

Операционные системы

29 марта 2019 г.

Содержание

1	Введение	3
1.1	Преподаватель	3
1.2	Операционные системы	3
1.3	Ядро и прочее	4
2	Процессы	5
2.1	Общее	5
2.2	Модель памяти процесса	6
2.3	Системные вызовы для работы с процессами	6
2.4	PID и дерево процессов	7
2.5	Calling convention	8
2.6	API and ABI	9
2.7	Процесс и ОС	9
2.7.1	Scheduler	9
2.7.2	Interruption	10
2.7.3	Состояния процесса	10
2.7.4	Переключение контекста	11
2.8	Литература	11
2.9	Домашнее задание №1	11
3	Файловые системы	13
3.1	Носители	13
3.1.1	HDD	13
3.1.2	SSD	14
3.1.3	Общее	14
3.2	Быстродействие	14
3.2.1	Интересные числа	14
3.2.2	Выводы для HDD	14
3.3	Structure packaging	15
3.4	Алгоритмы элеватора	15
3.5	Файл	16
3.6	Директория	16
3.6.1	Права — просто числа	16
3.6.2	sticky bit	17
3.7	Иерархия	17
3.8	Монтирование	18

3.9	Inode	18
3.10	Проход по пути	18
3.11	Атрибуты процесса	19
3.11.1	Structures	19
3.11.2	Duplication and sharing	19
3.11.3	Deep view	20
3.12	Файловые системы	21
3.13	Диски	21
3.14	RAID	23
3.15	Организация файловых систем	24
3.16	Операции с файлами	26
3.17	Системные вызовы	26
3.18	Пару слов о типах	26
3.19	Common pitfalls	26
3.20	Литература	26
3.21	Домашнее задание №2	26
4	Виртуальная память	28
4.1	Прерывания и исключения	28
4.2	Память	29
4.3	Подходы к организации памяти	30
4.3.1	Досегментная организация(№1)	30
4.3.2	Сегментная организация(№2)	30
4.3.3	Страничная организация(№3)	30
4.3.4	Страничная организация в x86(Реальность)	30
4.4	MMU	30
4.5	Переключение контекста	30
4.6	Запрос памяти у ядра	30
4.6.1	Выделение памяти	30
4.6.2	Mapping	30
4.6.3	Аллокаторы памяти	30
4.7	Безопасность	30
4.7.1	Meltdown	30
4.7.2	ASLR	30
4.8	Page Reclaiming	31
4.9	Page Fault	31
4.10	Литература	31
4.11	Домашнее задание №3	31

Лекция 1

Введение

1.1 Преподаватель

Банщиков Дмитрий Игоревич

email: me@ubique.spb.ru

1.2 Операционные системы

- Операционная система — это уровень абстракции между пользователем и машиной. Цель курса в том, чтобы объяснить что происходит в системе от нажатия кнопки в браузере до получения результата.
- Курс будет посвящен Linux, потому что иначе говорить особо не о чем. Linux - это операционная система общего назначения, для машин от самых маленьких почти без ресурсов до мощнейших серверов. Простой ответ почему Linux настолько популярен, а не Windows — в некоторых случаях он бесплатный.
- Почему полезно разрушить абстракцию черного ящика? Чтобы писать более оптимизированный и функциональный код. Иногда встречаются проблемы которые не могут быть решены без знания внутренней работы ОС.

1.3 Ядро и прочее

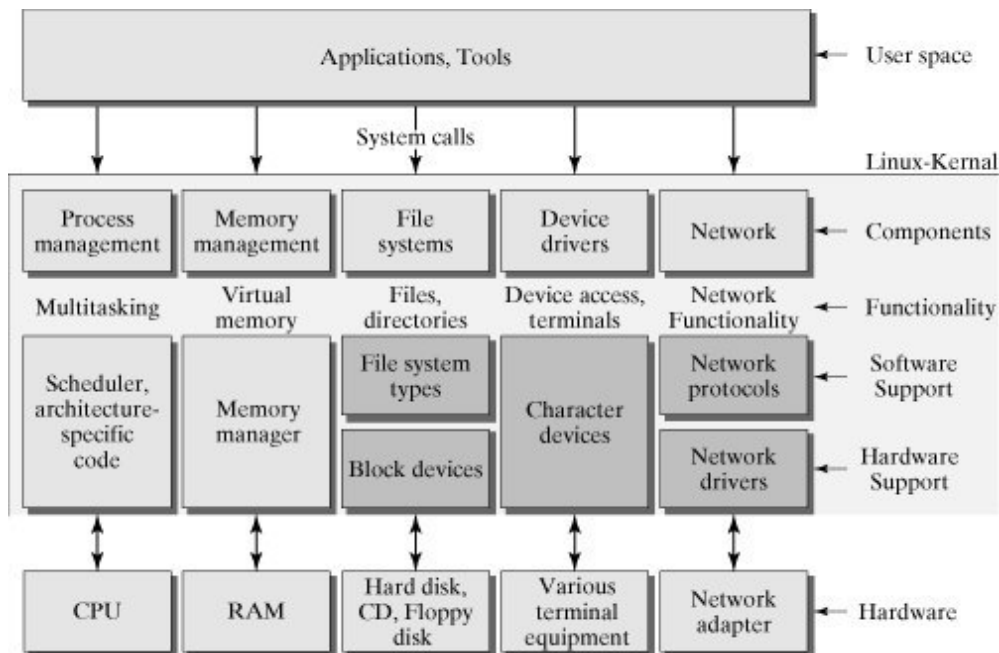


Рис. 1.1: Kernel scheme

- Ядро Linux (*kernel*) — монолитное, это оправдано для ядра, но уязвимость одной части ядра ставит в угрозу все остальные части.
- Микроядерные ОС - альтернатива монолитным (мы не будем их изучать), но с ними сложно работать, потому что протоколы общения между частями требуют ресурсов.
- *UNIX-like* системы - это системы предоставляющие похожий на *UNIX* интерфейс.

TODO Написать побольше

Лекция 2

Процессы

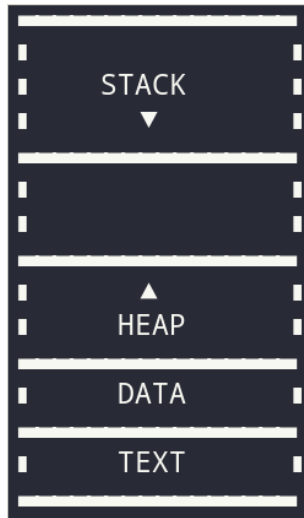
2.1 Общее

- Процесс — экземпляр запущенной программы. Процессы должны уметь договариваться чтобы сосуществовать, но в то же время не знать друг о друге и владеть монополией на ресурс машины.
- С точки зрения ОС процесс — это абстракция, позволяющая абстрагироваться от внутренностей процесса.
- С точки зрения программиста процесс — абстракция, которая позволяет думать что мы монополично владеем ресурсами машины.
- На момент выполнения процесс можно охарактеризовать полным состоянием его памяти и регистров. Чтобы приостановить процесс нам нужно просто сохранить его 'отпечаток', а чтобы возобновить нужно загрузить его память и регистры
- Батч-процессы (например, сборки или компиляции) не требуют отзывчивости пока жрут ресурсы.

Могут быть сформулированы следующие тезисы:

- Система не отличает между собой процессы
- Процессы в общем случае ничего не знают друг о друге
- Процесс - с одной стороны абстракция, которая позволяет не различать их между собой, с другой - конкретная структура
- Память и регистры - однозначно определяют процесс
- Способ выбора процесса - алгоритм *shedule*гивания
- Переключение с процесса на процесс - смена контекста процесса
- Контекст процесса - указатель на виртуальную память и значения регистров
- Как отличать процессы между собой - *pid*

2.2 Модель памяти процесса



- **stack** — выделяется неявно, **heap** — должны выделять сами (malloc, new и тп),
- секции — **data**, **text**
- **data** — статические, глобальные переменные, **text**
- **stack** растёт вниз, **heap** - вверх
- **frame** — область памяти стека, хранящая данные об адресах возврата, информацию о локальных переменных
- Резидентная память та, которая действительно есть

2.3 Системные вызовы для работы с процессами

- *fork()* — для того чтобы создать новый процесс

fork-example.c

```
void f() {
    const pid_t pid = fork();

    if (pid == -1) {
        // handle error
    }
    if (!pid) {
        // we are child
    }
    if (pid) {
        // we are parent
    }
}
```

fork-бомба — каждый дочерний процесс делает *fork()* и так далее

- *wait(pid)* — ждем процесс
- *exit()* — завершаемся

- *execve()* — запустить программу

execve-example.c

```
int main(int argc, char *argv[]) {
    char *newargv[] = { NULL, "hello", "world", NULL };
    char *newenviron[] = { NULL };
    if (argc != 2) {
        fprintf(stderr, "Usage: %s <file-to-exec>\n", argv[0]);
        exit(EXIT_FAILURE);
    }
    newargv[0] = argv[1];
    execve(argv[1], newargv, newenviron);
    perror("execve"); /* execve() returns only on error */
    exit(EXIT_FAILURE);
}
```

- *SIGKILL* — принудительное завершение другого процесса (**\$ kill**)

TODO Подробнее

2.4 PID и дерево процессов

- У каждого *PID* есть *parentPID* (*PPID*)
- **\$ ps** — позволяет посмотреть специфичные атрибуты процесса
- Процесс *init(pid 0)* создается ядром и выступает родителем для большинства процессов, созданных в системе
- Можно построить дерево процессов (**\$ pstree**)

Процесс делает *fork()*. Возможны 2 случая:

1. Процесс не делает *wait(childpid)*

Зомби-процесс (*zombie*) — когда дочерний процесс завершается быстрее, чем вы сделаете *wait*

2. Процесс завершается, что происходит с дочерним процессом?

Сирота (*orphan*) — процесс, у которого умер родитель. Ему назначается родителем процесс с *pid 1*, который время от времени делает *wait()* и освобождается от детей

PID - переиспользуемая вещь (таблица процессов)

2.5 Calling convention

\$ **man syscall** - как вызываются *syscall*

syscall.h

```
#ifndef SYSCALL_H
#define SYSCALL_H

void IFMO_syscall();

#endif
```

syscall.s

```
.data

.text
.global IFMO_syscall

IFMO_syscall:
    movq $1, %rax
    movq $1, %rdi
    movq $0, %rsi
    movq $555, %rdx
    syscall
    ret
```

syscall-example.c

```
#include "syscall.h"

int main() {
    IFMO_syscall();
}
```

Что здесь происходит?

1. Вызываем `write()`
2. Просим ядро записать 555 байт начинающихся по адресу 0 в файловый дескриптор №1 (*stdout* — №1, *stdin* — №2, *stderr* — №3)
3. Ничего не происходит, так как:
write(1, NULL, 555) возвращает -1 (*EFAULT* - Bad address)

Как со всем этим работать?

- \$ **strace** — трассировка процесса (подсматриваем за процессом, последовательность *syscall* с аргументами и кодами возврата)

Если *syscall* ничего не возвращает, то в выводе пишется ? вместо возвращаемого значения

- **\$ man errno** — ошибки

Если делаем *fork()* — проверяем код возврата (хорошая практика)

char strerror(int errnum)* - возвращает строковое описание кода ошибки

Почему *char**, а не *const char**? Потому что всем было лень.

thread_local — решение проблемы: переменная с ошибкой - общая для каждого потока

- До *main()* и прочего (конструкторы) происходит куча всего (*mmap*, *mprotect*, *mmap*, *access*) - размещение процесса в памяти и т.д.
- Программа не всегда завершается по языковым гарантиям (деструкторы)
- **\$ ptrace** — позволяет одному процессу следить за другим (используется, например, в *GDB*)
- *ERRNO* — переменная с номером последней ошибки, *strerror*
- *finalizers*, библиотечный вызов *exit*

2.6 API and ABI

TODO

2.7 Процесс и ОС

2.7.1 Scheduler

- Заводит таймер для процесса(квант времени), после его истечения или когда процесс сам закончился выбирает другой процесс.
- Производительность - разбиение на несколько процессов
- Дизайн приложения

2.7.2 Interruption

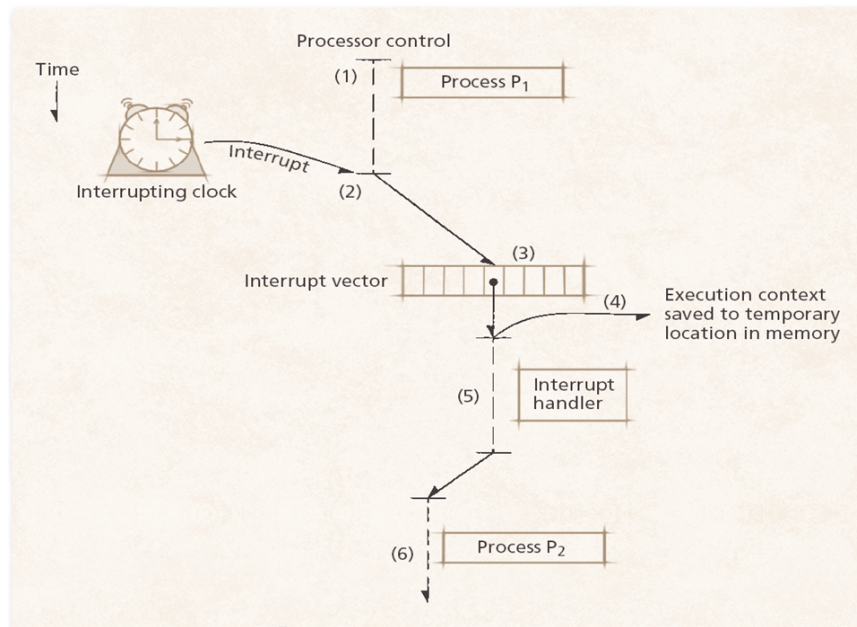


Рис. 2.1: Process-interruption

2.7.3 Состояния процесса

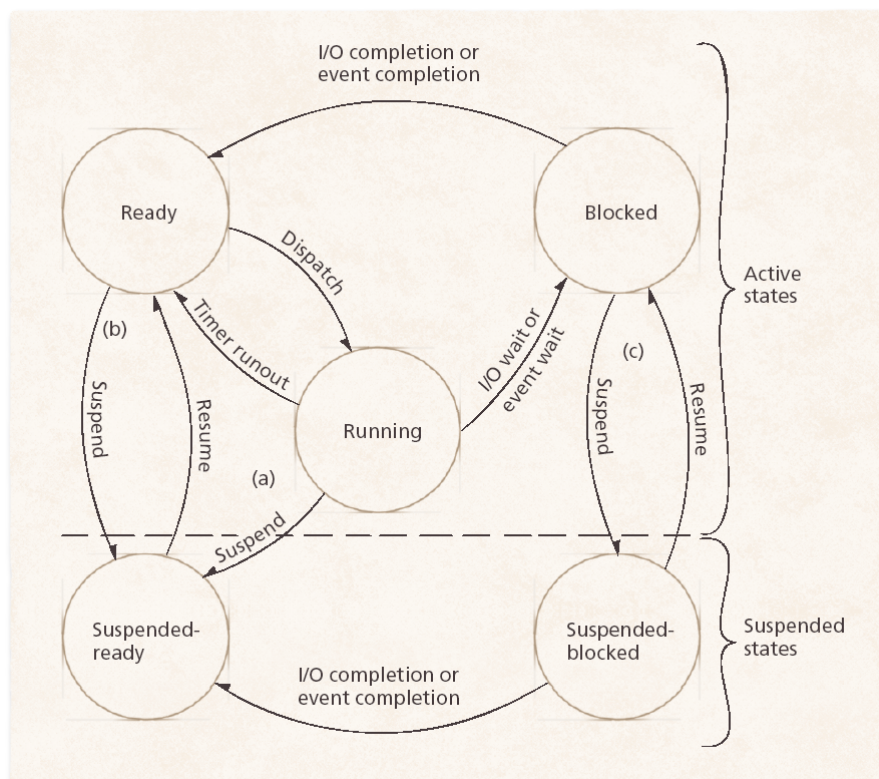


Рис. 2.2: Диаграмма времени жизни процесса и взаимодействия с ОС

2.7.4 Переключение контекста

Шедюлер ОС раскидывает процессы и создает иллюзию одновременного выполнения

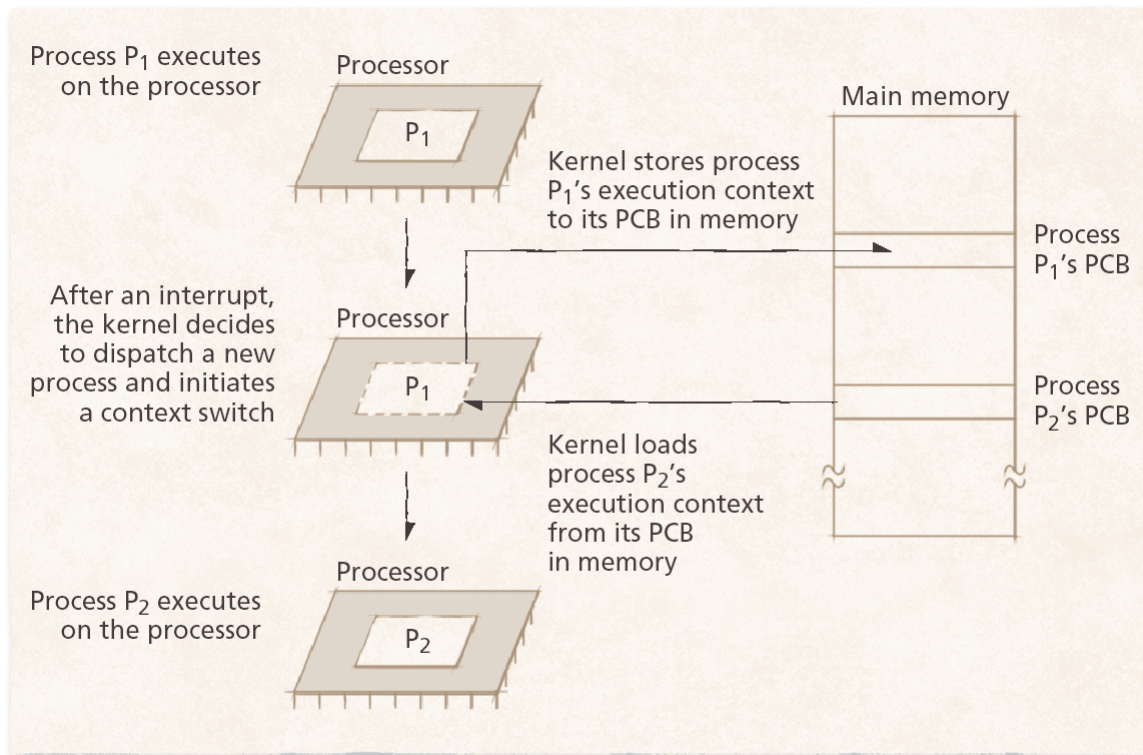


Рис. 2.3: Иллюзия многозадачности

2.8 Литература

- Windows Internals by Mark Russinovich
- Операционная система UNIX. Андрей Робачевский
- Unix и Linux. Руководство системного администратора. Эви Немец.

2.9 Домашнее задание №1

Необходимо создать игрушечный интерпретатор.

Цель — получить представление о том, как работают командные интерпретаторы.

- Программа должна в бесконечном цикле считывать с *stdin* полный путь к исполняемому файлу, который необходимо запустить и аргументы запуска. Дождавшись завершения процесса необходимо вывести на *stdout* код его завершения.
- Необходимо использовать прямые системные вызовы для порождения новых процессов, запуска новых исполняемых файлов и получения статуса завершения системного вызова.

- Все возвращаемые значения системных вызовов должны быть проверены и в случае обнаружения ошибок необходимо выводить текстовое описание ошибки.
- На входе могут быть некорректные данные.
- Дополнительные баллы - поддержка переменных окружения.
- Язык имплементации - C или C++.

TODO Добавить еще одну картинку из images

TODO Секция Контекст процесса

TODO Секция Системные процессы

TODO Состояния процесса

Лекция 3

Файловые системы

3.1 Носители

3.1.1 HDD

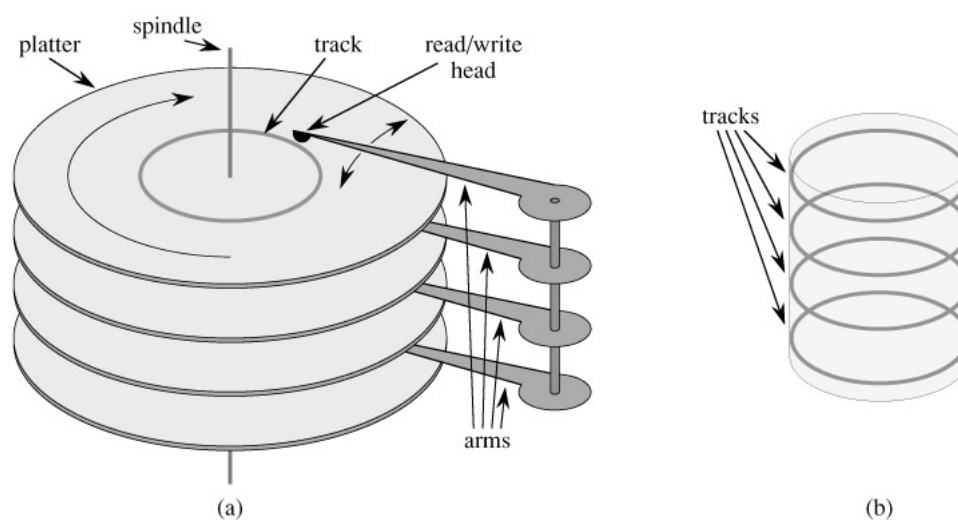


Рис. 3.1: Жесткий диск

- Обороты в минуту(O) — 5400, 7200, 10000, ...
- $\frac{1}{2*O}$ — минимальное время доступа (случайное чтение)
- В мире Unix не существует дефрагментации (ОС должна сама заботиться)
- Время отказа (**MTBF** — min time before failure) — условное количество циклов наработки до отказа
- На **server** — сутки, **desktop** — часы (разница примерно в 3 раза, если одно и то же число циклов)
- Плюсы: стоимость, объем
- Минусы: время доступа, надежность

3.1.2 SSD

- **SATA** и **NVME** — протоколы для дисков
- **NVME** — новомодная штука для **SSD**
- Плюсы: время доступа
- Минусы: надежность, стоимость, объем

3.1.3 Общее

- **IOPS** — input/output operations per second

Показатель применяется для сравнения, например, какого-нибудь **HDD** с **SSD**

- **seek** — рандомное чтение (512 байт)
- Минимум информации: сектор — 512 байт -> 4096 байт
- Чтение одного байта равносильно чтению всего сектора с этим байтом
- Запись одного байта — считать один сектор, заменить байт и записать один сектор
- Аналогия — процессор-память — **cacheline**
(кэшируется линиями, а на диск записывается и считывается секторами)

3.2 Быстродействие

3.2.1 Интересные числа

Числа, которые должен знать каждый программист

Cycle	1 ns
Main memory reference	100 ns
Read 4K randomly from SSD	150 us
Read 1 MB sequentially from SSD	1 ms
Disk seek	10 ms
Read 1 MB sequentially from disk	20 ms

3.2.2 Выводы для HDD

- Читать нужно последовательно
- Обращения к диску следует минимизировать
- Стоимость доступа сильно дороже передачи данных

3.3 Structure packaging

Сколько будет занимать памяти следующая структура?

hole1.c

```
struct hole {  
    uint64_t a;  
    uint32_t b;  
    uint64_t c;  
    uint32_t d;  
}
```

Ответ: 32 байта, так как *b* и *d* будут выравнены по MAX_ALIGNMENT
Очевидное решение проблемы:

hole2.c

```
struct hole {  
    uint64_t a;  
    uint32_t b;  
    uint32_t d;  
    uint64_t c;  
}
```

Данная структура будет занимать 24 байта на x86_64.

3.4 Алгоритмы элеватора

[Ссылка на презентацию](#)

1. SLIDE 6

Алгоритмы элеватора обрабатывают последовательности запросов к диску (перепорядочивают их)

2. SLIDE 7

FCFS (FIFO) — самый простой и медленный

3. SLIDE 8-9

SSTF (Shortest Seek Time First)— сортировка (очередной запрос определяется наименьшим временем seek)

4. SLIDE 10 - ...

Различные способы упорядочивания(**SCAN**)

3.5 Файл

- Абстракция для данных (для Kernel space)
- Последовательность байтов (для Userspace)
- Формат не определен
- **Unix** — все есть файл (абстракция-интерфейс внутри ядра)
- Типы файлов
 - regular
 - directory
 - symlink
 - socket, fifo
 - character device, block device

3.6 Директория

- Содержит имена находящихся в ней файлов
- `.` — ссылка на текущую
- `..` — ссылка на родителя
- `$ cd` — сменить директорию
- `$ pwd` — текущая директория
- `$ ls` — формирование дерева
- `$ find` — поиск
- *filename vs pathname*: `$ realpath`

3.6.1 Права — просто числа

- `$ view /etc/passwd`
- `$ view /etc/group`
- `$ id` - показывает идентификаторы того, кто ее вызывал
- `$ execute` — search
- `$ read` — directory listing
- `$ write` — changing directory

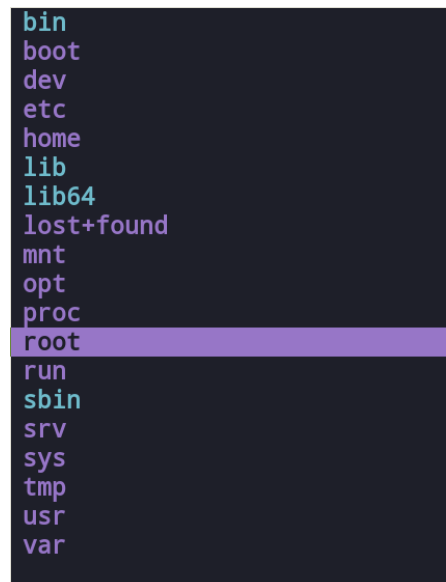
- Темные директории (переход в директорию внутри директории, для который ты не можешь посмотреть все файлы)
- Права `rx` (read, write, execute)
- **\$ chmod** — меняет права доступа
\$ chmod 123 — 1 - user, 2 - group, 3 - other
- У процесса есть информация о том, кто его запустил
- **SGID** (Set Group ID up on execution)
 Специальный тип прав, который временно выдается запускающему (у него теперь права группы на файл/директорию)

3.6.2 sticky bit

- Изменение поведения при создании нового файла
- `/tmp`
- Создаешь директорию со *sticky bit* и все, кто создают файлы в этой директории имеют на них права

3.7 Иерархия

- /
 - bin/
 - dev/
 - etc/
 - sbin/
 - home/
 - var/
 - usr/
 - * bin/
 - * sbin/
 - tmp



(На картинке изображен типичный вид корня в Linux)

3.8 Монтирование

- Есть корень и есть узлы, в которые можно монтировать другие файловые системы (часть из них виртуальная)
- **\$ mount**
- Для / обычно используется **ext4** (использует журналирование)
- Для /boot может использоваться **ext2** — так как это более проверено временем (на Ubuntu)
- Файловая система для узла — это не константа, ее можно менять
- **\$ df -h** , **\$ du -hs**

3.9 Inode

- Директория задает mapping имени файла в его inode
- **\$ ln**
- Hardlink — существует в рамках одной файловой системы
- Softlink(symlink) — text string
- **\$ stat** — информация о файле
- *atime* — время последнего доступа
- *ctime* — изменение мета-информации
- *mtime* — изменение содержимого файла
- inode корневой файловой системы фиксирован — 2

3.10 Проход по пути

- Рекурсивный процесс (увеличиваем индекс при проходе в глубину)
- Количество seek по диску зависит от длины пути
- `namei` (name-innode) — lru-cache (файл \leftrightarrow номер inode)

3.11 Атрибуты процесса

3.11.1 Structures

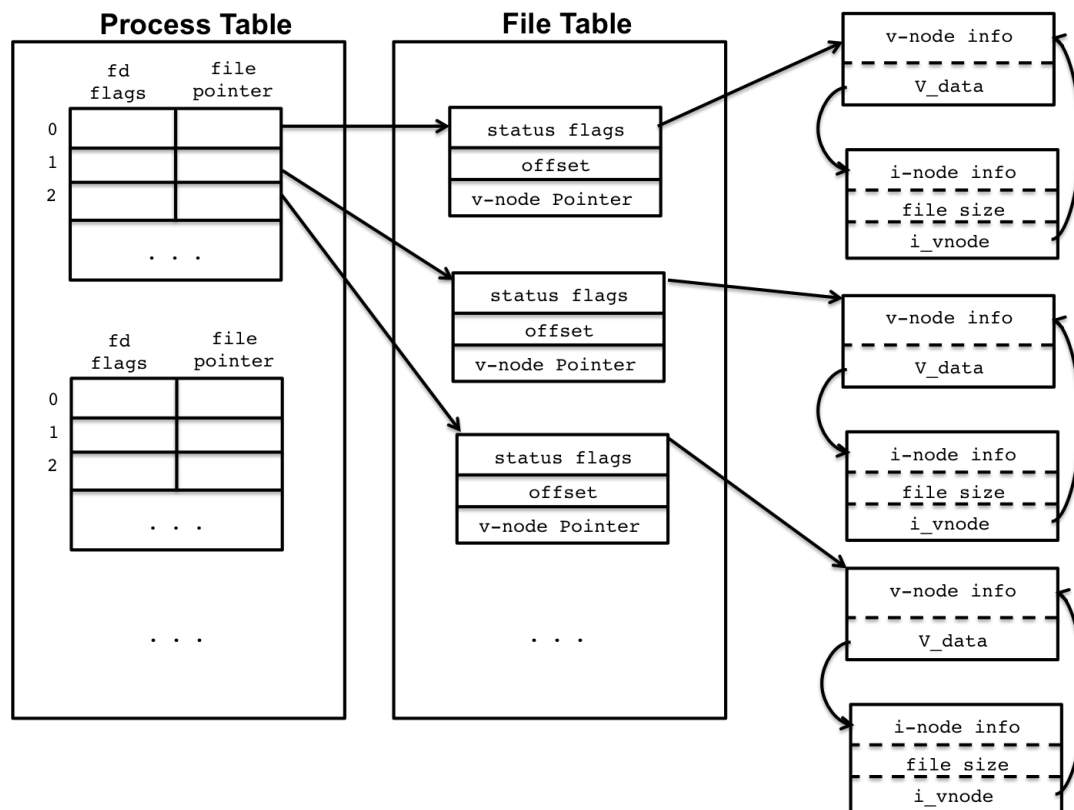


Рис. 3.2: Kernel structures

3.11.2 Duplication and sharing

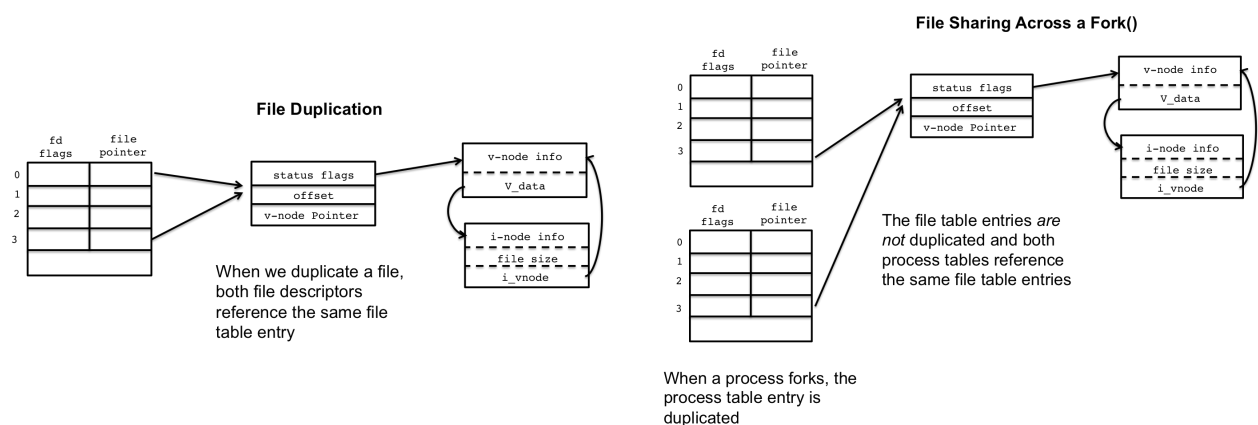


Рис. 3.3: Duplication and sharing

3.11.3 Deep view

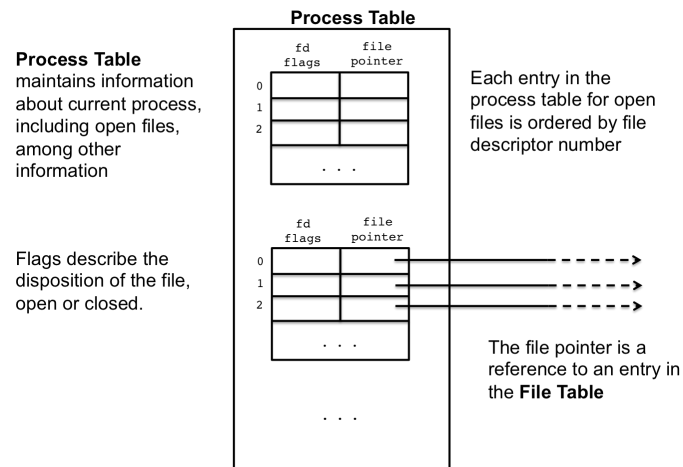


Рис. 3.4: Processes

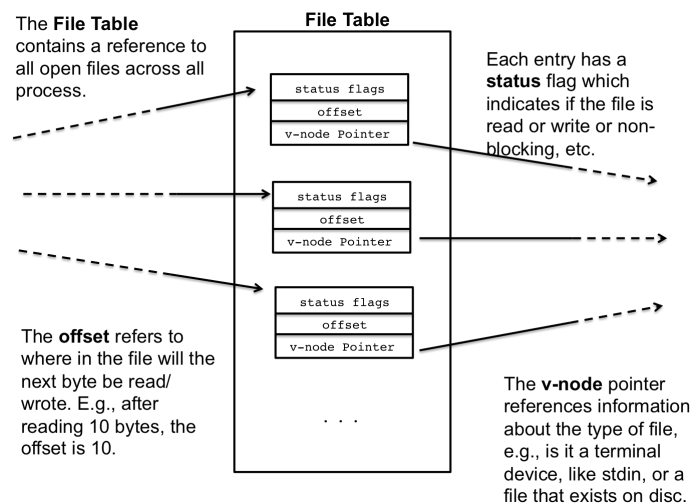


Рис. 3.5: Files

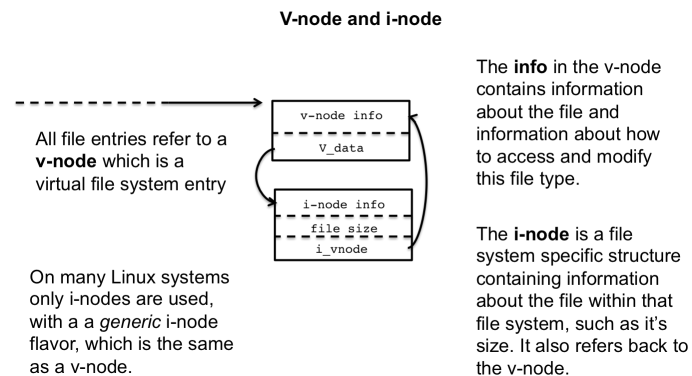
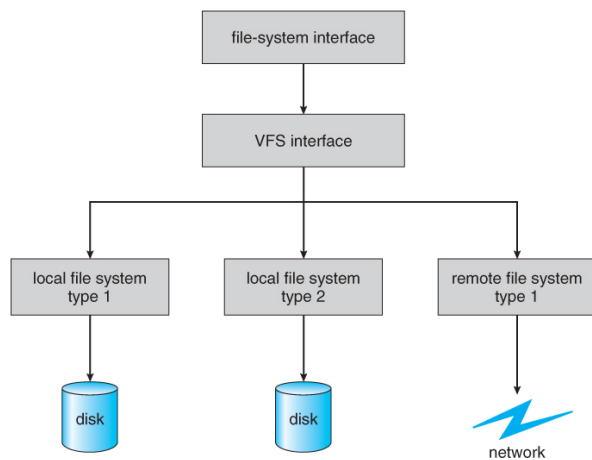


Рис. 3.6: Vnode and Inode

3.12 Файловые системы



Виды

- VFS
- Сетевые
- Виртуальные
- На диске
- В памяти

TODO Описания

3.13 Диски

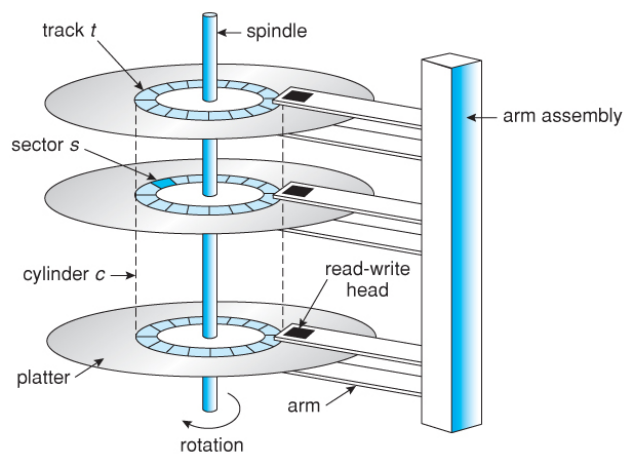


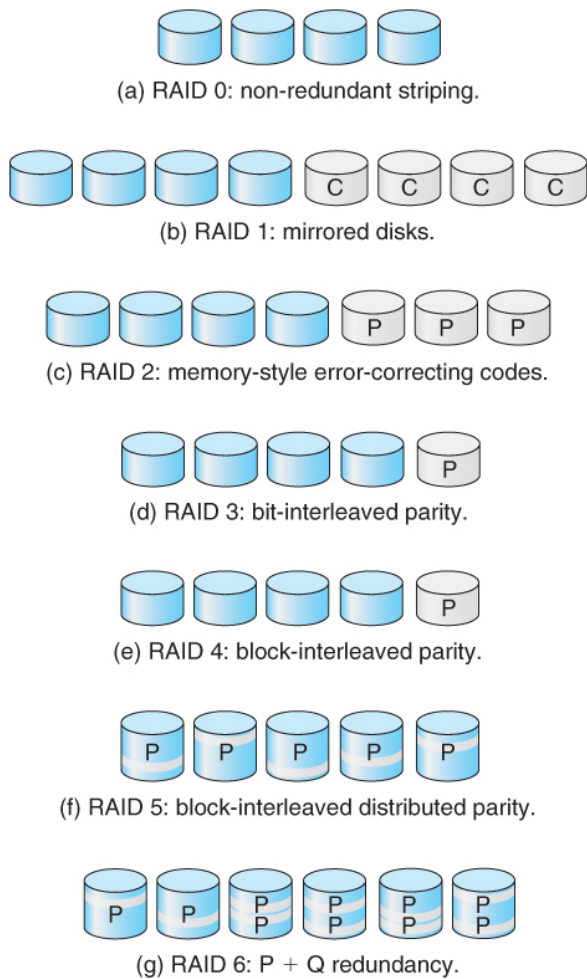
Рис. 3.7: Устройство диска

- Устройство диска:
 - сектор
 - * header: метаданные для контроллера диска
 - * данные
 - * trailer: ECC
 - цилиндр
 - пластина
 - трэк
 - шпиндель

- При записи данных на диск в сектора считаем и записываем **ECC**, при чтении считаем и затем сверяем (пытаемся исправить, если не сошлось)
- **CLV** — Constant Linear Velocity(**CDROM**)
- **CAV** — Constant Angular Velocity(**HDD**)
- На внешних цилиндрах больше секторов, чем на внутренних => чем ближе к центру тем меньше скорость нужна (CD)
- На жестких дисках — постоянная угловая скорость (в центре больше плотность)
- *Partitioning* — разделение диска на несколько логических частей (партиции, на каждой своя файловая система), они трактуются как "отдельные" диски
- Существует другой подход - "собственная" файловая система на "сыром" диске (MySQL)
- Современный контроллер жесткого диска может находить механически поврежденные блоки (bad blocks) и делать remap их на некоторые запасные (sector sparing: replace bad sectors with spare)
- **\$ man 1 badblocks**
- Bootblock — bootstrap program at fixed location
- **MBR** — master boot record — boot code + partition table

3.14 RAID

Redundant Arrays of Independent Disks (Избыточный массив независимых дисков)



- Reliability (надежность, hacks for more long time of complex usage)
- Performance (striping, суммирование IOPS)
- Levels:
 - **0** — pure striping (1 блок на 1 диске, 2 блок на 2 диске и т.д. — один диск вышел из строя — fail)
 - **1** — pure mirroring (пара дисков, данные продублированы)
 - **0 + 1, 1 + 0**
 - **2, 3, 4, 5** — используются не так часто (хранение доп. данных)
- Rebuild — падает производительность
- Hardware RAID — проблемы: "заложенность" на производителе (vendor lock in), драйвера, как правило, не очень
- Software RAID — гипотетически медленно, но на практике нужная производительность достигается
- У аппаратных RAID — есть батарейка, которая "улучшает" производительность (сначала на батарейку, потом на диск, когда будет удобно)
- **TODO** Байка про SpaceWeb

3.15 Организация файловых систем

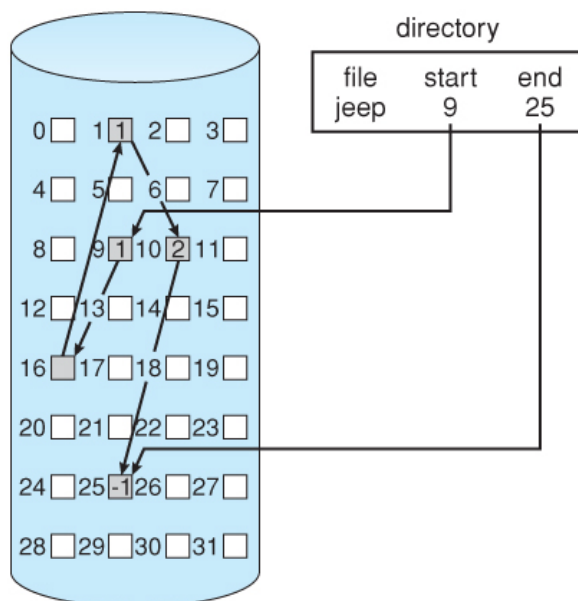
Структура директорий: связный список или хэш-таблица

smart (`$ smartctl`) — оценка диска на практике

Свободные сектора

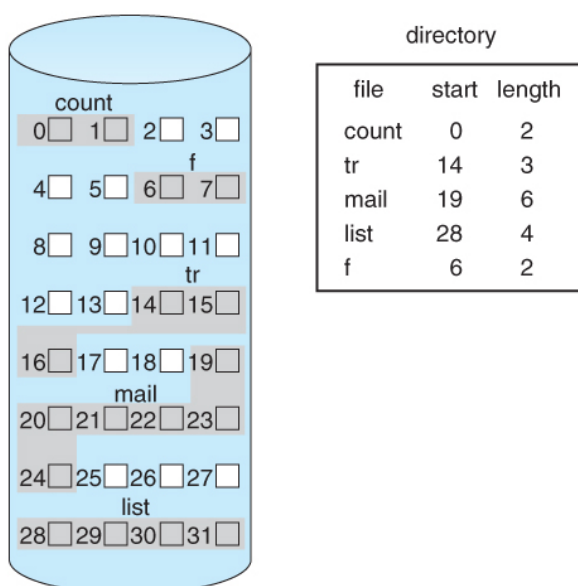
1. Bit Vector — fast, space usage
2. Список

Выделение памяти (allocation)



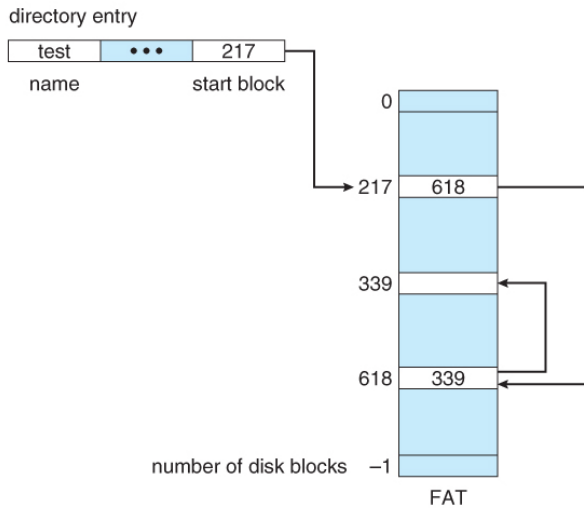
Линейное

- Объект задается началом и концом (здесь возникают проблемы внешней и внутренней фрагментации)
- Линейное чтение, меньше обращений
- Performance: sequential, random



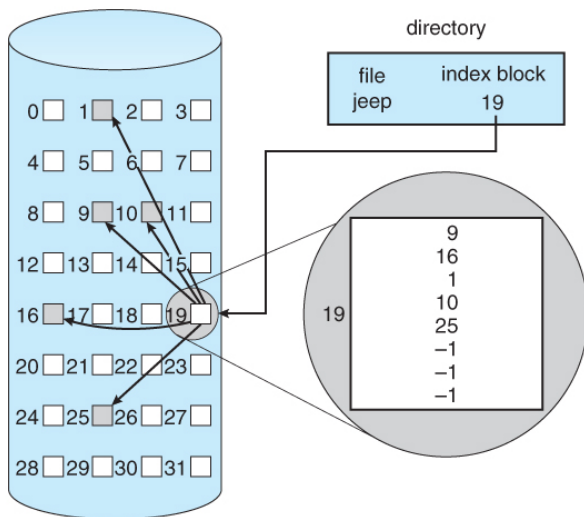
Список

- В каждом "блоке" указатель на следующий
- Плюсы: решает проблему внешней фрагментации
- Минусы: надежность, прыгаем по памяти
- Performance: sequential, awful random



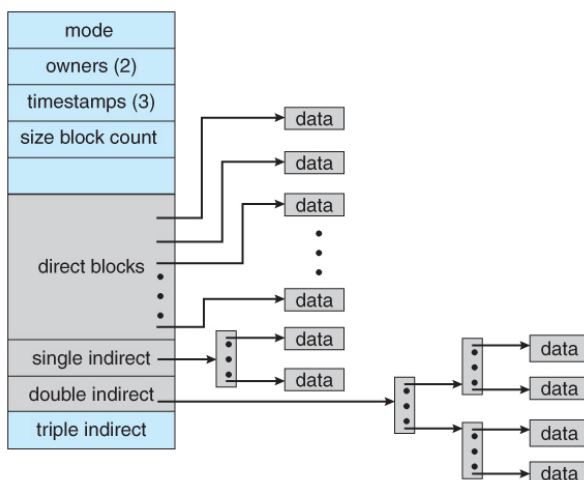
FAT

- Все ссылки хранятся в начале диска — их можно эффективно кэшировать
- Улучшенный поиск



Indexed

- Отдельный блок для ссылок на данные
- Внутренняя фрагментация



UNIX

- Комбинированная
- Косвенная многоуровневая адресация

3.16 Операции с файлами

TODO 3 картинки + презентация

3.17 Системные вызовы

TODO

3.18 Пару слов о типах

Лучше всего использовать следующие типы данных:

TODO Why?

- `off_t`
- `size_t`
- `ssize_t`

3.19 Common pitfalls

- Неатомарные операции (окно **race**)
- Утечка дескрипторов
- Файловая система гарантирует, что до тех пор пока ты держишь файловый дескриптор на файл с ним ничего не произойдет извне (функции оканчивающиеся на *"at"*, защита от **TOCTOU**)
- *openat*

3.20 Литература

- The Unix Programming Environment. Brian W. Kernighan, Rob Pike
- Advanced Programming in the Unix Environment. W. Richard Stevens

3.21 Домашнее задание №2

Необходимо написать подмножество утилиты `find`.

Программа должна:

- Первым аргументом принимать абсолютный путь, в котором будет производиться поиск файлов.
- По умолчанию выводить в стандартный поток вывода все найденные файлы по этому пути

- Поддерживать аргумент **-inum num**. Аргумент задает номер инода
- Поддерживать аргумент **-name name**. Аргумент задает имя файла
- Поддерживать аргумент **-size [—=+]size**. Аргумент задает фильтр файлов по размеру(меньше, равен, больше)
- Поддерживать аргумент **-nlinks num**. Аргумент задает количество hardlink'ов у файлов
- Поддерживать аргумент **-exec path**. Аргумент задает путь до исполняемого файла, которому в качестве единственного аргумент нужно передать найденный в иерархии файл
- Поддерживать комбинацию аргументов. Например хочется найти все файлы с размером больше 1GB и скормить их утилите `/usr/bin/sha1sum`.
- Выполнять поиск рекурсивно, в том числе во всех вложенных директориях.
- Сильные духом призываются к выполнению задания с использованием системного вызова *getdents(2)*. Остальные могут использовать *readdir* и *opendir* для чтения содержимого директории.

Лекция 4

Виртуальная память

4.1 Прерывания и исключения

- Процессор с памятью не могут быть жить в вакууме (без ОС)
- Простыми словами: иногда процессор не знает что ему делать в конкретной ситуации, так как не знает контекста исполнения, тогда он просит помощи у внешней среды (чаще всего ОС)
- *Interrupt Deriving Architecture* — есть таблица, каждой ячейке которой соответствует какая-либо исключительная ситуация (например, поделить на ноль) и функция ее разрешающая.

- **IDTR** — регистр, в котором хранится адрес *Interrupt Descriptor Table* (глобальный)

В некоторых архитектурах находится по фиксированному адресу (например, x86 — защищенный режим)

Проще говоря **callbacks**

- Другой подход — *Polling* (есть управляющий код, который периодически опрашивает устройство на предмет того, что нужно обработать; процессор выставляет флаг — "нуждаюсь в обработке").

Пример — сетевая карта

- У каждого подхода свои плюсы и минусы
- **cr2** — контрольный регистр, считывается функцией *do_page_fault* (которая занимается обработкой **page fault**)

4.2 Память

Хочется чтобы каждый процесс был защищен от любого другого
Проблемы памяти:

1. Памяти мало, она дорогая

2. Памяти мало, программ много, как договориться?

Закон Парето - 80% обращений к 20% памяти в среднем у пользовательской программы

Может тогда выгружать неиспользуемую память на диск?

Может еще переиспользовать память? (например, сегмент **text** у **Chrome**)

3. Памяти мало, программ много, как защититься?

Неплохо было бы выложить в read-only какую-то память (сегмент **text** — *const*-переменные)

stackoverflow.cpp

```
#include <iostream>

void a() {
    char A[100]; // Локальная переменная
    std::cin >> A; // 132 байта
    // Начали писать вверх и переписали адрес возврата
    // (так как стек растет вниз, а адреса массива вверх)
    // Когда делаем RET, вернемся по испорченному адресу
}

void b() {
    a();
}
```

Способ защиты — память, которая может записываться не может выполняться

Канарейка на стеке — проверяем значение переменной 'канарейка', которую добавили после адреса возврата

Хотим чтобы память ядра была недоступна пользователям

Как можно это все сделать?

4.3 Подходы к организации памяти

TODO

4.3.1 Досегментная организация(№1)

4.3.2 Сегментная организация(№2)

4.3.3 Страничная организация(№3)

4.3.4 Страничная организация в x86(Реальность)

4.4 MMU

TODO

4.5 Переключение контекста

TODO

4.6 Запрос памяти у ядра

4.6.1 Выделение памяти

TODO

4.6.2 Mapping

TODO

4.6.3 Аллокаторы памяти

TODO

4.7 Безопасность

4.7.1 Meltdown

TODO

4.7.2 ASLR

TODO

4.8 Page Reclaiming

TODO presentation

4.9 Page Fault

TODO presentation

4.10 Литература

1. Understanding the Linux Kernel by Daniel P. Bovet & Marco Cesati
(Достаточно хорошо описана архитектура)
2. Intel 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual Volume 3
(Руководство от Intel)
3. x86 Instruction Set Architecture by Tom Shanley
(Выжимка руководства от Intel)
4. What every programmer should know about memory by Ulrich Drepper
(Очень полезно)
5. Безопасное программирование на C и C++. Роберт С. Сиакорд
(Про уязвимости)

4.11 Домашнее задание №3

TODO