Лабораторная работа №9

Управление виртуальной памятью.

Алгоритмы замещения страниц.

1. Теоретические сведения

1.1 Понятие виртуальной памяти

Разработчикам программного обеспечения часто приходится решать проблему размещения в памяти больших программ, размер которых превышает объем доступной оперативной памяти. Один из вариантов решения данной проблемы – организация структур с перекрытием – рассмотрен в предыдущей лекции. При этом предполагалось активное участие программиста в процессе формирования перекрывающихся частей программы. Развитие архитектуры компьютеров и расширение возможностей операционной системы по управлению памятью позволило переложить решение этой задачи на компьютер. Одним из главных достижений стало появление виртуальной памяти (virtual memory). Впервые она была реализована в 1959 г. на компьютере «Атлас», разработанном в Манчестерском университете.

Суть концепции виртуальной памяти заключается в следующем. Информация, с которой работает активный процесс, должна располагаться в оперативной памяти. В схемах виртуальной памяти у процесса создается иллюзия того, что вся необходимая ему информация имеется в основной памяти. Для этого, во-первых, занимаемая процессом память разбивается на несколько частей, например страниц. Во-вторых, логический адрес (логическая страница), к которому обращается процесс, динамически транслируется в физический адрес (физическую страницу). И наконец, в тех случаях, когда страница, к которой обращается процесс, не находится в физической памяти, нужно организовать ее подкачку с диска. Для контроля наличия страницы в памяти вводится специальный бит присутствия, входящий в состав атрибутов страницы в таблице страниц.

Таким образом, в наличии всех компонентов процесса в основной памяти необходимости нет. Важным следствием такой организации является то, что размер памяти, занимаемой процессом, может быть больше, чем размер оперативной памяти. Принцип локальности обеспечивает этой схеме нужную эффективность.

Возможность выполнения программы, находящейся в памяти лишь частично, имеет ряд вполне очевидных преимуществ.
Программа не ограничена объемом физической памяти. Упрощается разработка программ, поскольку можно задействовать большие виртуальные пространства, не заботясь о размере используемой памяти.
Поскольку появляется возможность частичного помещения программы (процесса) в память и гибкого перераспределения памяти между программами, можно разместить в памяти больше программ, что увеличивает загрузку процессора и пропускную способность системы.
Объем ввода-вывода для выгрузки части программы на диск может быть меньше, чем в варианте классического свопинга, в итоге каждая программа будет работать быстрее.
Напомним, что в системах с виртуальной памятью те адреса, которые генерирует программа (логические адреса), называются виртуальными, и они формируют виртуальное адресное пространство. Термин «виртуальная память» означает, что программист имеет

дело с памятью, отличной от реальной, размер которой потенциально больше, чем размер оперативной памяти.

Хотя известны и чисто программные реализации виртуальной памяти, это направление получило наиболее широкое развитие после соответствующей аппаратной поддержки.

Следует отметить, что оборудование компьютера принимает участие в трансляции адреса практически во всех схемах управления памятью. Но в случае виртуальной памяти это становится более сложным вследствие разрывности отображения и многомерности логического адресного пространства. Может быть, наиболее существенным вкладом аппаратуры в реализацию описываемой схемы является автоматическая генерация исключительных ситуаций при отсутствии в памяти нужных страниц (page fault).

Любая из трех ранее рассмотренных схем управления памятью – страничной, сегментной и сегментно-страничной – пригодна для организации виртуальной памяти.

1.2 Страничная виртуальная память

Как и в случае простой страничной организации, страничная виртуальная память и физическая память представляются состоящими из наборов блоков или страниц одинакового размера. Виртуальные адреса делятся на страницы (page), соответствующие единицы в физической памяти образуют страничные кадры (page frames), а в целом система поддержки страничной виртуальной памяти называется пейджингом (paging). Передача информации между памятью и диском всегда осуществляется целыми страницами.

После разбиения менеджером памяти виртуального адресного пространства на страницы виртуальный адрес преобразуется в упорядоченную пару (p,d), где p – номер страницы в виртуальной памяти, а d – смещение в рамках страницы p, внутри которой размещается адресуемый элемент. Процесс может выполняться, если его текущая страница находится в оперативной памяти. Если текущей страницы в главной памяти нет, она должна быть переписана (подкачана) из внешней памяти. Поступившую страницу можно поместить в любой свободный страничный кадр.

Поскольку число виртуальных страниц велико, таблица страниц принимает специфический вид (см. раздел «Структура таблицы страниц»), структура записей становится более сложной, среди атрибутов страницы появляются биты присутствия, модификации и другие управляющие биты.

При отсутствии страницы в памяти в процессе выполнения команды возникает исключительная ситуация, называемая страничное нарушение (page fault) или страничный отказ. Обработка страничного нарушения заключается в том, что выполнение команды прерывается, затребованная страница подкачивается из конкретного места вторичной памяти в свободный страничный кадр физической памяти и попытка выполнения команды повторяется. При отсутствии свободных страничных кадров на диск выгружается редко используемая страница.

1.3 Исключительные ситуации при работе с памятью

Отображение виртуального адреса в физический осуществляется при помощи таблицы страниц. Для каждой виртуальной страницы запись в таблице страниц содержит номер соответствующего страничного кадра в оперативной памяти, а также атрибуты страницы для контроля обращений к памяти.

Что же происходит, когда нужной страницы в памяти нет или операция обращения к памяти недопустима? Естественно, что операционная система должна быть как-то оповещена о происшедшем. Обычно для этого используется механизм исключительных ситуаций (exceptions). При попытке выполнить подобное обращение к виртуальной странице возникает исключительная ситуация "страничное нарушение" (page fault), приводящая к вызову специальной последовательности команд для обработки конкретного вида страничного нарушения.

Страничное нарушение может происходить в самых разных случаях: при отсутствии страницы в оперативной памяти, при попытке записи в страницу с атрибутом "только чтение" или при попытке чтения или записи страницы с атрибутом "только выполнение". В любом из этих случаев вызывается обработчик страничного нарушения, являющийся частью операционной системы. Ему обычно передается причина возникновения исключительной ситуации и виртуальный адрес, обращение к которому вызвало нарушение.

1.4 Стратегии управления страничной памятью

Программное обеспечение подсистемы управления памятью связано с реализацией следующих стратегий:

Стратегия выборки (fetch policy) - в какой момент следует переписать страницу из вторичной памяти в первичную. Существует два основных варианта выборки - по запросу и с упреждением. Алгоритм выборки по запросу вступает в действие в тот момент, когда процесс обращается к отсутствующей странице, содержимое которой находится на диске. Его реализация заключается в загрузке страницы с диска в свободную физическую страницу и коррекции соответствующей записи таблицы страниц.

Алгоритм выборки с упреждением осуществляет опережающее чтение, то есть кроме страницы, вызвавшей исключительную ситуацию, в память также загружается несколько страниц, окружающих ее (обычно соседние страницы располагаются во внешней памяти последовательно и могут быть считаны за одно обращение к диску). Такой алгоритм призван уменьшить накладные расходы, связанные с большим количеством исключительных ситуаций, возникающих при работе со значительными объемами данных или кода; кроме того, оптимизируется работа с диском.

Стратегия размещения (placement policy) - в какой участок первичной памяти поместить поступающую страницу. В системах со страничной организацией все просто - в любой свободный страничный кадр. В случае систем с сегментной организацией необходима стратегия, аналогичная стратегии с динамическим распределением.

Стратегия замещения (replacement policy) - какую страницу нужно вытолкнуть во внешнюю память, чтобы освободить место в оперативной памяти. Разумная стратегия замещения, реализованная в соответствующем алгоритме замещения страниц, позволяет хранить в памяти самую необходимую информацию и тем самым снизить частоту

страничных нарушений. Замещение должно происходить с учетом выделенного каждому процессу количества кадров. Кроме того, нужно решить, должна ли замещаемая страница принадлежать процессу, который инициировал замещение, или она должна быть выбрана среди всех кадров основной памяти.

1.5 Алгоритмы замещения страниц

Итак, наиболее ответственным действием менеджера памяти является выделение кадра оперативной памяти для размещения в ней виртуальной страницы, находящейся во внешней памяти. Напомним, что мы рассматриваем ситуацию, когда размер виртуальной памяти для каждого процесса может существенно превосходить размер основной памяти. Это означает, что при выделении страницы основной памяти с большой вероятностью не удастся найти свободный страничный кадр. В этом случае операционная система в соответствии с заложенными в нее критериями должна:

- найти некоторую занятую страницу основной памяти;
- переместить в случае
- надобности ее содержимое во внешнюю память;
- переписать в этот страничный кадр содержимое нужной виртуальной страницы из внешней памяти;
- должным образом модифицировать необходимый элемент соответствующей таблицы страниц;
- продолжить выполнение процесса, которому эта виртуальная страница понадобилась.

Заметим, что при замещении приходится дважды передавать страницу между основной и вторичной памятью. Процесс замещения может быть оптимизирован за счет использования бита модификации (один из атрибутов страницы в таблице страниц). Бит модификации устанавливается компьютером, если хотя бы один байт был записан на страницу. При выборе кандидата на замещение проверяется бит модификации. Если бит не установлен, нет необходимости переписывать данную страницу на диск, ее копия на диске уже имеется. Подобный метод также применяется к read-only-страницам, они никогда не модифицируются. Эта схема уменьшает время обработки page fault.

Существует большое количество разнообразных алгоритмов замещения страниц. Все они делятся на локальные и глобальные. Локальные алгоритмы, в отличие от глобальных, распределяют фиксированное или динамически настраиваемое число страниц для каждого процесса. Когда процесс израсходует все предназначенные ему страницы, система будет удалять из физической памяти одну из его страниц, а не из страниц других процессов. Глобальный же алгоритм замещения в случае возникновения исключительной ситуации удовлетворится освобождением любой физической страницы, независимо от того, какому процессу она принадлежала.

Глобальные алгоритмы имеют ряд недостатков. Во-первых, они делают одни процессы чувствительными к поведению других процессов. Например, если один процесс в системе одновременно использует большое количество страниц памяти, то все остальные приложения будут в результате ощущать сильное замедление из-за недостатка кадров памяти для своей работы. Во-вторых, некорректно работающее приложение может подорвать работу всей системы (если, конечно, в системе не предусмотрено ограничение на размер памяти, выделяемой процессу), пытаясь захватить больше памяти. Поэтому в многозадачной системе иногда приходится использовать более сложные локальные

алгоритмы. Применение локальных алгоритмов требует хранения в операционной системе списка физических кадров, выделенных каждому процессу. Этот список страниц иногда называют резидентным множеством процесса. В одном из следующих разделов рассмотрен вариант алгоритма подкачки, основанный на приведении резидентного множества в соответствие так называемому рабочему набору процесса.

Эффективность алгоритма обычно оценивается на конкретной последовательности ссылок к памяти, для которой подсчитывается число возникающих page faults. Эта последовательность называется строкой обращений (reference string). Мы можем генерировать строку обращений искусственным образом при помощи датчика случайных чисел или трассируя конкретную систему. Последний метод дает слишком много ссылок, для уменьшения числа которых можно сделать две вещи:
для конкретного размера страниц можно запоминать только их номера, а не адреса, на которые идет ссылка; несколько подряд идущих ссылок на одну страницу можно фиксировать один раз.

Как уже говорилось, большинство процессоров имеют простейшие аппаратные средства, позволяющие собирать некоторую статистику обращений к памяти. Эти средства обычно включают два специальных флага на каждый элемент таблицы страниц. Флаг ссылки (reference бит) автоматически устанавливается, когда происходит любое обращение к этой странице, а уже рассмотренный выше флаг изменения (modify бит) устанавливается, если производится запись в эту страницу. Операционная система периодически проверяет установку таких флагов, для того чтобы выделить активно используемые страницы, после чего значения этих флагов сбрасываются.

1.6 Алгоритм FIFO. Выталкивание первой пришедшей страницы

Простейший алгоритм. Каждой странице присваивается временная метка. Реализуется это просто созданием очереди страниц, в конец которой страницы попадают, когда загружаются в физическую память, а из начала берутся, когда требуется освободить память. Для замещения выбирается старейшая страница. К сожалению, эта стратегия с достаточной вероятностью будет приводить к замещению активно используемых страниц, например страниц кода текстового процессора при редактировании файла. Заметим, что при замещении активных страниц все работает корректно, но page fault происходит немедленно.

На первый взгляд кажется очевидным, что чем больше в памяти страничных кадров, тем реже будут иметь место page faults. Удивительно, но это не всегда так. Как установил Билэди с коллегами, определенные последовательности обращений к страницам в действительности приводят к увеличению числа страничных нарушений при увеличении кадров, выделенных процессу. Это явление носит название "аномалии Билэди" или "аномалии FIFO". Система с тремя кадрами (9 faults) оказывается более производительной, чем с четырьмя кадрами (10 faults), для строки обращений к памяти 012301401234 при выборе стратегии FIFO.

Рис. 10.1. Аномалия Билэди: (a) - FIFO с тремя страничными кадрами;
(b) - FIFO с четырьмя страничными кадрами

Аномалию Билэди следует считать скорее курьезом, чем фактором, требующим серьезного отношения, который иллюстрирует сложность ОС, где интуитивный подход не всегда приемлем.

1.7 Оптимальный алгоритм (OPT)

Одним из последствий открытия аномалии Билэди стал поиск оптимального алгоритма, который при заданной строке обращений имел бы минимальную частоту page faults среди всех других алгоритмов. Такой алгоритм был найден. Он прост: замещай страницу, которая не будет использоваться в течение самого длительного периода времени.

Каждая страница должна быть помечена числом инструкций, которые будут выполнены, прежде чем на эту страницу будет сделана первая ссылка. Выталкиваться должна страница, для которой это число наибольшее.

Этот алгоритм легко описать, но реализовать невозможно. ОС не знает, к какой странице будет следующее обращение. (Ранее такие проблемы возникали при планировании процессов - алгоритм SJF).

Зато мы можем сделать вывод, что для того, чтобы алгоритм замещения был максимально близок к идеальному алгоритму, система должна как можно точнее предсказывать обращения процессов к памяти. Данный алгоритм применяется для оценки качества реализуемых алгоритмов.

1.8 Выталкивание дольше всего не использовавшейся страницы. Алгоритм LRU

Одним из приближений к алгоритму OPT является алгоритм, исходящий из эвристического правила, что недавнее прошлое - хороший ориентир для прогнозирования ближайшего будущего.

Ключевое отличие между FIFO и оптимальным алгоритмом заключается в том, что один смотрит назад, а другой вперед. Если использовать прошлое для аппроксимации будущего,

имеет смысл замещать страницу, которая не использовалась в течение самого долгого времени. Такой подход называется least recently used алгоритм (LRU). Работа алгоритма проиллюстрирована на рис. рис. 10.2. Сравнивая рис. 10.1 b и 10.2, можно увидеть, что использование LRU алгоритма позволяет сократить количество страничных нарушений.

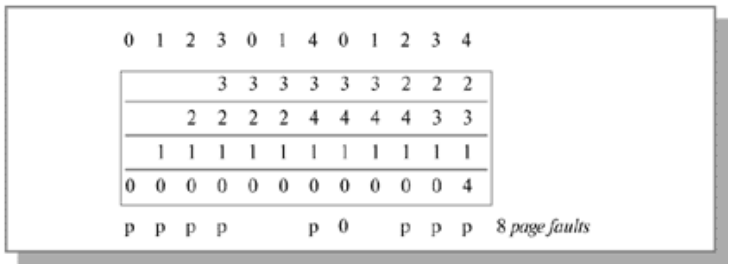

Рис. 10.2. Пример работы алгоритма LRU

LRU - хороший, но труднореализуемый алгоритм. Необходимо иметь связанный список всех страниц в памяти, в начале которого будут хранится недавно использованные страницы. Причем этот список должен обновляться при каждом обращении к памяти. Много времени нужно и на поиск страниц в таком списке.

В [Таненбаум, 2002] рассмотрен вариант реализации алгоритма LRU со специальным 64-битным указателем, который автоматически увеличивается на единицу после выполнения каждой инструкции, а в таблице страниц имеется соответствующее поле, в которое заносится значение указателя при каждой ссылке на страницу. При возникновении page fault выгружается страница с наименьшим значением этого поля.

Как оптимальный алгоритм, так и LRU не страдают от аномалии Билэди. Существует класс алгоритмов, для которых при одной и той же строке обращений множество страниц в памяти для n кадров всегда является подмножеством страниц для n+1 кадра. Эти алгоритмы не проявляют аномалии Билэди и называются стековыми (stack) алгоритмами.

1.9 Выталкивание редко используемой страницы. Алгоритм NFU

Поскольку большинство современных процессоров не предоставляют соответствующей аппаратной поддержки для реализации алгоритма LRU, хотелось бы иметь алгоритм, достаточно близкий к LRU, но не требующий специальной поддержки.

Программная реализация алгоритма, близкого к LRU, - алгоритм NFU(Not Frequently Used).

Для него требуются программные счетчики, по одному на каждую страницу, которые сначала равны нулю. При каждом прерывании по времени (а не после каждой инструкции) операционная система сканирует все страницы в памяти и у каждой страницы с установленным флагом обращения увеличивает на единицу значение счетчика, а флаг обращения сбрасывает.

Таким образом, кандидатом на освобождение оказывается страница с наименьшим значением счетчика, как страница, к которой реже всего обращались. Главный недостаток алгоритма NFU состоит в том, что он ничего не забывает. Например, страница, к которой очень часто обращались в течение некоторого времени, а потом обращаться перестали, все равно не будет удалена из памяти, потому что ее счетчик содержит большую величину. Например, в многопроходных компиляторах страницы, которые активно использовались во

время первого прохода, могут надолго сохранить большие значения счетчика, мешая загрузке полезных в дальнейшем страниц.

К счастью, возможна небольшая модификация алгоритма, которая позволяет ему "забывать". Достаточно, чтобы при каждом прерывании по времени содержимое счетчика сдвигалось вправо на 1 бит, а уже затем производилось бы его увеличение для страниц с установленным флагом обращения.

Другим, уже более устойчивым недостатком алгоритма является длительность процесса сканирования таблиц страниц.

1.10 Алгоритм Second-Chance

Например, алгоритм Second-Chance - модификация алгоритма FIFO, которая позволяет избежать потери часто используемых страниц с помощью анализа флага обращений (бита ссылки) для самой старой страницы. Если флаг установлен, то страница, в отличие от алгоритма FIFO, не выталкивается, а ее флаг сбрасывается, и страница переносится в конец очереди. Если первоначально флаги обращений были установлены для всех страниц (на все страницы ссылались), алгоритм Second-Chance превращается в алгоритм FIFO. Данный алгоритм использовался в Multics и BSD Unix.

2. Задание

Разработать программу, реализующую заданный алгоритм замещения страниц в памяти. Менеджер памяти должен:

6. Разбивать память заданного размера на указанное количество страниц. На экран должна выводиться следующая информация о состоянии памяти: объем памяти, число страниц, число свободных страниц (%), размер страницы;
7. Размещать в памяти страницу заданного процесса, с замещением занятой по заданному алгоритму (по нажатию кнопки «ДОБАВИТЬ»). Для размещения страницы в памяти, указывается имя процесса и ее номер (вводятся отдельно). Например: Pro 3. После нажатия на кнопку «ДОБАВИТЬ» страница размещается в свободной странице памяти. Если задано **глобальное размещение** (см. вариант задания), то выбирается любая не занятая страница. При **локальном размещении** страница размещается только среди виртуальных страниц выделенных этому процессу. Выделение страниц в памяти выполняется при первом ее занесении процесса в память. Алгоритм замещения выполняется **только при отсутствии свободных страниц** под процесс.;
8. Удалять из памяти заданную страницу или все страницы заданного процесса (по нажатию кнопки «УДАЛИТЬ»). Указывается номер удаляемой страницы в **памяти**;
9. Организовывать циклическое обращение к страницам размещенным в памяти по нажатию на кнопку. При этом случайным образом задается количество обращений к страницам (диапазон 1..10). Для каждого обращения генерируется, случайным образом, номер страницы из диапазона [0; количество страниц памяти]. При обращении к странице в зависимости, от варианта, увеличивается ее внутренний счетчик обращений или устанавливается флаг обращения

Таблица вариантов зданий

Вариант	Задание
01	**Глобальное размещение.** Алгоритм замещения - Random.

	Замещается случайная страница.
02	**Глобальное размещение.** Алгоритм замещения – FIFO. Реализуется очередь страниц в конец которой попадают страницы размещенные в памяти, а из начала берутся для замещения.
03	**Глобальное размещение.** Алгоритм замещения – LRU. Замещается страница с наименьшим количеством обращений.
04	**Глобальное размещение.** Алгоритм замещения – LRU CLOCK. Существует глобальный счетчик обращений к страницам. При каждом обращении к станице в ее внутренний регистр заносится значение глобального счетчика. Выгружается страница с наименьшим значением счетчика.
05	**Глобальное размещение.** Алгоритм замещения – NFU. По таймеру 2 (с большей задержкой чем T1) происходит опрос всех страниц, для каждой страницы с установленным флагом обращений увеличивается соответствующий счетчик, флаг обращений сбрасывается. Выгружается страница с наименьшим значением счетчика.
06	**Локальное размещение.** Алгоритм замещения – Random. Замещается случайная страница.
07	**Локальное размещение.** Алгоритм замещения – FIFO. Реализуется очередь страниц в конец которой попадают страницы размещенные в памяти, а из начала берутся для замещения.
08	**Локальное размещение.** Алгоритм замещения – LRU. Замещается страница с наименьшим количеством обращений.
09	**Локальное размещение.** Алгоритм замещения – LRU CLOCK. Существует глобальный счетчик обращений к страницам. При каждом обращении к станице в ее внутренний регистр заносится значение глобального счетчика. Выгружается страница с наименьшим значением счетчика.
10	**Локальное размещение.** Алгоритм замещения – NFU. По таймеру 2 (с большей задержкой чем T1) происходит опрос всех страниц, для каждой страницы с установленным флагом обращений увеличивается соответствующий счетчик, флаг обращений сбрасывается. Выгружается страница с наименьшим значением счетчика.
11	**Локальное размещение с динамическим увеличением количества выделенных страниц при количестве запросов к страницам больше установленного порога.** Алгоритм замещения – Random. Замещается случайная страница.
12	**Локальное размещение с динамическим увеличением количества выделенных страниц при количестве запросов к страницам больше установленного порога.** Алгоритм замещения – FIFO. Реализуется очередь страниц в конец которой попадают страницы размещенные в памяти, а из начала берутся для замещения.
13	**Локальное размещение с динамическим увеличением количества выделенных страниц при количестве запросов к страницам больше установленного порога.** Алгоритм замещения – LRU. Замещается страница с наименьшим количеством обращений.

14	**Локальное размещение с динамическим увеличением количества выделенных страниц при количестве запросов к страницам больше установленного порога.** Алгоритм замещения – LRU CLOCK. Существует глобальный счетчик обращений к страницам. При каждом обращении к станице в ее внутренний регистр заносится значение глобального счетчика. Выгружается страница с наименьшим значением счетчика.
15	**Локальное размещение с динамическим увеличением количества выделенных страниц при количестве запросов к страницам больше установленного порога.** Алгоритм замещения – NFU. По таймеру 2 (с большей задержкой чем T1) происходит опрос всех страниц, для каждой страницы с установленным флагом обращений увеличивается соответствующий счетчик, флаг обращений сбрасывается. Выгружается страница с наименьшим значением счетчика.

В процессе работы менеджера на экран должна выводиться следующая статистическая информация:
1. общее число обращений к страницам;
2. количество выталкиваний из памяти (дополнительно в %).
Провести исследования для разного числа страниц при постоянном объеме памяти.