

УДК 681.324

**В.Я. Воропаева, В.Ф. Шапо**

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

кафедра автоматизации и телекоммуникаций

Одесская национальная морская академия, г. Одесса

кафедра теории автоматического управления и вычислительной техники

E-mail: [voropayeva@meta.ua](mailto:voropayeva@meta.ua), [stani@te.net.ua](mailto:stani@te.net.ua)**АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К СОЗДАНИЮ СЕРВЕРНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРЕДПРИЯТИЙ****Abstract**

*Voropayeva V.Y., Shapo V.F. Analysis of demands to the server subsystem creating for enterprises information systems building. The problems and questions of server subsystem creating are discussed. The servers features depending on complex work loading are analyzed. The criteria and principles of server subsystem building are proposed.*

**Keywords:** server subsystem, RAID-array, file server, SQL-server, blade-server, scaleableness, moduleness, productivity, reliability.

**Анотація**

*Воропаєва В.Я., Шапо В.Ф. Аналіз вимог до серверної підсистеми при створенні інформаційних систем підприємства. Розглянути проблеми і питання створення серверних підсистем. Проаналізована залежність показників сервера від комплексного робочого навантаження. Запропоновані критерії і принципи побудови серверних підсистем.*

**Ключові слова:** серверна підсистема, RAID-масив, файловий сервер, SQL-сервер, blade-сервер, масштабованість, модульність, продуктивність, надійність.

**Аннотация**

*Воропаева В.Я., Шапо В.Ф. Анализ требований к серверной подсистеме при построении информационных систем предприятия. Рассмотрены проблемы и вопросы создания серверных подсистем. Проанализирована зависимость показателей сервера от комплексной рабочей нагрузки. Предложены критерии и принципы построения серверных подсистем.*

**Ключевые слова:** серверная подсистема, RAID-массив, файловый сервер, SQL-сервер, blade-сервер, масштабируемость, модульность, производительность, надежность.

**Общая постановка проблемы.** Информационная система (ИС) современного предприятия обслуживает потоки коллективно используемых данных: описание и анализ технологических процессов, документооборот, движение товарных и материальных ценностей, статистику и анализ управленческой деятельности, бухгалтерскую отчетность, распределение человеческих, материальных, товарных, финансовых и других ресурсов и т. д. На серверную подсистему предприятий возлагается организация доступа к корпоративной электронной почте и Интернет, распределенная обработка данных, управление локальными и региональными сетями, обмен данными с удаленными подразделениями, распространение и защита информации, реализация хостинга, IP-телефония, системы обмена сообщениями, охранные системы и системы видеонаблюдения, организация видеоконференций и множество других задач.

**Постановка задач исследования.** Для построения комплексной ИС предприятия необходимо решить следующие основные задачи:

- классифицировать серверы ИС предприятия по различным характеристикам;
- выполнить анализ решаемых серверной подсистемой ИС предприятия задач;
- разработать рекомендации для построения серверной подсистемы ИС предприятия с учетом следующих критериев: аппаратное обеспечение (платформа) и быстродействие; возможности модернизации; живучесть (надежность); стоимость внедрения и эксплуатации.

**Решение задач и результаты исследований.** Классификацию серверов по назначению, производительности и программно-аппаратной платформе можно выполнять, в частности, в зависимости от размера обслуживаемого подразделения (сервер предприятия, здания или корпуса, цеха, этажа, отдела, подразделения, рабочей группы) с учетом числа пользователей. В качестве основных характеристик выделим показатели производительности; емкостные, скоростные (тип интерфейса) и надежность (среднее время наработки на отказ, измеряемое в сотнях тысяч часов, и наличие дублирования жестких дисков) характеристики подсистем хранения данных, пропускной способности внутренних и внешних шин. К серверам необходимо предъявлять существенно более высокие требования по отказоустойчивости и времени восстановления работоспособности после сбоя по сравнению с настольными компьютерами, поскольку зачастую они работают без выключения годами, в режиме 7/24/365.

Аппаратная база серверов варьируется от многопроцессорных RISC-систем с возможностью установки сотен процессоров и "горячей заменой" (во время работы, без выключения) практически любого компонента (процессоров, дисков, блоков питания, вентиляторов, контроллеров и модулей памяти) до одно-, двух-, четырехпроцессорных на платформе x86 без возможности замены компонентов без выключения питания.

Однако в случае использования классификации серверов по масштабу обслуживаемых подразделений невозможно четко определить, могут ли задачи, возлагаемые на ИС предприятия, быть эффективно решены с помощью сервера соответствующей производительности. Так, для сотен или даже тысяч пассивных пользователей сервер с несколькими процессорами может быть избыточен, а небольшая, но активная рабочая группа, решающая сложные задачи, может полностью загрузить гораздо более производительный сервер и высокоскоростную компьютерную сеть. Поэтому гораздо более важна для принятия решения при создании ИС предприятия классификация серверов по функциональности с учетом масштаба и сложности решаемых прикладных задач. Проведем анализ функционального назначения наиболее распространенных типов серверов, которые задействуются при построении ИС предприятий.

1. Файловый сервер (File Server) широко распространен, применяется для построения компьютерных сетей и информационных систем уже более 15 лет и обеспечивает совместное использование дискового пространства и размещенных на нем данных. Файловые серверы используются в вычислительной сети для совместного доступа к общей информации (базе данных, БД), экономии места на жестких дисках компьютеров пользователей за счет отказа от дублирования неиндивидуальной информации (например, дистрибутивы программных продуктов, обновления для программных продуктов, общедоступная документация и т.п.), повышение надежности хранения критически важных для бизнеса предприятия данных. Данный тип сервера является базовым, и большинство остальных типов серверов целесообразно строить на базе файл-сервера или с учетом предъявляемых к нему требований. Именно по этой причине проанализируем требования к файл-серверу в первую очередь.

Выделим основные факторы, определяющие возможности файлового сервера: производительность дисковой подсистемы и сетевых интерфейсов; объем оперативной памяти для кэширования данных; быстродействие используемой в установленной операционной системе (ОС) файловой системы; производительность процессора (она особенно важна при реализации на сервере антивирусной защиты — проверки в реальном времени ("на лету") файлов, поступающих по скоростным сетевым интерфейсам, или при включенном программном сжатии данных (в файловых системах NTFS, HPFS, Novell FS и др.).

При експлуатації файлового сервера чрезвычайно важно наличие отказоустойчивого дискового RAID-массива (Redundant Array of Independent Disks, избыточный массив независимых дисков) и использование протоколов кэширования данных операционной системой и контроллером дискового массива. Сквозное кэширование (Write Through) имеет высокую надежность, но существенно уступает отложенному кэшированию (Write Back), поскольку процессор контроллера RAID-массива может оказаться сдерживающим фактором в связи с недостаточной производительностью.

Один из главных аспектов, определяющих производительность и надежность файлового сервера, — файловая система. Для достижения максимальной эффективности она должна полностью размещаться в оперативной памяти, допускать регистрацию событий, поддерживать транзакции на уровне файлов, оптимизацию размещения данных и развитую систему назначения прав и мало загружать центральный процессор. ОС должна самостоятельно поддерживать перегруппировку запросов для оптимизации перемещения головок дисковых накопителей и иметь возможности настройки параметров чтения/записи в дополнение к реализованной в современных жестких дисках технологии NCQ (Native Command Queuing, естественный порядок команд). Несоблюдение этих требований может привести к тому, что производительность файлового сервера при выполнении потока операций ввода/вывода существенно упадет.

Скоростные параметры сетевых интерфейсов практически не ограничивают производительность файлового сервера. В большинстве случаев единственной сетевой платы Gigabit Ethernet (1000 Мбит/с) достаточно для любых объемов файлового ввода/вывода, однако предпочтительнее использовать внутренний интерфейс PCI-X (64 бит, 33 или 66 МГц с пропускной способностью 264 или 528 Мбайт/с соответственно) вместо стандартного PCI (пропускная способность 132 Мбайт/с), а для достижения максимального быстродействия желательно применять технологию Jumbo Frames (в этом случае вместо стандартных пакетов Ethernet размером 64–1500 байт по сети пересылаются пакеты размером 8 кбайт, что снижает общее число пакетов и нагрузку на процессоры сетевого адаптера и маршрутизатора). Средний выигрыш в производительности составляет 10–15%, в отдельных случаях — до 30%. Однако в некоторых случаях (например, в терминальной системе) возможно и снижение быстродействия.

Разновидностями файлового сервера можно назвать кэширующие проху-, FTP- (File Transfer Protocol, протокол передачи файлов) и Web-серверы, отображающие преимущественно статические страницы.

2. SQL-сервер (Structured Query Language, язык структурированных запросов) — сервер, используемый для обработки общедоступных реляционных БД. В настоящее время является обязательным при построении любой ИС предприятия. Требования к нему рассмотрим в качестве дополнительных по отношению к файловому серверу. Причиной создания системы обработки структурированных запросов послужила задача адаптации файл-серверных решений для работы с БД. В этом случае возникает ряд проблем: компьютерная корпоративная сеть не в состоянии обеспечить скорость доступа к данным, сравнимую со скоростью передачи по внутренним шинам компьютера; блокировка данных для сохранения их целостности и связности возможна только на уровне целого файла; аварийные разрывы соединений, весьма опасные для данных, но неизбежные при неидеальных клиентских рабочих местах, на которых часто используются морально и физически устаревшие компьютеры.

Работа SQL-сервера основана на отправке клиентским компьютером запроса, который обрабатывается сервером, и возвращении пользователю результатов обработки запроса по компьютерной сети. При этом все операции по управлению данными, контролю целостности и связности, а иногда и по выполнению логики приложения возлагаются на программное обеспечение сервера. Такой подход решает описанные выше проблемы, но и порождает новые, поскольку на сервере сосредоточивается вся нагрузка по обработке данных. Если при файл-серверной архитектуре обработкой занимаются рабочие станции, то в клиент-серверной практически вся нагрузка ложится на сервер. Поэтому при проектировании и ана-

лизе требований к SQL-серверу основное внимание необходимо уделять рассмотренным ниже характеристикам.

2.1. Пропускная способность оперативной памяти при произвольной выборке — один из важнейших показателей, так как современные процессоры с большими коэффициентами умножения практически всегда испытывают недостаток в пропускной способности памяти при любых объемах кэш-памяти.

2.2. Размер оперативной памяти теоретически должен быть таким, чтобы помещались все рабочие таблицы, индексы, временные таблицы, хранимые процедуры и т.д. Однако даже для нескольких гигабайт данных желаемый объем может составить десятки гигабайт. Поэтому приемлема ситуация, соответствующая принципу Парето (правилу 80–20), где 80% запросов приходится на 20% данных, и лишь 20% запросов обращается к 80% данных. Поэтому желательно разместить в оперативной памяти эти приблизительно-условные 20% данных (индексы данных, хранимые процедуры и наиболее часто используемые данные). В общем случае для достижения приемлемой производительности целесообразно использовать объем оперативной памяти в диапазоне 256–512 Мбайт на каждый гигабайт данных.

2.3. Требования к производительности центрального процессора связаны с особенностями нагрузки на процессорную часть — высокой степенью ветвления кода с малой степенью предсказуемости, поблочная обработка данных, большой нагрузкой на оперативную память. Поэтому желательно, чтобы центральный процессор сервера БД (SQL-сервера) имел конвейер с минимально возможным числом ступеней, максимальный объем иерархии кэш-памяти (желательно трех уровней) и не слишком большой коэффициент умножения.

Все вышеперечисленные ограничения и требования связаны между собой. Так, при непродуманном построении SMP-систем (Symmetric Multiprocessing, симметричная многопроцессорность) даже самая современная архитектура подсистемы памяти не сумеет предоставить каждому процессору требуемую пропускную способность при приемлемом уровне временных задержек. Коммутируемые архитектуры многопроцессорных систем, обладающие большим быстродействием, также не могут обеспечить необходимого времени отклика оперативной памяти, поэтому во избежание простоев процессоры серверов БД желательно оснащать большим объемом кэш-памяти со сложной иерархией. Для серверов крупных подразделений или целых предприятий, работающих с тысячами запросов и многогигабайтовыми базами данных, типичны 8, 16 и более Мбайт кэш-памяти, а в многоядерных процессорах свою кэш-память может иметь каждое ядро.

Подсистема резервного копирования также является узким местом в архитектуре SQL-серверов, поскольку быстрое (максимум десятки минут) резервное копирование огромных БД представляет немалую сложность. Поэтому при проектировании высокопроизводительных и высокозагруженных серверов БД особое внимание необходимо уделять устройствам резервного копирования и тщательной разработке сценария их работы.

Важный аспект конфигурирования серверов БД связан с контроллерами дисковых массивов RAID. Необходимо тщательно подбирать размер аппаратно адресуемого блока массива, число и тип дисков в массиве, число каналов и контроллеров. Например, если типичный запрос со стороны ОС намного больше размера адресуемого блока, это приводит к существенному росту нагрузки на процессор контроллера и, соответственно, нехватке его производительности в нужный момент. Если же типичный запрос со стороны ОС намного меньше размера адресуемого блока, контроллер будет иметь невысокую загрузку, в результате чего возникают накопительные задержки или кэш-память контроллера будет использоваться слишком часто. Анализ возникающих на практике сбоев показывает, что около 80% проблем с быстродействием SQL-серверов связаны с настройками контроллера RAID-массивов.

SQL-сервер задействуется в чрезвычайно широком спектре программно-аппаратных комплексов, позволяющих автоматизировать различные задачи: построение CRM-, MRP-, ERP-систем (Client Relationships Management — управление взаимоотношениями с клиентами; Manufacturing Re-

sources Planning — планирование производственных ресурсов; Enterprise Resources Planning — планирование всех ресурсов предприятия) в рамках единой ИС предприятия, терминальных систем (продажа железнодорожных билетов, обслуживание касс в супермаркетах и др.), построение систем дистанционного обучения (например, система Moodle применяет связку из Web-сервера (рассмотрен ниже) Apache, языка программирования PHP и SQL-сервера MySQL) и т.д.

Ключевое требование к системам обеспечения безопасности, — устойчивость их ОС. Очень хорошо зарекомендовали себя в этом отношении закрытые (фирменные) системы Cisco IOS, Solaris или специализированные ОС (FreeBSD, NetBSD). Производительность аппаратного обеспечения не оказывает ключевого влияния на работоспособность системы, хотя при высокой нагрузке желательно применение высокопроизводительного процессора (многоядерного процессора, многопроцессорной системы). Ограничивающим фактором является скорость внешнего соединения (сетевой интерфейс). Например, если сетевой интерфейс в состоянии передать до 10000 кадров/с, то способность шлюза обрабатывать 20000 кадров/с останется не востребуемой и приведет лишь к перерасходу средств. Жестких требований к системам хранения данных не предъявляется, так как ОС должна загружаться из ПЗУ, правила работы загружаются также из ПЗУ либо с флэш-, твердотельных или других накопителей, а на дисковых накопителях может вообще ничего не храниться. Для бесперебойной работы системы достаточно памяти сравнительно небольшого объема с поддержкой стандарта ECC.

3. Terminal-сервер используется для подключения устройств в терминальном режиме. Требования к терминальному серверу являются дополнительными по отношению к файловому серверу и SQL-серверу. Уровень загрузки компьютеров, использующих ресурсы корпоративной сети предприятия, относительно невелик в пределах рабочего дня или недели, но потребность использования в работе современного ПО приводит к необходимости достаточно регулярной (раз в 3–5 лет) замены или существенной модернизации компьютеров. Поэтому для сохранения инвестиций в аппаратное обеспечение целесообразно использовать терминальные системы, в которых выполнение программ сосредоточено на выделенных для этого серверах, что позволяет существенно увеличить срок эксплуатации оборудования и предоставить пользователям морально устаревших систем доступ к значительным ресурсам данных и программным продуктам, отвечающим современным требованиям. При низкой общей производительности терминальной системы замена устройств не требуется, гораздо предпочтительнее добавить еще один терминальный сервер и перенести на него часть клиентов. В таком случае морально устаревшее оборудование (клиентские рабочие места) можно эксплуатировать до полного физического износа. В странах Запада, как показывает полученный опыт, такой подход чрезвычайно широко практикуется. В этом случае повышается и живучесть терминальной серверной подсистемы, поскольку в случае выхода одного из серверов из строя оставшиеся продолжают функционирование, а пользователей, которые обслуживались вышедшим из строя сервером, можно перераспределить между работоспособными терминальными серверами.

Особенностью терминального сервера являются повышенные требования к пропускной способности сетевого интерфейса при пересылке коротких пакетов, так как 90% пакетов, пересылаемых терминальным сервером, имеют длину 100–200 байт. Вследствие этого несколько сетевых адаптеров Fast Ethernet с пропускной способностью 100 Мбит/с каждый, установленных в одном терминальном сервере и имеющих общую производительность в несколько сотен Мбит/с, имеют большую производительность, чем один сетевой адаптер Gigabit Ethernet с пропускной способностью 1 Гбит/с. При создании, настройке и эксплуатации терминального сервера важное значение имеют пропускная способность оперативной памяти при произвольной выборке, размер и иерархия кэш-памяти процессоров (эти параметры весьма важны при постоянном переключении десятков пользовательских процессов), скорость работы виртуальной памяти (виртуальную память и временные файлы целесообразно размещать на дисках, которые не входят в RAID-массив, чтобы производительность его контроллера не стала узким местом системы), быстродействие ОС. Частным случаем термини-

нального сервера является высокозагруженный Web-сервер, выполняющий одновременно значительное число приложений (CGI, Perl, Java, Javascript, PHP, C#, Python, Ruby и др.).

Предлагается методика выбора конфигурации аппаратной платформы серверной подсистемы и учета нагрузки на корпоративную компьютерную сеть (ККС) при построении информационных систем предприятий, позволяющая формализовать и автоматизировать этот процесс. Метод заключается в последовательном выполнении ряда взаимосвязанных этапов. На первом этапе разрабатывается информационная модель территориально распределенной сети (ТРС) на основе анализа связей между входящими в нее ЛКС, и анализа типов и объемов циркулирующих в ней трафиков. Полная нагрузка на ККС предприятия

$$W = f(W_{fs}, W_{ds}, W_{ts}), \quad (1)$$

где  $W_{fs}$  — нагрузка на сегмент ККС, в котором находится файл-сервер;  
 $W_{ds}$  — нагрузка на сегмент ККС, в котором находится SQL-сервер;  
 $W_{ts}$  — нагрузка на сегмент ККС, в котором находится терминальный сервер.

Если файл-сервер, SQL-сервер и терминальный сервер находятся в одном сегменте ККС предприятия, полная нагрузка на данный сегмент составит

$$W = W_{fs} + W_{ds} + W_{ts}. \quad (2)$$

Как было показано в п.3, нецелесообразно использовать в качестве терминального сервера один высокопроизводительный компьютер. Предпочтительнее использовать несколько независимых терминальных серверов, имеющих сравнительно небольшую производительность, и обслуживающих определенное количество пользователей. Тогда при использовании  $k$  терминальных серверов в одном сегменте ККС предприятия нагрузка составит

$$W_{ts} = \sum_{i=1}^k W_{tsi}. \quad (3)$$

Формулы (1)–(3) позволяют оценить загрузку серверной подсистемы и сегментов ККС, в которых размещены соответствующие серверы.

Схема алгоритма предложенной методики представлена на рис. 1.

Конструктивно серверы могут быть реализованы в классических «башенных» корпусах типа Middle Tower или Full Tower, а также в "тонком" (blade, лезвийном) исполнении. Проведенный выше анализ нагрузки на различные подсистемы описанных серверов говорит о существенных различиях в требованиях к их аппаратной платформе, производительности и режиму работы. Современные тенденции развития информационных технологий, удачные и неудачные технические решения совместно с проведенным анализом говорят, что совместное выполнение разных типов задач одним универсальным высокопроизводительным и высоконадежным сервером может быть реализовано только для приложений со сходной нагрузкой, в стесненных финансовых обстоятельствах или в качестве временного. Различные типы задач предпочтительнее выполнять на физически разных машинах, что позволит повысить общую производительность, стабильность, отказоустойчивость и живучесть ИС предприятия. Увеличение числа пользователей и расширение спектра решаемых ими задач, качественное изменение бизнес-процессов и увеличение различных типов нагрузок на ИС предприятия требуют оптимизации потоков данных, распараллеливания решаемых задач, разбиения корпоративной компьютерной сети предприятия на сегменты вместо замены единственного универсального высокопроизводительного сервера на еще более производительный (что зачастую практиковалось ранее). Такой подход принесет существенную экономию средств при модернизации компьютерного и сетевого оборудования, а специализация серверов придает ИС предприятия большую устойчивость и защищенность вследствие распределенности решаемых задач и выполняемых функций, аппаратных и программных модулей и узлов, подверженных повышенным нагрузкам, хакерским или вирусным атакам, сбоям или выходам из строя.

Многолетняя популярность платформы x86, отсутствие или высокая стоимость альтернативных решений, стесненные финансовые обстоятельства и зачастую непродуманные решения на первичном этапе построения ИС предприятия привели к появлению такого подхода, как «вечная» модернизация оборудования.

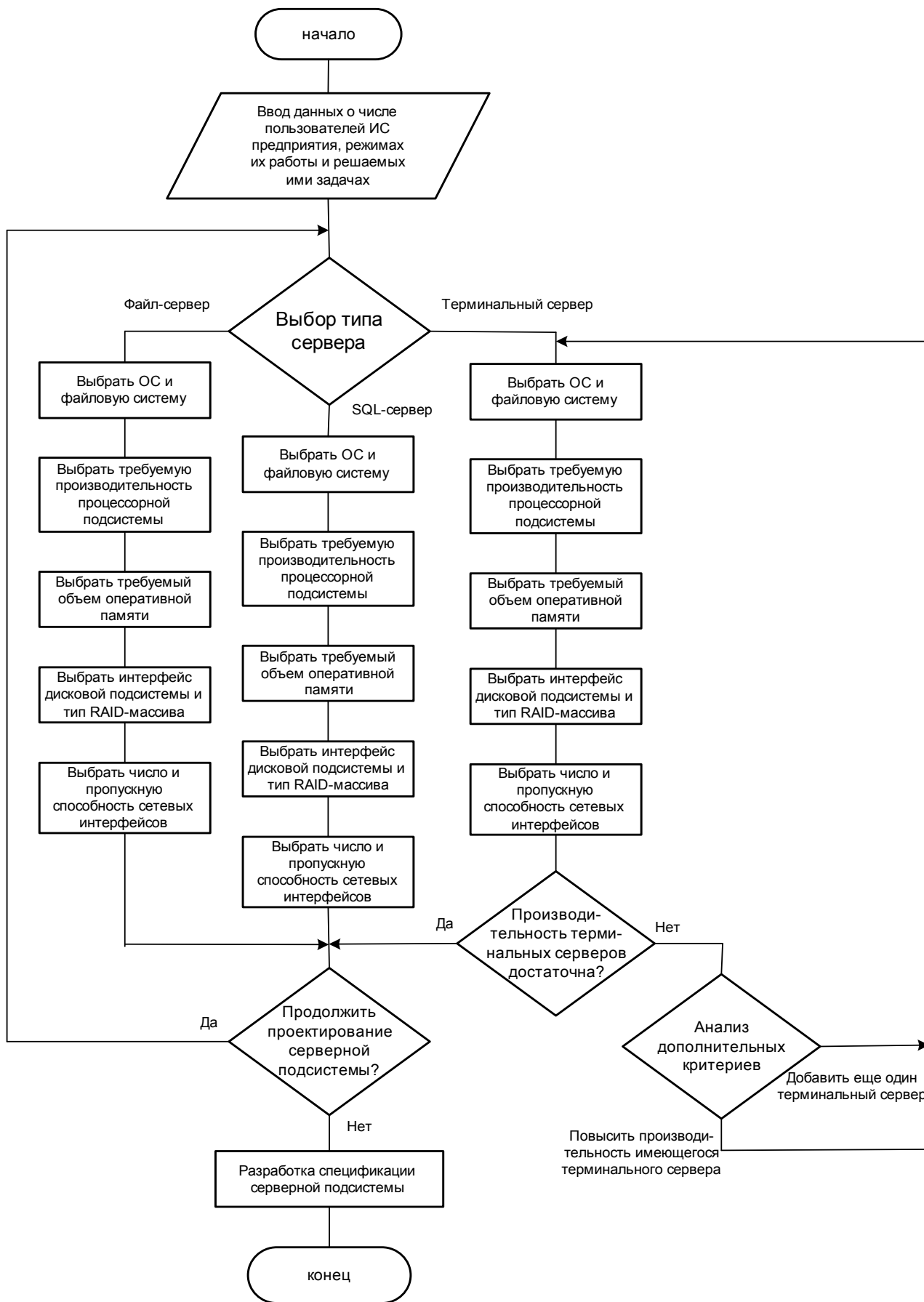


Рисунок 1 — Методика проектирования серверной подсистемы ИС предприятия

Однако в настоящее время в связи с быстрыми темпами развития компьютерной техники, сетевого оборудования и ПО однозначного решения нет и быть не может. Например, современные процессоры уже нельзя установить в приобретенный 2–3 года назад сервер; чрезвычайно трудно или невозможно приобрести морально устаревшую оперативную память ECC EDO, PC133 и ряда других стандартов или кэш-модули для RAID-контроллера. Устаревшие версии BIOS (Base Input-Output System, базовая система ввода-вывода) материнских плат, для которых уже невозможно найти современные прошивки даже на сайтах производителей, уже не могут правильно определить характеристики современных жестких дисков, устанавливаемых вместо вышедших из строя. Часто стоимость морально устаревших комплектующих сопоставима или даже выше стоимости современных, гораздо более производительных устройств. Трудно оценить и финансовые выгоды от постоянной замены одних компонентов на другие по мере их появления на рынке с целью поддержания должной производительности постепенно устаревающей базовой платформы. Очень часто в этом случае совершенно не оцениваются трудозатраты ИТ-персонала и стоимость останковки ИС предприятия или ее отдельных компонентов в связи с необходимостью сравнительно частой модернизации оборудования и возникающий вследствие этого вынужденный простой множества сотрудников предприятия, потеря потенциальных клиентов и недополученная из-за этого прибыль. В итоге даже самое дорогостоящее универсальное серверное решение с огромным запасом производительности на начальном этапе может через сравнительно короткое время оказаться бессильным вследствие появления очередного нового стандарта [1].

“Тонкие” или blade-серверы в современных условиях целесообразно использовать вместо универсальных, если имеется или потенциально возможен рост бизнеса, разработана и пошагово реализуется четкая концепция построения ИС предприятия и разумный подход к финансовым затратам на информационные технологии. В течение ряда лет blade-серверы составляют успешную конкуренцию серверам универсального назначения. Сложность решаемых задач и величина информационных потоков требуют соответствующего аппаратного обеспечения, но оптимальным в настоящее время является распределение ресурсов.

Физически модульный подход к построению ИС предприятия реализован в промышленном стандарте с использованием шкафов-стоек шириной 19 дюймов (482,6 мм; rack mount, стоечный монтаж), в которых с использованием специальных крепежных комплектов устанавливаются серверы, сетевые коммутаторы, источники бесперебойного питания и т.д.

**Выводы.** Проектирование серверной подсистемы, применяемой при создании ИС предприятия, необходимо начинать с анализа планируемых для реализации прикладных задач и числа пользователей и последующего сравнения достоинств мощного универсального сервера и набора специализированных, имеющих сравнительно узкую функциональность серверов. Проведенный анализ показал, что перспективность решений зависит от планируемой и реальной динамики развития ИС предприятия, количества и сложности решаемых задач, их разнообразия и объемов, числа пользователей. Эти параметры формируют и требования к надежности и масштабируемости (scalability; scale — масштаб), которые обязательно должны присутствовать, однако для их реализации требуются дополнительные финансовые затраты. Масштабируемость и модульность в современном понимании — аппаратные комплексы, минимальные единицы которых — готовые устройства, построенные на архитектуре x86 для совместного или независимого выполнения различных типов программных приложений. Предложенные математические соотношения и методика проектирования серверной подсистемы ИС предприятия позволяет автоматизировать и формализовать этот процесс.

### Литература

1. Шапо В. Ф. Основы построения компьютерных систем: учебное пособие. — Одесса: ОНМА, 2007. — 110 с.

Здано в редакцію:  
19.02.2009р.

Рекомендовано до друку:  
д.т.н, проф. Скобцов Ю.О.