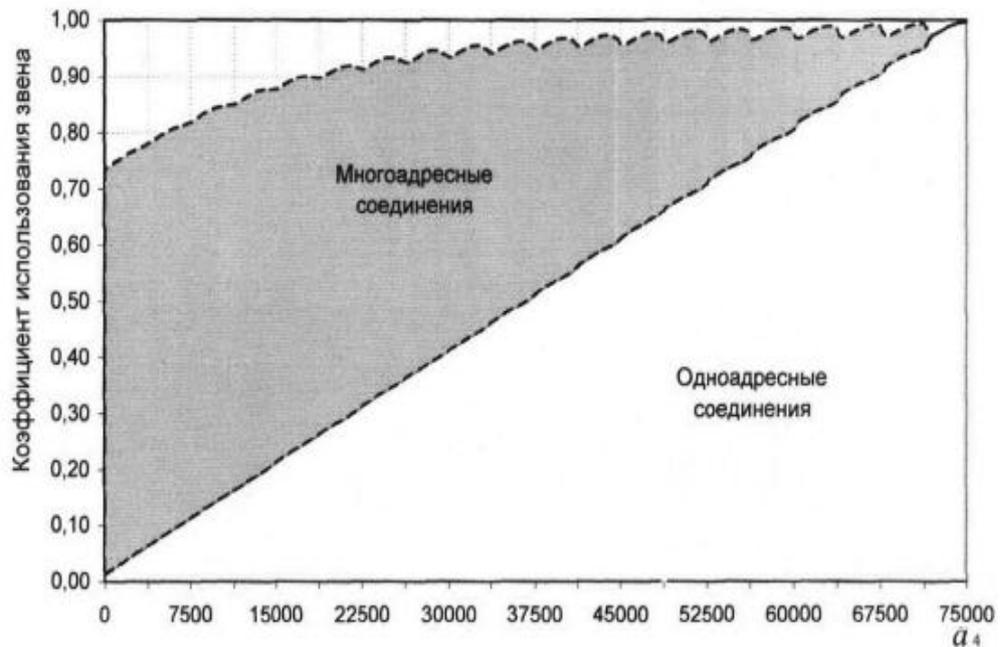


Рисунок 18 - Коэффициент использования звена.

По графикам, представленным на рисунке 19, можно проследить влияние резервирования ресурсов на коэффициент использования звена. В рассматриваемом примере резервирование приводит к снижению коэффициента использования, однако на практике это зачастую компенсируется для оператора более высокой стоимостью приоритетного трафика.

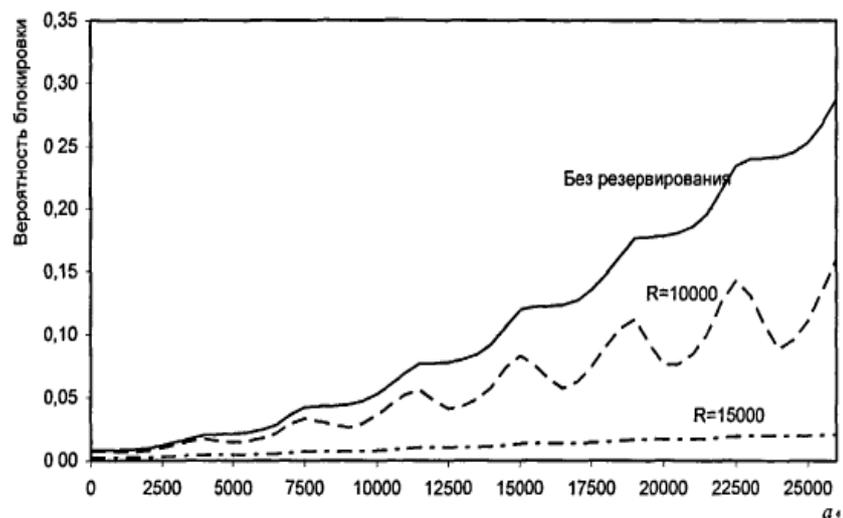


Рисунок 19 - Вероятность блокировки приоритетных услуг мультимедиа ($m = 1, \dots, 5$) при $R=0$, $R=10000$ и $R=15000$

Результаты численного анализа демонстрируют, что предложенные методы исследования вероятностных характеристик звена мультисервисной сети позволяют выявить интересные для приложений закономерности в функционировании систем связи и могут быть полезны при их проектировании. В следующем разделе диссертации предложен метод Монте-Карло для численного анализа вероятностных характеристик МСС, а также представлены полученные с помощью этого метода численные результаты.

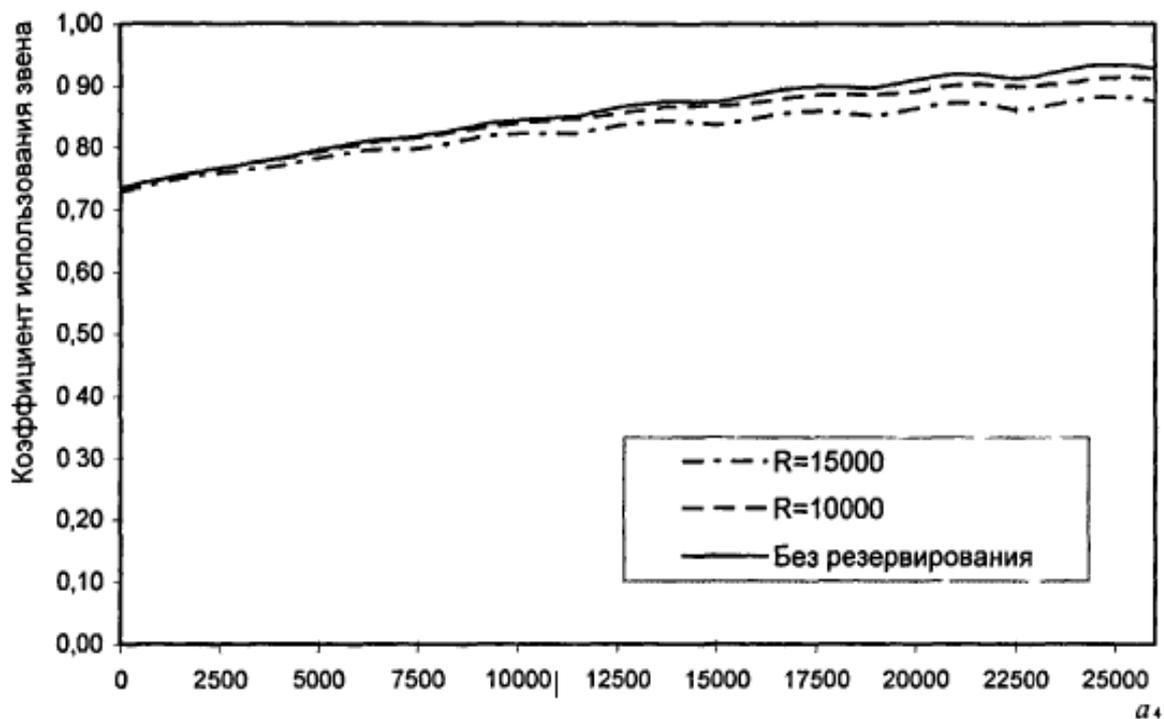


Рисунок 20 - Коэффициент использования звена при $R=0$, $R=10000$ и $R=15000$.

3.3 Алгоритмы метода статистических испытаний и метода просеянной нагрузки

Выше отмечалось, что вычисление вероятностных характеристик модели методом прямого перебора пространства состояний имеет экспоненциальную временную сложность от нескольких важных параметров модели.

Разработанный в разделе 2.2 диссертации рекуррентный метод расчета применим лишь к сетям древовидной топологии, тогда как приближенный метод просеянной нагрузки демонстрирует удовлетворительную точность при анализе сетей сложной структуры с большим количеством не совпадающих между собой маршрутов соединений.

В ряде случаев удобной альтернативой перечисленным методам является известный численный метод Монте-Карло, или метод статистических

испытаний [14,32,55]. Метод Монте-Карло для оценки нормирующей константы и вероятностей блокировок установления соединений в модели мультисервисной сети с одноадресными соединениями представлен в [95].

Вычисление методом Монте-Карло вероятностей блокировки установления соединений в сетях мультимедиа рассматривается в [79]. В данном разделе диссертации предложен метод Монте-Карло для анализа модели мультисервисной сети с двумя типами трафика, построенной в разделе 1.2.

Итак, необходимо получить приближенные значения нормирующей константы $G(Z)$ и вероятностей блокировок B_{mps} и B_k , исходя из распределения вероятностей (1.10) с пространством состояний вида (1.9). Для этого введем многомерную СВ

распределенную в соответствии с некоторым произвольным дискретным законом $\{p_{z_i}\}$, удовлетворяющим условию $\sum_{z_i} p_{z_i} = 1$ для таких z_i , что $z = (x, 0)$.

Аналогично, введем СВ $\{p_{z_i}\}$, распределенную по произвольному закону $\{p_{z_i}\}$, такому что $\sum_{z_i} p_{z_i} = 1$ при $z=(0, n)$. Будем рассматривать выборку объема I , где z_i - i -ая реализация СВ $\{z_i\}$, и z_i - i -ая реализация СВ $\{z_i\}$. Введем для любого подмножества I СВ:

$$\bar{z}_i = \frac{1}{I} \sum_{i \in I} z_i \quad (3.1)$$

Уточним, что в соответствии с формулой (1.5):

$$\bar{z}_i = \frac{1}{I} \sum_{i \in I} z_i \quad (3.2)$$

Тогда статистика:

$$\bar{z}_i = \frac{1}{I} \sum_{i \in I} z_i \quad (3.3)$$

является несмещенной оценкой нормирующей константы $G(Z)$ для любого фиксированного I .

Из ЦПТ следует, что доверительный интервал уровня значимости α для $G(Z)$ имеет вид:

$$\bar{z}_i \pm \frac{\sigma}{\sqrt{I}} \quad (3.4)$$

где $\frac{\sigma}{\sqrt{I}}$ - квантиль порядка $\alpha/2$ стандартного нормального закона;

$$\frac{\sigma}{\sqrt{I}} \quad (3.5)$$

В этом случае СВ можно генерировать покомпонентно на основе распределений η_k , η_{mp} , и η_{ms} , таких что $\eta_k + \eta_{mp} + \eta_{ms} = 1$.

Для выбора этих распределений прибегнем к методу существенной выборки (англ. importance sampling) [14,32,55,95]. Пусть закон распределения СВ η_k имеет вид:

$$P(\eta_k = i) = \frac{a_k^i}{\sum_{j=0}^{\infty} a_k^j} \quad (3.6)$$

а СВ η_k распределена по пуассоновскому закону с параметром a_k :

$$P(\eta_k = i) = \frac{a_k^i e^{-a_k}}{i!} \quad (3.7)$$

В этом случае статистика (3.3) принимает удобную форму:

$$T_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_{ki} \quad (3.8)$$

Далее, введем для любого подмножества S статистику:

$$T_k^S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_{ki}^S \quad (3.9)$$

являющуюся оценкой вероятности $P(\eta_k \in S)$, которая определяется формулой (1.12). Согласно [95], $(1-\alpha)*100$ -процентный доверительный интервал для $P(\eta_k \in S)$ имеет вид:

$$T_k^S \pm z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{T_k^S(1-T_k^S)}{n}} \quad (3.10)$$

Для оценки вероятностей блокировки B_{mps} и B_k естественно воспользоваться статистиками T_{mps} и T_k соответственно.

Статистика (3.9), в отличие от (3.3), является смещенной оценкой искомой величины, однако смещение уменьшается с ростом объема выборки [95]. Более того, в [55] показано, что являющееся доминирующим слагаемое порядка $O(1/n)$ смещения такой оценки имеет вид:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_{ki}^S - P(\eta_k \in S) \quad (3.11)$$

Для приближенного расчета нормирующей константы на основе оценки

(3.8) разработан следующий алгоритм. Алгоритм 3.1 (вычисление нормирующей константы (1.11) методом Монте-Карло).

Шаг 1.

Шаг 2. Для i от 1 до I выполнять

Шаг 3. Для всех k , l выполнять

Шаг 4.

Шаг 5. Для всех k выполнять

Шаг 6.

Шаг 7. Если для всех k

Шаг 8. То

Шаг 9.

Шаг 10. Возвратить Γ

Сложность вычисления нормирующей константы методом Монте-Карло с помощью алгоритма 3.1 имеет порядок $O(NL \max\{MPS, K\})$ в случае сети произвольной топологии или $O\{NMP^2\}$ в случае бинарного дерева. Напомним, что $N = \max N_k$, где

На основе алгоритма 3.1 строится алгоритм расчета вероятностей блокировки путем добавления переменной-счетчика числа состояний блокировки соответствующего логического пути или класса одноадресных соединений.

Алгоритм 3.2 разработан для приближенного расчета вероятности блокировки (m, p, s) -пути на основе оценки (3.13). Отметим, что алгоритм 3.2, как и алгоритм 3.1, прост в реализации. Алгоритм расчета вероятности блокировки одноадресных соединений на основе оценки (3.14) строится аналогично и для краткости в диссертации не приводится.

Алгоритм 3.2 (вычисление вероятности блокировки $\{m, p, s\}$ -пути методом Монте-Карло).

Шаг 1.

Шаг 2. Для i от 1 до I выполнять

Шаг 3. Для всех k , l выполнять

Шаг 4.

Шаг 5. Для всех k выполнять

Шаг 6.

Шаг 7. Если для всех k

Шаг 8. То

Шаг 9. Если $\Gamma < \Gamma_{\text{зад}}$ то

Шаг 10.

Шаг 11. Если $\Gamma > \Gamma_{\text{зад}}$ то

Шаг 12.

Шаг 13.

Шаг 14. Возвратить Γ_{mps}

На рисунке 21 представлены графики вероятностей блокировок установления соединений в сети, схема которой изображена на рисунке 15 и структурные параметры предложены в разделе 3.1.

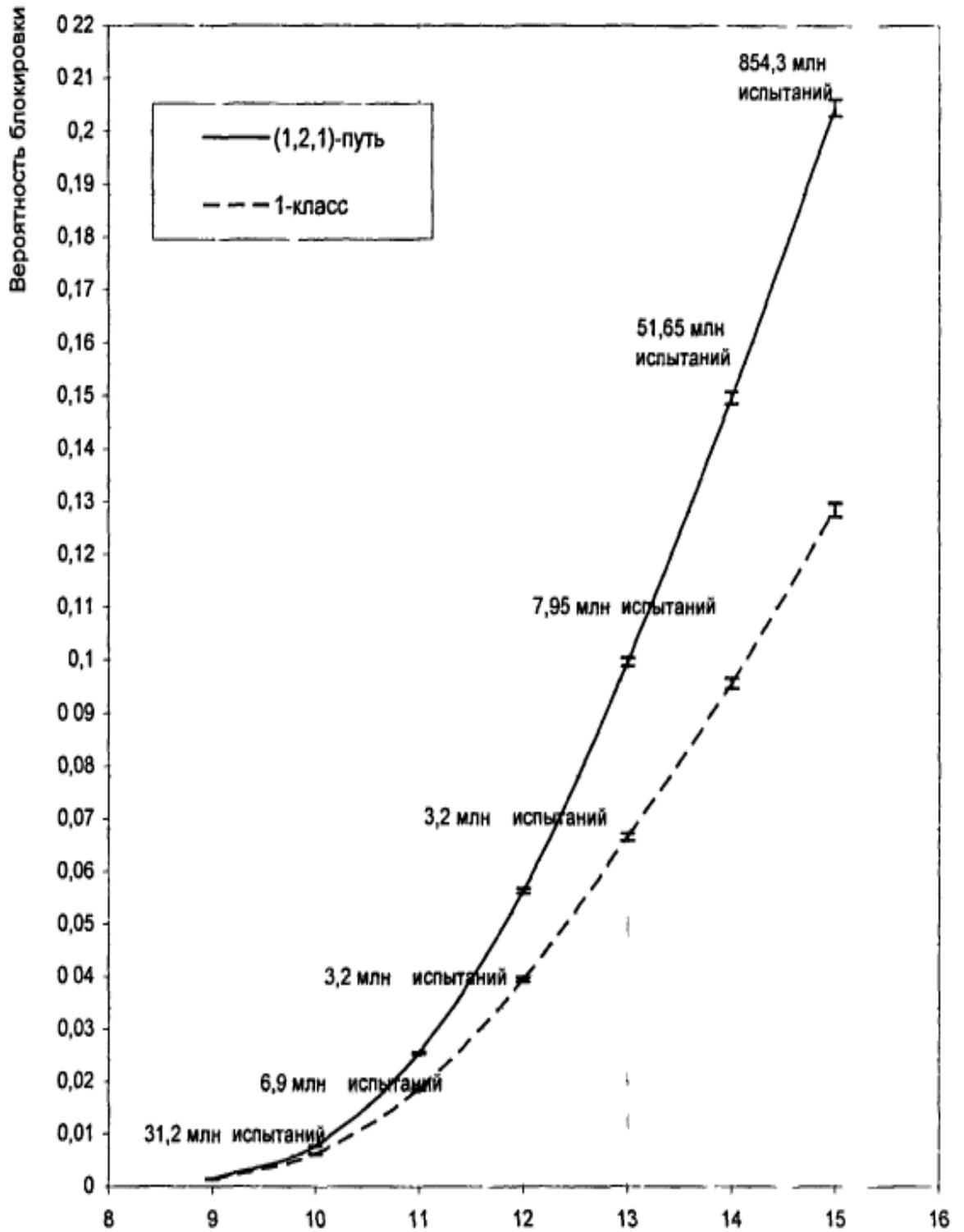


Рисунок 21 - Точечные оценки и 95-процентные доверительные интервалы для вероятностей блокировок, полученные методом Монте-Карло.

Нагрузочные параметры модели имеют следующие значения: $p_{mps} = 1$ для всех логических путей сети и $a_k = a$ для всех k , значение переменной a меняется в диапазоне от 9 до 14 и отложено по оси абсцисс.

В силу симметричности структуры сети и выбранных значений параметров модели имеется две группы логических путей, вероятности блокировки установления которых равны между собой: пути, состоящие из одного звена, например (1,1,1) и (1,8,1), и пути, состоящие из двух звеньев, например (1,2,1) и (1,3,1).

Также имеется две группы классов одноадресных соединений с совпадающими значениями вероятностей блокировок: классы соединений, маршруты которых состоят из трех звеньев и четыре класса, маршруты которых состоят только из двух звеньев, например между пользователями 1 и 8.

На рисунке 21 для краткости приводятся значения вероятности блокировки логического пути (1,2,1) и одноадресных соединений класса 1 с маршрутом между пользователями 1 и 2.

Результаты, представленные в этом и следующем разделах диссертации, получены с помощью специально разработанного программного средства на языке Java. Объем выборки при расчетах не являлся фиксированным: производилась остановка вычислений, как только длина 95-процентного доверительного интервала для B_1 составляла менее 2 % от величины вероятности блокировки, но не раньше, чем объем выборки превысит 5×10^5 .

Потребовавшиеся для соблюдения данного условия в каждой точке объемы выборки надписаны на графике рисунка 21, также на кривых показаны границы 95-процентного доверительного интервала.

Из этих значений видно, что наименьший объем выборки требуется при средней нагрузке на сеть, когда вероятности блокировок лежат в диапазоне от 0,005 до 0,1.

Графики рисунка 21 подтверждают, что законы распределения (3.6) и (3.7) удобно использовать в значимых для практики диапазонах нагрузочных параметров сети. Если же сеть сильно перегружена (вероятности блокировок установления соединений превышают 0,2-0,25), существенная часть генерируемых реализаций СВ попадает за пределы пространства состояний Z .

Аналогичная проблема возникает при очень слабой загрузке сети (вероятности блокировок установления соединений меньше 10^{-6}), поскольку реализации СВ редко попадают в соответствующее множество блокировок, в этом случае необходимо либо значительно увеличивать объем выборки, либо применять другой закон распределения СВ.

Отметим, однако, что при выборе другого закона распределения СВ величина смещения (3.15) оценки (3.9) будет отлична от нуля, что, как показывает численный анализ системы рассматриваемого типа, приводит к возникновению плохо предсказуемых погрешностей.

Добавим, что вопросы выбора распределения генерируемого вектора для сети с одноадресными соединениями обсуждаются в [80,95].

Известно, что чем больше и сложнее структура сети и маршруты соединений, тем выше точность метода просеянной нагрузки [51]. В [36] точность данного приближенного метода исследуется на примере сети звездообразной топологии с четырьмя звеньями, в которой имеются один источник многоадресной рассылки и шесть классов одноадресных соединений.

Представленные в работе результаты позволяют говорить о том, что точность метода просеянной нагрузки является удовлетворительной для широкого диапазона нагрузочных параметров.

В таблицах 3-5 данного раздела приведены результаты численного анализа вероятностей блокировки установления соединений в мультисервисной сети, схема которой изображена на рисунке 15 и структурные параметры даны в разделе 3.1.

Результаты вычислений методом просеянной нагрузки сопоставляются с оценками, полученными методом Монте-Карло, разработанным в разделе 3.3 диссертации.

Нагрузочные параметры для соединений обоих типов указаны в таблицах 3-5. Вновь из-за симметричности структуры сети и выбранных значений параметров модели имеется по две группы логических путей и классов одноадресных соединений с совпадающими значениями вероятностей блокировок.

В таблицах для краткости приводятся значения вероятности блокировки логического пути (1,2,1) и одноадресных соединений класса 1 с маршрутом между пользователями 1 и 2.

Заметим, что результаты для различных логических путей и классов одноадресных соединений, полученные методом Монте-Карло по причине статистической природы метода не совпадали между собой. Значения, полученные методом просеянной нагрузки, адекватно отразили симметричность модели. Рассмотрим полученные таблицы, в которых представлены значения нагрузочных параметров, вероятность блокировки, метод просеянной нагрузки, 95-процентный доверительный интервал, абсолютная погрешность, относительная погрешность.

Т а б л и ц а 3 - Результаты вычислений вероятностей блокировки для случая низкой нагрузки.

	(1,2,1)-путь	1-класс
Значения нагрузочных параметров	$P_{mps}=1$	$a_k=7.5$,
Вероятность блокировки, метод просеянной нагрузки	$2.7 \cdot 10^{-5}$	$3.1 \cdot 10^{-5}$
95-процентный доверительный интервал	$(1.8 \cdot 10^{-5}; 3.8 \cdot 10^{-5})$	$(1.9 \cdot 10^{-5}; 4.1 \cdot 10^{-5})$
Абсолютная погрешность	$9.54 \cdot 10^{-7}$	$8.98 \cdot 10^{-7}$
Относительная погрешность	$3.41 \cdot 10^{-2}$	$2.99 \cdot 10^{-2}$

Т а б л и ц а 4 - Результаты вычислений вероятностей блокировки для случая средней нагрузки.

	(1,2,1)-путь	1-класс
Значения нагрузочных параметров	$P_{mps}=1$, ,	$a_k=10$,
Вероятность блокировки, метод просеянной нагрузки	0.007782	0.006198
95-процентный доверительный интервал	(0.007719; 0.007834)	(0.006103; 0.006205)
Абсолютная погрешность	$5.84 \cdot 10^{-6}$	$4.35 \cdot 10^{-5}$
Относительная погрешность	$7.51 \cdot 10^{-4}$	$7.07 \cdot 10^{-3}$

Т а б л и ц а 5 - Результаты вычислений вероятностей блокировки для случая высокой нагрузки.

	(1,2,1)-путь	1-класс
Значения нагрузочных параметров	$P_{mps}=1$, ,	$a_k=15$,
Вероятность блокировки, метод просеянной нагрузки	0.203062	0.127946
95-процентный доверительный интервал	(0.193168; 0.205861)	(0.119361; 0.129851)
Абсолютная погрешность	$3.55 \cdot 10^{-3}$	$3.34 \cdot 10^{-3}$
Относительная погрешность	$1.78 \cdot 10^{-2}$	$2.68 \cdot 10^{-2}$

При расчетах для решения системы уравнений (2.66) применялся метод последовательных приближений с начальным приближением (2.69) и условием остановки (2.70) при $\varepsilon=10^{-8}$.

Количество итераций, необходимых для сходимости метода последовательных приближений, составило 3 в первом (см. таблицу 3), 5 во втором (см. таблицу 4) и 24 в третьем (см. таблицу 5) случаях, что позволяет говорить о высокой эффективности метода просеянной нагрузки с точки зрения времени вычислений для рассматриваемого диапазона значений параметров сети.

Из приведенных в таблицах значений погрешностей видно, что метод просеянной нагрузки демонстрирует высокую точность. Более того, в ходе численного эксперимента было замечено, что при слабой и средней нагрузке на сеть величина погрешности уменьшается с повышением точности метода Монте-Карло за счет увеличения объема выборки. В таблицах 3-5 приведены результаты для выборок объема 10^6 , $5 \cdot 10^6$ и $5 \cdot 10^7$ соответственно. На рисунке 22 изображены графики вероятностей блокировок в сети рисунка 15, полученных методами просеянной нагрузки и Монте-Карло при $p_{mps} = 1$, ,

и $a_k=a$,

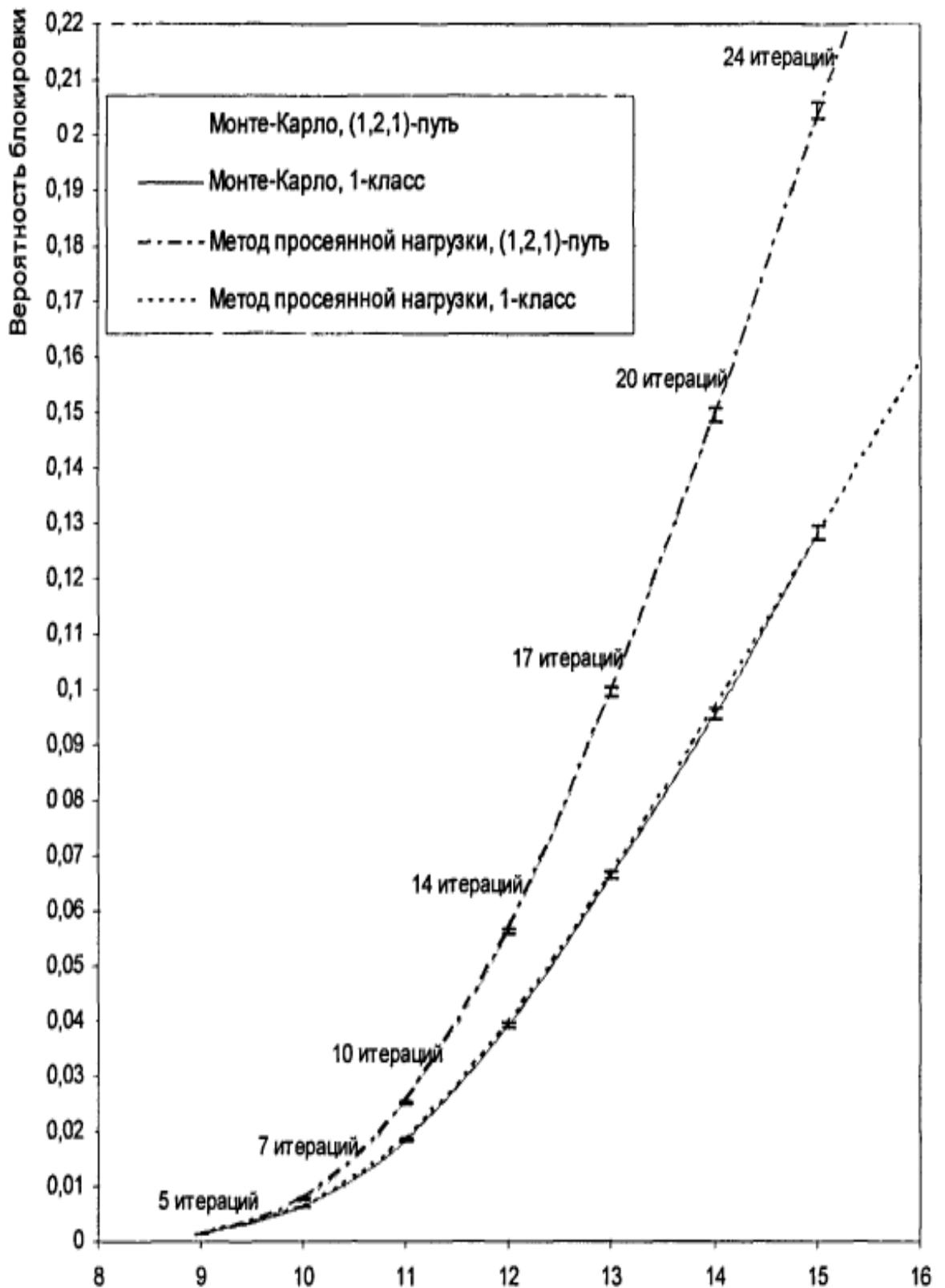


Рисунок 22 - Оценка вероятностей блокировок методом просеянной нагрузки в сравнении с точечными оценками и 95-процентными доверительными интервалами, полученными методом Монте-Карло.

Значение переменной a изменяется в диапазоне от 9 до 14 и отложено по оси абсцисс. Рядом с каждой точкой надписано количество итераций, потребовавшихся для сходимости метода последовательных приближений при решении системы неподвижной точки (2.66).

На графиках также показаны границы 95-процентного доверительного интервала, полученные предложенным в разделе 3.3 методом. Сопоставление изображенных на рисунке 22 графиков вероятностей блокировок, полученных методом просеянной нагрузки, со значениями вероятностей блокировок, полученных методом Монте-Карло, и 95-процентными доверительными интервалами для них подтверждает высокую точность разработанного в разделе 2.3 приближенного метода в данном диапазоне нагрузок. Заметим, что с ростом нагрузки на сеть сходимость метода последовательных приближений при решении системы неподвижной точки (2.66) замедляется.

При дальнейшем увеличении нагрузки сходимость замедляется существенно вплоть до наличия точек, где достичь сходимости не удалось, при этом точность метода просеянной нагрузки снижается. Такое поведение метода объясняется наличием у системы уравнений (2.66) в данном диапазоне значений параметров нескольких решений.

Согласно [51], наличие нескольких решений свидетельствует о нестабильности функционирования системы: при очень большой предложенной нагрузке в сети сменяют друг друга длительные периоды пропуска трафика то одних классов и услуг, то других.

Численный анализ других конфигураций сети, результаты которого не представлены в диссертации, показывает, что диапазон значений нагрузочных параметров, в котором метод демонстрирует высокую точность, зависит от топологии сети и количества не совпадающих друг с другом маршрутов соединений и, как правило, включает диапазоны низкой, средней и высокой нагрузки вплоть до нагрузки, когда вероятности блокировок доходят до 0,4-0,5.

Таким образом, проведен численный эксперимент, направленный на анализ области применения разработанных методов расчета вероятностных характеристик модели МСС. В следующем разделе сформулированы основные выводы относительно эффективности и области применения методов.

3.4. Область применения исследуемых методов

На основе численных данных, полученных в главе 3 диссертации, можно сделать следующие выводы относительно эффективности и области применения предложенных методов расчета вероятностных характеристик моделей МСС.

Разработанный в разделе 2.1 метод анализа отдельного звена сети достаточно эффективен при работе с встречающимися на практике значениями параметров.

Метод позволяет выявить важные закономерности в функционировании звена МСС – периодические колебания вероятностей блокировок и, следовательно, обслуженной нагрузки, с ростом интенсивности предложенной нагрузки. Разработанный в разделе 3.3 метод Монте-Карло является простым в реализации и эффективным с точки зрения времени вычислений средством оценки вероятностных характеристик сети произвольной структуры в среднем диапазоне нагрузок (вероятности блокировок около 0,005-0,15) с любой наперед заданной точностью. Разработанный в разделе 2.3 метод просеянной нагрузки пригоден для приближенного расчета вероятностей блокировок в сети сложной структуры, то есть в сети сильносвязанной топологии с большим количеством узлов и не совпадающих друг с другом маршрутов соединений, без перегрузок, при этом метод демонстрирует очень высокую скорость вычислений (при условии использования предложенного в разделе 2.1 алгоритма свертки для расчета вероятностей блокировок на отдельном звене) и высокую точность. Проведем сравнительный анализ разработанных в диссертационной работе методов на основе пяти характеристик:

- скорости вычислений в оптимальном для данного метода диапазоне значений параметров модели;
- сложности программной реализации соответствующего алгоритма;
- точности вычислений в оптимальном для данного метода диапазоне значений параметров модели;
- ограничений на топологию МСС;
- диапазона значений нагрузочных параметров, для которого применим метод.

Метод прямого перебора. Скорость вычисления: очень низкая; неприменим для задач большой размерности. Сложность реализации алгоритма: средняя (требует реализации эффективного алгоритма порождения состояний модели). Точность: точный. Топология сети: произвольная. Нагрузка на сеть: любая.

Рекуррентный метод. Скорость вычисления: средняя, экспоненциально зависит от числа услуг мультивещания. Сложность реализации алгоритма: высокая. Точность: точный. Топология сети: древовидная, маршруты одноадресных соединений только длины 1. Нагрузка на сеть: любая.

Метод Монте-Карло. Скорость вычисления: средняя, определяется требуемой точностью. Сложность реализации алгоритма: низкая. Точность: приближенный, любая наперед заданная точность. Топология сети: произвольная. Нагрузка на сеть: средняя (вероятности блокировок 0,003-0,15).

Метод просеянной нагрузки. Скорость вычисления: очень высокая; не применим для задач большой размерности. Сложность реализации алгоритма: средняя (требует реализации алгоритма свертки для расчета вероятностных характеристик модели отдельного звена). Точность: приближенный, точность возрастает при усложнении структуры сети. Топология сети: Сильносвязанная с большим числом узлов и не совпадающих маршрутов. Нагрузка на сеть: любая, кроме очень высокой.

Заключение

В данной диссертационной работе была рассмотрена тема исследования методов расчета вероятностных характеристик мультисервисных систем с резервированием. Для достижения поставленных целей была построена модель мультисервисной сети связи с одноадресными и многоадресными соединениями и выявлены вероятностные характеристики сети.

В ходе выполнения данной работы была смоделирована система массового обслуживания мультисервисной сети с резервированием каналов с использованием программы GPSS World. Также, исследованы алгоритмы рекуррентного метода и метода прямого перебора для вычисления нормирующей константы. При сравнительном анализе этих методов, выявлено, что рекуррентный алгоритм является наиболее эффективным. Данный результат подтверждается рисунками 11(а,б).

Экспериментальная часть работы, представленная в главе 3, направлена на оценку сферы применимости и эффективности методов расчета и анализа вероятностных характеристик мультисервисных сетей связи. Проведенный численный эксперимент позволил получить графики вероятностей блокировок, что является основным показателем качества обслуживания в мультисервисных системах. На графиках представлены для сравнения изменения вероятностей блокировок для одноадресных соединений и услуг мультимедиа (многоадресных соединений). Также, представлен график коэффициента использования звена. На рисунке 20 представлены результаты вычислений вероятности блокировок для трех случаев: без резервирования, резервирование 10000 единиц емкости и 15000 единиц емкости. Из графиков видно, что минимум блокировок наблюдается при резервировании 15000 единиц емкости, и максимум – при отсутствии резервирования каналов. Но если резервирование приводит к снижению вероятности блокировок, то в случае коэффициента использования звена все наоборот. То есть, коэффициент резервирования звена тем выше, чем ниже значение единиц емкости резервирования.

Сравнительный анализ значений вероятностей блокировок, рассчитанных статистическим методом и методом просеянной нагрузки, изображен на графиках рисунка 22. Данные графики подтверждают, что полученные алгоритмы вычислений исследуемой величины удобно использовать в значимых для практики диапазонах нагрузочных параметров сети.

Подводя итог, можно утверждать, что самая высокая сложность реализации алгоритма у рекуррентного метода, наиболее точные методы: метод прямого перебора и рекуррентный метод. Скорость вычислений самая высокая у метода просеянной нагрузки.

Список литературы

- 1 *Башарин, Г. П.; Самуилов, К. Е.* Современный этап развития теории телетрафика // Информационная математика. - 2001. - № 1.
- 2 *Башарин, Г. П.* Лекции по математической теории телетрафика. - М.: Изд-во РУДН, 2004.
- 3 *Башарин, Г. П.; Богуславский, Л. Б.; Самуилов, К. Е.* О методах расчета пропускной способности сетей связи ЭВМ // Итоги науки и техники. Серия «Электросвязь». - М.: ВИНТИ, 1983. - Т. 13. - С. 32-106.
- 4 *Башарин, Г. П.; Бочаров, П. П.; Коган, Я. А.* Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета. - М.: Наука, 1989.
- 5 *Башарин, Г. П.; Харкевич, А. Д.;* Массовое обслуживание в телефонии. - М.: Наука, 1968.
- 6 *Башарин, Г. П.; Толмачев, А. Л.* Теория сетей массового обслуживания и ее приложения к анализу информационно- вычислительных систем // ИНТ. Теория вероятностей. Мат. статистика. Техн. кибернетика. - М.: ВИНТИ, 1983. - Т. 21. - С. 3-119.
- 7 *Боровков, А. А.* Вероятностные процессы в теории массового обслуживания. - М.: Наука, 1972.
- 8 *Бусленко, Н. П.* Моделирование сложных систем. - М.: Наука, 1968.
- 9 *Величко, В. В.; Субботин, Е. А.; Шувалов, В. П.; Ярославцев, А. Ф.* Телекоммуникационные системы и сети : учебное пособие : в 3 т. Т. 3 : Мультисервисные сети / под ред. проф. В.П. Шувалова. - М.: Горячая линия-Телеком, 2005.
- 10 *Вишневский, В. М.* Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. - М.: Техносфера, 2003.
- 11 *Гайдамака, Ю. В.; Яркина, Н. В.* Примеры численного анализа модели звена сети мультимедиа // Сб. «XXXVII Всероссийская научная конференция по проблемам математики, информатики, физики, химии и методики преподавания». - М.: Изд-во ПАИМС, 2001.
- 12 *Гнеденко, Б. В.; Коваленко, И. Н.* Введение в теорию массового обслуживания. - М.: Наука, ГРФМЛ, 1987. - 2 изд.
- 13 *Ермаков, С. М.; Михайлов, Г. А.* Статистическое моделирование. - М.: Наука, 1982. - 2-е изд.
- 14 *Ершов, В. А.; Кузнецов, Н. А.* Мультисервисные телекоммуникационные сети. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003.
- 15 *Клейнрок, Л.* Теория массового обслуживания. - М.: Машиностроение, 1979.
- 16 *Корнышев, Ю. Н.; Пшеничников, А. П.; Харкевич, А. Д.* Теория телетрафика. - М.: Радио и связь, 1996.
- 17 *Кох, Р.; Яновский, Г. Г.* Эволюция и конвергенция в электросвязи. - М.: Радио и связь, 2001.
- 18 *Крэйн, М.; Лемуан, О.* Введение в регенеративный метод анализа

моделей / пер. с англ. под ред. В. В. Калашникова. - М. : Наука, 1982.

19 Кучерявый, А. Е.; Пармонов, А. И. Модели трафика для сенсорных сетей в и-России // Электросвязь. - 2006. - № 6. - С. 15-18.

20 Лагутин, В. С.; Степанов, С. Н. Телетрафик мультисервисных сетей связи. - М.: Радио и связь, 2000.

21 Нечитайлова, О. С.; Яркина, Н. В. Применение метода Монте-Карло для анализа моделей мультисервисных сетей с многоадресными соединениями // Сб. «XLII Всероссийская научная конференция по проблемам математики, информатики, физики и химии». - М.: Изд-во РУДН, 2006.

22 Рыков, В. В.; Самуилов, К. Е.. К анализу вероятностей блокировок ресурсов сети с динамическими многоадресными соединениями // Электросвязь. - 2000. - № 10. - С. 27-30.

23 Самуилов, К. Е. Метод расчета вероятностных характеристик модели сети с многоадресными соединениями // Вестник РУДН. Серия «Прикладная и компьютерная математика». - 2003. - Т.2, №1.

24 Самуилов, К. Е.; Савочкин, Е. А. Алгоритм свертки для расчета вероятностных характеристик сети с многоадресными соединениями и несколькими источниками информации // Сб. научн. трудов «Системы телекоммуникаций и моделирование сложных систем». - М.: ПАИМС, 2002. - С. 29-37.

25 Самуилов, К. Е.; Яркина, Н. В. Метод просеянной нагрузки в мультисервисных сетях с одноадресными и многоадресными соединениями // Труды 1ЛХ конф. РНТОРЭС. - 2004. - Т. 2. - С. 169-171.

26 Самуилов, К. Е.; Яркина, Н. В. Модель звена мультисервисной сети с одноадресными и многоадресными соединениями // Вестник РУДН. Серия «Прикладная и компьютерная математика». - 2003. - Т. 2, № 1.-С. 32-43.

27 Севастьянов, Б. А. Эргодическая теорема для марковских процессов и ее приложение к телефонным линиям с отказами // Теория вероятностей и ее приложения. - 1957. - Т. 2, вып. 1. - С. 106-116.

28 Симонина, О. А.; Яновский, Г. Г. Характеристики трафика в сетях IP // Труды учебных заведений связи / СПбГУТ. - СПб. : 2004. - № 171.-С. 8-14.

29 Соболев, И. М. Численные методы Монте-Карло. - М.: Наука, 1973.

30 Спирин, В. А.; Тарасов, В. К.; Фомин, Н. А. Как идти к Triple Play? // Вестник связи. - 2005. - №4 (апрель).

31 Шашкин, Ю. А. Неподвижные точки. - М.: Наука, 1989.

32 Шнепс-Шнеппе, М. А. Системы распределения информации. Методы расчета : справочное пособие. - М.: Связь, 1979.

33 Яркина, Н. В. Численный анализ модели сети с одноадресными и многоадресными соединениями // Сб. «XL Всероссийская научная конференция по проблемам математики, информатики, физики и химии». - М.: Изд-во РУДН, 2004.

34 Akinpelu, J. M. The overload performance of engineered networks with nonhierarchical and hierarchical routing // AT&T Tech. Journal. - 1984. - Vol. 63.- P. 1261-1281.

- 35 Alkahtani, A.; Woodward, M.; Al-Begain, K An Overview of Quality of Service (QoS) and QoS Routing in Communication Networks // Proc. of PGNet 2003 (4th Annual Network Symposium, Liverpool, June 16-17 2003).-2003.-P. 236-244.
- 36 Bain, A.; Kelly, F.; Key, P.; Massoulié, L. Fair Internet traffic integration: network flow models and analysis // Annals of Telecommunication. - 2004. - Vol. 59, No. 11-12. - P. 1338-1352.
- 37 Bannister, J.; Mather, P.; Coope, S. Convergence Technologies for 3G Networks. IP, UMTS, EGPRS and ATM. - Chichester : John Wiley & Sons, 2004.
- 38 Benameur, N.; Ben Fredj, S.; Oueslati-Boulahia, S.; Roberts, J. Quality of service and flow-aware admission control in the Internet // Computer Networks. - 2002. - Vol. 40. - P. 57-71.
- 39 Benameur, N.; Kortebi, A.; Oueslati, S.; Roberts, J. Selective service protection in overload: differentiated services or per flow admission control? // Proceedings of 11th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS 2004, Vienna, 13-16 June 2004). - 2004. - P. 217-222.
- 40 Bocharov, P.P.; D'Apice, C.; Pechinkin, A. V.; Salerno, S. Queueing Theory. - Boston : VSP, Brill Academic Publishers, 2004.
- 41 Boussetta, K.; Beylot, A.-L. Multirate Resource Sharing for Unicast and Multicast Connections // Proc. of 5th FIP Broadband Communications (BC'99, Hong Kong, November 1999). - 1999. - P. 561-570.
- 42 Boxma, O. J.; Gabor, A. F.; Nunez-Queija, R.; Tan, H.-P. Performance Analysis of Admission Control for Integrated Services with Minimum Rate Guarantees // Proc. of the 2nd Conference on Next Generation Internet Design and Engineering (NGI 2006, Valencia, Spain, April 3-5 2006).-2006.
- 43 Caballero-Artigas, J. M. Gigabit Ethernet roll-out. - Maidenhead, UK : Trend Communications, 2005.
- 44 Cerf, V. On the evolution of Internet Technologies // Proc. of the IEEE. - 2004. - Vol. 92, No. 9. - P. 1360-1370.
- 45 Chan, W. C.; Geraniotis, E. Tradeoff between blocking and dropping in multicasting networks // Proc. of IEEE International Conference on Communications. - 1996. - P. 1030-1034.
- 46 Chlamtac, I.; Gumaste, A.; Szabro, C. A. (Eds.) Broadband Services. Business Models and Technologies for Community Networks. - Chichester : John Wiley & Sons, 2005.
- 47 Choudhury, G. L.; Leung, K. K.; Whitt, W. An algorithm to compute blocking probabilities in multi-rate multi-class multi-resource loss models // Advances in Applied Probability. - 1995. - Vol. 27. - P. 1104-1143.
- 48 Chung, S.-P.; Ross, K. W. Reduced load approximations for multirate loss networks // IEEE Transaction on communications. - 1993. - Vol. 41.-P. 1222-1231.
- 49 Cinkler, T.; Ast, L. Approximations for Call-Blocking Probabilities in Multirouting Multicasting Multirate Loss Networks // Proc. of Networking 2000 / eds. G. Pujolle et al. - Berlin : Springer-Verlag, 2000. -P. 287-298.
- 50 Daigle, J. N. Queueing theory with applications to packet

telecommunication. - Boston : Springer Science + Business Media, 2005.

51 Delcoigne, F.; Proutiere, A.; Regnie, G. Modeling integration of streaming and data traffic // Performance Evaluation. - 2004. - Vol. 55. -P. 185-209.

52 Fishman, G. S. Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications. - New York : Springer-Verlag, 1996.

53 Gaidamaka, Y.; Samouylov, K. Analytical model of multicast network and single link performance analysis // Proc. of the 6-th Int. Conf. on Telecommunications (ConTEL-2001, Zagreb, Croatia). - 2001. - P. 169175.

54 Gelenbe, E.; Pujolle, G. Intoduction to queueing networks. - New York : Willey, 1987.

55 ITU-T Draft Recommendation Y.RACF Version 9.2 : Functional Architecture and Requirements for Resource and Admission Control Functions in Next Generation Networks. - [S. 1.]: ITU-T, April 2006.

56 ITU-T Recommendation E.525 : Designing networks to control grade of service. - [S. 1.] : ITU-T, June 1992.

57 ITU-T Recommendation E.737 : Dimensioning methods for B-ISDN. - [S. 1.] : ITU-T, May 1997.

58 ITU-T Recommendation X.6 : Multicast service definition. - [S. 1.] : ITU-T, March 1993.

59 ITU-T Recommendation Y.2011 : General principles and general reference model for next generation networks. - [S. 1.] : ITU-T, October 2004.

60 Iversen, V. B. Teletraffic Engineering Handbook. - [S. 1.] : ITU-D, November 2002.

61 Iversen, V. B.; Stepanov, S. N. The usage of convolution algorithm with truncation for estimation of individual blocking probabilities in circuit- switched telecommunication networks // Proc. 15th Int. Teletraffic Conf. - 1997. - Vol. 2. - P. 1327-1336.

62 Janevski, T. Traffic analysis and design of wireless IP networks. - [S. 1.] : Artech House, 2003. - (Artech House mobile communications series).

63 Kamoun, F.; Kleinrock, L. Analysis of shared finite storage in a computer networks node environment under general traffic conditions // IEEE Trans, on Commun. - 1980. - Vol. 28, No. 7. - P. 922-1003.

64 Karvo, J. A study of teletraffic problems in multicast networks : doctoral dissertation. - Helsinki, Finland : University of Technology, 2002.

65 Karvo, J.; Virtamo, J.; Aalto, S.; Martikainen, O. Blocking of dynamic multicast connections in a single link // Future of Telecommunications : proc. of International Broadband Communications Conference (Stuttgart, Germany, April 1998). - 1998. - P. 473-483.

66 Karvo, J.; Virtamo, J.; Aalto, S.; Martikainen, O. Blocking of dynamic multicast connections // Telecommunication Systems. - 2001. - Vol. 16, No. 3-4.-P. 467-481.

67 Kaufman, J. S. Blocking in a shared resource environment // IEEE Trans. Commun. - 1981.-Vol. COM-29, No. 10.-P. 1474-1481.

68 Kelly, F. P. Charging and rate control for elastic traffic // European

Transactions on Telecommunications. - 1997. - Vol. 8. - P. 33-37.

69 Kelly, F. P. Blocking probabilities in large circuit-switched networks // Advances in Applied Probability. - 1986. - Vol. 18. - P. 473-505.

70 Kelly, F. P. Mathematical models of multiservice networks // Complex Stochastic Systems and Engineering. - Oxford * Oxford University Press, 1995.

71 Kelly, F. P. Reversibility and stochastic network. - Chichester : Wiley, 1979.-11475. Kelly, F. P. Routing and capacity allocation in networks with trunk reservation // Mathematics of Operations Research. - 1990. - Vol. 15, No. 4.-P. 771-793.

72 Kelly, F. P.; Key, P. B.; Zachary, S. Distributed admission control // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. - 2000. - Vol. 18. -P. 2617-2628.

73 Krieger, U. R.; Naoumov, V.; Wagner, D. Analysis of a Versatile Multi-Class Delay-Loss System with a Superimposed Markovian Arrival Process // European J. of Operational Research. - 1998. - Vol.108, No.2.

74 Lam, S. S.; Lien, Y. L. A Tree Convolution Algorithm for the Solution of Queueing Networks // Commun. ACM. - 1983. - Vol. 26. - P. 203-215.

75 Leiner, B.M.; Cerf, V. G.; Clark, D.D.; Kahn, R. E.; Kleinrock, L.; Lynch, D. C.; Postel, J. B.; Roberts, L. G.; Wolff, S. A brief history of the Internet [Electronic resource] / Internet Soc., Reston, VA. - Version 3.32, last revised 10 Dec. 2003. - Electronic data. - Mode access : <http://www.isoc.org/internet/history/brief.shtml>.

76 Li, C. Y.; Wai, P. K. A.; Li, V. O. K The decomposition of a blocking model for connection-oriented networks // IEEE/ACM Transactions on Networking. - 2004. - Vol. 12, Issue 3 (June). - P. 549-558.

77 Liu, M.; Baras, J. S. Fixed Point Approximation for Multirate Multihop Loss Networks With State-Dependent Routing // IEEE/ACM Transactions on Networking. - 2004. - Vol. 12, No. 2 (April). - P. 361374.

78 Louth, G.; Mitzenmacher, M.; Kelly, F. P. Computational complexity of loss networks // Theoretical Computer Science. - 1994. - Vol. 125, No. 1 (March).- P. 45-59.

79 Massoulié, L.; Roberts, J. Bandwidth Sharing: Objectives and Algorithms // IEEE/ACM Transactions on Networking. - 2002. - Vol. 10, No. 3 (June). - P. 320-328.

80 Mitra, D. Asymptotic Analysis and Computational Methods for a Class of Simple, CircuitSwitched Networks with Blocking // Advances in Applied Probability. - 1987. - Vol. 19. - P. 219-239.

81 Mitra, D.; Gibbens, R. J.; Huang, B. D. State-Dependent Routing on Symmetric Loss Networks with Trunk Reservations // IEEE Trans. Commun. - 1993. - Vol. 41. - P. 400-411.

82 Naoumov, V. Normal Type Approximation for Multi-Service Systems with Trunk Reservation // Telecommunication Systems. - 1995. - Vol. 4, No. 1-2.- P. 113-118.

83 Nyberg, E.; Virtamo, J.; Aalto, S. An exact algorithm for calculating

blocking probabilities in multicast networks // Proc. of Networking 2000 / eds. G. Pujolle et al. - Berlin : Springer-Verlag, 2000. - P. 275-286.

84 Park, K. I. QoS in Packet Networks. - Boston : Springer, 2005. - (The International Series in Engineering and Computer Science ; Vol. 779).

85 Roberts, J. W. Teletraffic Models for the Telecom 1 Integrated Services System // Proc. of the 10th International Teletraffic Congress (ITC-10, Montreal). - 1983. - Session 1.1, paper no. 2.

86 Roberts, J. W. Traffic Theory and the Internet // IEEE Communications Magazine. - 2001. - 39 (1). - P. 94-99.

87 Roberts, J. W. A service system with heterogeneous user requirements // Performance of data communications systems and their applications / Ed. G. Pujolle. - 1981. - P. 423-431.

88 Roberts, J. W.; Mocci, U.; Virtamo, J. (Eds.) Broadband Network Teletraffic: Performance Evaluation and Design of Broadband Multiservice Networks : Final Report of Action Cost 242. - [S. 1.] :Springer-Verlag, 1996. - (Lecture Notes in Computer Science ; Vol. 1155).

89 Ross, K. W. Multiservice loss models for broadband telecommunication networks. - London : Springer-Verlag, 1995.

90 Samouylov, K.; Yarkina, N. Blocking Probabilities in Multiservice Networks with Unicast and Multicast Connections // Proceedings of the 7-th International Conference on Telecommunications (ConTel 2005, Zagreb, Croatia, June 15-17, 2005). - 2005. - P. 423-429.

91 Serfozo, R. Introduction to Stochastic Networks. - New York : Springer-Verlag, 1999.

92 Shenker, S. Fundamental Design Issues for the Future Internet // IEEE Journal Selected Areas Communication. - 1995. - 13. - P. 1176-1188.

93 Standards, Architectures and Managements of Broadband convergence Networks (BcN). The 1st International Workshop on Broadband convergence Networks (IEEE BcN2006, Vancouver, Canada, April 2006) / Eds. Y.-T. Kim, T. Hamada, N. Agoulmine. - 2006.

94 Stasiak, M.; Zwierzykowski, P. Point-to-Point Blocking Probability in the Switching Networks with Unicast and Multicast Traffic Streams // Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC 2001, Helsinki, Finland, 2001). - 2001. - Vol. 8. - P. 2608-2612.

95 Tsang, D.H.K.; Ross, K. W. Algorithms to determine exact blocking probabilities for multirate tree networks // IEEE Trans. Commun. - 1990.

Приложение А

Текст программы моделирования системы массового обслуживания с резервированием каналов

```
GENERATE 8,4 ;генерация транзактов
QUEUE QRAM ;вход в накопитель
QUEUE QN ;вход в очередь к основному каналу
SEIZE OSKANAL ;занять основной канал
DEPART QN ;покинуть очередь к основному каналу
ADVANCE 7,3 ;задержка на обработку
RELEASE OSKANAL ;освободить основной канал
DEPART QRAM ;покинуть накопитель
OUT TERMINATE ;вывод транзактов из модели
GENERATE 170,30,,,1 ;генерация «сбойных» транзактов
PREEMPT OSKANAL,PR,OUT ;захват основного канала
SPLIT 1,REZ ;передача копии транзакта в резервный канал
ADVANCE 20,7 ;задержка на восстановление основного канала
RETURN OSKANAL ;освободить основной канал
TRANSFER ,OUT ;переслать транзакт на блок TERMINATE
REZ QUEUE 1 ;занять очередь
ADVANCE 1,1 ;задержка на запуск резервного канала
DEPART 1 ;покинуть очередь
QUEUE 2 ;вход очередь к резервному каналу
SEIZE RKANAL ;занять резервный канал
DEPART 2 ;покинуть очередь к резервному каналу
ADVANCE 7,3 ;задержка на обработку
RELEASE RKANAL ;освободить резервный канал
TRANSFER ,OUT ; переслать транзакт на блок TERMINATE
;сегмент таймера
GENERATE 7200 ;генерация транзактов через 7200 с
TERMINATE 1 ;вывод транзакта из модели и уменьшение значения счетчика на единицу
START 1 ;установка начального значения счетчика в единицу
```

Приложение Б

Листинг программы

```
START TIME END TIME BLOCKS FACILITIES STORAGES
0.0 7200.000 28 2 0
NAME VALUE
OSKANAL 10002.000
OUT 10.000
QN 10001.000
QRAM 10000.000
REZ 17.000
RKANAL 10003.000
```

```
LABEL LOC BLOCK TYPE ENTRY COUNT CURRENT COUNT RETRY
1 GENERATE 894 0 0
2 QUEUE 894 0 0
3 QUEUE 894 2 0
4 SEIZE 892 0 0
5 DEPART 892 0 0
6 ADVANCE 892 1 0
7 RELEASE 853 0 0
8 DEPART 853 0 0
OUT 9 TERMINATE 975 0 0
10 GENERATE 42 0 0
11 PREEMPT 42 0 0
12 SPLIT 42 0 0
13 ADVANCE 42 0 0
14 RETURN 42 0 0
15 TRANSFER 42 0 0
REZ 16 QUEUE 42 0 0
17 ADVANCE 42 0 0
18 DEPART 42 0 0
19 QUEUE 42 0 0
20 SEIZE 42 0 0
21 DEPART 42 0 0
22 ADVANCE 42 0 0
23 RELEASE 42 0 0
24 TRANSFER 42 0 0
25 GENERATE 1 0 0
26 TERMINATE 1 0 0
```

```
FACILITY ENTRIES UTIL. AVE. TIME AVAIL. OWNER PEND INTER RETRY DELAY
OSKANAL 934 0.954 7.357 1 978 0 0 2 0
RKANAL 42 0.039 6.703 1 0 0 0 0 0
```

```
QUEUE MAX CONT. ENTRY ENTRY(0) AVE.CONT. AVE.TIME AVE.(-0) RETRY
1 1 0 42 0 0.006 1.031 1.031 0
2 1 0 42 42 0.000 0.000 0.000 0
QRAM 43 41 894 0 21.064 169.645 169.645 0
QN 6 2 894 126 1.350 10.871 12.654 0
```

```
FEC XN PRI BDT ASSEM CURRENT NEXT PARAMETER VALUE
981 0 7201.562 981 0 1
978 0 7205.764 978 7 8
974 1 7323.492 974 0 11
982 0 14400.000 982 0 27
```

