

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**С.М. Платунова**

**МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ФРАГМЕНТОВ КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ**

**Учебное пособие**



**Санкт-Петербург**

**2012**

**Платунова С.М.** Методы проектирования фрагментов компьютерной сети – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 51 с.

В учебном пособии описываются особенности проектирования компьютерных сетей, характеристики компьютерных сетей, влияние на сетевые характеристики программного и аппаратного состава компьютерных сетей. Рассматриваются математические методы анализа характеристик функционирования компьютерных сетей. Рассматриваются методы и алгоритмы структурного синтеза компьютерных сетей.

Пособие адресовано специалистам с высшим и средним профессиональным образованием, имеющим опыт работы в области IT технологий, обучающихся по направлению 230100 Информатика и вычислительная техника.

Рекомендовано к печати... Ученым советом факультета Академии ЛИМТУ, протокол № 6 от 23.12.2011



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012  
©С.М. Платунова, 2012

## *Содержание*

Введение .....	4
1. Особенности проектирования компьютерной сети.....	4
1.1. Характеристики компьютерной сети.....	6
1.2. Влияние на сетевые характеристики программного и аппаратного состава компьютерных сетей.....	9
1.3. Постановка задачи анализа характеристик компьютерной сети .....	12
2. Математическое моделирование.....	13
2.1. Аналитический метод моделирования .....	13
2.2. Имитационное моделирование.....	22
3. Синтез структуры компьютерной сети по обеспечению ее доступности.....	27
3.1. Постановка задачи синтеза структуры технической системы по обеспечению доступности .....	29
3.2. Влияние числа резервных элементов на показатели доступности.....	32
3.3. Практическая задача исследования зависимости доступности ресурсов и услуг сети со сложными условиями эксплуатации .....	33
3.4. Влияние наличия резервных элементов на показатели доступности.....	35
3.5. Методика определения кратности отдельного резервирования .....	38
3.6. Определение значений задаваемых показателей доступности и выбор варианта построения КС .....	38
4. Методика проектирования фрагмента компьютерной сети.....	39
Литература .....	47

## ***Введение***

Аппаратно-программные средства вычислительной техники, объединенные в компьютерные сети, обновляются с большой скоростью и требуют обновления проектов сети в короткие сроки и с меньшими затратами.

Важнейшей характеристикой сети является односторонняя задержка пакетов (One-Way Delay Metric, OWD) входящая в число стандартов IPPM и описанная в RFC 2679 ([rfc2679.openrfc.org](http://rfc2679.openrfc.org)). Единичное значение этой метрики описывается как время передачи пакета определенного типа между некоторыми двумя узлами сети.

Для оценки производительности проектируемой сети требуется определенный механизм предсказаний. Стохастический характер поступления данных и недетерминированная обработка в узлах коммутации и каналах связи предопределяет использование моделей теории массового обслуживания для проектирования и анализа проектных характеристик компьютерной сети [1]. Теория массового обслуживания обеспечивает возможность расчета характеристик качества функционирования сетей, включая оценку вероятностно-временных характеристик узлов коммутации.

При изменении структуры сети в целях улучшения характеристик появляется опасность снижения надежности функционирования. Для оценки надежности сложной системы, такой как компьютерная сеть, применяется коэффициент оперативной готовности, показатель доли времени, в течение которого сеть работоспособна. Надежность может быть повышена путем введения избыточности в структуру системы: ключевые элементы должны существовать в нескольких экземплярах, чтобы при отказе одного из них функционирование системы обеспечивали резервные элементы.

### ***1. Особенности проектирования компьютерной сети***

Процесс проектирования объекта - компьютерной сети носит итерационный характер. Итерации могут включать в себя более чем один уровень проектирования. То есть, в процессе проектирования приходится многократно выполнять процедуру анализа объекта. Поэтому очевидно стремление уменьшить трудоемкость каждого варианта анализа без ущерба для качества окончательного проекта. В этих условиях целесообразно на начальных стадиях проектирования, когда высокой точности результатов не требуется, использовать наиболее простые и экономичные модели [1].

Создать проект сети означает выбрать структуру сети, определить значения всех его параметров и представить результаты в установленной

форме. Результаты (проектная документация) могут быть выражены в виде схем, пояснительных записок, программ и других документов на бумаге или на машинных носителях информации [2].

Разработка (или выбор) структуры сети есть проектная процедура структурного синтеза, а расчет (или выбор) значений параметров элементов процедура параметрического синтеза.

Задача структурного синтеза заключается в определении цели, множества возможных решений и ограничивающих условий. Задача заключается в синтезе (или коррекции) структуры, определении типов серверов (программно-аппаратных средств), распределении функций по серверам таким образом, чтобы достигался экстремум целевой функции при выполнении заданных ограничений.

Следующая после синтеза группа проектных процедур — процедуры анализа. Цель анализа — получение информации о характере функционирования и значениях выходных параметров при заданной структуре объекта, сведениях о внешних параметрах и параметрах элементов.

Для анализа компьютерной сети широко используются математические методы и модели массового обслуживания. Упрощенные модели массового обслуживания позволяют находить явный вид целевой функции, в качестве которой используется характеристика сети, такая как время задержки сообщений (пакетов).

Моделирование жизненного цикла компьютерной сети проводится по итеративной модели — это выполнение работ параллельно с непрерывным анализом полученных результатов и корректировкой предыдущих этапов работы. Компьютерная сеть при этом подходе в каждой стадии проходит повторяющийся цикл: планирование — реализация — проверка — оценка (англ. plan-do-check-act cycle).

В автоматизированных проектных процедурах вместо проектируемого еще не существующего объекта оперируют моделью, которая отражает некоторые интересующие исследователя свойства объекта.

Математические функциональные модели в общем случае представляет собой алгоритм вычисления вектора выходных параметров при заданных векторах параметров элементов и внешних параметров.

Закон функционирования сети может быть представлен в следующем виде:

$$H(t) = f_c(S, F, Y, X, t),$$

где  $f_c$  — функция, функционал, логические условия, алгоритм, методика, таблица или словесное описание, определяющее правило (закон) преобразования входных величин (параметров) в выходные величины (характеристики); [3]

$H(t)$  — вектор характеристик, зависящий от текущего момента времени  $t (t \geq 0)$ :

$H = \{V, T, N, C, Z\}$

Параметры – первичные данные сети:

$S$  – структурные,

$F$  – функциональные,

$Y$  – нагрузочные,

$X$  – внешней среды.

Характеристики – вторичные данные сети:

$V$  – мощностные,

$T$  – временные,

$N$  – надежностные,

$C$  – экономические,

$Z$  – прочие.

### 1.1. Характеристики компьютерной сети

Понятие характеристики функционирования сети в работе включает вторичные свойства компьютерной сети, которые определяются в процессе решения задач анализа, как функция параметров. Параметры компьютерной сети описывают первичные свойства сети и являются исходными данными при решении задач анализа.

Характеристики компьютерных сетей – это совокупность показателей эффективности (качества) сети. Характеристики компьютерных сетей можно разделить на качественные и количественные [4].

Количественные характеристики компьютерных сетей можно разделить на две группы:

- глобальные, определяющие наиболее важные свойства сети как целостного объекта;
- локальные, определяющие свойства отдельных устройств или частей сети и позволяющие получить более детальное представление об эффективности сети.

К глобальным относятся характеристики производительности, оперативности, надежности, стоимостные, прочие (энергопотребления, массогабаритные и т.п.).

Производительность компьютерной сети – мера мощности сети, определяющая количество работы, выполняемой сетью в единицу времени. Понятие производительности охватывает широкую номенклатуру показателей эффективности компьютерной сети, определяющих качество функционирования как сети в целом, так и отдельных ее подсистем и элементов – технических и программных средств.

Производительность сети зависит, в первую очередь, от производительности отдельных ее элементов, называемой скоростью работы или быстродействием устройств, например, скорость передачи данных по каналам связи, измеряемая объемом данных, передаваемых за единицу времени, быстродействие ЭВМ или, точнее, процессора,

измеряемое числом команд, выполняемых в единицу времени, и т.п. Для оценки производительности компьютерной сети в целом используется следующая совокупность показателей:

- производительность СТК (сети передачи данных), измеряемая числом сообщений (пакетов, кадров, бит) передаваемых по сети за единицу времени;
- производительность СВТ (средств обработки данных), представляющая собой суммарную производительность всех средств ВТ (ЭВМ и систем), входящих в состав сети.

Производительность СТК (коммуникационная мощность) может быть задана следующими показателями:

- максимальная или предельная производительность, называемая пропускной способностью сети передачи данных и измеряемая количеством пакетов (кадров), передаваемых в сети за единицу времени;
- реальная или фактическая производительность сети передачи данных, которая может быть задана как среднее значение на некотором интервале времени или как мгновенное значение в конкретный момент времени.

Производительность СВТ (вычислительная мощность) в целом складывается из производительностей ВС, выполняющих обработку данных в сети. Наиболее важным показателем производительности ВС, как совокупности технических и программных средств, является системная производительность  $\lambda_0$ , измеряемая числом задач, выполняемых системой за единицу времени:

Характеристики оперативности описывают задержки, возникающие при передаче и обработке данных в сети.

Для оценки оперативности сети в целом используются следующие показатели: время доставки пакетов (сообщений), время отклика (ответа).

Время доставки (время задержки) пакетов характеризует эффективность организации передачи данных в вычислительной сети и представляет собой интервал времени, измеряемый от момента поступления пакета или сообщения в сеть до момента получения пакета адресатом. В общем случае, время задержки – величина случайная, что обусловлено случайным характером процессов поступления и передачи данных в сети.

В компьютерных сетях обычно время доставки задаётся средним значением  $T$ , на которое может налагаться ограничение  $T < T^*$  в зависимости от типа передаваемых данных.

При передаче мультимедийных данных кроме среднего значения времени доставки пакетов важной характеристикой является вариация или джиттер задержки, представляющая собой среднеквадратическое отклонение времени задержки разных пакетов.

Время отклика (ответа) – интервал времени от момента поступления запроса (сообщения, транзакции) в сеть до момента завершения его обслуживания, связанного с выполнением некоторой прикладной или обслуживающей программы, с обращением к базе данных и т.п.

Время ответа представляет собой время пребывания запроса в сети и характеризует эффективность как телекоммуникационных, так и вычислительных средств компьютерной сети.

Время отклика, как и время задержки, – величина случайная и может задаваться средним значением  $U$  или в виде вероятности  $P(t_u < U^*)$  непревышения некоторого заданного значения  $U^*$ .

В сетях реального времени вместо термина "время ответа" часто используют термин "время реакции".

В качестве характеристик надежности обычно используются следующие показатели:

- вероятность безотказной работы сети  $P(t)$  – вероятность того, что в течение времени  $t$  не произойдет отказа;
- интенсивность отказов  $\lambda_o$  – среднее число отказов за единицу времени;
- время наработки на отказ – промежуток времени между двумя смежными отказами – величина случайная, а ее среднее значение  $T_o$  называется средней наработкой на отказ  $T_o = 1/\lambda_o$ ;
- время восстановления – интервал времени от момента наступления отказа до момента восстановления работоспособности системы – величина случайная и обычно задается средним значением  $T_v$ , называемым средним временем восстановления;
- коэффициент готовности  $K_2$  – доля времени, в течение которого сеть работоспособна:  $K_2 = T_o/(T_o+T_v)$ .

Величина  $K_2$  может трактоваться как вероятность того, что в любой момент времени сеть работоспособна.

Аналогично, значение  $(1-K_2)$  определяет вероятность того, что сеть находится в состоянии восстановления (неработоспособна).

В качестве стоимостных (экономических) характеристик компьютерной сети могут использоваться следующие показатели:

- полная стоимость владения (Total cost of ownership, TCO) – затраты, рассчитываемые на всех этапах жизненного цикла сети и включающие стоимость технических, информационных и программных средств (прямые затраты) и затраты на эксплуатацию сети (косвенные затраты);
- стоимость (цена) передачи данных и обработки данных в сети, определяемая объемом и стоимостью используемых ресурсов сети соответственно при передаче и обработке данных.



В качестве локальных характеристик компьютерных сетей могут использоваться в зависимости от целей исследования самые разнообразные показатели эффективности.

Локальные характеристики описывают эффективность функционирования:

- узлов и каналов связи;
- отдельных сегментов сети;
- узлов обработки данных: вычислительной системы и ее подсистем.

Локальные характеристики могут быть разбиты на две группы: временные; безразмерные.

К временным характеристикам относятся:

- время доставки (задержки) пакетов при передаче между соседними узлами сети;
- время ожидания передачи данных в узлах сети или освобождения ресурсов ВС (сервера);
- время пребывания данных в различных узлах, устройствах или подсистемах.

К безразмерным характеристикам относятся:

- число пакетов, находящихся в буферной памяти узлов (маршрутизаторов, коммутаторов);
- коэффициенты загрузки узлов, каналов связи и устройств ВС и т.д.

Коэффициент загрузки или просто загрузка  $\rho$  устройства это – доля времени, в течение которого устройство работает:

$$\rho = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{t}{T},$$

где  $t$  - время, в течение которого устройство работало;  $T$  – время наблюдения.

Загрузка  $\rho$  характеризует степень использования устройства и часто называется коэффициентом использования устройства. Поскольку  $0 \leq \rho \leq 1$ , то загрузка может трактоваться как вероятность того, что в любой момент времени устройство работает. Величина  $\eta = 1 - \rho$  называется коэффициентом простоя устройства и характеризует долю времени, в течение которого устройство не работает (простаивает).

## **1.2. Влияние на сетевые характеристики программного и аппаратного состава компьютерных сетей**

Современные достижения производителей программного и аппаратного состава средств вычислительной техники и сетевого оборудования существенно влияют на возможности изменения структур компьютерной сети (КС).

Производители коммутационного оборудования создают новые технологии, существенно изменяющие возможности аппаратно-программных средств построения компьютерной сети и тем самым

значительно увеличивающим количество и характер возможных для реализации структур компьютерной сети.

Можно выделить компоненты, имеющие наибольший вес в процессе влияния на сетевые характеристики:

- разработки фирм–производителей аппаратной части коммутационного оборудования (управляемые и неуправляемые switches L2, L2+, L3, L3+ уровней),
- разработки средств виртуализации фирм – производителей прикладного программного обеспечения (VMWare, HyperVisor),
- разработки программного обеспечения фирм–производителей коммутационного оборудования (реализации технологий VLAN, Link Aggregation, Spanning Tree, RSTP, MSTP, Loop Guard, ARP Spoofing, DHCP Snooping, VRRP, ...)

Изменение структуры КС, в свою очередь, неоднозначно влияют на сетевые характеристики. Набор аппаратных средств и ресурсов компьютерной сети, соответствующих первому, второму, третьему уровням семиуровневой модели межсетевого взаимодействия ISO/OSI, включает в себя сетевые интерфейсы, структурированную кабельную систему, различное коммутационное оборудование, позволяющее направлять потоки данных между пользователями. Из имеющегося набора средств имеется возможность создать определенное количество структур компьютерной сети:  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_k$ , где:

$S_k$  – структура с  $k$  количеством узлов и конкретной физической топологией

Структуры  $S_i$  различаются количеством узлов и способом взаимодействия между ними, образуя определенную физическую топологию  $S_i, i=1, k$ .

Фирмы-изготовители коммутационного оборудования предлагают решения на базе аппаратно-программных возможностей своих продуктов, которые можно назвать типовыми структурами компьютерной сети:

$S_i, i=1, n; n < k$ .

Кроме типовых фирменных структур, могут быть предложены структуры на основе аналитического и имитационного моделирования и методики анализа характеристик сети целенаправленным изменением структуры сети, предлагаемой в данной работе:

$S_i, i=(n+1, k); n < k$ .

Производители программного обеспечения коммутационного оборудования предлагают средства с использованием технологии виртуальных локальных сетей VLAN, стандартов функций и протоколов фирм-производителей, которые также при настройке заметно меняют потоки в компьютерной сети и характеристики сети. В частности добавление одной или нескольких VLAN кардинально перераспределят

потоки данных в сети с одной и той же физической топологией. Появляется необходимость дополнительных исследований конкретного варианта сети по рациональному использованию программного обеспечения коммутационного оборудования.

Функции, которые могут быть настроены на коммутационном оборудовании или в сети предлагаются фирмами-производителями для повышения производительности и надежности компьютерной сети. К ним относятся: Технологии Виртуальных Сетей VLAN, Поддержка протокола Spanning Tree, Объединение (агрегирование) портов, Поддержка SNMP – управления, Port Security или привязка MAC-адреса к определенному порту, Поддержка 802.1x, Протоколы группового вещания, Управление потоком, Ограничение полосы пропускания, Настройка IP-доменов на коммутаторах, Использование классификатора и политики, Применение OSPF и пр. Технологии и функции, перечисленные выше, увеличивают число и характер структур компьютерной сети  $S_i$ .

$$S_i, i=(k, f); k < f.$$

Производители прикладного программного обеспечения предлагают средства виртуализации, такие как приложения VMWare, созданные на ее основе виртуальные (гостевые) рабочие станции и серверы, виртуальные сети серверы и свитчи. Виртуальные (гостевые) операционные системы, виртуальные серверы и свитчи имеют возможность взаимодействовать между собой и с материнскими (хостовыми) операционными системами и физическими компьютерными сетями посредством встроенных средств коммутации и маршрутизации.

Использование различных средств прикладной виртуализации значительно изменяет количество и характер возможных для реализации структур компьютерной сети  $S_i$ .

Таким образом, при дополнительной настройке или администрировании одной и той же структуры  $S_k$  компьютерной сети с одинаковыми постоянными вложениями можно получить несколько вариантов  $S_k$  структур, с другими характеристиками сети, одна из которых является наилучшей по заданному критерию  $S_k$ .

Изменение структурно-функциональной организации компьютерной сети приводит к улучшению одних показателей эффективности функционирования сети и к ухудшению других показателей сети, что существенно осложняет выбор наилучшего варианта структурно-функциональной организации проектируемой компьютерной сети, т.к. показатели эффективности сети являются противоречивыми.

При некорректном применении технологии VLAN, использовании различных средств прикладной виртуализации, дополнительной настройке или администрировании одной и той же структуры  $S_k$  компьютерной сети с одинаковыми постоянными вложениями можно ухудшить работоспособность сети. Появляется необходимость дополнительных

исследований конкретного варианта сети по рациональному использованию программного обеспечения коммутационного оборудования.

Следовательно, возникает задача изменения структуры сети, повышения характеристик производительности и оперативности, не ухудшая надежности сети.

Вложения дают возможность разнообразить структуры физически и логически. Например, функция вложений создает множество структур  $S_i$ :  $f(c) = \{S_i^{\text{физическая}}, \dots, S_i^{\text{логическая}} \dots\}$ . Новые структуры дадут некоторые характеристики  $H = f(S_i^{\text{физическая}}, \dots, S_i^{\text{логическая}} \dots)$ . Требуется найти рациональный путь анализа характеристик функционирования структуры сети, при ограничении - обеспечении надежности не ниже требуемой.

### **1.3. Постановка задачи анализа характеристик компьютерной сети**

Бурный рост сложности комплектующих компьютерных сетей требует повышения эффективности их применения и совершенствования методов управления и планирования сетей.

Теория массового обслуживания обеспечивает возможность расчета количественных характеристик функционирования сетей, включая оценку вероятностно-временных характеристик узлов коммутации, но не позволяет рассчитать надежность сети. Упрощенный подход ТМО требует дальнейшего уточнения характеристик сети с помощью более реальных моделей, что приводит к итерационной процедуре проектирования компьютерных сетей [3].

В настоящее время технические и программные средства компьютерной сети и условия их работы становятся всё более сложными. Количество элементов в отдельных видах устройств компьютерной сети исчисляется сотнями тысяч. Вероятность возникновения хотя бы одного отказа современного сложного устройства становится достаточно большой, следовательно, необходимы специальные меры, обеспечивающие доступность ресурсов и услуг. Доступность — такое состояние компьютерной сети, при котором сеть соответствует всем требованиям, предъявляемым к ее функционированию, т.е. это свойство сохранять работоспособное состояние в течение некоторой наработки. Для оценки доступности применяется количественный показатель: коэффициент оперативной готовности  $R_o$ .

Методы теории надежности используются для обеспечения заданных требований к функционированию компьютерной сети и повышения доступности на этапах проектирования, изготовления, испытания и эксплуатации сети. Методы теории вероятностей, как математического аппарата теории надежности, используются для расчета показателя вероятности безотказной работы компьютерной сети.

При проектировании сети изменение ее структуры в целях улучшения характеристик или обновления появляется опасность снижения готовности, поэтому необходимо рассчитывать коэффициент готовности проекта сети на каждом шаге итерации проектирования.

Использование предлагаемой методики анализа проекта КС приводит к целенаправленному изменению структуры сети и вычислению, в том числе и надежностных характеристик функционирования.

Характеристики функционирования сети в этом случае предлагается представить как функцию структурно-функциональной организации и коэффициента оперативной готовности, не ниже заданного.

$$H(t) = f(SF, R_s \geq R_z, C) \quad (1)$$

где  $SF$  – структурно - функциональные параметры компьютерной сети;

$R_s, R_z$  – коэффициенты оперативной готовности;

условие  $R_s \geq R_z$  ограничивает вероятность безотказной работы сети,

$C$  - вложения в компьютерную сеть.

## **2. Математическое моделирование**

Математическое моделирование дискретных систем со стохастическим характером функционирования предполагает использование моделей массового обслуживания, описываемых в терминах аппарата теории вероятностей [3].

Разработка модели компьютерной сети, как технической системы с дискретным характером функционирования состоит в выборе конкретного математического аппарата, в терминах которого формулируется модель, и построении модели или совокупности моделей исследуемой сети, отображающих возможные варианты структурно-функциональной организации компьютерной сети.

### **2.1. Аналитический метод моделирования**

Аналитический метод математического моделирования использует аппарат теории вероятностей, теории массового обслуживания. При этом многие модели реальных систем строятся на основе моделей массового обслуживания: базовых в виде систем массового обслуживания СМО и сетевых моделей в виде сетей массового обслуживания СеМО.

В процессе разработки аналитической модели сети необходимо определить состав и перечень параметров и характеристик модели в терминах теории массового обслуживания, и установить их взаимосвязь с параметрами и характеристиками исследуемой системы, то есть выполнить параметризацию модели.

В связи с тем, что состав и номенклатура системных и модельных параметров и характеристик, в общем случае, различается, возникает необходимость установления соответствия между значениями системных и

модельных параметров и характеристик, которое выполняется на этапе параметризации модели.

При построении математической модели аналитическим методом используется ряд упрощающих допущений. Многочисленные источники при моделировании компьютерной сети применяют модели массового обслуживания со следующими допущениями и упрощениями.

Для получения компактных аналитических результатов [5] допускается, что интервалы между поступлениями заявок описываются Марковским или пуассоновским распределением.

Теория массового обслуживания позволяет для модели М/М/К, упрощенно описывающей процессы, происходящие в коммутаторе, оценить среднюю длину очереди и среднее время ожидания заявки в очереди в зависимости от характеристик входного потока и времени обслуживания.

С помощью модели М/М/К системы массового обслуживания можно приближенно моделировать сеть с коммутацией пакетов. Пропускная способность магистрали коммутатора в  $N/2$  больше скорости поступления данных на входы портов. При этом шина передает кадры в псевдопараллельном режиме, не внося задержек в передачу кадра в целом. Шина обеспечивает одновременную передачу потока данных от всех портов и коммутатор не вносит задержку на пути передачи данных, т.к. является неблокируемым.

Важная роль простейшего потока при моделировании определяется тем, что простейшие или близкие к ним потоки часто встречаются на практике. Кроме того, при анализе СМО можно получить вполне удовлетворительные результаты, заменяя входной поток любой структуры простейшим с той же интенсивностью.

Для простейшего потока характерно, что поступление заявок через короткие промежутки времени более вероятно, чем через длинные, – 63% промежутков времени между заявками имеют длину, меньшую среднего значения  $1/\lambda$ . Следствием этого является то, что простейший поток по сравнению с другими видами потоков создает наиболее тяжелый режим работы системы. Поэтому предположение о том, что на вход системы поступает простейший поток заявок, приводит к определению предельных значений характеристик качества обслуживания. Если реальный поток отличен от простейшего, то система будет функционировать не хуже, чем это следует из полученных оценок.

Аналитические модели теории очередей обеспечивают довольно хорошее соответствие с реальностью в области сетей с упрощающими допущениями [6]. Для получения точных результатов предполагается, что интервалы времени между поступлениями запросов распределены экспоненциально, это равносильно тому, что число поступающих за период времени запросов распределению Пуассона. Время обслуживания

подчиняется экспоненциальному распределению. Теоретический максимум входной скорости  $\lambda_0$ , при которой узел сети будет успевать обрабатывать все запросы, обратно пропорционален времени обслуживания запроса. Из практических соображений, таких как требования, ко времени отклика или ограничения на размеры буферов, входная скорость ограничивается 70-90 % от теоретического максимума. Во многих случаях можно считать экспоненциально распределенное время обслуживания худшим случаем, поэтому консервативные результаты можно получить путем анализа, основанного на этом допущении. Приближение Пуассона позволяет получить оценку верхних границ размеров очереди и времени ожидания. Входной поток кадров в узел коммутации представляет суперпозицию большого количества заявок с различными законами распределения между моментами их поступления и разными интенсивностями. Это позволяет на основании теоремы о суммировании потоков принять предположение об экспоненциальном распределении интервалов между моментами поступления кадров в узел коммутации. Теорема Джексона может использоваться для приложений, работающих в сетях с коммутацией пакетов, которые можно моделировать как сеть очередей. Сеть очередей состоит из узлов, каждый из которых предоставляет независимое обслуживание с экспоненциально распределенным временем, запросы поступают с частотой, распределенной по Пуассону, после обслуживания запрос немедленно с фиксированной вероятностью поступает на другой узел или покидает систему. Каждый пакет сети представляет собой запрос модели. Благодаря усредняющему эффекту объединения и разделения потоков предположение о независимых временах обслуживания приемлемо.

Длина кадров [7] считается случайной величиной с экспоненциально распределенной плотностью вероятности и средним значением равным  $1/\mu$  бита на кадр, скоростью прибытия  $\lambda$  кадров в секунду и скоростью обслуживания равным  $\mu C$  кадров в секунду, где  $C$  – пропускная способность канала в бит/секунду,  $\mu$  – интенсивность обслуживания кадра. Теория массового обслуживания говорит о том, что пуассоновское время прибытия и обслуживания равно  $T = 1/(\mu C - \lambda)$ .

Модели сетей массового обслуживания применяются для анализа характеристик протоколов канального, сетевого и транспортного уровней модели ISO/OSI [1]. Сетевые модели отдельных элементов компьютерной сети адекватно отражают многоэтапный процесс обработка пакетов в этих устройствах, позволяя не только рассчитывать характеристики, но и осуществлять выбор различных параметров, например, объемов буферной памяти узлов коммутации. Опыт проектирования и измерений реальных сетей показывает, что модели массового обслуживания являются достаточно точным и практически единственным хорошо разработанным математическим аппаратом, позволяющим осуществлять выбор

альтернативных вариантов, и оптимизацию характеристик на этапе проектирования компьютерной сети.

### ***2.1.1. Предположения, принимаемые на этапе параметризации модели МО***

1. Входной поток пакетов сети с коммутацией кадров, поступающих на входной интерфейс коммутатора, соответствует входному потоку заявок модели  $\lambda_0$ .
2. Производители оборудования предлагают коммутаторы с коммутацией на лету, при которой пакеты передаются с минимально возможной задержкой. Это свойство можно интерпретировать как поток без последствия при рассмотрении входного потока пакетов.
3. Технологическая реализация коммутаторов определяется их архитектурой. В коммутаторах с общей шиной (backplane) для связи процессоров портов применяется высокоскоростная шина, используемая в режиме разделения времени. После того, как данные преобразуются в приемлемый для передачи по шине формат, они помещаются на шину и далее передаются в порт назначения. В каждый момент времени по шине может передаваться только один пакет, т.е. предполагается ординарный поток.
4. Интенсивность  $\lambda_0$  и закон распределения интервалов между последовательными заявками предполагаются постоянными во времени, и поток заявок считается стационарным.
5. Заявки выходящие из обслуживающего прибора модели образуют выходной поток пакетов выходного интерфейса узла сети.

### ***2.1.2. Упрощения, принимаемые при параметризации модели СМО***

Упрощения, принимаемые при взаимосвязи параметров и характеристик модели СМО с параметрами и характеристиками узла компьютерной сети следующие.

1. Кадр сети с коммутацией пакетов соответствует запросу модели.
2. Поток кадров соответствует потоку заявок.
3. Структурные параметры СМО:
  - a. Количество обслуживающих приборов равно  $K$ ;
  - b. Количество  $k$  накопителей равно 1. Ёмкость накопителя считается бесконечной, т.е. заявки никогда не теряются из-за исчерпания буфера;
  - c. Накопитель модели соответствует буферу интерфейса коммутатора (этот термин используется как обобщенное название устройства коммутации пакетов).
4. Нагрузочные параметры СМО:
  - a. Количество поступающих в систему классов заявок  $H$  равно 1;



- b. Экспоненциальный закон распределения интервалов времени между поступающими в систему заявками;
  - c. Среднее время обслуживания кадра соответствует среднему времени  $b_i$  продвижения кадра процессором коммутатора из входного буфера в выходной канал. Для получения аналитического результата время обслуживания считается случайной величиной с экспоненциальным законом распределения. Производительность обслуживающего прибора равна пропускной способности выходного интерфейса [5].
5. Основные характеристики СМО с однородным потоком заявок:
- a. нагрузка системы:  $y = \lambda b$  - это теоретический максимум входной скорости  $\lambda_0$ , при которой узел сети будет успевать обрабатывать все запросы, обратно пропорционален времени обслуживания запроса. Из практических соображений, таких как требования, ко времени отклика или ограничения на размеры буферов, входная скорость ограничивается 70-90 % от теоретического максимума.
  - b. загрузка системы  $\rho = \lambda b$ ;  
 среднее время ожидания заявок в очереди;  $w = \frac{Pb}{K(1-\rho)}$ ;  
 где  $P$  – вероятность того, что все  $K$  приборов заняты обслуживанием заявок.  
 Вероятность  $P$  определяется как:  $P = \frac{(K\rho)^K}{K!(1-\rho)} P_0$   
 где  $P_0$  – вероятность простоя многоканальной СМО, то есть вероятность того, что в системе нет заявок:  

$$P_0 = \left[ \frac{(K\rho)^K}{K!(1-\rho)} + \sum_{i=0}^{K-1} \frac{(K\rho)^i}{i!} \right]^{-1}$$
  - c. среднее время пребывания заявок в системе:  $u = w + b$ ;
  - d. средняя длина очереди  $= \lambda w$ ;
  - e. среднее число заявок в узле  $m = \lambda u$ .

### **2.1.3. Предположения о взаимосвязи параметров и характеристик модели СеМО с параметрами и характеристиками компьютерной сети**

С помощью модели сети массового обслуживания СеМО можно приближенно моделировать сети с коммутацией пакетов [5], узлами которой являются СМО М/М/К, описанные выше.

1. Узел коммутации соответствует узлу РСемо.
2. Экспоненциальный закон распределения интервалов времени между поступающими в систему кадрами описывает поток заявок  $\lambda_0$ .

3. Зависимости, связывающие интенсивности потоков заявок в разных узлах линейны.
4. Буфер предполагается бесконечным, т.е. заявки никогда не теряются из-за исчерпания буфера.
5. Предполагается что, заявки не размножаются после обслуживания некоторой заявки в узле и не формируют нескольких новых заявок.
6. для получения предельных, граничных значений характеристик КС предполагается однородный поток пакетов.
7. Маршрут предполагается один, для одной задачи, решаемой КС, например, только выход в Интернет или только работа с сервером приложений или файл-сервером.
8. Среднее время обслуживания заявки соответствует среднему времени продвижения кадра  $b_l$  процессором коммутатора из входного буфера в выходной канал.
9. Для получения аналитического результата время обслуживания считается случайной величиной с экспоненциальным законом распределения равной пропускной способности выходного интерфейса коммутатора.
10. Пользователи сети соответствуют нескольким внешним источникам заявок, генерирующих в КС запросы, независимо от числа запросов, находящихся в КС и ответы возвращаются во внешнюю среду после обслуживания в КС, т.е. моделью компьютерной сети можно предположить разомкнутую сеть массового обслуживания.
11. Для описания линейных разомкнутых однородных экспоненциальных СеМО необходимо задать следующие параметры:
  - а. число узлов в РСеМО  $n$  равное числу узлов коммутации сети.
  - б. число обслуживающих приборов в узлах РСеМО:  $K = 1$
  - с. матрицу вероятностей передач  $P = [p_{ij} | i, j = 0, 1, \dots, n]$  соответствующую матрице связей между узлами сети.
12. Для узла - коммутатора второго уровня трафик подсети в т.ч. и виртуальной сети VLAN, фильтруется с коэффициентом передачи  $\alpha_{ij}$  равным единице
13. Для узла КС - коммутатора третьего уровня трафик подсети, в т.ч. и виртуальной сети VLAN, фильтруется с коэффициентом передачи, определяемым объемом данных, передаваемых между подсетями и внутри подсети. Например, с коэффициентом передачи  $\alpha_{ij}$  равным 50%/50%, 20%/80%, 80%/20% в зависимости от задач, решаемых КС и коэффициентом передачи соответственно равным 0,5; 0,2; 0,8.
14. интенсивность источника заявок  $\lambda_0$ , поступающих в РСеМО вычисляется из следующих соображений: теоретический максимум входной скорости  $\lambda_0$ , при которой КС будет успевать обрабатывать все запросы, обратно пропорционален времени обслуживания запроса. Из практических соображений, таких как требования, ко

времени отклика или ограничения на размеры буферов, входная скорость ограничивается 70-90 % от теоретического максимума и количеством подключенных пользователей.

15. средние длительности обслуживания заявок в узлах РСeMO соответствуют среднему времени продвижения пакета  $b_i$  процессором коммутатора из входного буфера в выходной канал. Для получения аналитического результата время обслуживания считается случайной величиной с экспоненциальным законом распределения пуассоновским временем распределения. Производительность обслуживания равна пропускной способности выходного интерфейса коммутатора.

16. Условие отсутствия перегрузки разомкнутой СеМО соответствует условию отсутствия перегрузки КС:  $\lambda_0 < \min\left(\frac{K_1}{\alpha_1 b_1}, \dots, \frac{K_i}{\alpha_i b_i}\right)$ .

17. Нагрузка СеМО соответствует нагрузке КС  $Y = \sum_{j=1}^n y_j$ .

18. Загрузка СеМО соответствует Загрузка КС:  $R = \sum_{j=1}^n \rho_j$ .

19. Время ожидания СеМО соответствует времени ожидания КС:

$$W = \sum_{j=1}^n \alpha_j w_j.$$

20. Время пребывания СеМО соответствует времени пребывания КС:

$$U = \sum_{j=1}^n \alpha_j w_j.$$

21. Длина очереди СеМО соответствует длине очереди КС:  $L = \sum_{j=1}^n l_j$ .

22. Число заявок в СеМО соответствует числу заявок в КС:  $M = \sum_{j=1}^n m_j$ .

#### ***2.1.4. Предположения о параметрах модели СеМО и параметрах IP-подсети***

На практике для уменьшения широковещательной перегрузки и ограничения на замкнутые контуры в сети, которое разрешает только один путь между двумя любыми устройствами, большую сеть разбивают на подсети, ограниченные коммутаторами третьего уровня /маршрутизаторами. При этом MAC кадр доставляется в пределах своей подсети. В коммутаторах третьего уровня логика маршрутизации пакетов реализована аппаратно. Коммутаторы третьего уровня формируют локальную магистраль для увеличения производительности и надежности и связаны друг с другом линиями с пропускной способностью следующего уровня скорости по сравнению с портами пользователей (1 Гбит/с для 100

Мбит). В модели подсеть и сеть учитывается интенсивностью потока заявок.

Предположения, принятые для соответствия между значениями модельных параметров с параметрами IP-подсети приведено ниже.

1. Входной поток модели соответствует кадрам Ethernet. Кадры Ethernet минимальной длины создают наиболее тяжелый режим работы коммутатора.
2. Скорость входного потока модели определяется как теоретический максимум входной скорости  $\lambda_0$ , при которой IP-подсеть будет успевать обрабатывать все запросы, и обратно пропорциональна времени обслуживания запроса. На практике входная скорость ограничивается 70-90 % от теоретического максимума равного 100 Мбит в секунду /148800 кадров в секунду или 1000 Мбит в секунду /1488000 кадров в секунду и количеством подключенных пользователей.
3. Выходной поток узла модели соответствует кадрам Ethernet. Выходной поток узла IP-подсети в т.ч. и виртуальной сети VLAN, интенсивность потока равна пропускной способности выходного интерфейса коммутатора, данной производителем оборудования.
4. Скорость Выходного потока модели соответствует скорости обслуженных кадров коммутатором равной стандарту Ethernet 100 Мбит в секунду или 148800 кадров в секунду или 1000 Мбит в секунду 1488000 кадров в секунду.

### ***2.1.5. Предположения о взаимосвязи параметров модели СеМО с параметрами составной сети***

1. Входной поток модели соответствует кадрам Ethernet.
2. Скорость входного потока модели соответствует теоретическому максимуму входной скорости  $\lambda_0$ , при которой сеть будет успевать обрабатывать все запросы. Скорость входного потока обратно пропорциональна времени обслуживания запроса и ограничивается 70-90 % от теоретического максимума стандарта Ethernet 100 Мбит в секунду или 148800 кадров в секунду или 1000 Мбит в секунду или 1488000 кадров в секунду и количеством подключенных пользователей.
3. Выходной поток модели соответствует кадрам Ethernet.
4. Выходной поток узла подсети в т.ч. и виртуальной сети VLAN, равен пропускной способности выходного интерфейса коммутатора третьего уровня, данной производителем оборудования.
5. Скорость выходного потока модели соответствует скорости обслуженных кадров коммутатором - 100 Мбит в секунду /148800 кадров в секунду, 1000 Мбит в секунду /1488000 кадров в секунду.

6. Коэффициент передачи  $\alpha_{ij}$  показывает, во сколько раз интенсивность потока в узел отличается от интенсивности источника. Любой маршрутизатор программный или аппаратный, изменяет интенсивность потока пакетов в процессе продвижения. В коммутаторах третьего уровня логика маршрутизации пакетов реализована аппаратно. Для узла сети - коммутатора третьего уровня трафик подсети, в т.ч. и виртуальной сети VLAN, фильтруется с коэффициентом передачи, определяемым объемом данных, передаваемых между подсетями и внутри подсети, в зависимости от задач, решаемых сетью.
7. Различные средства прикладной виртуализации, такие как виртуальные и гостевые системы значительно изменяют количество и характер возможных для реализации структур компьютерной сети с функцией. При моделировании виртуальных объектов предполагается, что: Узел модели СМО или СеМО соответствует объекту виртуализации - виртуальной (гостевой) рабочей станции или серверу.

Исходя из сказанного, при исследовании аналитической модели компьютерной сети можно применить математический аппарат линейных экспоненциальных разомкнутых сетевых моделей массового обслуживания с указанными выше упрощающими допущениями.

На основе вышесказанного осуществляется структурный и нагрузочный синтез математической модели проекта компьютерной сети.

Целенаправленное добавление сетевых устройств, каналов с перенаправлением потоков для улучшения значений характеристик сети изменяет структуру сети. Для каждой структуры компьютерной сети необходимо:

1. рассчитать коэффициенты передач заявок  в узлах  сети  и интенсивности
2. проверить условие отсутствия перегрузок;
3. рассчитать узловые и сетевые характеристики – средние времена пребывания, ожидания, длины очереди, числа заявок;
4. выявить узкие места путем вычисления характеристик сети с наибольшим значением среднего времени пребывания заявок в узле и числа заявок, находящихся в очереди;
5. разгрузить узкие места путем увеличения скорости работы обслуживающего прибора, уменьшения коэффициента передач в узел или удорожания коммутационных узлов и сети.
6. провести имитационное моделирование для детального анализа спроектированной модели сети и оценить погрешность аналитических методов расчета набора характеристик.

## 2.2. Имитационное моделирование

Имеются исследования, утверждающие, что Internet и Ethernet трафики, являются самоподобными (self-similar))[6]. Приложение или рабочая станция формирует Ethernet-трафик всплесками с периодами бездействия между ними и также является самоподобным. Самоподобная структура трафика содержит уменьшенные копии самой себя на всех уровнях масштабирования. Предлагается моделировать самоподобный трафик распределением Парето. Требуется оценить влияние самоподобия на производительность сети. Сравнение проводится на моделях систем массового обслуживания. Для этого анализируются для моделей M/M/1 и G/M/1 с самоподобным входным потоком средняя и максимальная длина очереди, среднее время ожидания и среднее время пребывания в очереди.

Интервалы времени между прибывающими с частотой  $\lambda$  по распределению Пуассона пакетами, распределены экспоненциально с функцией распределения:

$$F(x) = 1 - (e^{-\lambda x}) \quad (2.1)$$

Распределение Парето имеет функцию распределения вероятностей:

$$F(x) = 1 - (\lambda/x)^\alpha \quad (x > k; \alpha > 0) \quad (2.2)$$

Распределение Парето можно наблюдать в широком спектре социальных и физических явлений, а также в области передачи данных. Хвост распределения Парето убывает значительно медленнее, чем экспоненциального. Наличие тяжелого хвоста у определенных сетевых переменных (например, размеров файлов и длительности соединения) является основной причиной долгосрочной зависимости и самоподобия.

Для отображения процессов в системе при наличии неэкспоненциальных внешних воздействий разработаны имитационные модели в среде GPSS World [8]. В качестве входного потока используется поток, сгенерированный GPSS World. Время ожидания, пребывания, длины очередей измеряются встроенной подсистемой GPSS в зависимости от загрузки системы:  $\rho = \lambda/\mu$ ,

где  $\lambda$  - средняя интенсивность входного потока;  $\mu$  - средняя интенсивность обслуживания заявки.

Распределение Парето – медленно затухающее распределение с параметрами, определяющими минимальное значение случайной величины и среднего значения и дисперсии случайной величины.

*PARETO (Nogenerator,  $\lambda$ ,  $\alpha$ )*

Параметры распределения:

$\lambda$  - определяет минимальное значение, которое может принимать случайная величина  $x$ ,

$\alpha$  - определяет среднее значение и дисперсию случайной величины. Если параметр  $\alpha$  принимает значения от 1 до 2, то случайная величина имеет конечное среднее и бесконечную дисперсию.

По [6] для Ethernet-трафика параметр  $\alpha$  индивидуальных источников равен 1.2, что соответствует самоподобному трафику. Internet-трафик соответствует распределению Парето с параметром  $1,16 \leq \alpha < 1,5$ .

Параметр  $\lambda$  подбирался таким, чтобы обеспечить загрузку, равную загрузке модели M/M/1. Результаты моделирования представлены в таблице 2.7. и рис.2.1 и рис.2.2. Фрагмент кода моделей M/M/1 и P/M/1 представлен ниже:

```
-----  
*m/m/1 *  
intervalarrival equ 1.108; 1.234; 1.422; 1.666;  
1.974; 2.47; 3.22; 4.95; 9.9;  
flow fvariable (exponential(111,0,intervalarrival))  
*p/m/1 *  
alfa equ 1.16  
xmin equ  
1.6;0.799;0.52;0.4;0.32;0.27;0.23;0.2;0.18;0.164;  
flow fvariable (pareto(111,xmin,alfa))  
-----
```

Анализ результатов моделирования систем P/M/1 и M/M/1 показывает следующее:

1. Все основные характеристики (средняя длина очереди, максимальная длина очереди, среднее время ожидания в очереди, среднее время пребывания в системе) для системы P/M/1 имеют большие значения по сравнению с системой M/M/1 с аналогичными параметрами.
2. При загрузке системы  $\rho \leq 0,1$  разница не велика для характеристик систем.
3. При загрузке системы  $0,1 \leq \rho \leq 0,3$  разница увеличивается до нескольких раз.
4. При загрузке системы  $0,3 \leq \rho \leq 0,7$ , значения характеристик для систем P/M/1 и M/M/1 разнятся в разы, и с повышением нагрузки на систему возрастают до десятков раз.
5. когда  $\rho$  превышает значение 0.7, разница в значениях между двумя системами продолжает возрастать до нескольких десятков раз.
6. Длина очереди предполагалась бесконечной, и не использовались приоритеты, но длина очереди имеет значение и поэтому влияние самоподобного входного потока на производительность системы более заметно и может приводить к нестабильности в ее работе или большим задержкам.
7. Влияние самоподобия и долгосрочной зависимости необходимо учитывать при проектировании и анализе буферов и сетей.

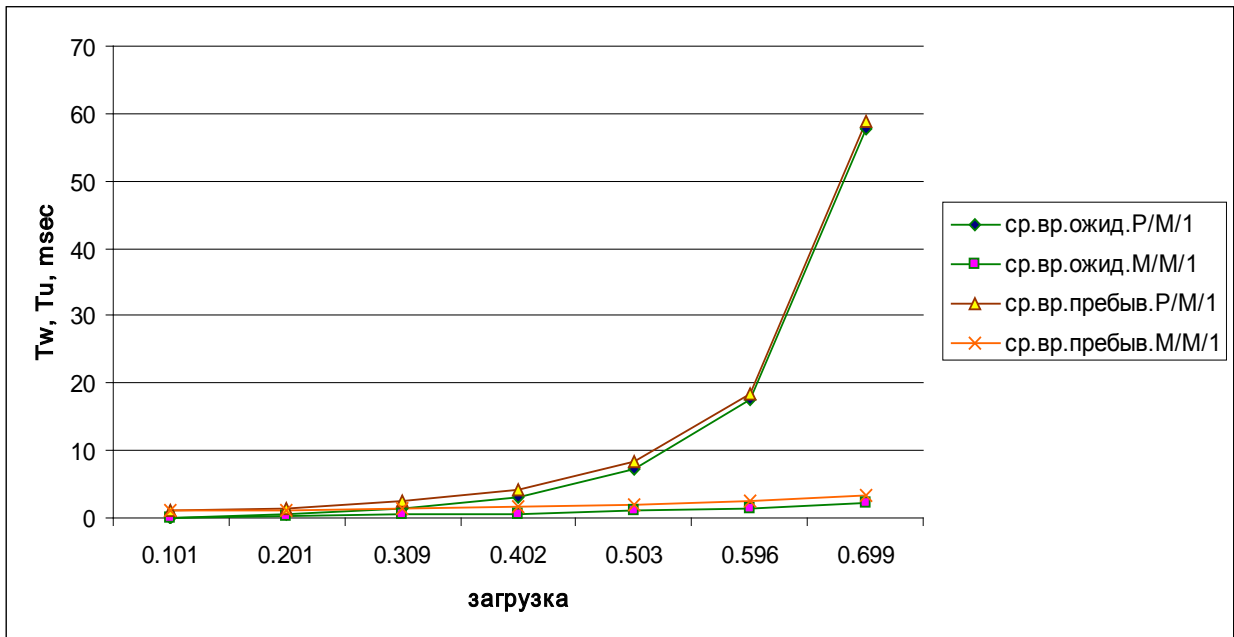


Рис.2.1 Зависимость средних времен ожидания и пребывания от загрузки для случаев экспоненциального и самоподобного потоков при загрузке от 0,1 до 0,7

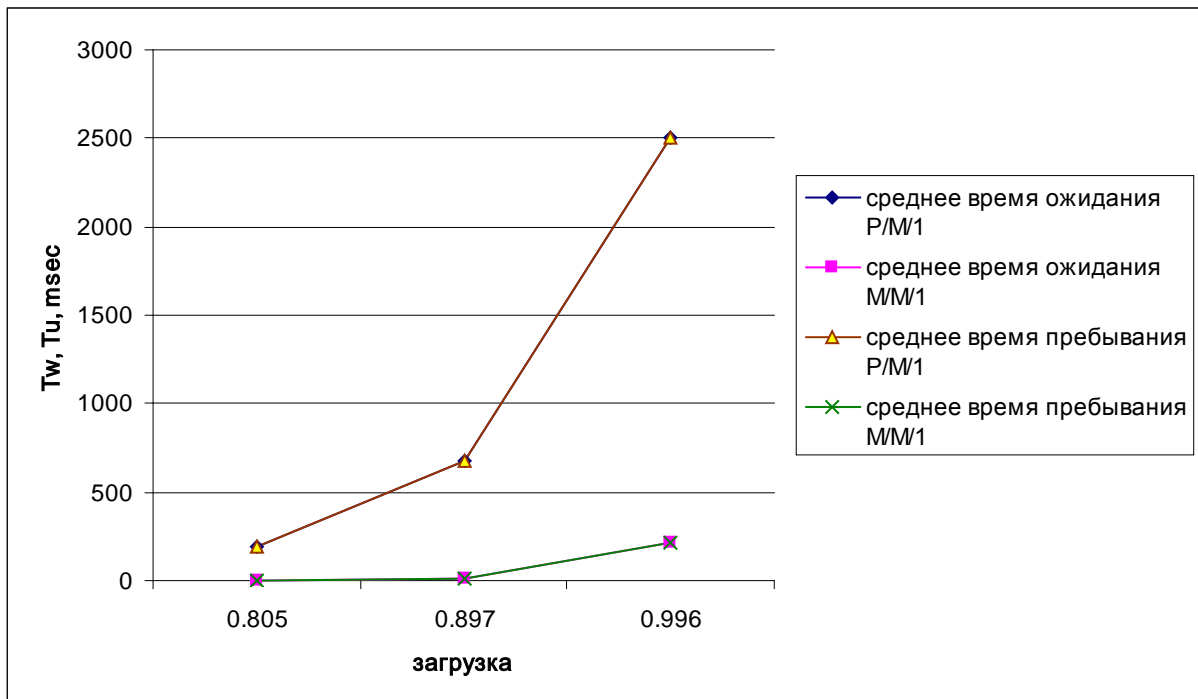


Рис.2.2 Зависимость средних времен ожидания и пребывания от загрузки для случаев экспоненциального и самоподобного потоков при загрузке от 0,8 до 0,996

Для модели с экспоненциально распределенными временными интервалами поступления заявок и экспоненциально распределенной длительностью обслуживания (ММ/1) зависимость необходимого [6] размера буфера  $q$  от среднего коэффициента использования  $\rho$  принимает вид (рис.2.3).



Таблица 2.7. Результаты экспериментов для сравнения поведения моделей М/М/1 (с экспоненциальным входным потоком) и G/М/1 с самоподобным входным потоком для максимальной и средней длины очереди, среднего времени ожидания в очереди и пребывания заявок в сети.

Загрузка	0.101	0.201	0.309	0.402	0.503	0.596	0.699	0.805	0.897	0.996
Макс. длина очереди Р/М/1	5	10	17	33	65	103	387	1114	2171	6106
Макс. длина очереди М/М/1	5	7	10	13	14	17	23	37	58	402
Средняя длина очереди Р/М/1	0.009	0.102	0.45	1.291	3.697	10.437	40.537	157.82	604.84	2495.99
Средняя длина очереди М/М/1	0.011	0.05	0.13	0.272	0.513	0.888	1.644	3.375	7.76	210.207
Среднее время ожидания Р/М/1	0.093	0.503	1.45	3.203	7.334	17.473	57.809	195.68	673.58	2508.33
Среднее время ожидания М/М/1	0.111	0.25	0.44	0.674	1.016	1.485	2.347	4.18	8.631	210.82
Среднее время пребывания Р/М/1	1.09	1.501	2.451	4.2	8.331	18.471	58.806	196.68	674.58	2509.33
Среднее время пребывания М/М/1	1.109	1.247	1.446	1.672	2.013	2.482	3.344	5.178	9.629	211.818

$$q = \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (2.3)$$

При долгосрочной зависимости высокой степени потребности в буфере растут стремительно с ростом коэффициент использования  $\rho$ . При определенных допущениях зависимость необходимого размера буфера  $q$  от среднего коэффициента использования  $\rho$  подчиняется закону (2.4):

$$q = \frac{\rho^{\frac{1}{2(1-H)}}}{(1 - \rho)^{\frac{H}{(1-H)}}}, \quad (2.4)$$

где  $H$  – параметр, принимающий значения  $0.5 < H < 1$ . Зависимость необходимого размера буфера показана на рис.2.3, таблице 2.8.

Рис.2.3. Зависимость необходимого размера буфера  $q$  от среднего коэффициента использования  $\rho$

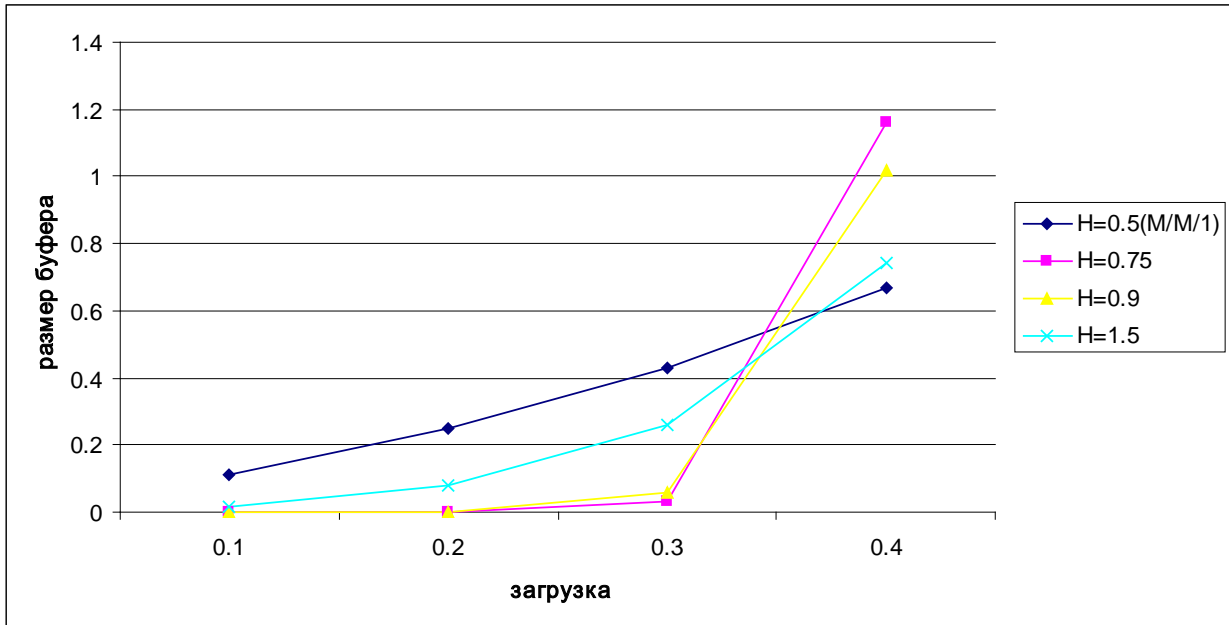


Таблица 2.8. Зависимость необходимого размера буфера от  $\rho$

$\rho$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
H=0.5 (M/M/1)	0.111	0.25	0.428	0.667	1	1.5	2.33	4	9
H=0.92	1.89E-06	0.00056	0.033	1.159	38.05	1547.9	110909	27068704	1.64E+11
H=0.9	2.58E-05	0.0024	0.06	1.016	16	296.6	8538.8	640000	5.9E+08
H=0.75	0.0137	0.078	0.262	0.740	2	5.625	18.148	80	810

Оценка среднего времени пребывания [9] требований в системе задается формулой (2.5).

$$\mu T = \frac{\rho^{\frac{H-\frac{1}{2}}{1-H}}}{(1-\rho)^{\frac{H}{1-H}}} \quad (2.5)$$

Самоподобный трафик прикладного и сетевого уровней различается.

На прикладном уровне самоподобие присуще источнику потока данных без взаимодействия с сетью. Поскольку поведение самоподобного трафика прикладного уровня независимо от текущего состояния сети, этим трафиком рекомендуется управлять в контексте управления доступом и выделения ресурсов для гарантирования требуемого класса обслуживания.

Самоподобный трафик сетевого уровня проявляет свойства самоподобия в широком диапазоне временной шкалы в результате многочисленных взаимодействий с сетью или объединенной сетью. Примером является ТСП - трафик. Самоподобный трафик сетевого уровня изменяет свое поведение в зависимости от нагрузки, схемы повторной передачи, количества конкурирующих пользователей, размеров запрашиваемых в Паутине или по FTP файлов и т.д. и это различие является предметом исследований [6]

### **3. Синтез структуры компьютерной сети по обеспечению ее доступности**

При синтезе структуры сети резервирование и ремонтпригодность использованы как научно обоснованные методы повышения доступности ресурсов и услуг проектируемой компьютерной сети.

Доступность является качественной характеристикой функционирования сложного технического объекта, такого как компьютерная сеть. Оценивать доступность предлагается количественными показателями надежности.

Надежность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки [10].

Надежность объектов закладывается при проектировании, реализуется при изготовлении и расходуется при эксплуатации.

Поэтому требуется рассматривать схемные методы повышения доступности по критерию показателей надежности на первом этапе жизненного цикла компьютерной сети - проектировании.

Средствами повышения работоспособности и производительности каналов связи являются альтернативные пути следования трафика, избыточные по отношению к единственному основному пути[5].

Работоспособность каждого физического канала локальной сети целиком определяется характеристиками работоспособности его компонентов (порта коммуникационного устройства, разъема, среды передачи, точек соединения разъемов со средой, кроссовых соединений).

Работоспособность канала повышается за счет применения избыточных физических соединений, когда канал дублируется одним или несколькими другими.

Повышение уровня связности сети, т. е. создание альтернативных маршрутов, — это средство повышения эксплуатационных характеристик сети.

Неизбежные дополнительные затраты создания альтернативных маршрутов могут оказаться меньше, чем при повышении производительности за счет применения более скоростной технологии канала, а для повышения работоспособности введение избыточных соединений чаще всего становится единственным практически осуществимым способом достижения цели.

Альтернативные соединения в сетях используются двумя способами:

1. в режиме резервирования, когда одно из них функционирует, а остальные находятся в "горячем" резерве для замены отказавшего соединения

2. в режиме баланса нагрузки; при этом данные передаются параллельно по всем альтернативным соединениям

Альтернативные соединения в режиме резервирования улучшают одну характеристику сети — работоспособность.

Альтернативные соединения в режиме баланса нагрузки позволяют повысить производительность и работоспособность.

В локальных сетях, где технологии и оборудование реализуют только функции первого и второго уровня модели OSI/ISO базовые протоколы поддерживают только древовидные топологии связей.

Для организации альтернативных каналов требуются протоколы и технологии, выходящие за рамки базовых, к которым относится Ethernet или алгоритм прозрачного моста (Transparent Bridge), описанный в стандарте 802.1D и применяемый в современных коммутаторах второго уровня.

Объединение нескольких физических каналов возможно с помощью механизмов агрегирования каналов Link Aggregation по спецификации IEEE 802.3ad.

Поддержка избыточных связей коммутаторами второго уровня снижает стоимость сети, так как многие участки сети строятся без привлечения относительно дорогих маршрутизаторов (коммутаторов третьего уровня) и повышается скорость реакции на обрыв связи.

При агрегировании физических каналов все избыточные связи остаются в рабочем состоянии, а имеющийся трафик распределяется между ними для деления нагрузки.

При отказе одного из составляющих логического канала, трафик распределяется между оставшимися каналами. Описана практическая задача нахождения числа резервных линий связи, сетевых адаптеров, портов узла коммутации, рабочих станций в сети и исследования зависимости показателей надежности от резерва, показанная на рисунке 3.0..

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 резервированием называется применение дополнительных средств и (или) возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов [9].

Таким образом, резервирование – это метод повышения надежности технических устройств или поддержания их на требуемом уровне посредством введения аппаратной избыточности за счет включения запасных (резервных) элементов и связей, дополнительных по сравнению с минимально необходимым, для выполнения заданных функций в данных условиях работы.

При резервировании с дробной кратностью работоспособное состояние резервированного соединения возможно при условии, если

число исправных элементов не меньше необходимого для выполнения заданных функций в данных условиях работы.

Кратность резерва - это отношение числа резервных элементов объекта к числу резервируемых ими основных элементов, выраженных несокращенной дробью.

Кратность резерва вычисляется по формуле:

$$k = m/(n - m),$$

где  $n$  - общее число элементов расчета резервированного системы;  
 $(n - m)$  - число элементов, необходимых для нормальной работы системы;  
 $m$  - число резервных элементов.

Отказ системы наступает при отказе  $(m + 1)$  элемента [11].

Система будет работоспособной в течение времени  $t$  при отказе не более чем  $m$  элементов.

Из требований приложений определяется число элементов  $(n - m)$ , необходимое для выполнения заданных функций в данных условиях работы системы, например количество человек в группе слушателей такое, чтобы на двоих слушателей была одна рабочая станция.

Нахождение количества резервных  $m$  элементов производится при допущениях, что основные элементы системы имеют одинаковую надежность, отказы элементов описываются простейшим потоком отказов, восстановление является независимым.

### **3.1. Постановка задачи синтеза структуры технической системы по обеспечению доступности**

Для обеспечения требуемой доступности используется структурная избыточность.

Постановка задачи синтеза структуры технической системы по обеспечению доступности:

1. Имеется структурная схема системы.
2. Известно число элементов  $n$  системы.
3. Известна интенсивность отказа элементов исходной системы.
4. Среднее время восстановления исходной системы.
5. Коэффициент оперативной готовности системы.

Необходимо определить показатели доступности системы:

1. Структурную схему системы, удовлетворяющую требованиям доступности,
2. Показатели доступности системы:
  - a. вероятность безотказной работы системы (ВБР)  $P_s(t)$ ,
  - b. плотность  $f_s(t)$  распределения времени безотказной работы (частота отказов) системы в зависимости от кратности резервирования.
  - c. выигрыш надежности.
  - d. коэффициент готовности системы  $K_{rs}$ .

е. коэффициент оперативной готовности системы  $R_s$ .

Методика синтеза структуры системы по обеспечению доступности следующая [11].

1. Анализ доступности исходной систем.
2. Определение кратности отдельного резервирования, обеспечивающего требования надежности.
3. Определение показателей надежности системы: вероятности безотказной работы системы  $P_s(t)$ , коэффициента готовности системы  $K_{rs}$ , коэффициента оперативной готовности системы  $R_s$  синтезированной структуры.

Анализ доступности исходной системы производится по критерию коэффициента оперативной готовности системы не меньше заданного  $R_s \geq R_z$  и включает определение:

- вероятности безотказной работы исходной системы  $P_s(t)$  в течение времени  $t$ ,
- коэффициента готовности элементов системы  $K_{ri}$ ,
- коэффициента оперативной готовности исходной системы для экспоненциального распределения  $R_s = K_r P_s(t)$ .

Вероятность безотказной работы для систем с дробной кратностью резервирования при условии, что все элементы имеют одинаковую надежность, рассчитывается из выражения:

$$P_s(t) = \sum_{i=0}^m C_n^i [p(t)]^{n-i} (1-p(t))^i, \quad (3.1)$$

где  $C_n^i$  – число сочетаний из  $(n)$  по  $(i)$  элементов системы;  $p(t)$  – вероятность безотказной работы элемента системы;  $m$  – число резервных элементов системы;  $n$  – общее число элементов системы с числом основных элементов  $(n-m)$ .

С помощью формулы (3.1) можно определить необходимое количество резервных элементов  $m$  системы для заданного числа основных  $(n-m)$ , обеспечивающих требуемую вероятность безотказной работы системы  $P_s(t)$ .

Плотность распределения времени безотказной работы (частота отказов) рассчитывается из выражения:

$$f_s(t) = (n-m) C_n^m Q^m(t) P^{n-m-1}(t) f(t) \quad (3.2)$$

где  $f(t)$  – плотность распределения времени безотказной работы элемента;  $Q(t) = 1 - p(t)$  – вероятность отказа элемента.

Коэффициент готовности элементов рассчитывается из выражения:

$$K_{ri}(t) = \frac{1}{1 + \rho_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.3)$$

Из литературы [10] известно, что интенсивность отказов одной микросхемы равна  $\lambda = [10^{-6}, 10^{-7}]$  час $^{-1}$ .

В одном управляемом коммутаторе второго или третьего уровня, рабочей станции имеется приблизительно 100 микросхем, следовательно, интенсивность отказов одного коммутатора или рабочей станции равна  $\lambda = [10^{-4}, 10^{-5}] \text{ час}^{-1}$ .

Доступность услуг сети в основном закладывается при проектировании, конструировании и изготовлении.

При резервировании в проекте сети заранее предусматривается замена неисправных элементов исправными элементами. Это первичный метод повышения надежности сети.

Оценка резервирования производится по критерию качества для восстанавливаемых систем – коэффициенту оперативной готовности.

Оценка эффективности резервирования производится при следующих упрощающих предположениях: все элементы имеют одинаковую надежность, поток отказов является простейшим.

Для постоянной интенсивности отказов элементов системы:

$$p(t) = e^{-\lambda t}, \quad (3.4)$$

формула вероятности безотказной работы (ВБР) системы принимает вид:

$$P_s(t) = \sum_{i=0}^m C_n^i (1 - e^{-\lambda t})^i e^{-\lambda t(n-i)}. \quad (3.5)$$

Формула ВБР системы  $P_s(t)$  представляет собой накопленные суммы биномиального распределения вероятностей с параметрами  $n$  и  $p = 1 - e^{-\lambda t}$ . ВБР системы  $P_s(t)$  является интегральной функцией распределения.

Плотность с точки зрения надежности системы показывает закон распределения времени до отказа или наработки до отказа.

Средняя наработка до отказа равна площади под кривой вероятности безотказной работы объекта.

$$f_s(t) = (n - m) \lambda C_n^m (1 - e^{-\lambda t})^m e^{-\lambda t(n-m)}. \quad (3.6)$$

Плотность  $f_s(t)$  распределения времени безотказной работы (частота отказов) системы является дифференциальной функцией распределения и показывает элементарную скорость, с которой в любой момент времени происходит приращение числа отказов.

Коэффициент готовности – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Коэффициент готовности  $K_r$  оценивает время  $T_{vi}$  восстановления элементов и рассчитывается из выражения:

$$K_r(t) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \rho_i}, \quad (3.7)$$

$$\text{где } \rho_s = \sum_{i=1}^n \rho_i = \sum_{i=1}^n \lambda_i T_{vi}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.8)$$

Коэффициент оперативной готовности определяется как вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного периода времени.

Коэффициент оперативной готовности  $R_s$  характеризует надежность объектов, необходимость применения которых возникает в произвольный момент времени, после которого требуется определенная безотказная работа.

Коэффициент оперативной готовности системы для экспоненциального распределения отказов и восстановления отказавших элементов равен:  $R_s = K_r P_s(t)$ . (3.9)

При анализе доступности резервированных устройств на этапе проектирования требуется сравнивать схемные решения по критерию качества резервирования – выигрышу надежности.

Анализ выигрыша надежности рассчитывается по основным количественным характеристикам.

Оценка эффективности резервирования осуществляется по критериям качества – вероятности и средней наработке до отказа при упрощающих предположениях: все элементы имеют одинаковую надежность, поток отказов элементов простейший.

Выигрыш резервированной системы по сравнению с нерезервированной вычисляется из отношений количественной характеристики резервированного устройства к той же характеристике нерезервированного устройства:  $G_p = P_s(t)/P_0(t)$ , (3.10)

$$G_t = T/T_0. \quad (3.11)$$

### 3.2. Влияние числа резервных элементов на показатели доступности

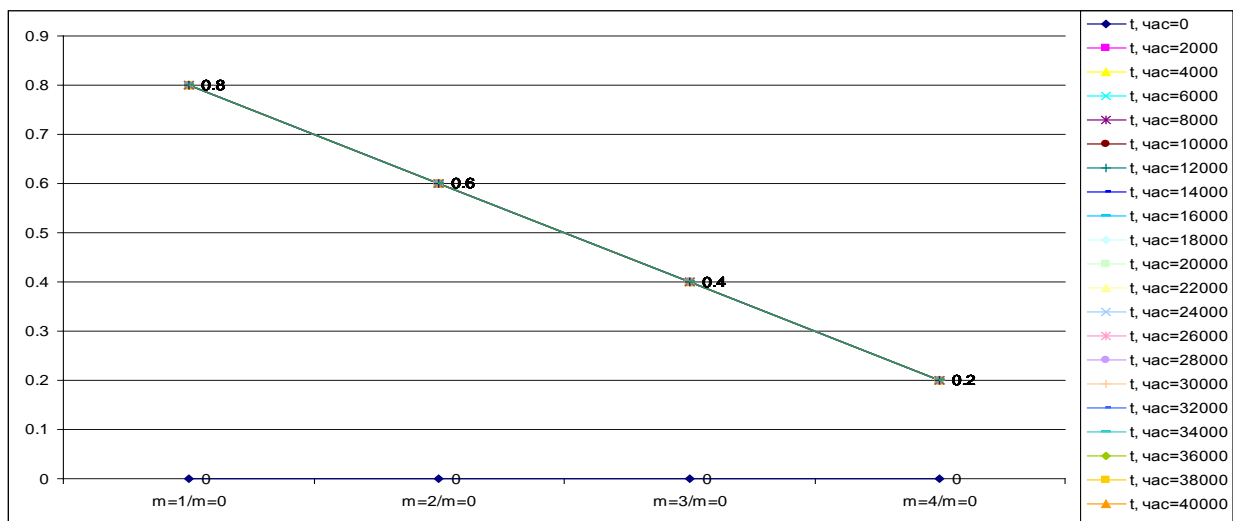


Рис.3.1. Выигрыш надежности  $G_t = T/T_0$  по средней наработке до отказа



Влияние числа резервных элементов на количественные показатели доступности системы с дробной кратностью резервирования определено при числе резервных элементов системы  $m = 0, 1, 2, 3, 4$ , числе элементов системы  $n$  равном 5 и интенсивности отказов  $\lambda = 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>, ВБР  $p(t)=e^{-t\lambda}$ .

Анализ (рис.3.1) показывает, что значительное увеличение числа резервных элементов системы приводит к менее значительному увеличению доступности.

### 3.3. Практическая задача исследования зависимости доступности ресурсов и услуг сети со сложными условиями эксплуатации

Существует практическая задача обеспечения доступности компьютерного класса слушателями, которые значительно повышают интенсивность отказов (цеховые условия эксплуатации) сети, например, с коэффициентом  $\alpha=10$ . Вероятность безотказной работы элемента системы в таком случае равна  $p(t) = e^{-\alpha\lambda t}$ . Интенсивность отказов рабочей станции в условиях учебного класса увеличивается до  $\lambda = [10^{-3}, 10^{-4}]$  час<sup>-1</sup>.

Зависимость коэффициента оперативной готовности системы с дробной кратностью резервирования от числа резервных элементов  $R_s=f(m)$  приведена на графиках рис.3.2. при числе резервных элементов системы  $m = 0, 1, 2, 3, 4$ , числе элементов системы  $n = 12$  и интенсивности отказов  $\lambda = 10^{-4}$  час<sup>-1</sup>.

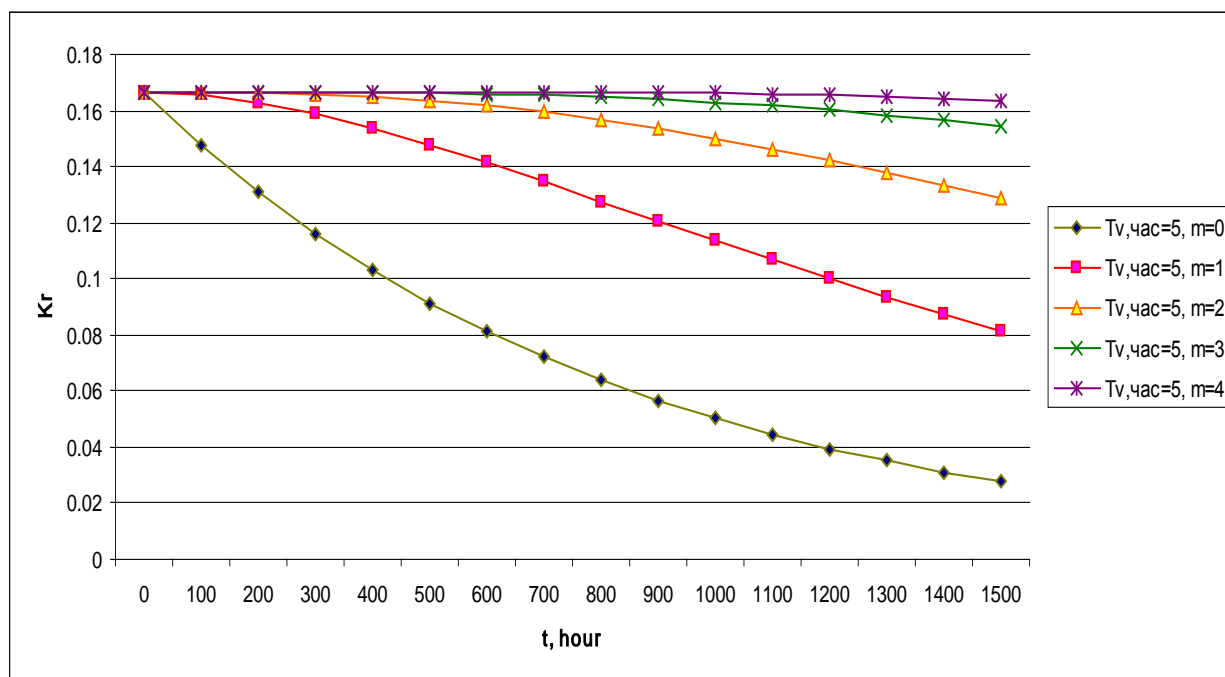


Рис.3.2. Зависимость коэффициента оперативной готовности системы с дробной кратностью резервирования  $R_s$  от числа резервных элементов и времени  $t$ , час

Графики плотностей  $f_s(t)=f(m)$  распределения времени безотказной работы системы в зависимости от числа резервных элементов и

параметрами при  $n=12$ ,  $p(t)=e^{-\lambda t}$ ,  $\lambda=10^{-4}$  час<sup>-1</sup> изображены на рис.3.3. Кривая «0» соответствует плотности распределения времени до отказа нерезервированной системы, состоящей из 5 элементов. Кривая «4» представляет собой плотность распределения времени до отказа резервированной системы с одним основным и 4 резервными элементами.

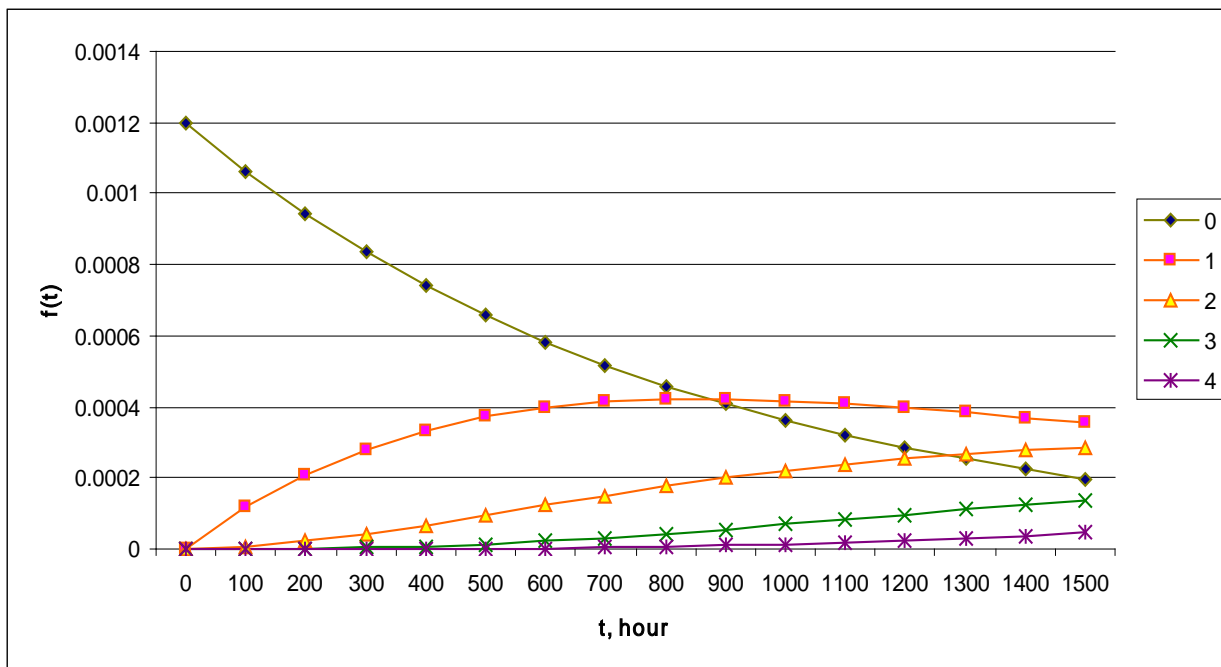


Рис.3.3. Зависимость плотности  $f_s(t)$  распределения времени безотказной работы системы от числа резервных элементов с параметрами  $n=5$ ,  $p(t)=e^{-\lambda t}$ ,  $\lambda = 10^{-4}$  час<sup>-1</sup>

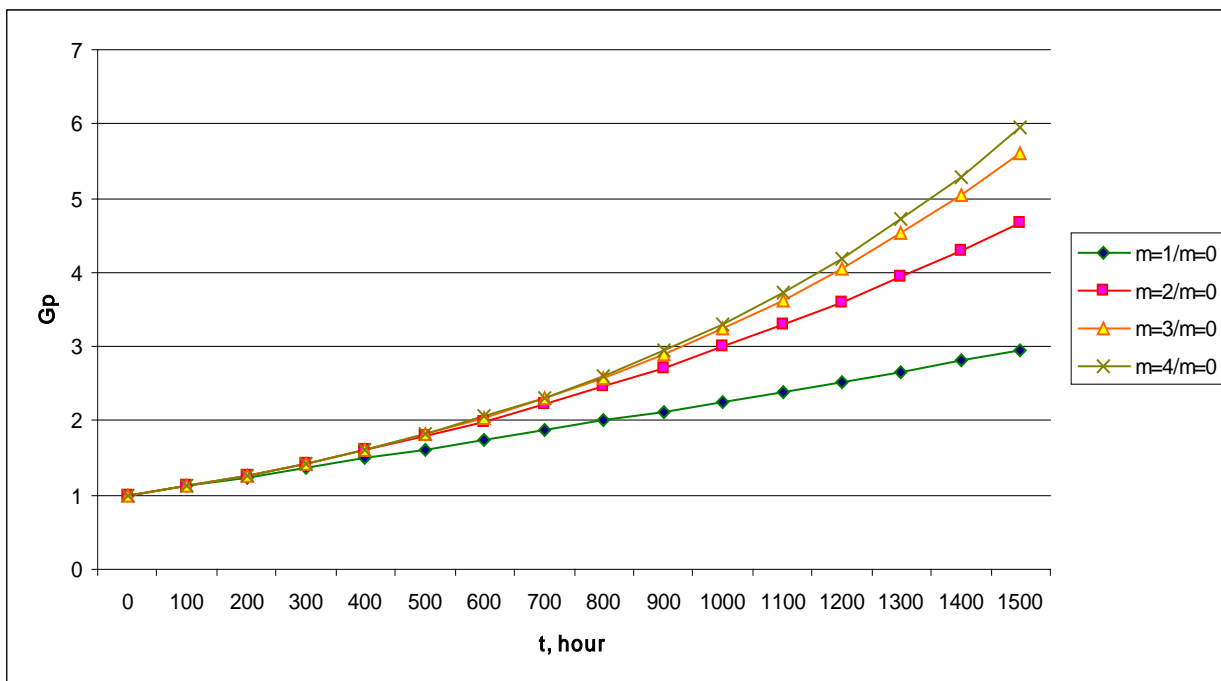


Рис.3.4. Выигрыш надежности  $G_p=P(t)/P_0(t)$  по вероятности безотказной работы

Графики  $G_p = P(t)/P_0(t)$  при числе резервных элементов  $m=0, 1, 2, 3, 4$  приведены на рис.3.4, где показан выигрыш при различных кратностях резервирования:  $m=1/m=0, m=2/m=0, m=3/m=0, m=4/m=0$ .

На рис.3.5 показаны графики  $G_t = T/T_0$  выигрыша надежности по средней наработке до отказа при следующих кратностях резервирования:  $m=1/m=0, m=2/m=0, m=3/m=0, m=4/m=0$

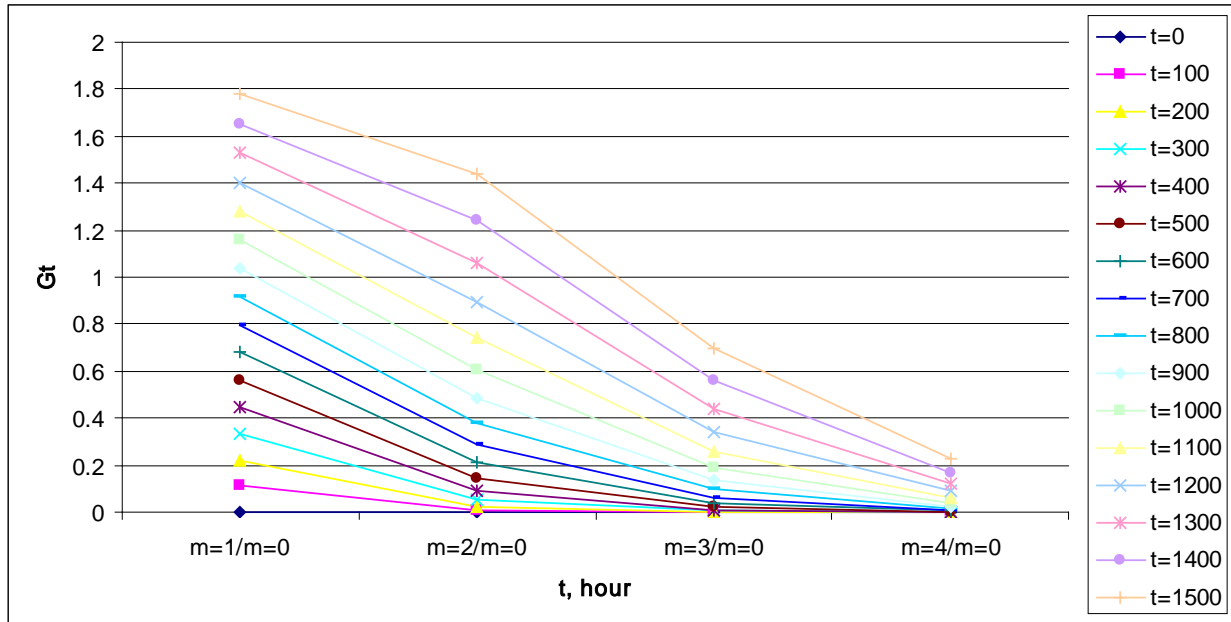


Рис.3.5. Выигрыш надежности  $G_t$  по средней наработке до отказа

### 3.4. Влияние наличия резервных элементов на показатели доступности

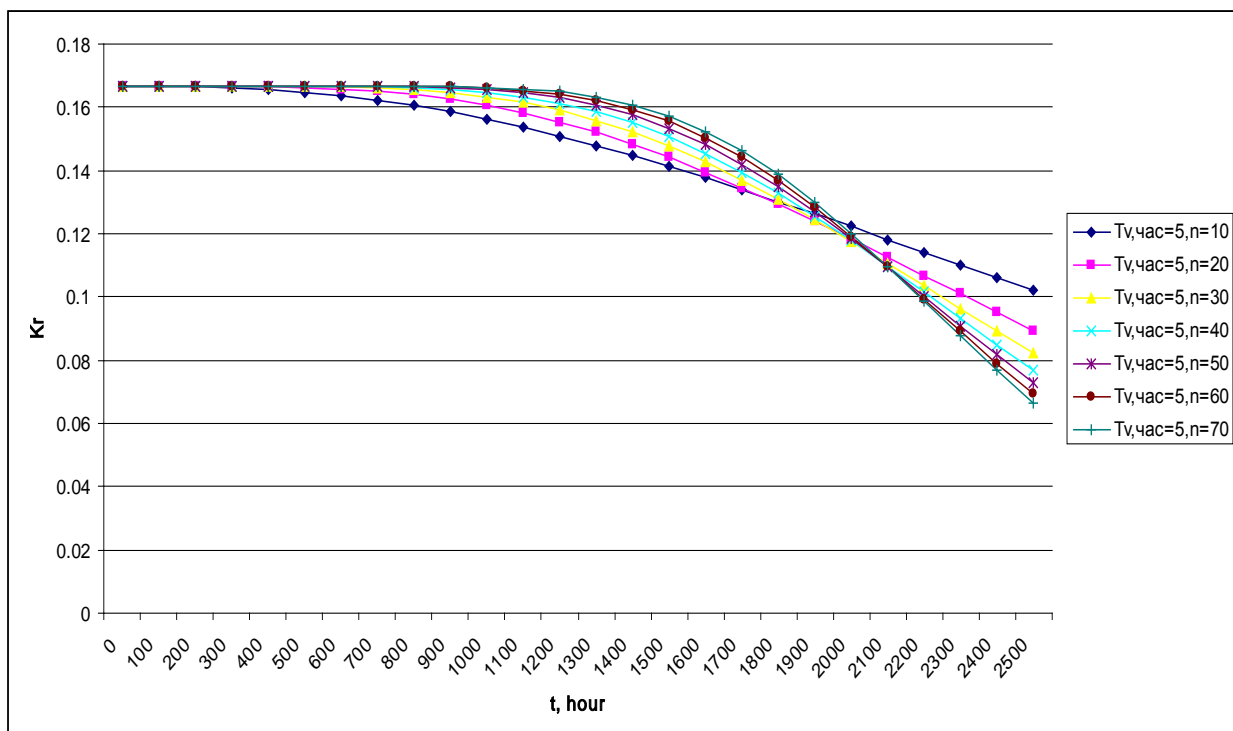


Рис.3.9. Зависимость коэффициента оперативной готовности системы с дробной кратностью резервирования от времени  $t$ , час и от

числа резервных элементов системы  $m=20\%n$ ,  $n=10-70$  при фиксированном времени восстановления  $T_v$

Зависимость коэффициента оперативной готовности системы с дробной кратностью резервирования от числа резервных элементов приведена на рис.3.9. при наличии 20% резервных элементов от общего числа элементов системы  $m = 20\%n$ ,  $n = 10-70$  и интенсивности отказов  $\lambda = 10^{-4}$  час<sup>-1</sup>.

Графики плотностей  $f_s(t)$  при  $p(t) = e^{-\lambda t}$  с параметрами: наличие 20% резервных элементов от общего числа элементов системы  $m=20\%n$ ,  $n=10-70$  и интенсивности  $\lambda = 10^{-4}$  час<sup>-1</sup> изображены на рис.3.10.

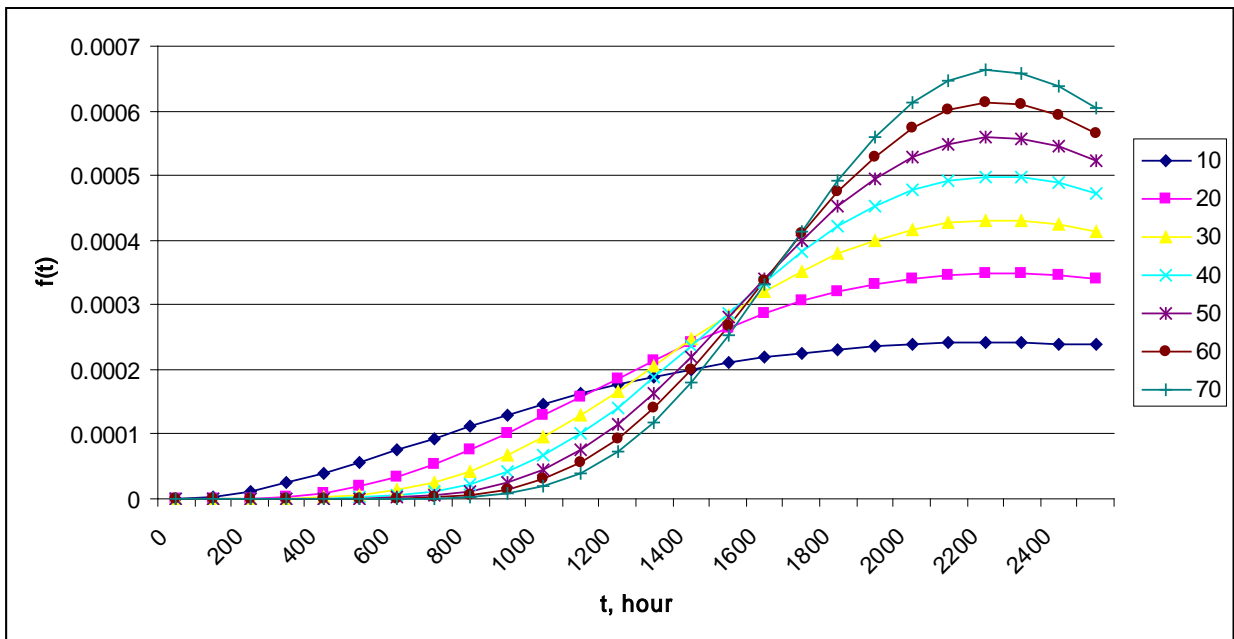


Рис.3.10. Зависимость плотности  $f_s(t)$  распределения времени безотказной работы системы от наличия 20% резерва с параметрами  $n=10, 20, 30, 40, 50, 60, 70$ ,  $p(t)=e^{-\lambda t}$ ,  $\lambda = 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>.

Графики выигрыша надежности по средней наработке до отказа  $G_t=T/T_0$  при наличии 20% резервных элементов  $m$  приведены на рис.3.11, где показан выигрыш при кратностях резервирования:  $m=2/m=0$ ,  $m=4/m=0$ ,  $m=6/m=0$ ,  $m=8/m=0$ ,  $m=10/m=0$ ,  $m=12/m=0$ ,  $m=14/m=0$ .

Зависимость коэффициента оперативной готовности  $R_s$  от параметра времени восстановления системы определяется по формулам, уже упоминавшимся выше (3.7), (3.9) и учитывающим время восстановления:

$$\text{Коэффициент готовности элемента системы: } K_{ri} = \frac{1}{1 + T_{vi}\lambda_i}.$$

$$\text{Коэффициент оперативной готовности системы } R_s = K_{rs}P_s(t), \quad K_{rs} = \sum_i K_{ri}.$$

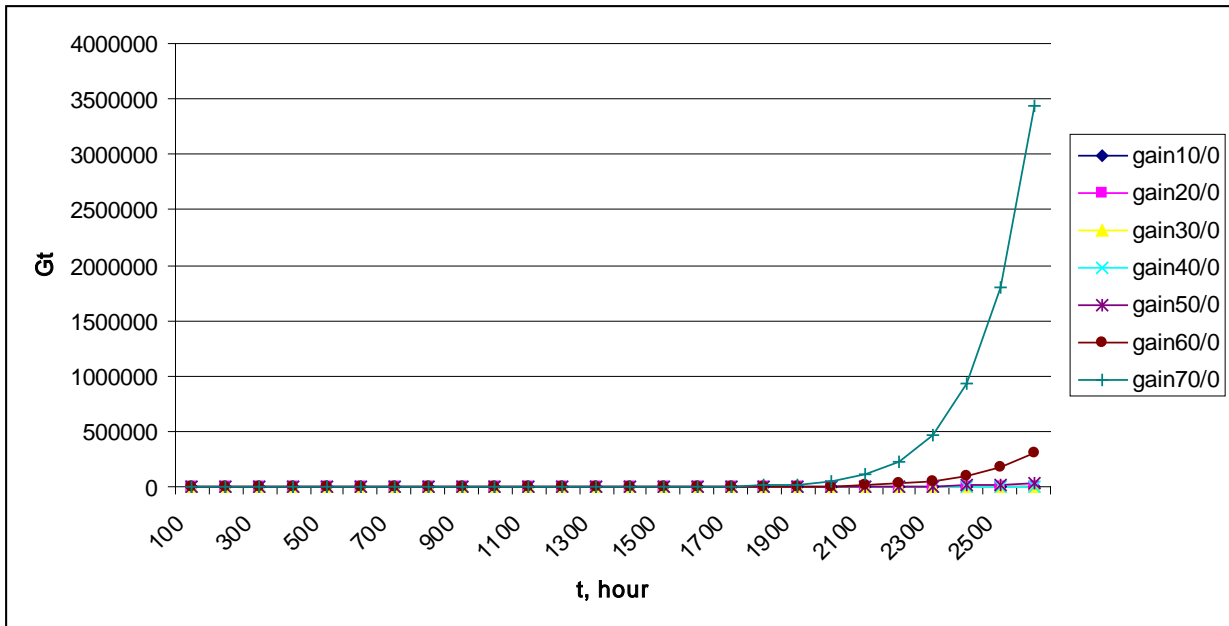


Рис.3.11. Выигрыш надежности по средней наработке до отказа при наличии 20% резервных элементов

Анализ зависимости КОГ от времени восстановления (рис.3.12) показал, что наличие числа резервных элементов, повышающее вероятность безотказной работы системы, поддерживает на постоянном уровне коэффициент оперативной готовности резервированной восстанавливаемой системы на определенный период времени.

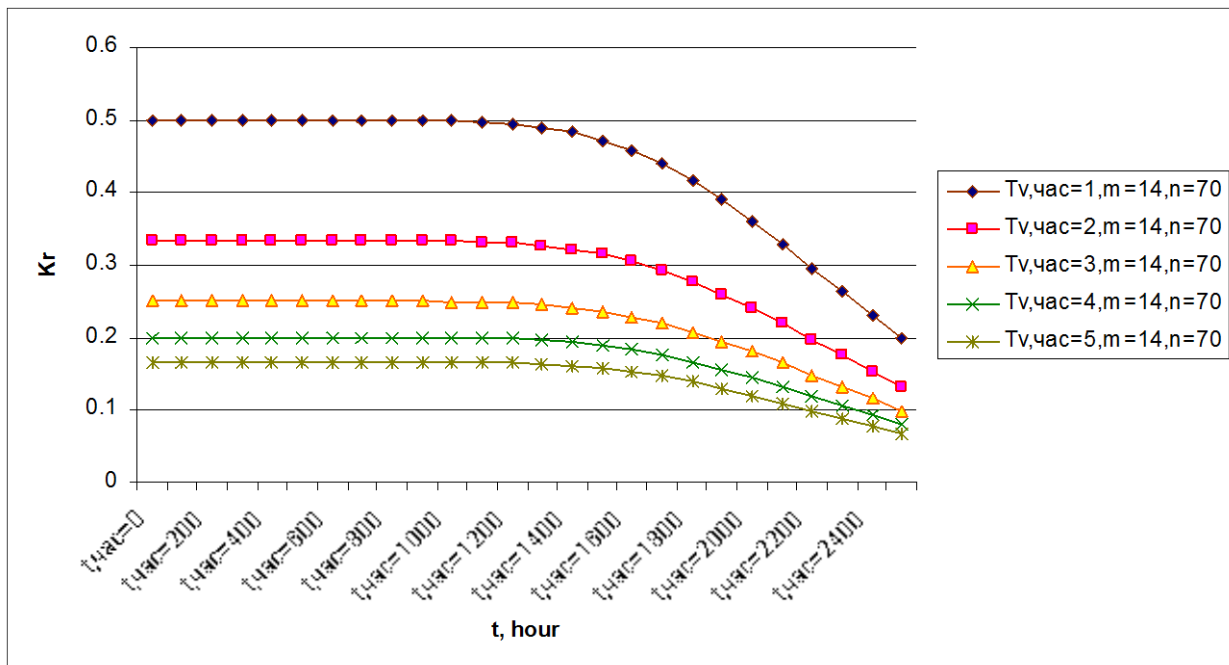


Рис.3.12 – Зависимость коэффициента оперативной готовности  $K_t$  от времени восстановления  $T_v$ , час при фиксированном числе резервных элементов  $m=20\%$  от числа основных элементов

### 3.5. Методика определения кратности раздельного резервирования

Методика [11] определения кратности раздельного резервирования состоит в следующем:

1. По данным расчета исходной системы выбирается наименее надежный элемент и резервируется таким же элементом методом постоянного резервирования.
2. Выполняется расчет доступности системы новой структуры, т. е. структуры с одним дублированным элементом.
3. Если доступность новой системы не удовлетворяет требуемой  $R_s \geq R_z$ , то выбирается следующий наименее надежный элемент, который также дублируется, и рассчитывается доступность системы с двумя резервными элементами.
4. Проверяется условие требуемой надежности  $R_s \geq R_z$  и повторяются предыдущие пункты до тех пор, пока условие требуемой доступности будет выполнено.
5. Если в процессе последовательного приближения окажется, что наименее надежным является уже дублированный элемент, то его резервируют снова.
6. Если условие требуемой доступности выполнено:  $R_s \geq R_z$ , то структура системы найдена. Для этой структуры определяется число ее элементов, и вычисляются показатели доступности.

### 3.6. Определение значений задаваемых показателей доступности и выбор варианта построения КС

Методика обоснования (ГОСТ 27003-90) значений (норм) показателей доступности (ПН) применяется в тех случаях, когда известны или могут быть установлены:

1. возможные варианты построения изделия и набор мероприятий по повышению доступности относительно исходного «базового» уровня;
2. значения прироста доступности  $DR_i$  и затрат  $DC_i$  для каждого из этих вариантов (мероприятия).

Определение норм ПН ( $R_s$ ) для новых разработок изделий конкретного назначения (ИКН) состоит в следующем.

1. Уровень доступности изделия должен быть не ниже некоторого минимального  $R_{min}$ , при котором создание (использование) изделия еще имеет смысл с учетом ограничивающих факторов.  $R_{min}$  - может быть числом или областью допустимых значений;
2. Если ограничивающих факторов несколько, то среди них выбирается один, исходя из условия, что ограничение по нему в процессе повышения доступности наступает раньше других. Далее рассматривается один ограничивающий фактор, в качестве которого принят наиболее общий — стоимость  $C_z$ .

При указанных условиях задача повышения доступности может быть сформулирована следующим образом: необходимо определить уровень доступности изделия, как можно более близкий к оптимальному, удовлетворяющий ограничениям  $R_s \geq R_{min}; C(R) \leq C_z$ .

Одновременно с обоснованием норм ПН решается задача выбора оптимального (по критерию доступности) варианта построения изделия и распределения норм ПН между его составными частями. Общий порядок решения задачи заключается в следующем.

1. Оценивается уровень доступности исходного варианта изделия, рассматриваются возможные мероприятия по повышению доступности и варианты построения изделий.
2. По каждому мероприятию (варианту) оцениваются затраты  $DC_i$  на повышение уровня доступности, возможное увеличение  $DR_i$  показателей доступности.
3. Из всех мероприятий выбирается наиболее эффективное по  $(DR_i/DC_i)$ , а затем расчет повторяется при новом исходном варианте (при уровне доступности  $R_i$ , достигнутом после очередного мероприятия).

Расчет заканчивается тогда, когда наиболее эффективное из оставшихся мероприятий не может обеспечить экономический выигрыш (достигнут оптимум) или когда исчерпаны выделенные средства на повышение доступности.

#### **4. Методика проектирования фрагмента компьютерной сети**

Процесс проектирования носит итеративный характер и позволяет проектировщику вносить коррективы в структурно-функциональную организацию аппаратно-программного комплекса компьютерной сети следующими процедурами:

- 1) разработка  $i$ -ой структуры сети в терминах разомкнутых линейных однородных сетей массового обслуживания;
- 2) расчет характеристик  $i$ -ой структуры по теории массового обслуживания  $\{H_{si}\}$ : составление матрицы вероятностей передач, расчет узловых и сетевых характеристик.
- 3) выявление узких мест сети и их разгрузка. Сохранение  $i$ -го набора значений характеристик  $\{H_{si}\}$  в отчет/на экран  $\{H_{si}\} = \{W_i, U_i, M_i, L_i\}$  входящих в  $H_{si}(t) = \{SF_i\}$ ;
- 4) решение задачи синтеза структуры системы по обеспечению ее доступности:
  - a. анализ коэффициента оперативной готовности исходной системы  $i$ -ой структуры сети;
  - b. определение кратности отдельного резервирования, обеспечивающего требования доступности;

- с. определение коэффициента оперативной готовности синтезированной структуры сети  $R_{ti}$ ;
- 5) повтор предыдущего пункта до удовлетворения условия  $R_s \geq R_z$ , при этом дополняется  $i$ -й набор значений характеристик  $H(t)_i = \{SF_i, R_s \geq R_z\}$  надежностьвыми характеристиками;
  - 6) определение следующей потенциально подходящей структуры сети  $\{S_i\}$  по стоимости и повторение предыдущих пунктов для каждой из них; при этом дополняется  $i$ -й набор значений характеристик  $H(t)_i = \{SF_i, R_s \geq R_z, C_s\}$ ;
  - 7) диалог с проектировщиком, включающий ввод параметров /вывод проектировщику ряда  $i$  наборов характеристик  $\{H(t)\}_i = \{SF_i, R_{st} \geq R_z, C_s\}$ , для анализа проектных решений и выработки рекомендаций по изменению структуры проектируемой сети.

Стоимостная характеристика сети вычисляется как сумма стоимостей всех элементов сети:  $C_s = \sum_{i=0}^n C_i k_i$ .

Приведенный вариант обеспечения доступности может быть оптимизирован по стоимости.

Применение методики проводится на примере образовательной сети, имеющей несколько компьютерных классов.

В компьютерных классах находится по 10 рабочих станций, объединенных в сеть по технологии Fast Ethernet коммутаторами второго уровня.

Параметрический синтез проекта КС включает в себя:

- структурный синтез с выбором исходных параметров в диалоге с проектировщиком;
- параметрический синтез с определением значений параметров;
- разработка  $i$ -ой структуры сети в терминах ТМО;

Возможные структуры образовательной сети представлены на рис.4.1.

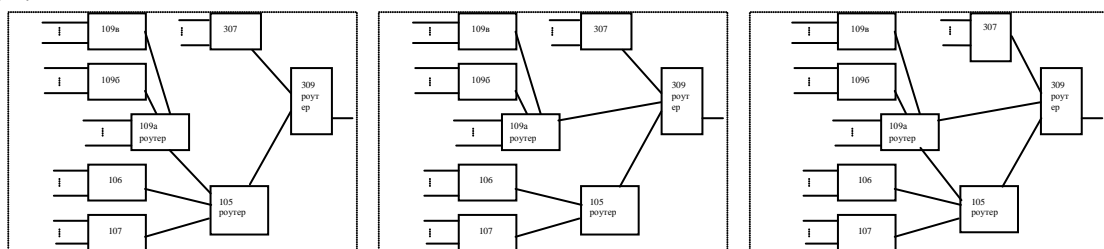


Рис. 4.1. Структуры сети «дерево», «звезда с периферией», «смешанная»

#### 4.1. Анализ характеристик функционирования с использованием теории массового обслуживания $\{H_{si}\}$

Аналитическое моделирование включает следующие шаги:

- разработка варианта структуры сети в терминах сетей массового обслуживания;



- расчет характеристик в терминах сетей массового обслуживания  $\{H_{si}\}$  этой структуры (составление матрицы вероятностей передач, выполнение условия отсутствия перегрузок, расчет узловых и сетевых характеристик).
- выявление узких мест сети – узлов с наибольшим значением числа заявок находящихся в очереди или среднего времени пребывания заявок узла сети массового обслуживания и их разгрузка путем перенаправления потоков, или увеличения скорости работы обслуживающего прибора. Сохранение набора характеристик  $\{H_{si}\}$  в отчете или вывод на экран  $\{H_{si}\}=\{W_i, U_i, M_i, L_i\}$  входящих в  $H_{si}(t) = \{SF_i\}$ ;

В соответствии с эквивалентным преобразованием рассматриваемые экспоненциальные разомкнутые СеМО представлены в виде независимых СМО, в которые поступают простейшие потоки заявок с интенсивностями  $\lambda_i = 0,03 \text{ с}^{-1}$ .

Средняя длительность обслуживания заявок  $b_i$  в СМО равна длительности обслуживания выходного интерфейса узла коммутации  $0,1488 \text{ с}^{-1}$ . Значения узловых и сетевых характеристик СеМО, сведены в таблицу 4.1.

Таблица.4.1. Значения сетевых характеристик аналитических моделей М/М/2 для указанных структур

Структура сети	Дерево	Звезда с периферией	Смешанная
Время ожидания СеМО, мкс	0,54	0,09	0,02
Время пребывания СеМО, мкс	21,79	17,98	17,9
Длина очереди СеМО	0.098	0.0165	0,0025
Число заявок СеМО	3,9	3,2372	2,149

#### **4.2. Имитационные эксперименты с самоподобным входным потоком**

Универсальным и наиболее эффективным методом исследования сложных систем со стохастическим характером функционирования является имитационное моделирование, предоставляющее возможность исследования систем любой сложности с любой степенью детализации и получения наиболее полных результатов.

Для оценки реальных процессов в сети при воздействии [2] отличных от экспоненциальных потоков, разработаны и исследованы имитационные модели в среде GPSS World.

Разработанные имитационные модели использованы для исследования реальной сети в случаях, когда входной поток имеет самоподобную структуру. Результаты представлены в таблице 4.2.

Оценка точности результатов имитационного моделирования (ИМ) по отношению к результатам аналитического моделирования (АМ), рассматриваемых в качестве эталонных, представлена в таблице 4.3

относительной погрешностью характеристик и составляет менее 3% и является приемлемой для расчетов.

Таблица.4.2. Значения сетевых характеристик имитационных моделей М/М/2 для указанных структур

Структура сети	Дерево	Звезда с периферией	Смешанная
Загрузка СеМО	0.604	0.618	0.974
Время ожидания СеМО, мкс	0.539	0.303	0.13
Время пребывания СеМО, мкс	21.79	18.432	18.35
Длина очереди СеМО	0.097	0.096	0.026
Число заявок СеМО	0.65	0.553	0.55

Таблица 4.3. Оценка точности результатов имитационного моделирования

Структура сети	Дерево	Звезда с периферией	Смешанная
Время пребывания /ср. значение ИМ, мкс	21.788	18.432	18.347
Время пребывания /ср. значение АМ, мкс	21,79	17,985	17,914
Относительная погрешность	0.00009	0.02487	0.0242

Таблица 4.4. Время пребывания в мкс заявки в различных структурах сети

$T_u$ , мкс	$\lambda$	Дерево	Звезда с периферией	Смешанная
$\alpha = 1.16$	18	21.298	18.057	18.123
$\alpha = 1.16$	9	21.357	18.114	18.204
$\alpha = 1.16$	6	22.127	18.608	18.185
$\alpha = 1.16$	5	22.725	19.794	18.412
$\alpha = 1.16$	4	25.997	23.569	18.982
$\alpha = 1.16$	3	60.192	76.339	21.288
$\alpha = 1.16$	2.5	494	1150	29.921
$\alpha = 1.16$	2.1	24227	70958	80.898
$\alpha = 1.2$	18	21.191	17.939	18.098
$\alpha = 1.2$	9	21.350	18.124	18.471
$\alpha = 1.2$	6	22.090	19.138	18.350
$\alpha = 1.2$	5	23.392	20.401	18.627
$\alpha = 1.2$	4	29.267	27.280	19.180
$\alpha = 1.2$	3	168.375	237.002	23.746
$\alpha = 1.2$	2.5	6363	33327	45.912
$\alpha = 1.2$	2.1	153793	190963	342.808

Зависимость времени пребывания заявок в сети с самоподобным входным потоком от интенсивности потока для Internet-трафика ( $\alpha = 1,16$ ) и Ethernet-трафика (параметр  $\alpha = 1,2$ ) представлены в таблице 4.4.

Проведенные имитационные эксперименты позволили выполнить детальное исследование характеристик сети с самоподобным входным потоком и выяснить, что повышение уровня связности стабилизирует время пребывания сети.

### **4.3. Синтез структуры сети, повышающий ее доступность**

Так как доступность сети в основном закладывается при проектировании, конструировании и изготовлении, то в проекте сети заранее предусматривается резерв для замены неисправного элемента исправным элементом. Это первичный метод повышения доступности сети.

Требуется ввести в структуру сети основу для последующего восстановления, используя метод дробного резервирования.

Существует практическая задача обеспечения доступности образовательной сети, обучающей студентов, слушателей построению компьютерной сети (цеховые условия эксплуатации), которая требует изменения структуры сети достаточно часто и на короткий срок – на время обучения (курса).

Для обеспечения требования доступности сети и соответствия потребностям заказчика необходимо внести в структуру сети резервы элементов: сетевых адаптеров, портов коммутаторов, линий связи, серверов и рабочих станций для обеспечения образовательных задач.

Анализ доступности исходной системы заключается в определении показателей доступности системы без резерва, при количестве резервных элементов  $M=0$  по критерию: коэффициента оперативной готовности больше или равного данному  $R_s \geq R_z$  и включает определение:

- ВБР системы  $P_s(t)$ ,
- коэффициент готовности элементов  $K_{ri} = \frac{1}{1 + T_{vi} \lambda_i}$ ,
- коэффициент оперативной готовности исходной системы  $R_s = K_{rs} P_s(t)$ .  
 $K_{rs} = \sum_i K_{ri}$ .

Структурная схема системы представляет собой соединение элементов сети учебных классов - рабочих станций, сетевых адаптеров, портов коммутаторов и линий связи.

Доступность системы описывается числом  $N$  элементов, временем непрерывной работы системы  $t$ , интенсивностью отказа элементов исходной системы равной  $\lambda=10^{-4}$ , средним временем восстановления исходной системы  $T_v=5$  часов.

Требуется определить:

- структурную схему системы, удовлетворяющую требованиям доступности,
- кратность отдельного резервирования, обеспечивающего требования доступности,
- показатели доступности системы: вероятность безотказной работы системы  $P_s(t)$ , коэффициент готовности системы  $K_{rs}$ , коэффициент оперативной готовности (КОГ) системы  $R_s$ .

Определяется кратность отдельного резервирования рабочих станций учебных классов количеством  $N=70, 60, 50, 40, 30, 20, 10$  обеспечивающая требование КОГ  $R_s(t) \geq 0,99$ .

Вероятность безотказной работы рабочей станции учебных классов при условии независимости отказов ее элементов равна  $p(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,001 * 120} = 0,988$ .

Для обеспечения требования КОГ  $R_s(t) \geq 0,99$  рабочих станций сети необходима кратность резервирования:

4/66, 3/57, 3/47, 3/37, 2/28, 2/18, 1/9.

Определяется кратность отдельного резервирования портов 16-ти и 24-ти портовых коммутаторов учебных классов, обеспечивающих требование КОГ  $R_s(t) \geq 0,99$ . Вероятность безотказной работы элемента  $p(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,001 * 120} = 0,99$ . Определение кратности отдельного резервирования и выигрыш  $G_p$  по ВБР представлены в таблицах 4.5 и 4.6.

Таблица 4.5

$p(t)$ элемента	$N$	$M$	$P_s(t)$	Выигрыш $G_p$	КОГ $R_{ri}$
0.99	16	0	0.8514	1	0.8510
0.99	16	1	0.9890	1.1616	0.9885
0.99	16	2	0.9994	1.1738	0.9989
0.99	16	3	0.9999	1.1744	0.9994
0.99	16	4	0.9999	1.1744	0.9994

Таблица 4.6

$p(t)$ элемента	$N$	$M$	$P(t)$	Выигрыш $G_p$	КОГ $R_{ri}$
0.99	24	0	0.7856	1	0.7852
0.99	24	1	0.9761	1.2424	0.9756
0.99	24	2	0.9982	1.2705	0.9977
0.99	24	3	0.9999	1.2726	0.9994
0.99	24	4	0.9999	1.2727	0.9994

Классы соединены в сеть по 12 рабочих станций. 12 портов 16-ти портовых коммутаторов и 12 портов 24-х портовых коммутаторов задействованы для основной нагрузки. Оставшиеся порты  $16-12=4$  и  $24-16=8$  можно использовать для агрегирования и резервирования.

Для обеспечения требования доступности  $R_s(t) \geq 0,99$  кратность резервирования портов 16-ти и 24-ти портовых коммутаторов равна 2/14, 2/22.

Определяется кратность отдельного резервирования портов всех коммутаторов сети с общим числом портов равным 160, обеспечивающих требование к КОГ  $R_s(t) \geq 0,99$ . Вероятность безотказной работы элемента  $p(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,001 * 120} = 0,99$ ; коэффициент готовности  $K_{ri}$  равен 0,0005.

Для обеспечения требования доступности  $R_s(t) \geq 0,99$  кратность резервирования всех портов коммутаторов равна 5/155.

Определяется кратность отдельного резервирования количества коммутаторов сети, обеспечивающих требование доступности  $R_s(t) \geq 0,99$ .

Вероятность безотказной работы коммутатора  $p(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,001 * 120} = 0,99$ ; коэффициент готовности  $K_{ri}$  равен 0,0005.

Для обеспечения доступности  $R_s(t) \geq 0,99$  кратность резервирования всех коммутаторов равна 1/9.

Для линий связи топологии сети «дерево» и «звезда» Кратность 3/74 обеспечивает КОГ  $R_s(t) \geq 0,99$ .

Для линий связи топологии сети «смешанная» кратность 3/75 обеспечивает КОГ  $R_s(t) \geq 0,99$ .

Для агрегированного соединения Кратность 1/1 обеспечивает КОГ  $R_s(t) \geq 0,99$ .

Рассчитанные выше кратности отдельного резервирования в структурах «дерево», «звезда с периферией» не обеспечивают требуемой доступности  $R_s \geq 0,99$ .

Потребуется агрегирование и увеличение резерва портов и линий связи в структурах «дерево», «звезда с периферией», обеспечивающие требуемую надежность  $R_s \geq 0,99$ .

Увеличение кратности до 4/77 портов, 4/70 станций, 4/77 линий связи обеспечит требуемое требование.

Рассчитанные выше кратности отдельного резервирования в структуре «смешанная» не обеспечивают требуемой безотказности  $R_s \geq 0,99$ . Потребуется увеличение резерва портов и линий связи и агрегирование в системе «смешанная», обеспечивающие требуемую надежность  $R_s \geq 0,99$ . Увеличение кратности до 4/78 портов, 4/70 станций, 4/78 линий связи в системе «смешанная» удовлетворит требуемому ограничению (рис. 4.4).

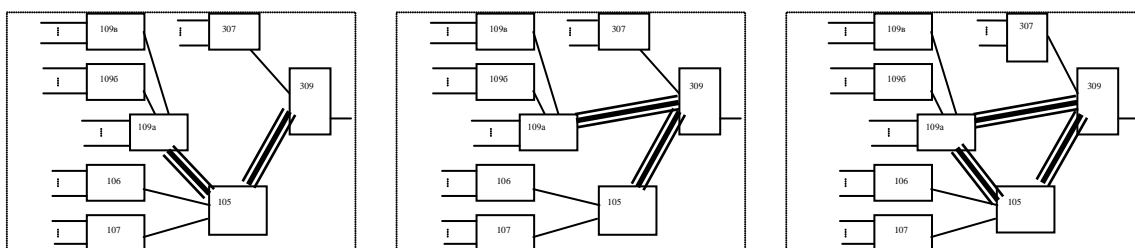


Рис. 4.4 Типовые топологии сети с агрегированием:

Кратность резервирования элементов, обеспечивающих доступность системы  $R_s \geq 0,99$ , заданной требованиями учебного процесса и выигрыш по вероятности безотказной работы представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7.

Система	«Дерево», «звезда с периферией» с агрегированием	«смешанная» с агрегированием
Выигрыш	10.944	11.123
Кратность резервирования станций	4/70	4/70
Кратность резервирования портов	4/77	4/78
Кратность резервирования линий связи	4/77	4/78

#### 4.4. Определение значений задаваемых показателей надежности и выбор варианта построения КС

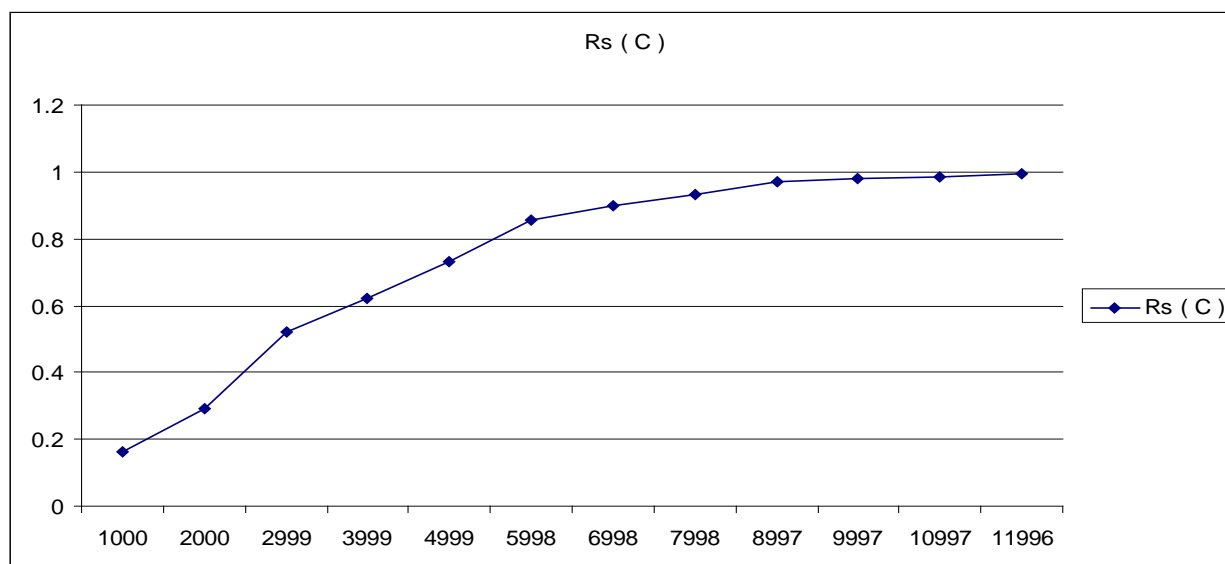


Рис.4.5. Зависимость уровня надежности  $R$  от стоимости  $C$  вариантов сети «звезда с периферией», «дерево», «смешанная».

Реализована схема выбора уровня доступности вариантов КС от стоимости следующими шагами:

1. определен вариант построения КС, в котором резерв отсутствует;
2. рассмотрены варианты, в каждом из которых введено одно резервное устройство одного типа, для каждого из этих вариантов подсчитаны приращения показателя доступности изделия  $DR_i$  и его стоимости  $DC_i$ ;
3. выбран вариант с максимальным отношением  $DR_i/DC_i$ ; (резерв, принятый в данном варианте, в дальнейшем не пересматривается);

4. рассмотрены варианты, в каждом из которых введено еще по одному устройству каждого типа, включая уже выбранный вариант с добавленным резервом.

Процедуры повторены по пунктам «2» и «3». При этом последовательность выбранных вариантов образует зависимость доступности от стоимости. Результат выбора уровня надежности от стоимости вариантов сети при одинаковых стоимостях элементов сети показан на рис.4.5. При указанных условиях уровень надежности проекта сети выбирается из диапазона, удовлетворяющего ограничениям: показатель доступности не ниже минимального и/или стоимость не выше заданной:  $R_s \geq R_{min}; C(R) \leq C_z$ .

#### 4.5. Диалог с проектировщиком включающий ввод параметров и вывод характеристик

Диалог с проектировщиком осуществляет ввод параметров и вывод данных анализа характеристик структур сети и включает в себя:

- определение количества потенциально подходящих структур сети  $\{S_i\}$  по стоимости и повторение всех пунктов для каждой из них;  $H(t)_i = \{SF_i, R_s \geq R_z, C_s\}$ ;
- вывод ряда наборов характеристик  $\{H(t)\}_i = \{SF_i, R_s \geq R_z, C_s\}$ .

Наибольший рост характеристик дают вложения в узел 105 и 109а и изменение топологии на «смешанную» с агрегированием.

Улучшение времени пребывания возможно с помощью увеличения скорости работы в узлах сети и добавления резервных линий связи. На основании этих данных рассчитывается время пребывания и стоимость для проекта структуры сети, которые представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8

Характеристика	Структура Дерево	Звезда с периферией	Структура смешанная
Время ожидания, мкс $W_i$	0.539	0.303	0.130
Время пребывания, мкс $U_i$	21.788	18.194	18.347
Ср. длина очереди $L_i$	0.097	0.054	0.026
Ср. число заявок в сети $M_i$	0.654	0.546	0.550
Выигрыш от резерва	10.944	10.944	11.123
Стоимость сетевого оборудования, у.е.	3000	3000	3000
Стоимость работ по сегментированию, настройке, у.е.	1000	1000	1000
Стоимость сетевого оборудования и работ, у.е.	4000	4000	4000

Рассмотренные методы проектирования применяются при изменении топологии и состава сетевых устройств. Методы реализованы в

специализированном программном обеспечении (СПО), применяемом в организации дополнительного профессионального образования для повышения качества обучения. СПО является платформонезависимым и позволяет проводить процедуры синтеза параметров и анализа характеристик фрагментов компьютерной сети на стадии проектирования.

### **Литература**

1. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей [Текст] — М.: Техносфера, 2003 .— 512 с.: ил .— Библиогр.: с. 479-506 .— ISBN 5-94836-011-3.
2. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования Основы автоматизированного проектирования.— 4-е изд., перераб. и доп .— М.: Издательство МГТУ им Н. Э. Баумана, 2009 .— 430, [2] с.: ил .— (Информатика в техническом университете) .— Библиогр.: с. 426.- Предм. указ.: с. 427-431 .— ISBN 978-5-7038-3275-2 ((в пер.)).
3. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем [Текст]: учебное пособие — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009 .— 363, [2] с.: ил .— с. 353. - Алф. указ.: с. 354-357 .— ISBN 978-5-7577-0336-7((в пер.)).
4. Алиев Т. И. Сети ЭВМ и телекоммуникации, СПб: СПбГУ ИТМО, 2011, - 400 с,
5. Олифер В. Г., Олифер Н. А., Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы .— 4-е изд .— СПб. [и др.]: Питер, 2011 .— 943, [1] с.: ил .— (Учебник для вузов) .— Библиогр.: с. 917.- Алф. указ.: с. 918-943 .— ISBN 978-5-49807-389-7((в пер.)).
6. Столлингс В. Современные компьютерные сети, 2-е издание Энциклопедия, СПб: Питер, 2003, с.-782 с.
7. Таненбаум Э. Компьютерные сети, 4-е издание, Классика computer science, Питер, 2008, -992 с.
8. Бражник А.Н., Имитационное моделирование: возможности GPSS WORLD [Текст] — СПб.: Реноме, 2006 .— 438, [2] с.: ил .— Библиогр.: с. 434. - Алф. указ.: с. 435-438 .— ISBN 5-98947-036-3((в пер.)).
9. Крылов В.В., Самохвалов С.С. Теория телетрафика и её приложения. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.: ил.
10. Острейковский В. А., Теория надежности / — М.: Высшая школа, 2008 .— 463 с: ил .— Прил.: с. 427-453. — Библиогр.: с. 457 .— ISBN 5-06-004053-4.
11. Половко А. М. Гуров С. В., Основы теории надежности. Практикум — Изд. 2-е, перераб. и доп .— СПб.: БХВ-Петербург, 2008 .— 702 с.: ил .— Библиогр.: с. 689-698. - Предм. указ.: с. 699-702 .— ISBN 978-5-94157-541-1((в пер.)).





В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

---

#### КАФЕДРА АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Кафедра Аппаратно-программных комплексов вычислительной техники осуществляет переподготовку и повышение квалификации специалистов с широким спектром образовательных программ по следующим направлениям:

- Системный инженер - специалист по эксплуатации аппаратно-программных комплексов вычислительной техники
- Системный администратор - специалист по эксплуатации компьютерных сетей и сопровождению программ 1С:Предприятие
- Обслуживание, диагностика и ремонт персональных компьютеров
- Администрирование вычислительных сетей
- Конфигурирование, администрирование и программирование в среде 1С:

На кафедре ведется подготовка магистров по направлению 230100 «Информатика и вычислительная техника»:

магистерская программа – «Системное администрирование аппаратно-программных комплексов и сетей» - 230100.68.13.

Кафедра является выпускающей по направлению 230100 «Информатика и вычислительная техника» на факультете ВиЗО.

Светлана Михайловна Платунова

Методы проектирования фрагментов компьютерной сети

Учебное пособие  
по дисциплине «Корпоративные сети»

В авторской редакции  
Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО  
Зав. РИО  
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99  
Подписано к печати  
Заказ №  
Тираж 100  
Отпечатано на ризографе

Н.Ф. Гусарова

**Редакционно-издательский отдел**  
Санкт-Петербургского национального  
исследовательского университета  
информационных технологий, механики  
и оптики  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

