

Петрозаводский государственный  
университет

# Планирование мощности компьютерных систем

Методические указания  
для выполнения практических заданий

Петрозаводск  
2012

Печатаются по решению кафедры информатики и математического обеспечения от 01.11.2011

*Составитель:*

О. Ю. Богоявленская, кандидат технических наук

## 1. Задача планирования мощности

Планирование мощности некоторой системы производства или обслуживания является обычным видом деятельности во многих отраслях. При этом мощностью системы называется ее максимальная производительность. Планирование мощности — это предсказание времени в будущем, когда система достигнет насыщения, а также поиск наилучшего по критерию цена-качество способа устранения насыщения на столь возможно долгий срок. Предсказание должно исходить из возможной эволюции нагрузки системы (как для исполняемых ею, так и для возможных новых функций) и желаемого уровня обслуживания. В дальнейшем будем рассматривать проблемы планирования мощности компьютерных систем.

Предсказание производительности систем является самым важным этапом планирования мощности. Предсказывая момент насыщения системы, необходимо ответить на следующие вопросы:

1. Почему произошло насыщение?
2. В какой части системы в условиях насыщения запрос или задание пользователя проводит наибольшую часть времени обслуживания?
3. Какова лучшая по критерию цена-качество альтернатива, позволяющая устранить насыщение системы.

В этом контексте важную роль играет определение *узкого места* системы, т. е. такой подсистемы, к которой

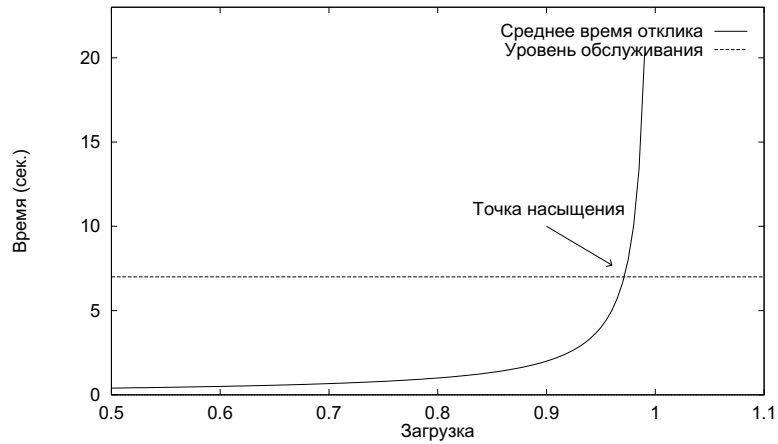


Рис. 1. Зависимость времени отклика от загрузки системы

задания предъявляют наибольшие требования к обслуживанию. Будем называть загрузкой системы (или подсистемы) долю времени, когда система занята обслуживанием заданий, по отношению ко всему периоду наблюдения. Как правило, загрузка узкого места в условиях насыщения близка к 100%.

На рис. 1 представлено время отклика однопроцессорной системы с бесконечной очередью как функция загрузки системы. Характер зависимости весьма типичен для характеристик производительности. Попадая в некоторую область, система нелинейно стремится к состоянию насыщения, что весьма повышает важность научно обоснованного прогноза. Так, на рис. 1 время отклика при некотором значении загрузки превышает заданный уровень в 7 сек. Задача планирования мощности — предсказать этот момент, указать причину роста времени отклика и возмож-

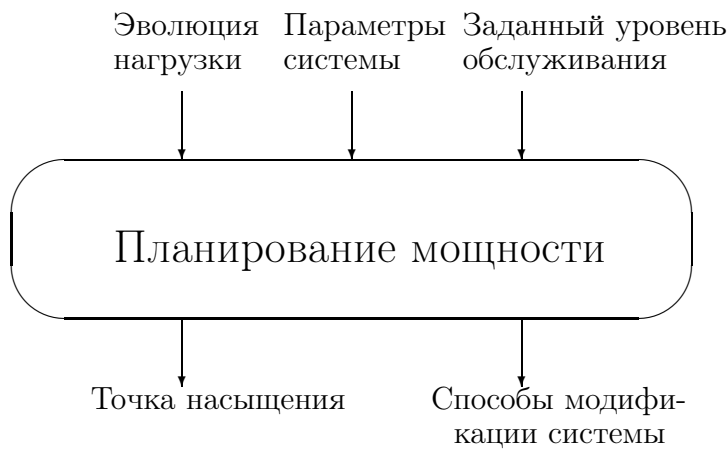


Рис. 2. Концепция планирования мощности

ные способы уменьшить эту величину.

Общая схема процесса планирования мощности представлена на рис. 2. Эволюция нагрузки и параметры системы являются исходными данными для прогноза ее производительности. Сопоставление результатов прогнозирования с заданным уровнем обслуживания определяет точку насыщения системы, а дальнейший анализ выявляет альтернативные способы модификации системы, сравнение которых производится по критерию цена-качество.

**Задача 1.** Сделайте общее описание известной Вам информационной или вычислительной системы. Для выбранной Вами системы составьте описание нагрузки, предложите прогноз ее эволюции. Сформулируйте для этой системы задачу планирования мощности.

## 2. Методология планирования мощности

Общий метод решения задач планирования мощности представлен на рис. 3. В первую очередь, отметим, что между административным планом развития системы и планированием мощности существует весьма тесная связь. Конечная цель планирования мощности — обеспечить выполнение планов развития. План развития системы определяет элементы возможной эволюции нагрузки, параметров системы и уровней обслуживания.

Первый этап методологии — описание текущего состояния системы. Здесь первым шагом является описание общей архитектуры компьютерной системы (в частности, аппаратного обеспечения, операционных систем, математического обеспечения, используемых приложений и т.п.). Также определяются временные окна в работе системы (например, часы пиковой нагрузки), измеряется текущий уровень обслуживания. В совокупности эти данные составляют *общее описание системы*.

Второй этап — характеристика нагрузки. Целью характеристики нагрузки является построение модели нагрузки. Эта задача является из одной самых сложных и трудоемких в планировании мощности. Она предполагает общую классификацию всей нагрузки системы и получение числовых характеристик каждого из выделенных однородных классов. Как правило, модель нагрузки не является точной копией реальной нагрузки, однако она должна позволять строить адекватные модели производительности. Основными числовыми характеристиками классов нагрузки являются: интенсивность поступления заданий и их требования к обслуживанию. Более подробно методы

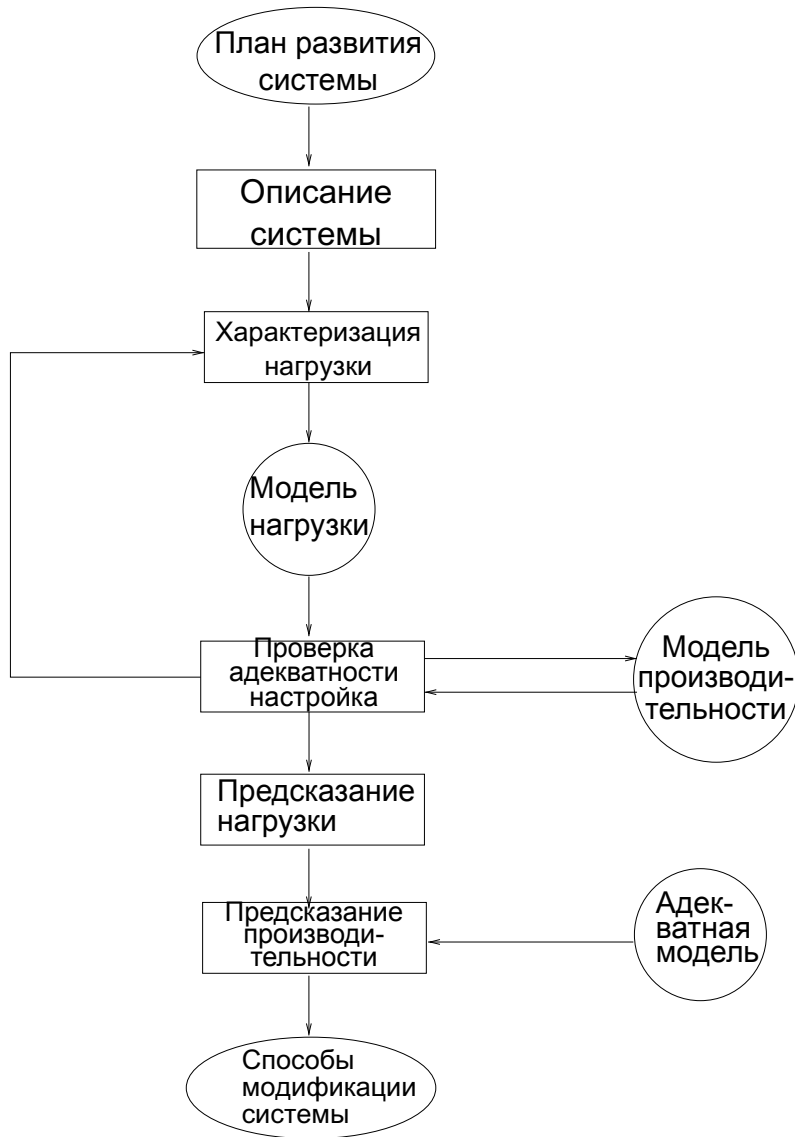


Рис. 3. Методология планирования мощности

характеризации нагрузки описаны в монографиях [1] и [2].

Третий этап — предсказание нагрузки. Важным источником сведений для предсказания нагрузки является административный план развития, определяющий пути развития существующих классов нагрузки или возможности возникновения новых. Здесь также могут использоваться методы анализа временных рядов с целью предсказания будущих значений нагрузки на основе наблюдений прошлого.

Следующий (четвертый) этап — предсказание производительности. Предсказание строится на основе модели производительности.

**Задача 2.** Для выбранной Вами в Задаче 1 системы постройте ее подробное общее описание и предложите модель нагрузки. Составьте административный план развития системы и на его основе уточните составленный Вами прогноз эволюции модели нагрузки.



### 3. Идентификация исходных параметров моделей производительности

Модель производительности представляет поведение реальной системы в терминах ее производительности. Основные вопросы, возникающие при идентификации параметров реальных систем:

- Какие информационные источники доступны для определения входных параметров модели?
- Какие методы применяются для идентификации?

Основными источниками информации о параметрах являются множество измерений, сделанных по результатам наблюдений за системой, а также документация используемого программного и аппаратного обеспечения. Однако, как правило, эти наборы данных требуют дальнейшей обработки для получения оценок параметров моделей производительности. Собственно процесс измерений состоит из трех основных шагов.

1. *Спецификация измерений.* На этом шаге определяется какие переменные будут измеряться. Например, если параметром модели производительности является интенсивность потока транзакций, поступающих в систему, необходимо фиксировать число транзакций, поступающих за время наблюдения.
2. *Определение инструментов измерения и сбор данных.* Определив наблюдаемые переменные, необходимо выбрать и установить в системе средства их

измерения. С их помощью осуществляются наблюдения и фиксируются данные измерений.

3. *Анализ и преобразование данных.* Измерительные системы часто накапливают обширные массивы данных, детально описывающие функционирование системы. Эти массивы данных должны быть преобразованы в оценки исходных параметров модели производительности, для чего используются статистические методы и методы теории идентификации [4] — [6].

Монитором называется средство измерения активности компьютерной системы. Идеальный монитор, наблюдая за изучаемой системой, не вмешивается в ее работу и не влияет на ее производительность. По методам реализации мониторы делятся на три следующих класса.

**Аппаратный монитор** проверяет состояние системы, используя электронные зонды, интегрированные в ее аппаратное обеспечение, и записывает результаты измерений. Электронные зонды могут определять состояние регистров, подсистемы распределения памяти, каналов ввода-вывода. Аппаратные мониторы, являясь внешними устройствами, не потребляют ресурсы системы, переносимы и не зависят от операционных систем. При этом их использование требует больших затрат труда и высокой квалификации.

**Программный монитор** является набором утилит, введенных в программное обеспечение и регистрирует статус событий, происходящих как в аппаратном обеспечении, так и в выполняемых модулях. Он может записывать любые сведения доступные приложениями и операционной системе, является гибким, избирательным, легко настраивается. Однако, используя для своей работы ресурсы наблюдаемой системы, такой монитор может существенно

влиять на ее работу и зависит от используемой операционной системы. Программные мониторы разделяют на два подкласса: системы счетов и программные анализаторы.

**Гибридные мониторы** — комбинация программных и аппаратных мониторов. В основном программные модули определяют события и размещают информацию о них в специальные регистры мониторинга. Аппаратные компоненты выполняют функции записи данных и предотвращения коллизий устройств ввода-вывода. Использование гибридных мониторов требует специального аппаратного обеспечения, интегрированного в архитектуру системы.

Способ сбора данных монитором называется режимом мониторинга. Используются два основных режима.

**Режим слежения.** Монитор в режиме слежения собирает данные о событиях в системе. Как правило, это код, интегрированный в операционную систему. При обнаружении события им вызывается подпрограмма, генерирующая запись в буфере, который затем переносится на жесткий диск. Если интенсивность событий велика, то монитор может породить неприемлемые накладные расходы и/или пропускать часть событий из-за низкого быстродействия системы. Это основной недостаток режима слежения, так как монитор не может управлять частотой регистрируемых событий.

**Режим выборки.** В этом режиме монитор регистрирует информацию о состоянии системы в определенные промежутки времени. Подпрограммы сбора данных активизируются по прерыванию таймера, осно-

ванного на системных часах, в моменты, называемые сессиями мониторинга. Накладные расходы зависят от количества наблюдаемых переменных и величины интервала между последовательными сессиями, которые контролируются экспериментатором. Увеличения интервала между сессиями мониторинга может привести к потере данных о редких событиях.

**Задача 3.** Для выбранной Вами в задаче 1 системы определите основные параметры модели производительности, сформулируйте обоснованную спецификацию измерений, необходимых для их идентификации, укажите наиболее подходящий для этого монитор.

## 4. Модель производительности. Однопроцессорная вычислительная система

Общая схема построения модели производительности представлена на рис. 4.

**Постановка задачи:** Пусть в некоторую вычислительную систему поступает в среднем 30 транзакций в секунду. Обработка каждой транзакции на центральном процессоре требует в среднем 20 миллисекунд. Какова текущая производительность системы, а именно загрузка процессора, среднее время отклика системы, ее пропускная способность и средняя длина очереди? Какова будет производительность системы, если ее нагрузка увеличится на 50%? Какова будет производительность системы, если ее нагрузка увеличится на 50% и одновременно центральный процессор также будет усилен на 50%?

Обозначим интенсивность потока транзакций  $\lambda$ , а вели-

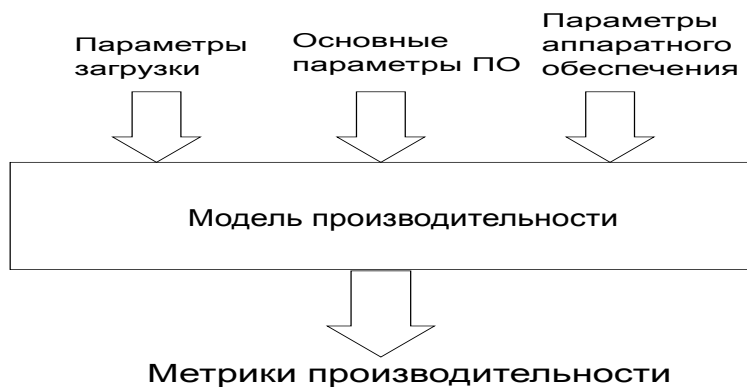


Рис. 4. Модель производительности

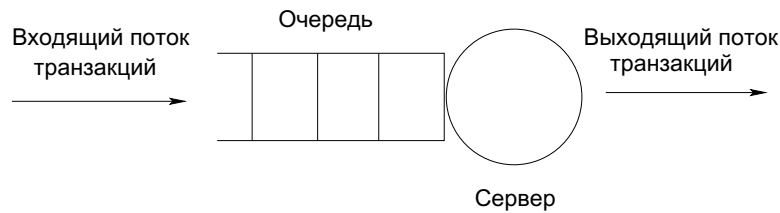


Рис. 5. Однопроцессорная система

чину, обратную среднему времени обслуживания,  $\mu$ . Очевидно,  $\lambda = 30$  tps (транзакций в секунду) и  $\mu = 50$  tps. Графическое представление этой системы изображено на рис. 5<sup>1</sup>. Одна из классических задач теории массового обслуживания (задача об очереди  $M|M|1$  — см., например, [3]) позволяет получить распределение числа транзакций в системе:

$$P_n = P_0 \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^n, \quad (1)$$

где

$$P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu}$$

— вероятность простоя системы. Таким образом, обозначив  $\rho = \lambda/\mu$ , получим

$$P_n = (1 - \rho)\rho^n. \quad (2)$$

Загрузка системы (система загружена, если в ней есть хотя бы одна заявка) определяется в виде

$$U = 1 - P_0 = 1 - (1 - \rho) = \rho = 60\%.$$

<sup>1</sup>Задача решается в предположении, что входящий поток транзакций является пуассоновским и времена их обслуживания распределены по показательному закону.

Заметим, что если  $\lambda > \mu$  или, что то же самое,  $\rho > 1$ , то распределение (1) не существует.

Пропускная способность системы — это средняя интенсивность, с которой заявки покидают систему. Следовательно,

$$\begin{aligned} T &= 0P_0 + \mu P_1 + \mu P_2 + \dots = \\ &= \mu(1 - P_0) = \mu\rho = \lambda = 30 \text{ tps.} \end{aligned} \quad (3)$$

Заметим, что речь идет о средних значениях, и очевидно, что все заявки, поступающие в систему, покидают ее.

Средняя длина очереди также определяется распределением (1).

$$N_q = \sum_{n=0}^{\infty} nP_n = (1 - \rho) \frac{\rho}{(1 - \rho)^2} = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}. \quad (4)$$

Таким образом,  $N_q = 1.5$  транзакции.

Весьма важной характеристикой производительности является среднее время отклика. Это время, которое заявка проводит в системе. Очевидно, что эта величина состоит из двух компонент: времени ожидания и времени обслуживания. Мы можем вычислить эту величину следующим образом:

$$R = \frac{1}{\mu} N_q + \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu - \lambda} = \frac{1}{20} \text{ сек.} \quad (5)$$

Итак, мы ответили на первый из поставленных вопросов, определив текущую производительность системы. Теперь перейдем к анализу ее развития. Если нагрузка возрастет на 50%, это означает, что  $\lambda' = 45$  tps. Используя приведенные выше формулы, получим:

$$U = \frac{\lambda'}{\mu} = 90\%,$$

$$T = \lambda' = 45 \text{ tps},$$
$$N_q = \frac{\lambda'}{\mu - \lambda'} = 9 \text{ транзакций},$$
$$R = \frac{1}{\mu - \lambda'} = \frac{1}{5} \text{ сек.}$$

Заметим, что при увеличении нагрузки на 50%, загрузка процессора и пропускная способность системы также возросли на 50%. Эти две метрики иногда называют метриками администратора, так как именно они показывают, насколько эффективно используется ресурс системы. Однако средняя длина очереди возросла на 500%, а среднее время отклика — на 300%. Две последние метрики часто называют метриками пользователя или потребителя, так как именно по ним судят о качестве обслуживания в системе. Поэтому администратор должен находить баланс между эффективностью использования ресурсов и удобством пользователей. Числовым выражением такого баланса является уровень обслуживания.

Посмотрим, как изменится ситуация, если будет проведена запланированная модификация системы: увеличение мощности центрального процессора на 50%. Для нового процессора  $\mu = 75 \text{ tps}$ . Тогда

$$U = \frac{\lambda'}{\mu'} = 60\%,$$
$$T = \lambda' = 45 \text{ tps},$$
$$N_q = \frac{\lambda'}{\mu' - \lambda'} = 1.5 \text{ транзакции},$$
$$R = \frac{1}{\mu' - \lambda'} = \frac{1}{30} \text{ сек.}$$



---

Модификация сохраняет исходный уровень загрузки процессора, пропускная способность системы увеличивается в 1.5 раза, средняя длина очереди также остается на прежнем уровне, а среднее время отклика уменьшается на 33%. Поэтому можно сказать, что такая модификация несколько улучшает уровень обслуживания.

**Задача 4.** Рассмотрим вновь однопроцессорную модель, описанную выше:

- а) Как изменятся метрики производительности системы, если ее нагрузка увеличится в  $N/10$  раз, а мощность центрального процессора в  $N/10 + 1$  раз? ( $N = 1 \dots 25$  — номер варианта.)
- б) Пусть  $p\%$  пользователей системы начали использовать новое приложение и больше не обращаются к системе. Администрация решила установить менее мощный центральный процессор. Какой должна быть минимальная мощность нового процессора, для того чтобы среднее время отклика системы не превысило  $1/20$  сек.?  $p = 3N$ .
- в) Предположим, что центральный процессор системы был усилен на  $q\%$ . Какое минимальное увеличение нагрузки приведет к тому, что среднее время отклика превысит  $1/20$  сек.?  $q = 4N$ .

## 5. Модель центрального сервера

**Постановка задачи:** *Рассмотрим сервер рабочих станций, состоящий из одного ЦП и двух дисков — медленного и быстрого. Из-за ограничения производительности сервера только два пользователя могут обслуживаться им одновременно. Однако потребность в системе высока, поэтому в ней практически всегда обслуживаются два пользователя. Транзакции поочередно обращаются к процессору и дискам. "Типичная транзакция" требует в среднем 10 сек. времени ЦП, равновероятно обращается к медленному или к быстрому диску, требуя 20 сек. на быстром диске и 30 сек. на медленном.*

*Какова текущая производительность системы? Как изменится производительность системы, если код обработки транзакций на ЦП будет модифицирован и среднее время обработки транзакции сократится на 33%? Как следует распределить файлы между дисками?<sup>2</sup>*

Составим формальное описание системы. Мы предполагаем, что потребность в системе высока, то есть как только одна транзакция покидает сервер, ее место сразу же занимает другая. Поэтому можно считать, что система является замкнутой, то есть две обслуживаемые ею транзакции поочередно переходят от процессора на диск и обратно. Каждое устройство имеет отдельную очередь.

Средние интенсивности обслуживания транзакций: на ЦП  $\mu_c = 6$  tpm (транзакций в минуту), на медленном диске  $\mu_s = 2$  tpm и на быстром диске  $\mu_f = 3$  tpm. Маршрутизация транзакций между дисками производится с вероят-

---

<sup>2</sup>Задача решается в предположении, что времена обслуживания транзакций на элементах системы подчиняются показательному закону распределения.

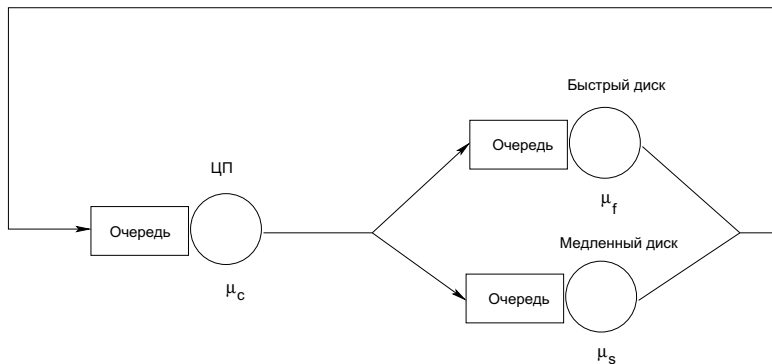


Рис. 6. Центральный сервер

ностями  $p$  и  $1 - p$ ,  $p = 1/2$ . Уровень мультипрограммирования (среднее число одновременно обслуживаемых транзакций) равен 2. Графически эта система представлена на рис. 6.

Следующий шаг — определение и описание возможных состояний системы. Определим вектор  $(n_c, n_f, n_s)$ . Его координаты соответствуют устройствам и равны числу обращающихся к нему транзакций. Очевидно,  $n_c + n_f + n_s = 2$ . Например, если система находится в состоянии  $(2\ 0\ 0)$ , то это означает, что обе транзакции обращаются к ЦП. Одна из них обслуживается, а вторая ожидает в очереди.

Определив пространство состояний и интенсивности переходов, возможных между ними, получим систему уравнений Колмогорова. Однако прямое решение такой системы может быть затруднительным. В некоторых случаях бывает возможно преобразовать исходную систему уравнений в систему уравнений локального равновесия. В такой системе потоки в состояние и из него разделяются, их части приравниваются друг к другу.

В рассматриваемой нами задаче система уравнений локального равновесия имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\mu_f P_{110} &= \mu_c p P_{200} \\ \mu_s P_{101} &= \mu_c (1-p) P_{200} \\ \mu_f P_{020} &= \mu_c p P_{110} \\ \mu_s P_{011} &= \mu_c (1-p) P_{110} \\ \mu_f P_{011} &= \mu_c p P_{101} \\ \mu_s P_{002} &= \mu_c (1-p) P_{101}\end{aligned}\tag{6}$$

Обозначим  $U_f = \mu_c p / \mu_f$  и  $U_s = \mu_c (1-p) / \mu_s$ . Тогда решение системы (6) будет иметь вид:

$$\begin{aligned}P_{110} &= U_f P_{200} \\ P_{101} &= U_s P_{200} \\ P_{020} &= U_f^2 P_{200} \\ P_{011} &= U_s U_f P_{200} \\ P_{002} &= U_s^2 P_{200}\end{aligned}\tag{7}$$

Вероятность  $P_{200}$  находится из условия нормировки:

$$P_{200} = (1 + U_f + U_s + U_f^2 + U_s U_f + U_s^2)^{-1}.$$

Теперь определим метрики производительности системы. Начнем с быстрого диска. Загрузка быстрого диска определяется теми состояниями, в которых на быстром диске обслуживается транзакция. Это состояния  $(1\ 1\ 0)$ ,  $(0\ 2\ 0)$  и  $(0\ 1\ 1)$ . Таким образом, загрузка быстрого диска равна:

$$U^f = P_{110} + P_{020} + P_{011}.$$

---

Определение загрузки позволяет легко найти пропускную способность быстрого диска:

$$T^f = \mu_f U^f.$$

Средняя длина очереди к быстрому диску также определяется полученным распределением:

$$N_q^f = 1P_{110} + 2P_{020} + 1P_{011}.$$

Среднее время отклика, согласно модифицированному закону Литтла:

$$R^f = \frac{N_q^f}{T^f}.$$

Характеристики производительности остальных двух устройств вычисляются аналогично. Более подробный анализ этой задачи можно найти в монографии [1, Глава 5].

**Задача 5.** Будем рассматривать модель центрального сервера, описанную выше.

- а) Найдите числовые значения метрик производительности всех трех устройств.
- б) Дайте ответ на вопросы, указанные в постановке задачи.
- в) На сколько изменится производительность системы, если производительность процессора возрастет на  $p\%$ , а  $q\%$  файлов будут перемещены с медленного диска на быстрый?  $p = 4N, q = 2N$ .

# Библиографический список

- [1] Menasce D., Almeida V. A. F., Dowdy L. W. Capacity Planning and Performance Modeling. From Mainframes to Client-Server Systems. New-Jersey: Prentice-Hall Inc., 1994.
- [2] Jain R. The Art of Computer System Performance Analysis. John Wiley&Sons Inc., 1988.
- [3] Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания. М.: Радио и связь, 1987. 336 с.
- [4] Кендалл М., Стюарт А. Статистические выводы и связи. М.: Наука, 1973. 900 с.
- [5] Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
- [6] Льюинг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 456 с.

Учебное издание

**Планирование мощности  
компьютерных систем**

Методические указания  
для выполнения практических заданий

Составитель:  
**Богоявленская Ольга Юрьевна**

Редактор Т. Н. Музалева

ЛР ИД №02969 от 06.19.2000  
Гигиенический сертификат №10. КЦ 34.953. П.00136.03.99  
от 05.03.99

Подписано в печать 03.12.2002.

Формат 60x84 1/16. Бумага газетная.

Офсетная печать. 0.8 уч.-изд.л. 6 усл. кр.-отт.

Тираж 50 экз. Изд № 197

Петрозаводский государственный университет  
Типография Издательства Петрозаводского  
государственного университета  
185640, Петрозаводск, пр. Ленина, 33