

1. Билет №11

Аппаратные прерывания в Linux: запрос прерывания и линии IRQ. Простейшая схема аппаратной поддержки прерываний (концептуальная трех шинная архитектура системы). Быстрые и медленные прерывания, пример быстрого прерывания, флаги. Нижняя и верхняя половины обработчиков прерываний: регистрация обработчика аппаратного прерывания, функция регистрации и ее параметры. Нижние половины: `softirq`, `tasklet`, `work queue` — особенности реализации и выполнения в SMP-системах. Примеры, связанные с планированием отложенных действий (лаб. раб.)

ОС - аппаратно-зависимое ПО.

1.1. Система прерываний

Система прерываний включает в себя:

1. Системные вызовы (синхронные — возникают в процессе выполнения программы, вызываются соответствующей командой).
2. Исключения (синхронные — возникают в процессе выполнения программы, переполнение стека/деление на 0...).
3. Аппаратные прерывания (асинхронные — не зависят ни от каких действий в системе, выполняются на высоких уровнях приоритетов, их выполнение нельзя прервать, задача — информирование процессов о событиях в системе, от системного таймера/клавиатуры..., виды: от системного таймера (единственное периодическое), от действий оператора (ctrl+c), от внешних устройств).

Про таблицы прерываний:

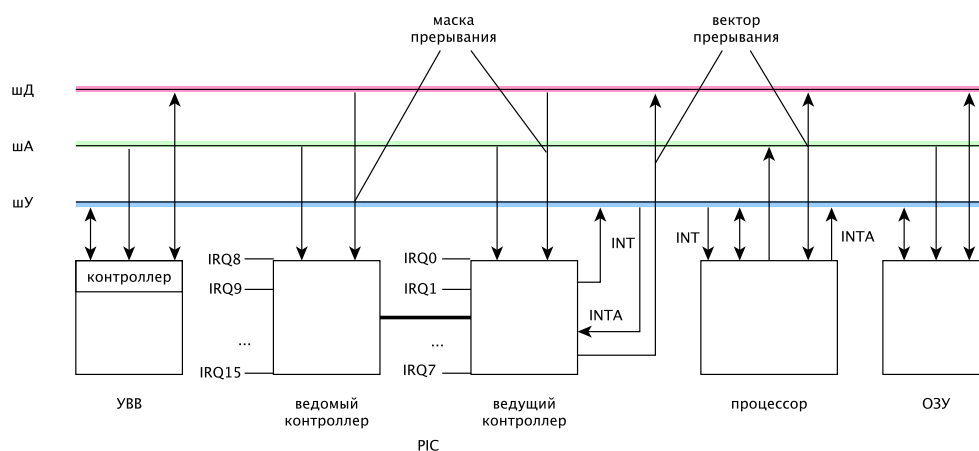
В 16-разрядной ОС (DOS) существует таблица векторов прерываний — таблица, содержащая векторы прерывания (far-адреса обработчиков прерывания — сегмент (2б) + смещение (2б)). Она начинается с нулевого адреса, занимает 1 Мб. Вектор прерывания - смещение в этой таблице.

В 32-разрядной ОС существует IDT (Interrupt Descriptor Table), нужная для получения адресов обработчиков прерываний, содержащая 8-байтовые дескрипторы прерываний, хранящие информацию о смещении к обработчику прерывания в соответствующем сегменте.

В 64-разрядной ОС существует IDT и список прерываний — запутанная система.

В современных системах часть прерываний относится к APIC, а часть к подсистеме ОС MSI (Message Signal Interrupts).

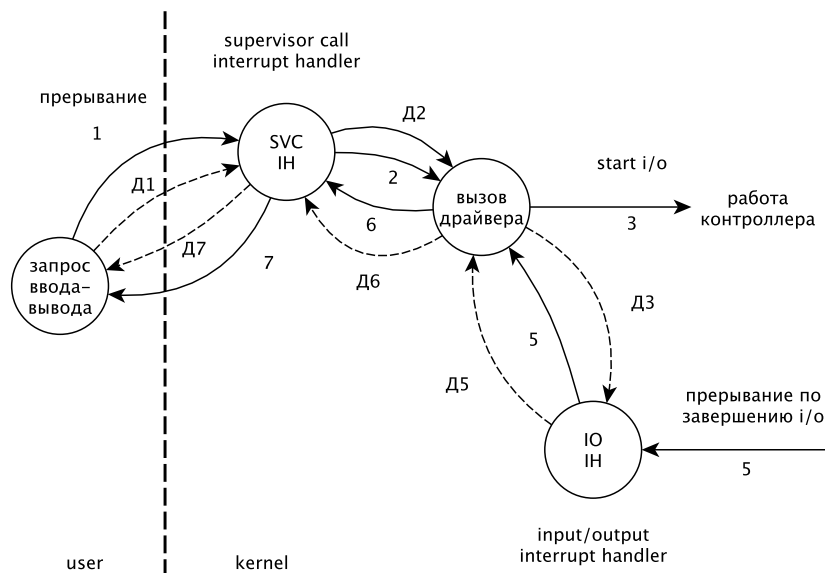
1.2. Прерывания в последовательности ввода-вывода — обслуживание запроса процесса на ввод-вывод



Взаимодействие компьютера с внешними устройствами выполняется с помощью аппаратных прерываний — идея распараллеливания действий, когда управление внешним устройством берёт на себя контроллер устройства (замена опроса готовности ВУ).

Взаимодействие компьютера с внешними устройствами выполняется с помощью аппаратных прерываний — идея распараллеливания действий, когда управление внешним устройством берёт на себя контроллер устройства (замена опроса готовности ВУ).

1. Запрос приложения на ввод/вывод переводит систему в режим ядра.
2. Подсистема ввода/вывода вызывает драйвер устройства (в драйвере есть 1 обработчик прерывания от данного устройства).
3. По окончании операции ввода/вывода контроллер устройства формирует сигнал прерывания, приходящий на соответствующую линию прерывания контроллера прерываний.
4. Контроллер формирует сигнал INT, который по ШУ идёт на выделенную ножку процессора.
5. В конце цикла выполнения каждой команды (выборка-дешифрирование-выполнение) процессор проверяет наличие сигнала на ножке. Если есть сигнал, процессор выставляет на ШУ INTA.
6. Контроллер отправляет по ШД вектор прерывания в регистры процессора.
7. Процессор смещается относительно нулевого адреса и находит в таблице адрес обработчика.
8. Процессор по шине данных отправляет в контроллер маску прерываний, и контроллер адресуется по шине адреса.



1.3. Обработчики аппаратных прерываний: регистрация в системе — функция и ее параметры, примеры

Основная задача обработчика прерывания — передача данных от устройства по шине данных, если была запрошена операция чтения. Даже если была запрошена операция записи, устройство все равно опрашивает по шине данных информацию об успешности операции. Чтобы обработать ее, обработчик должен сохранять информацию, поступающую от устройства в буфер ядра. Затем эта информация поступит приложению, запросившему ввод/вывод.

1.4. Обработка аппаратных прерываний

Любые аппаратные прерывания выполняются на самом высоком уровне приоритета (самый высокий — системный таймер, выше него только migration для перебалансировки нагрузки между процессорами и power при падении напряжения — система отключается от питания и не может работать).

Далее идут остальные прерывания от внешних устройств.

Т.к. АП — важнейшие прерывания в системе, то для того, чтобы исключить негативные ситуации, связанные с обработкой данных, поступивших от внешних устройств (в многопроцессорных системах), система делает следующее:

Т.к. любое АП не может обрабатываться всеми ядрами (обрабатывается определенным ядром), то на этом ядре все прерывания запрещаются, а в системе запрещаются все прерывания по конкретной линии IRQ.

1.5. Нижняя и верхняя половины обработчиков прерываний

АП не могут выполнять большой объем действий, т.е. выполняться длительное время, т.к. никакая другая работа на данном процессоре выполняться не может, что негативно сказывается на **производительности и отзывчивости системы**.

Эти 2 части — top_half и bottom_half. top_half (interrupt handler) копирует данные устройства в специальный буфер, инициализирует отложенное действие bottom_half (softirq, tasklet или workqueue) и завершается. top_half должен выполняться быстро, так как при этом игнорируются остальные прерывания. bottom_half выполняется при разрешенных остальных прерываниях и делает всю остальную обработку прерывания.

1.6. Быстрые и медленные прерывания

Выделяются быстрые и медленные аппаратные прерывания. Быстрые — выполняются атомарно, не делятся на части, в современных системах это только прерывание от системного таймера. Медленные — все остальные, делятся на 2 части.

Если речь идет о медленных, то одной из задач обработчика АП является инициализация отложенного действия в виде `softirq`, `tasklet`, `workqueue`.

`bottom_half` — отложенные действия, при этом этими отложенными действиями система управляет по-разному.

1.7. Функция регистрации и ее параметры

Система предоставляет разработчику возможность зарегистрировать собственный обработчик прерывания.

Для этого ядро предоставляет функцию `request_irq`

```
1 typedef irqreturn_t (*irq_handler_t)(int, void *);
2
3 int request_irq(unsigned int irq, irq_handler_t handler, unsigned long
    flags, const char* name, void *dev);
```

`irq` — номер линии прерывания. `handler` — обработчик прерывания. `flags` — флаги. `name` — имя обработчика. `dev` - указатель на некоторый объект, используется для освобождения линии прерывания от указанного обработчика:

```
1 const void *free_irq(unsigned int irq, void *dev_id);
```

1.8. Флаги

1. `level_triggered`, `edge_triggered` — определяют срабатывание;
2. `IRQF_SHARED` — разрешает деление линии `irq` между несколькими обработчиками прерываний.
3. `IRQF_PROBE_SHARED` — устанавливается абонентом, если предполагается возможность проблем/нестыковок при делении.
4. `IRQF_TIMER` — определяет единственное быстрое прерывание.

5. IRQF_PERCPU — закрепление конкретного прерывания за определенным процессом (монопольно).

1.9. Тасклеты — объявление, планирование

Тасклет — специальный тип softirq. Тасклеты представлены двумя типами отложенных прерываний: HI_SOFTIRQ (вып. раньше) и TASKLET_SOFTIRQ.

Тасклет не может выполняться параллельно, выполняется атомарно на том же процессоре, на котором выполняется обработчик запланировавшего его прерывания. Инициализируется как статически, так и динамически. Выполняется в контексте прерывания — нельзя использовать средства взаимного исключения, кроме spinlocks (активное ожидание на процессоре). Выполняется ksoftirqd. Является упрощённым интерфейсом softirq.

Определена структура:

```
1 struct tasklet_struct
2 {
3     struct tasklet_struct *next; // указатель на следующий тасклет в doubly-linked списке
4     unsigned long state; // состояние тасклета
5     atomic_t count; // счетчик ссылок
6     bool use_callback; // флаг
7     union {
8         void (*func)(unsigned long data); // функция обработчика тасклета
9         void (*callback)(struct tasklet_struct *t);
10    };
11    unsigned long data; // аргумент функции обработчика — тасклет
12};
```

Тасклеты в отличие от softirq могут быть зарегистрированы как статически, так и динамически. Статически тасклеты создаются с помощью двух макросов (man 6.2.1):

```
1 #define DECLARE_TASKLET(name, _callback) \
2 struct tasklet_struct name = { \
3     .count = ATOMIC_INIT(0), \
4     .callback = _callback, \
5     .use_callback = true, \
6 }
7 #define DECLARE_TASKLET_DISABLED(name, _callback) \
8 struct tasklet_struct name = { \
```

```

9   .count = ATOMIC_INIT(1) ,      \
10  .callback = _callback ,        \
11  .use_callback = true ,         \
12 }

```

Оба макроса статически создают экземпляр структуры `struct tasklet_struct` с указанным именем (`name`). Например,

```

1 DECLARE_TASKLET(my_tasklet, tasklet_handler);

```

Эта строка эквивалентна следующему объявлению:

```

1 struct tasklet_struct my_tasklet = {NULL, 0, ATOMIC_INIT(0) ,
   tasklet_handler};

```

В данном примере создается тасклет с именем `my_tasklet`, который разрешен для выполнения. Функция `tasklet_handler` будет обработчиком этого тасклета. Поле `dev` отсутствует в текущих ядрах.

При динамическом создании тасклета объявляется указатель на `struct tasklet_struct`, а затем для инициализации вызывается функция:

```

1 extern void tasklet_init(struct tasklet_struct *t, void (*func)(unsigned
   long), unsigned long data);

```

Пример:

```

1 tasklet_init(t, tasklet_handler, data);

```

Тасклеты должны быть зарегистрированы для выполнения. Тасклеты могут быть запланированы на выполнение функциями:

```

1 tasklet_schedule(struct tasklet_struct *t);
2 tasklet_hi_schedule(struct tasklet_struct *t);

```

Когда тасклет запланирован, ему выставляется состояние `TASKLET_STATE_SCHED`, и он добавляется в очередь. Пока он находится в этом состоянии, запланировать его еще раз не получится, т.е. в этом случае просто ничего не произойдет. Тасклет не может находиться сразу в нескольких местах очереди на планирование, которая организуется через поле `next` структуры `tasklet_struct`. После того, как тасклет был запланирован, он выполниться только один раз.

Свойства:

1. Если вызывается функция `tasklet_schedule()`, то после этого тасклет гарантированно будет выполнен на каком-либо процессоре хотя бы один раз.
2. Если тасклет уже запланирован, но его выполнение все еще не запущено, он будет выполнен только один раз.
3. Если этот тасклет уже запущен на другом процессоре (или `schedule` вызывается из самого тасклета), выполнение переносится на более поздний срок.
4. Если разработчик считает, что в данном тасклете нужно выполнить действия, которые могут выполняться в других таскетах, он реализует взаимное исключение с помощью `spinlocks`.

Критерии	softirq	tasklet	workqueue
Определение	10 шт. определено в ядре статически	С + Д	С + Д
Взаимоискл.	Да	Нет	Да
Возможность паралл. вып.	Да	Нет	Да
Выполнение	В контексте спец. потоков ядра (<code>ksoftirqd</code>)	В контексте запланировавшего обраб. прерыв.	В контексте спец. потоков ядра (<code>kworker</code>)
Блокируются	Наверное нет	Нет	Да

1.10. spin_lock

Race condition — условия гонок: процессы выполняются с разной скоростью и пытаются получить доступ к разделяемым переменным.

Аппаратная реализация взаимного исключения — `test_and_set`. Атомарная функция, реализующая как неделимое действие проверку и установку значения в памяти. По сути, читает значение переменной `b`, копирует его в `a`, устанавливает `b` значение `true`. Считается, что это не приведет к бесконечному откладыванию.

Использование `test_and_set` в цикле проверки значения переменной называется циклической блокировкой. Spin-блокировки — активное ожидание на процессоре (время непроизводительно расходуется на проверку флага другого процессора). Реализация `test_and_set` связана с блокировкой локальной шины памяти, в результате один поток может занять

шину на длительное время, что понижает отзывчивость (решение — 2 вложенных цикла, если переменная занята — выполняется обычный цикл без блокировки шины).

```
1  void spin_lock(spin_lock_t* c)
2  {
3      while (test_and_set(*c) != 0)
4      {
5          /* ресурс занят */
6
7          /*
8           while (*c != 0)
9           {
10              ...
11              }
12          */
13      }
14  }
15
16 void spin_unlock(spin_lock_t* c)
17 {
18     *c = 0;
19 }
```

Циклическую блокировку может удерживать только 1 поток. Захваченная — в состоянии `contended`. Если другой поток пытается захватить уже захваченную, то блокировка находится в состоянии конфликта, а поток выполняет цикл проверки `busy_loop`. Блокировка должна быть связана с тем, что она блокирует. Запрещаются данные (разделяемый ресурс), а не код. В этой блокировке есть смысл, только когда ее длительность не превышает 2 переключений контекста.

Пример из лабораторной:

```
1  #include <linux/kernel.h>
2  #include <linux/module.h>
3  #include <linux/interrupt.h>
4  #include <linux/slab.h>
5  #include <asm/io.h>
6
7  #include "ascii.h"
8
9  #define IRQ_NUMBER 1
```

```

10
11 MODULE_LICENSE("GPL");
12 MODULE_AUTHOR("Karpova_Ekaterina");
13
14 struct tasklet_struct *tasklet;
15 char tasklet_data[] = "key_pressed";
16
17 void tasklet_func(unsigned long data)
18 {
19     printk(KERN_INFO "+:_____");
20     printk(KERN_INFO "+:tasklet_began");
21     printk(KERN_INFO "+:tasklet_count=%u", tasklet->count.counter);
22     printk(KERN_INFO "+:tasklet_state=%lu", tasklet->state);
23
24     printk(KERN_INFO "+:key_code=%d", data);
25     if (data < ASCII_LEN)
26         printk(KERN_INFO "+:key_press=%s", ascii[data]);
27     if (data > 128 && data < 128 + ASCII_LEN)
28         printk(KERN_INFO "+:key_release=%s", ascii[data - 128]);
29
30     printk(KERN_INFO "+:tasklet_ended");
31     printk(KERN_INFO "+:_____");
32 }
33
34 static irqreturn_t my_irq_handler(int irq, void *dev_id)
35 {
36     int code;
37     printk(KERN_INFO "+:my_irq_handler_called\n");
38
39     if (irq != IRQ_NUMBER)
40     {
41         printk(KERN_INFO "+:irq_not_handled");
42         return IRQ_NONE;
43     }
44
45     printk(KERN_INFO "+:tasklet_state_(before_schedule)=%lu",
46           tasklet->state);
47     code = inb(0x60);

```

```

48     tasklet->data = code;
49     tasklet_schedule(tasklet);
50     printk(KERN_INFO "+:_tasklet_scheduled");
51     printk(KERN_INFO "+:_tasklet_state_(after_schedule)=%lu",
52            tasklet->state);
53
54     return IRQ_HANDLED;
55 }
56
57 static int __init my_init(void)
58 {
59     if (request_irq(IRQ_NUMBER, my_irq_handler, IRQF_SHARED, "
60         tasklet_irq_handler", (void *) my_irq_handler))
61     {
62         printk(KERN_ERR "+:_cannot_register_irq_handler\n");
63         return -1;
64     }
65
66     tasklet = kmalloc(sizeof(struct tasklet_struct), GFP_KERNEL);
67
68     if (tasklet == NULL)
69     {
70         printk(KERN_ERR "+:_kmalloc_error");
71         return -1;
72     }
73
74     tasklet_init(tasklet, tasklet_func, (unsigned long)tasklet_data);
75
76     printk(KERN_INFO "+:_module_loaded\n");
77     return 0;
78 }
79 static void __exit my_exit(void)
80 {
81     tasklet_kill(tasklet);
82     free_irq(IRQ_NUMBER, my_irq_handler);
83
84     printk(KERN_INFO "+:_module_unloaded\n");

```

```

85 }
86
87 module_init(my_init);
88 module_exit(my_exit);

```

1.11. Очереди работ — объявление, создание, постановка работы в очередь, планирование

Очереди работ — еще один тип `bottom_half` (отложенного действия). Кроме очередей, которые мы создаём, есть общесистемные очереди и соответствующие возможности для работы с этими очередями. Определена структура в `<linux/workqueue.h>`.

```

1  struct workqueue_struct {
2  struct list_head pwqs; /* WR: all pwqs of this wq */
3  struct list_head list; /* PR: list of all workqueues */
4
5  struct mutex mutex; /* protects this wq */
6  int work_color; /* WQ: current work color */
7  int flush_color; /* WQ: current flush color */
8  atomic_t nr_pwqs_to_flush; /* flush in progress */
9  struct wq_flusher *first_flusher; /* WQ: first flusher */
10 struct list_head flusher_queue; /* WQ: flush waiters */
11 struct list_head flusher_overflow; /* WQ: flush overflow list */
12
13 struct list_head maydays; /* MD: pwqs requesting rescue */
14 struct worker *rescuer; /* MD: rescue worker */
15
16 int nr_drainers; /* WQ: drain in progress */
17 int saved_max_active; /* WQ: saved pwq max_active */
18
19 struct workqueue_attrs *unbound_attrs; /* PW: only for unbound wqs */
20 struct pool_workqueue *dfl_pwq; /* PW: only for unbound wqs */
21
22 #ifdef CONFIG_SYSFS
23 struct wq_device *wq_dev; /* I: for sysfs interface */
24 #endif
25 #ifdef CONFIG_LOCKDEP
26 char *lock_name;

```

```

27  struct lock_class_key key;
28  struct lockdep_map lockdep_map;
29  #endif
30  char name[WQ_NAME_LEN]; /* I: workqueue name */
31
32  /*
33   * Destruction of workqueue_struct is RCU protected to allow walking
34   * the workqueues list without grabbing wq_pool_mutex.
35   * This is used to dump all workqueues from sysrq.
36   */
37  struct rcu_head rcu;
38
39  /* hot fields used during command issue, aligned to cacheline */
40  unsigned int flags __cacheline_aligned; /* WQ: WQ* flags */
41  struct pool_workqueue __percpu *cpu_pwqs; /* I: per-cpu pwqs */
42  struct pool_workqueue __rcu *numa_pwq_tbl[]; /* PWR: unbound pwqs
     indexed by node */
43  };

```

На процессор имеется 2 kworker: normal и high. Это соответствует созданию очередей с нормальным и высоким уровнем приоритета, вторые будут выполняться раньше, но это разные воркеры.

worker — рабочий поток ядра (worker_thread).

Все воркеры выполняются как обычные потоки ядра, при этом они выполняют функцию worker_thread().

1. После инициализации worker_thread() она входит в бесконечный цикл и засыпает (прерываемый сон).
2. Она просыпается, когда в очередь ставится какая-то работа и начинает выполнять ее.
3. Закончив выполнение работы, поток опять засыпает.

В системе также есть структура

```

1  /*
2   * Очередь отложенных действий , связанная с процессором :
3   */
4  struct cpu_workqueue_struct
5  {

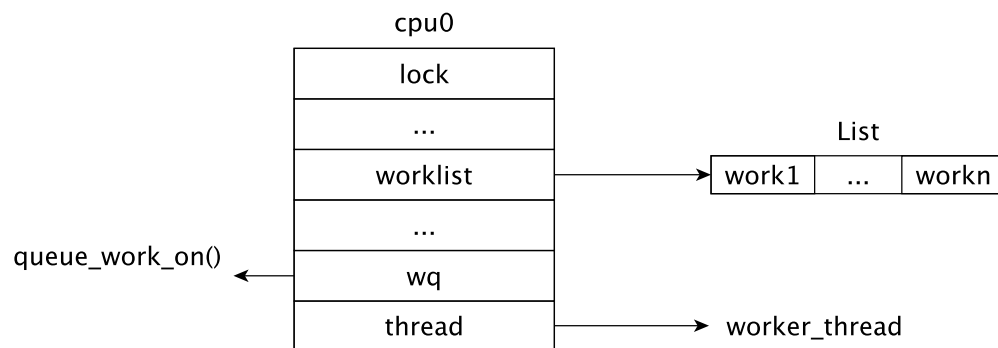
```

```

6   spinlock_t lock; /* Очередь для защиты данной структуры */
7   long remove_sequence; /* последний добавленный элемент следующий
8   ( для запуска ) */
9   long insert_sequence; /* следующий элемент для добавления */
10  struct list_head worklist; /* список действий на каждое cpu */
11  wait_queue_head_t more_work;
12  wait_queue_head_t work_done;
13  struct workqueue_struct *wq; /* соответствующая структура
14                               workqueue_struct */
15  task_t *thread; /* соответствующий поток функция () */
16  int run_depth; /* глубина рекурсии функции run_workqueue() */
17 };

```

Иллюстрация для *cpu0* (для всех *cpu* одинаково):



wq — указатель на инициализированную структуру очереди работ.

Работа описывается структурой (1 экземпляр на каждое отложенное действие):

```

1 typedef void (*work_func_t) (struct work_struct *work);
2 struct work_struct {
3     atomic_long_t data;
4     struct list_head entry;
5     work_func_t func; // обработчик работы
6 #ifdef CONFIG_LOCKDEP
7     struct lockdep_map lockdep_map;
8 #endif
9 };

```

В современных системах очередь работ создается функцией *alloc_workqueue()*:

```

1 struct workqueue_struct *alloc_workqueue(const char *fmt,
2     unsigned int flags,

```

```
3      int max_active , ... ) ;
```

fmt - формат на имя очереди (workqueue), но в отличие от старых реализаций потоков с этим именем не создается. flags - флаги определяют как очередь работ будет выполняться. max_active - ограничивает число задач (work) из некоторой очереди, которые могут выполняться одновременно на любом CPU.

Кроме этой, есть еще функция:

```
1  #define alloc_ordered_workqueue(fmt, flags, args...) \
2  alloc_workqueue(fmt, WQ_UNBOUND | __WQ_ORDERED | \
3  __WQ_ORDERED_EXPLICIT | (flags), 1, ##args)
```

create_workqueue() — устаревшая.

Несколько объектов, связанных с очередью работ (workqueue), представлены в ядре соответствующими структурами:

1. Работа (work);
2. Очередь работ (workqueue) – коллекция work. Workqueue и work относятся как один-ко-многим;
3. Рабочий (worker). Worker соответствует потоку ядра worker_thread;
4. Пул рабочих потоков (worker_pool) это – набор рабочих (worker). Worker_pool и worker относятся как «один ко многим»;
5. Pwd (pool_workqueue) это – посредник, который отвечает за отношение workqueue и worker_pool: workqueue и pwd является отношением один-ко-многим, а pwd и worker_pool – отношение один-к-одному.

Для начала пулы для привязанных очередей (на картинке). Для каждого CPU статически выделяются два worker pool: один для высокоприоритетных work'ов, другой — для work'ов с нормальным приоритетом. То есть, если ядра у нас четыре, то привязанных пулов будет всего восемь, не смотря на то, что workqueue может быть сколько угодно.

Когда мы создаем workqueue, у него для каждого CPU выделяется служебный pool_workqueue (pwq). Каждый такой pool_workqueue ассоциирован с worker pool, который выделен на том же CPU и соответствует по приоритету типу очереди. Через них workqueue взаимодействует с worker pool.

Worker'ы исполняют work'и из worker pool без разбора, не различая, к какому workqueue они принадлежали изначально.

Для непривязанных очередей worker pool'ы выделяются динамически.

1.12. Флаги

1. WQ_UNBOUND — очередь работ не связана ни с каким сри.
2. WQ_FREEZABLE — очередь работ может блокироваться.
3. WQ_HIGHPRI — задания, представленные в такую очередь, будут поставлены в начало очереди и будут выполняться (почти) немедленно.
4. WQ_CPU_INTENSIVE — очередь работ может интенсивно использовать процессор.
5. WQ_POWER_EFFICIENT — очереди работ, связанные с конкретным процессором, являются более предпочтительными, так как имеют более высокую производительность благодаря локальному кешу. Но такая привязанность к конкретному процессору имеет отрицательный побочный эффект — увеличение энергопотребления.

Продолжение про WQ_POWER_EFFICIENT

Это связано с тем, что если энергия не тратится, процессор простаивает.

Такие соображения учитываются в любой системе.

Таким образом, если нет `workqueue`, привязанных к конкретному процессору, можно «не трогать» этот неработающий процессор и, если позволяют соответствующие условия, выполнять эту работу на том процессоре, который работает.

Фактически мы можем ограничиться одним процессором...

1.13. Создание работы

Мы создаем очередь работ для того, чтобы поместить в нее нужные нам действия (работы).

Существует статический способ определения работы с помощью макроса

Листинг 1..1: Статический способ определения

```
1 DECLARE_WORK(name, void (*func)(void*));  
2 struct work_struct *name; // имяэкземпляра () структуры work_struct
```

`func` — имя функции, которая вызывается из `workqueue` (код для выполнения отложенных действий, нижняя половина).

Работу можно определить динамически т.е. в процессе выполнения программы:

Листинг 1..2: Динамический способ определения

```
1 #define INIT_WORK(_work, func) __INIT_WORK((_work),(func), 0)
```

Листинг 1..3: Определение __INIT_WORK()

```
1 __INIT_WORK((_work, _func, _onstack)
2 do {
3     ...
4     INIT_LIST_HEAD(&(work)->entry);
5     (_work)->func=(-func);
6 } while (0);
```

Также может встретиться функция PREPARE_WORK(). INIT_WORK() производит инициализацию работ более тщательно (советую Вам использовать её), а PREPARE_WORK() используется, если работа была инициализирована, для сокращения времени повторной инициализации.

1.14. Постановка работы в очередь

Работа поставлена в очередь — она попадает в список и через какое-то время (не мгновенно) будет выполнена.

Инициализировав работу, требуется поставить ее в очередь. Это делает функция:

```
1 bool queue_work(struct workqueue_struct *queue, struct work_struct *work);
```

queue — очередь, в которую мы хотим поставить работу; work — инициализированная структура work_struct.

Также есть

```
1 bool queue_delayed_work(..., unsigned long delay); // ... — те же два параметра
```

delay — время, через которое данная работа может быть поставлена в очередь. Определяет количество jiffies («мгновений»).

queue_work() определена через queue_work_on().

1.15. Завершение работы/очереди работ

Принудительное завершение очереди работ:

```
1 extern void _flush_workqueue(struct worqueue_struct *wq);
```

Принудительно завершить работу и заблокировать прочую обработку прежде, чем работа будет закончена:

```
1 extern bool flush_work(struct work_struct *work);
```

Чтобы абсолютно точно отменить выполнение (отменить работу, если она еще не выполнена обработчиком; завершит работу в очереди, либо возникнет блокировка до тех пор, пока не будет завершен обратный вызов (если работа уже выполняется обработчиком)), советуют использовать:

```
1 extern bool cancel_work(...);
```

Если работа отложена, вы можете использовать функции `flush_delayed_work()` и `cancel_delayed_work()`.

Пример:

```
1 #include <linux/module.h>
2 #include <linux/kernel.h>
3 #include <linux/interrupt.h>
4 #include <linux/slab.h>
5 #include <asm/io.h>
6 #include <linux/stddef.h>
7 #include <linux/workqueue.h>
8 #include <linux/delay.h>
9
10 #include "ascii.h"
11
12 #define IRQ_NUMBER 1
13
14 MODULE_LICENSE("GPL");
15 MODULE_AUTHOR("Karpova_Ekaterina");
16
17 typedef struct
18 {
19     struct work_struct work;
20     int code;
21 } my_work_struct_t;
22
23 static struct workqueue_struct *my_wq;
```

```

24
25 static my_work_struct_t *work1;
26 static struct work_struct *work2;
27
28 void work1_func(struct work_struct *work)
29 {
30     my_work_struct_t *my_work = (my_work_struct_t *)work;
31     int code = my_work->code;
32
33     printk(KERN_INFO "+:_____");
34     printk(KERN_INFO "+:_work1_began");
35
36     printk(KERN_INFO "+:_key_code_-_%d", code);
37     if (code < ASCII_LEN)
38         printk(KERN_INFO "+:_key_press_-_%s", ascii[code]);
39     if (code > 128 && code < 128 + ASCII_LEN)
40         printk(KERN_INFO "+:_key_release_-_%s", ascii[code - 128]);
41
42     printk(KERN_INFO "+:_work1_ended");
43     printk(KERN_INFO "+:_____");
44 }
45
46 void work2_func(struct work_struct *work)
47 {
48     printk(KERN_INFO "+:_____");
49     printk(KERN_INFO "+:_work2_began");
50     msleep(10);
51     printk(KERN_INFO "+:_work2_ended");
52     printk(KERN_INFO "+:_____");
53 }
54
55 irqreturn_t my_irq_handler(int irq, void *dev)
56 {
57     int code;
58     printk(KERN_INFO "+:_my_irq_handler_called\n");
59
60     if (irq != IRQ_NUMBER)
61     {

```

```

62         printk(KERN_INFO "+:_irq_not_handled");
63         return IRQ_NONE;
64     }
65
66     code = inb(0x60);
67     work1->code = code;
68
69     queue_work(my_wq, (struct work_struct *)work1);
70     queue_work(my_wq, work2);
71
72     return IRQ_HANDLED;
73 }
74
75 static int __init my_init(void)
76 {
77     int rc = request_irq(IRQ_NUMBER, my_irq_handler, IRQF_SHARED,
78                         "work_irq_handler", (void *) my_irq_handler);
79     if (rc) {
80         printk(KERN_ERR "+:_cannot_register_irq_handler");
81         return rc;
82     }
83
84     my_wq = alloc_workqueue("%s", __WQ_LEGACY | WQ_MEM_RECLAIM, 1, "my_wq"
85                             );
86     if (my_wq == NULL)
87     {
88         printk(KERN_ERR "+:_cannot_alloc_workqueue");
89         return -1;
90     }
91
92     work1 = kmalloc(sizeof(my_work_struct_t), GFP_KERNEL);
93     if (work1 == NULL)
94     {
95         printk(KERN_ERR "+:_cannot_alloc_work1");
96         destroy_workqueue(my_wq);
97         return -1;
98     }

```

```

99     work2 = kmalloc(sizeof(struct work_struct), GFP_KERNEL);
100     if (work2 == NULL)
101     {
102         printk(KERN_ERR "+:_cannot_alloc_work2");
103         destroy_workqueue(my_wq);
104         kfree(work1);
105         return -1;
106     }
107
108     INIT_WORK((struct work_struct *)work1, work1_func);
109     INIT_WORK(work2, work2_func);
110
111     printk(KERN_INFO "+:_module_loaded");
112
113     return 0;
114 }
115
116 static void __exit my_exit(void)
117 {
118     synchronize_irq(IRQ_NUMBER);
119     free_irq(IRQ_NUMBER, my_irq_handler);
120
121     flush_workqueue(my_wq);
122     destroy_workqueue(my_wq);
123     kfree(work1);
124     kfree(work2);
125
126     printk(KERN_INFO "+:_module_unloaded");
127 }
128
129 module_init(my_init);
130 module_exit(my_exit);

```

1.16. softirq

softirq — “гибкие” прерывания.

ksoftirq daemon — по одному на каждый процессор, т.е. каждый процессор имеет свой

поток ksoftirq daemon (/0, /1, ...)

Задача ksoftirq daemon — вызов функции spawn_ksoftirqd (порождает потоки ksoftirqd)

В системе определен набор гибких прерываний (всего 10, определены статически)

индекс	приоритет	описание
HI_SOFTIRQ	0	высокоприоритетные таймеры
TIMER_SOFTIRQ	1	таймеры
NET_TXSOFTIRQ	2	отправка сетевых пакетов
NET_RXSOFTIRQ	3	прием сетевых пакетов
BLOCK	4	блочное устройство
BLOCK_IOPOLL_SOFTIRQ	5	опрос блочного устройства
TASKLET_SOFTIRQ	6	тасклет
SCHED_SOFTIRQ	7	планировщик
HR_TIMER_SOFTIRQ	8	не используется
RCU_SOFTIRQ	9	должен быть последним
NR_SOFTIRQ	10	

10 обработчиков представлены в массиве

```
1 const char * const softirq_to_name[NR_SOFTIRQS] = {  
2 "HI", "TIMER", "NET_TX", "NET_RX", "BLOCK", "IRQ_POLL",  
3 "TASKLET", "SCHED", "HRTIMER", "RCU"  
4 };
```

На самом деле можно включить свой softirq в массив/вектор softirq, но для этого надо перекомпилировать систему перед RCU, но нет смысла делать это после тасклета.

Этапы работы с softirq

Каждый softirq проходит через следующие этапы:

1. softirq регистрируется функцией open_softirq();
2. обработчик softirq отмечается как отложенный с помощью функции raise_softirq();
3. затем отмеченные softirq запускаются на выполнение (triggered) в каждом следующем цикле выполнения отложенных функций.
4. выполнение заканчивается завершением.

Функции ядра и системные вызовы На softirq определены функции ядра и системные вызовы

```

1  struct softirq_action{
2  void (*action)(struct softirq_action*);
3  }

```

Когда ядро выполняет обработчик отложенного прерывания, ф-ция action() вызывается с указателем на struct softirq_action в качестве аргумента

```

1  extern void open_softirq(int nr,
2                          void (*action(struct softirq_action*))));

```

эта ф-ция инициализирует softirq

nr — индекс элемента массива softirq_vec;

action — указатель на функцию softirq, которая будет выполняться;

softirq_to_vec определен аналогично

softirq_to_name — массив размером 10 эл-ов, в котором перечисляются имена обработчиков, начиная с 0.

Обработчик отложенного действия (softirq), которое зарегистрировано ф-цией open_softirq(), в рез-те выполнения этой функции ставится в очередь на выполнение.

Это отложенное действие активизируется с помощью функции raise_softirq

```

1  extern void raise_softirq(unsigned int nr)
2  {
3      unsigned long flags;
4      local_irq_save(flags); \\ сохраняетсостояниефлага   IFразрешаетзапрещает
5      \\(/ преря— напроцессоре )
6      raise_softirq_irqoff(nr);
7      local_irq_restore(flags);
8  }

```

Функция raise_softirq_irqoff может выполняться только с разрешенными прерываниями;

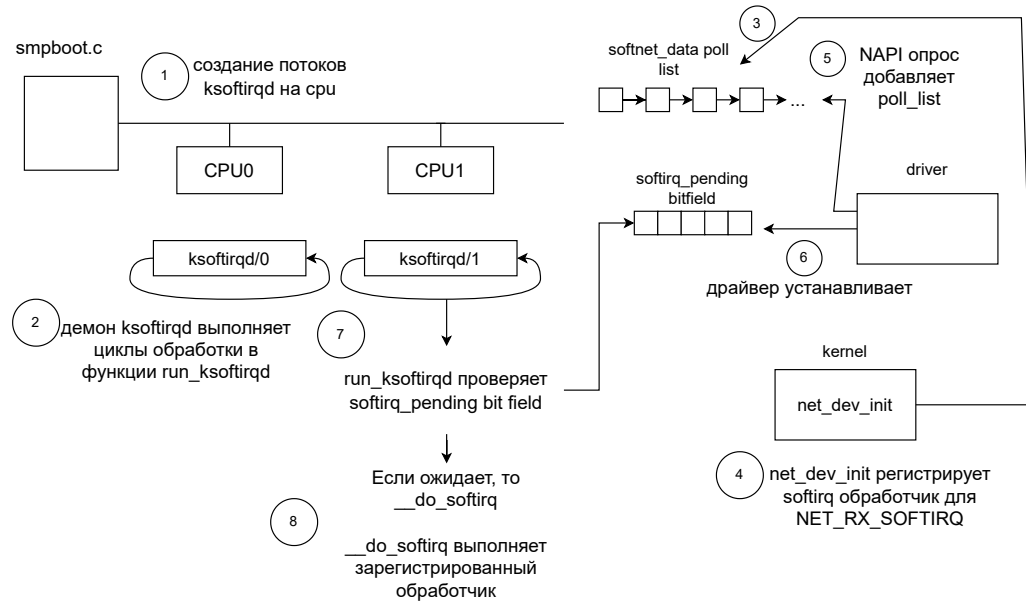
Для каждого процессора существует ksoftirq daemon – демон, работающий с отложенными действиями (softirq).

Работа ksoftirqd на примере получения сетевых пакетов

При запуске системы для каждого ядра начинает выполняться демон softirqd.

Какие-то внешние действия (в частности инициализация девайса, связанного с сетью) приводит к формированию события в системе (в данном случае это получение сетевых пакетов), которое должно быть обработано.

Соответствующее прерывание, которое придет от сетевого устройства, приведет к выполнению так называемого poll list и затем с помощью softirq daemon, на которой будет выполнена функция run_ksoftirqd, эта информация инициализирует вызов функции __do_softirq



NAPI — New API, появилось как ответ на возросший объем действий с сетевой подсистемой. Был разработан для улучшения выполнения высокоскоростных действий с сетевой подсистемой.

High speed networking может генерировать тысячи прерываний в секунду, они должны быть обработаны.

Сначала возникшее прерывание регистрируется, затем помещается в соответствующую очередь и обрабатывается в соответствии с этой очередью

raise_softirq_irqoff() **raise_softirq_irqoff()** помечает softirq как отложенный путем установки соответствующего бита в юитовой маске softirq (softirq pending локального процессора). Это делается в **raise_softirq()**.

Если при этом процессор выполняет аппаратное прерывание, то осуществляется выход из функции **raise_softirq_irqoff()** и восстанавливается флаг IF. В противном случае (если не в прерывании) вызывает **wakeup_softirqd()**

```

1  if (!n_interrupt)
2      wakeup_softirqd();

```

Это объясняет, почему каждый процессор имеет собственный Ksoftirq daemon