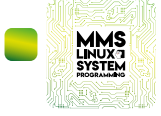
Системно програмиране за Линукс

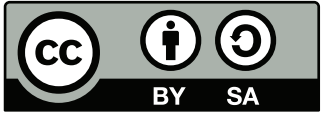
Системни извиквания. Етапи при създаване на изпълнима програма.

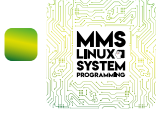
Ангел Чолаков

MMSolutions
A ThunderSoft Company

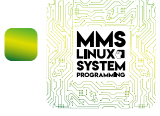
07.04.2021г.





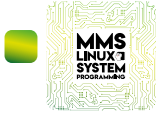


Съдържание I



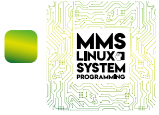
Цел на презентацията

- Да опита да поясни:
  - какво се крие зад абревиатурите ISA, API, ABI;
  - как приложенията се възползват от услугите на ОС;
  - какво представляват системните извиквания;
  - какво е процес и как се дефинира;
  - какви са етапите при създаване на изпълнима C програма;
  - как се представя изпълнимата програма в паметта;



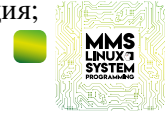
Въведение

- **Основни функции** на ОС - предоставяне на:
  - средства за заделяне и управление на системни ресурси;
  - среда за изпълнение на потребителски задания (процеси);
  - инструменти за подсигуряване комуникация - както между изпълняваните процеси, така и между свързани в мрежа компютърни системи;
  - механизми за интерактивно взаимодействие с потребителите (текстови команден интерпретатор или чрез графичен интерфейс)
  - механизми за защита интегритета на потребителските данни;

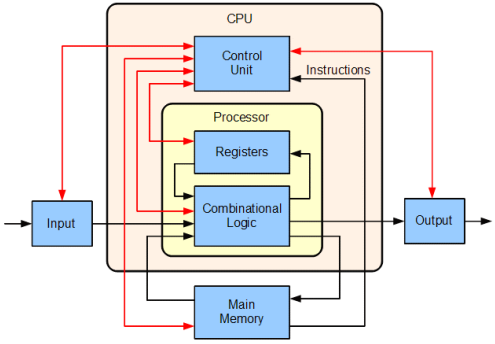


Какво е **ISA**?

- **Спецификация**, която:
  - представя набора от инструкции и абстрактния модел на изчисление за дадена компютърна архитектура;
  - имплементацията на всяка такава спецификация е конкретен вид микропроцесор (CPU);
- **Наборът от инструкции** показва:
  - какви процесорни регистри са налични;
  - какви са машинните команди и типовете данни;
  - как се изгражда моделът на паметта и какви са режимите за адресация;
  - как е организирана обработката на прекъсванията и др.



Опростена блокова структура на микропроцесор

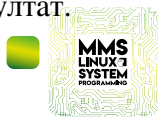


pic. by Lambtron , CC BY-SA 4.0 via Wikimedia Commons

Какво е **API**?

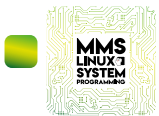
- **Интерфейс**, чрез който:
  - разработчикът се възползва от предоставен набор функции в процеса на създаване на приложение с помощта на език от високо ниво;
  - реализацията на тези функции остава скрита, като тя може да е поверена на съставни блокове от самата ОС или да е пакетирана под формата на системни библиотеки посредници;

  API включва само описание на прототипа на наличните функции заедно с броя и формата на формалните параметри и типа на връщания резултат.



Какво е **ABI**?

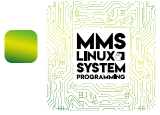
- **Конвенция**, която показва:
  - как структурите от данни и/или машинните подпрограми в контекста на дадена процесорна микроархитектура се достъпват на ниско ниво;
- Този интерфейс дефинира още и:
  - как са организирани самите изчисления;
  - как се форматират входните и изходните данни (предавани аргументи);
  - как става представянето на данните в регистрите на процесора или паметта;
  - какъв е редът на разполагане на данните и др.



Основни режими на работа на микропроцесора

- **Привилегирован (supervisor)** Разрешени са:
  - изпълнението на пълния набор от процесорни инструкции;
  - достъпът до системните шини и периферни устройства, като е възможен и невъзпрепятстван достъп до цялата наличната физическа памет;
  - прецизно управление на обслужването на хардуерните прекъсвания и/или тяхното динамично забраняване или разрешаване

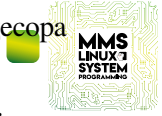
  Това е основният режим, в който ОС работи с процесора.



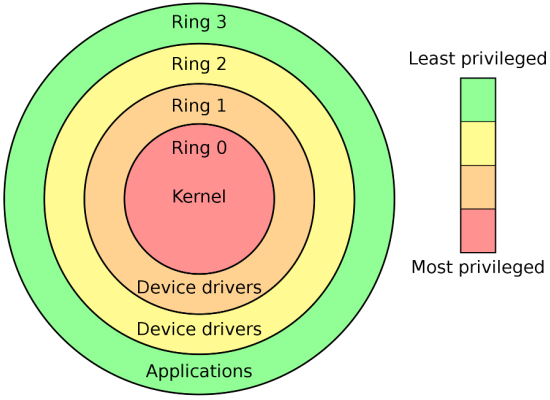
Основни режими на работа на микропроцесора

- **Потребителски (user)**
  - прилагат се принципите на изолация на изпълняваните задачи чрез поставянето им в отделени един от друг и защитени региони от адресното пространство на паметта;
  - избягва се непосредствена работа с физически адреси;
  - въвежда се логическо обособяване на виртуални региони от паметта, които са под контрола на обособен транслиращ хардуер - мениджър на виртуална памет (MMU);
  - директният достъп до паметта или до определено системно устройство са забранени;
  - не всички управляващи инструкции и регистрови структури на процесора са активни

В този режим се изпълняват потребителските процеси или задания.



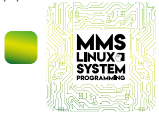
Пример за разслояване на поддържаните режими



pic. by Hertzsprung, CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons

Интерфейс на системните извиквания

- **Същност**:
  - **набор от подпрограми на една ОС**, чрез които тя предоставя своите услуги на потребителските задания съобразно конкретиките на всяка микроархитектура;
  - съществува силна корелация между множеството от функции, което изгражда един приложен програмен интерфейс (API) и набора от асоциираните системни функции или извиквания;
  - **корелацията** е представена посредством пакет от системни библиотеки, които се предоставят като част от инструментите за разработка на даден програмен език, включващи: **компилатор**, **свързващ редактор** и **зареждаща програма**



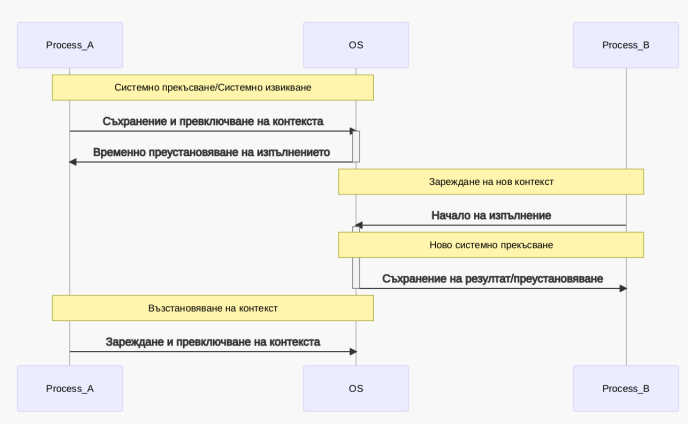
Механика на системните извиквания

- **Изпълнението** на системните извиквания обикновено се съпътства:
  - с **превключване** на режима на работа на процесора;
  - изпълнение на поредица подпрограми на ОС в привилегирован режим от името на извикващия процес;
  - връщане на резултат от обработката чрез повторно превключване в потребителски режим на работа

Не е задължително това превключване да стане веднага с извикването на помощната библиотечна функция - това се случва по платформено зависим начин след предаване контрол върху процесите на операционната система.

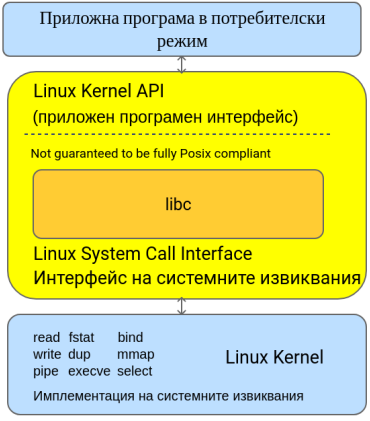
Прибягва се до т.нар. механизъм на **софтуерни прекъсвания** или специализирани инструкции, които тригерират събитие по софтуерно прекъсване на работата на процесора и **превключване на контекста**.

Процедура по системно извикване - илюстрация



pic. based on `https://en.wikipedia.org/wiki/System_call`

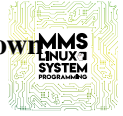
Диаграма на системните извиквания в Линукс



pic. based on work by Shmuel Csaba Otto Traian, CC BY-SA 4.0 via Wikimedia Commons

Категории системни извиквания

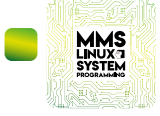
- Групи в контекста на Линукс ядрото:
  - създаване и управление на потребителски процеси: **fork**, **execv**, **kill**, **exit** и др.;
  - работа с файлове, файлови атрибути и файлови дескриптори: **open**, **read**, **write**, **lseek**, **close** и др.;
  - заявяване и освобождаване на системни устройства и управление на устройствени атрибути: **read**, **write**, **ioctl**;
  - поддържащи функции и средства за контрол върху поведението на системата: **sched_get_affinity**, **sched_setaffinity**, **getpid** и др.;
  - комуникация между процеси и системи: **pipe**, **mmap**, **socket** и др.;
  - механизми за защита на достъпа и задаване на правомощия: **chmod**, **chown**, **umask** и др.



Практически пример: проследяване на системните извиквания

```
strace -o sc_trace.txt -f -x -c ./test_util
```

% time	seconds	usecs/call	calls	errors	syscall
0.00	0.000000	0	3		read
0.00	0.000000	0	2		write
0.00	0.000000	0	1		fstat
0.00	0.000000	0	4		brk
0.00	0.000000	0	1	1	access
0.00	0.000000	0	1		execve
0.00	0.000000	0	1		uname
0.00	0.000000	0	1		readlink
0.00	0.000000	0	1		arch_prctl
0.00	0.000000	0	1		openat
100.00	0.000000		16	1	total

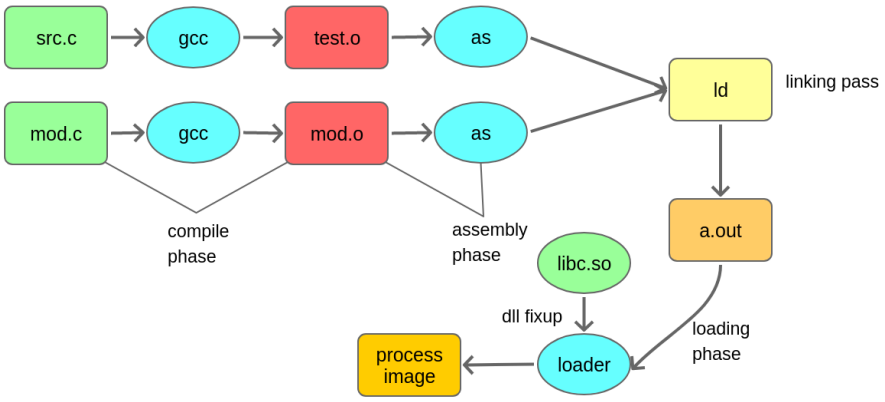


Процедура по създаване на изпълнима C програма

- Фази, илюстриращи процеса:
  1. **създаване** и редактиране на изходния код на програмата;
  2. **компилиране**, при което текстовото описание се преобразува до последователност от машинни инструкции съгласно конвенцията на приложния бинарен интерфейс (ABI);
  3. **асемблиране и свързване**, което има за цел да разчете символните таблици и разреши правилно крос-реферирането на даннови структури в колекцията от обединявани обектни файлове. Свързването бива статично или динамично.

Резултатът довежда до създаване на машинно съвместим изпълним файл. Той обаче е пасивен обект, представящ списък от инструкции с определено предназначение, съхранени на външен носител.

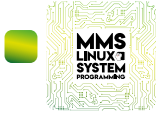
Диаграма, илюстрираща процедурата



pic. based on `https://en.wikipedia.org/wiki/Compiler`

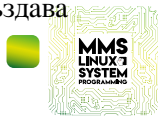
Защо няма да коментираме тези фази детайлно сега?

- Парсване и Компилиране, защото:
  - изискват специализирани познания от дисциплини като **дискретна математика**, **информатика**, **създаване на програмни среди** и **технология на програмирането**;
- Асемблиране и свързване, защото:
  - предполагат познания за това как се разпределя и управлява **адресното пространство** на паметта и какви механизми за работа с **виртуална памет** съществуват;

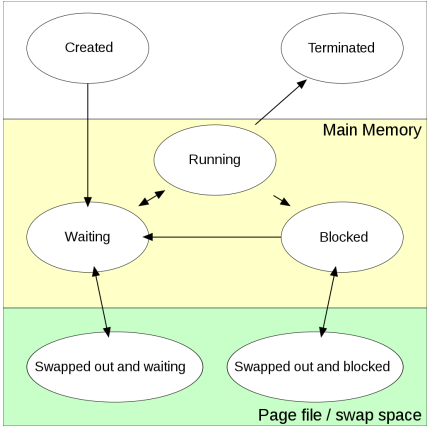


Дефиниция на процес

- Представлява **програма в етап на изпълнение**. Дефиницията включва:
  - съвкупността от региони виртуална памет, в които се изобразява съдържанието на изпълнимия файл;
  - атрибути и ресурси, които ОС назначава, за да диспечерира изпълнението на програмата във времето;
  - наборът от използваните процесорни регистри, тяхното състояние и съдържание във времето, а също и ползвания режим на адресиране на физическата памет;
  - йерархия от производни подпроцеси или подзадачи, ако процесът създава или е създал такива



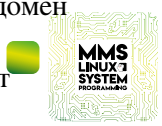
Състояния на един процес



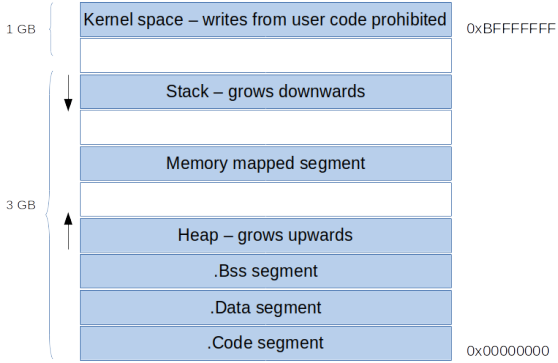
pic. by A3r0 assumed, Public Domain via Wikimedia Commons

Състояния на процес

- Обособяват се типично:
  - **новосъздаден** - след зареждане на изпълнимия файл в паметта и преди изпълнение на машинни инструкции;
  - **чакащ изпълнение** - в очакване на разрешение за изпълнение от страна на диспечера;
  - **изпълняващ се** - в етап на изпълнение на последователността от машинни инструкции;
  - **блокиран** - при заявка на достъп до физическо устройство или обмен на данни с друг процес. Управлението се предава на друга програма и текущият процес преминава в чакащо състояние докато не бъде уведомен от диспечера;
  - **терминиран** - при завършване на изпълнението или терминиране от страна на ОС;



Опростено представяне на процеса в паметта



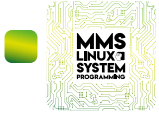
pic. based on work by Surueña, CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons

Представяне на процес: вътрешно описание

- Най-важни сегменти:
  - **програмен стек** (stack);
  - сегмент за реферирание на споделени региони от паметта **mmap**;
  - раздел за **динамично заделяна памет (heap)**;
  - **.bss сегмент** - тук се разполагат неинициализираните глобални и статични променливи;
  - **.data** или даннов сегмент - тук се пазят инициализираните глобални и статични променливи;
  - **.text** или текстови сегмент, който отразява последователността от машинни инструкции, които описват логиката на програмата;

Предназначение на програмния стек

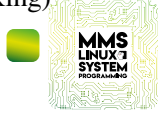
- Реализира операции, свързани с:
  - предаване и прочитане на аргументи при извикване на функция;
  - отразяване състоянието и обработката на локални променливи и прочитане на изходния резултат от изпълнението на функция;
  - проследяване на последователността от извиквани функции и техния контекст в динамиката на изпълнение на програмата



ELF file format: въведение

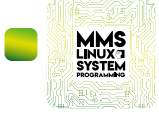
Описва пакетирането на програмни задания в изпълним файлов контейнер и изграждане на изпълним образ на процеса в паметта.

- Включва в състава си:
  - **сегменти** - раздели, които указват области от изпълнимия файл, които съдържат необходими за изпълнението на програмата елементи и участват непросредствено в изграждането на изпълним образ на процеса в паметта;
  - **секции** - подраздели, съставна част от отделните сегменти. Секциите се прочитат и обработват преди и по време на фазата на свързване (linking)



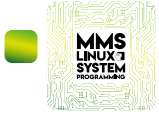
ELF file header

- Предназначение:
  - съдържа характеристики метаданни, чрез които идентифицира изпълнимия файл и указва как той се прочита и интерпретира от конкретна машинна архитектура



ELF file header

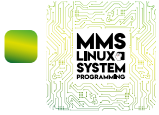
- Някои от най-съществените характеристики са:
  - тип на файла;
  - кодиране на данните в обектния формат;
  - разновидността микропроцесорна архитектура;
  - адреса в паметта на стартовата точка на изпълнение;
  - начало на таблицата със заглавни програмни раздели (program header table);
  - начало на таблицата със заглавни секции на програмата



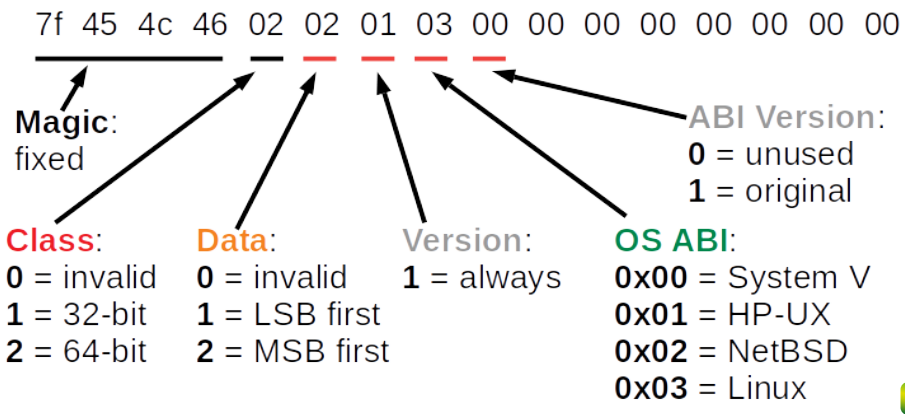
ELF file header: формат

//C

```
typedef struct {
        Byte            e_iden[16];
        HalfWord        e_type;         /* Common types         */
        HalfWord        e_machine;      /* 0  = ET_NONE         */
        Word            e_version;      /* 1  = ET_REL          */
        Address         e_entry;        /* 2  = ET_EXEC         */
        Offset          e_phoff;        /* 3  = ET_DYN          */
        Offset          e_shoff;        /* 4  = ET_CORE         */
        Word            e_flags;        /* ...................  */
        HalfWord        e_ehsize;
        HalfWord        e_phentsize;
        HalfWord        e_phnum;
        HalfWord        e_shentsize;
        HalfWord        e_shnum;
        HalfWord        e_shstrndx;
} ELFHeader
```



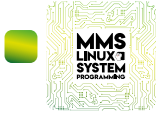
ELF file header: идентифициране



pic. based on `https://refspecs.linuxfoundation.org/elf/elf.pdf`

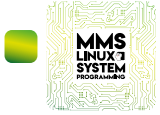
Практически пример: прочитане на ELF file header

```
readelf -h test_util
ELF Header:
  Magic:   7f 45 4c 46 02 01 01 03 00 00 00 00 00 00 00 00
  Class:                             ELF64
  Data:                              2's complement, little endian
  Version:                           1 (current)
  OS/ABI:                            UNIX - GNU
  ABI Version:                       0
  Type:                              EXEC (Executable file)
  Machine:                           Advanced Micro Devices X86-64
  Version:                           0x1
  Entry point address:               0x400a50
  Start of program headers:          64 (bytes into file)
  Start of section headers:          843536 (bytes into file)
  Flags:                             0x0
  Size of this header:               64 (bytes)
  Size of program headers:           56 (bytes)
  Number of program headers:         6
  Size of section headers:           64 (bytes)
  Number of section headers:         33
  Section header string table index: 32
```



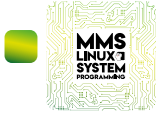
Заглавен програмен раздел (program header)

Служи за дефиниране на всеки един от съставните програмни сегменти.
Таблицата със заглавни програмни раздели се намира, отместена на **e_phoff** спрямо началото на файла и се състои от **e_phnum** записа, всеки с размер **e_phentsize**.
Размерът на съставните полета за всеки запис се различава в зависимост от това дали форматът на ELF файла таргетира 32 или 64-битова архитектура.



Заглавен програмен раздел (program header)

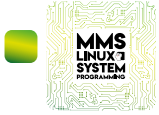
- Някои от най-важните полета са:
  - тип на представяния сегмент;
  - отместване на сегмента в изпълнимия файлов образ;
  - виртуален адрес на сегмента;
  - физически адрес в случаите, когато това е от значение;
  - флагове за достъп - маркиран за четене (PF_R), запис (PF_W) или съдържащ изпълними инструкции (PF_X);



ELF program header: формат

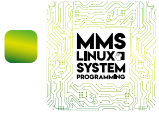
//C

```
typedef struct {
        Word      p_type;           /* Common types          */
        Offset    p_offset;
        Address   p_vaddr;          /* 0 = PT_NULL;          */
        Address   p_paddr;          /* 1 = PT_LOAD;          */
        Word      p_filesz;         /* 2 = PT_DYNAMIC;       */
        Word      p_memsz;          /* 3 = PT_INTERP;        */
        Word      p_flags;          /* 4 = PT_NONE;          */
        Word      p_align;          /* 5 = PT_SHLIB;         */
} ProgramHeader32                   /* 6 = PT_HEADER;        */
                                    /* 7 = PT_TLS;           */
                                    /* ...                   */
```



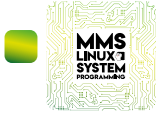
ELF program header: типове сегменти

- Пояснение:
  - PT_NULL - неактивен сегмент;
  - PT_LOAD - зареждаем в паметта сегмент;
  - PT_DYNAMIC - указва как да се организира зареждането на динамични библиотеки;
  - PT_INTERP - пази данни за абсолютен път, идентифициращ програмен интерпретатор;
  - PT_NOTE - съдържа допълнителни спомагателни данни;
  - PT_SHLIB - резервиран, но с неспецифицирано значение;
  - PT_PHDR - специфицира локацията и размера на таблицата със заглавни сегменти;
  - PT_TLS - показва, че сегментът съдържа TLS (thread local storage) данни. Това са статични или глобални променливи в контекста на дадена нишка, а не в контекста на всички системни потоци от задачи. Пример: errno;



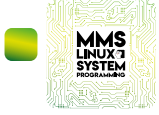
Практически пример: прочитане на програмните сегменти

```
readelf --segments ~/Desktop/Test/Project/test_util

Elf file type is EXEC (Executable file)
Entry point 0x400a50
There are 6 program headers, starting at offset 64

Program Headers:
  Type           Offset             VirtAddr           PhysAddr
                 FileSiz            MemSiz              Flags  Align
  LOAD           0x0000000000000000 0x0000000000400000 0x0000000000400000
                 0x000000000000b5e0e 0x000000000000b5e0e  R E    0x200000
  LOAD           0x000000000000b6120 0x000000000006b6120 0x000000000006b6120
                 0x00000000000051b8 0x0000000000006920  RW     0x200000
  NOTE           0x0000000000000190 0x0000000000400190 0x0000000000400190
                 0x0000000000000044 0x0000000000000044  R      0x4
  TLS            0x000000000000b6120 0x000000000006b6120 0x000000000006b6120
                 0x0000000000000020 0x0000000000000060  R      0x8
  GNU_STACK      0x0000000000000000 0x0000000000000000 0x0000000000000000
                 0x0000000000000000 0x0000000000000000  RW     0x10
  GNU_RELRO      0x000000000000b6120 0x000000000006b6120 0x000000000006b6120
                 0x00000000000002ee0 0x00000000000002ee0  R      0x1
```



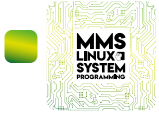
Заглавна част на секция (section header)

Служи за дефиниране на всяка една от съставните секции.
Разделите са подредени в масив, наречен таблица със заглавни части на секциите.



Заглавна част на секция (section header)

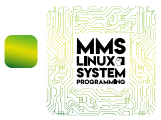
- Някои от най-важните полета са:
  - име на секцията - офсет в таблицата със символни низове;
  - тип на секцията;
  - флагове за достъп;
  - адрес, на който секцията се изобразява в образа на процеса в паметта, ако съдържанието е част от зареждаем сегмент;
  - офсет - локацията на данните в ELF файла;
  - индекс на асоциирана секция;
  - допълнителна информация;



ELF section header: формат

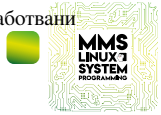
//C

```
typedef struct {
        Word    sh_name;        /* Common types         */
        Word    sh_type;        /* 0  = SHT_NULL        */
        Word    sh_flags;       /* 1  = SHT_PROGBITS    */
        Address sh_addr;        /* 2  = SHT_SYMTAB      */
        Offset  sh_offset;      /* 3  = SHT_STRTAB      */
        Word    sh_size;        /* 4  = SHT_RELA        */
        Word    sh_link;        /* 5  = SHT_HASH        */
        Word    sh_info;        /* 6  = SHT_DYNAMIC     */
        Word    sh_addralign;   /* 7  = SHT_NOTE        */
        Word    sh_entsize;     /* 8  = SHT_NOBITS      */
} SectionHeader32               /* 9  = SHT_REL         */
                                /* 10 = SHT_SHLIB       */
                                /* 11 = SHT_DYNSYM      */
                                /* .................    */
```



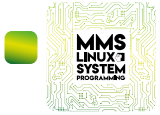
ELF section header: типове секции

- Пояснение:
  - SHT_NULL - неидентифицирана секция;
  - SHT_PROGBITS - данни или код за програмата;
  - SHT_SYMTAB - таблица със структури, дефинираща използвани символи;
  - SHT_STRTAB - таблица със символни низове;
  - SHT_RELA - показва как се модифицират различните секции при асемблиране;
  - SHT_HASH - хеш таблица на символите;
  - SHT_DYNAMIC - данни при динамично свързване и реферирание на библиотечни функции;
  - SHT_NOTE - спомагателни данни от разнороден характер;
  - SHT_NOBITS - секция с неинциализирани променливи;
  - SHT_REL - показва как се модифицират различните секции при асемблиране;
  - SHT_SHLIB - резервирана, но с неспецифирано приложение;
  - SHT_DYNSYM - таблица със структури, обозначаваща динамично реферирани символи, обработвани от свързващия редактор;

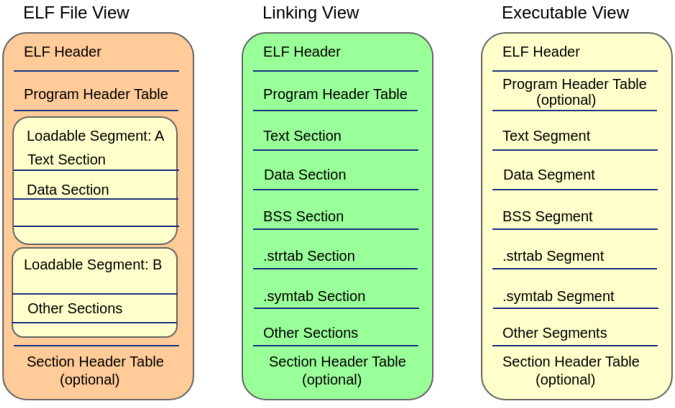


Практически пример: прочитане на програмните секции

```
readelf --sections ./test_util
...
Section Headers:
  [Nr] Name              Type             Address           Offset
       Size              EntSize          Flags  Link  Info  Align

       0000000000000228  0000000000000018  AI       0     20     8
  [ 4] .init             PROGBITS         0000000000400400  00000400
       0000000000000017  0000000000000000  AX       0      0     4
  ...
  [10] .rodata           PROGBITS         0000000000492440  00092440
       00000000000192ac  0000000000000000   A       0      0     32
  ...
  [21] .data             PROGBITS         00000000006b90e0  000b90e0
       0000000000001af0  0000000000000000  WA       0      0     32
  ...
  [26] .bss              NOBITS           00000000006bb2e0  000bb2d8
       0000000000001738  0000000000000000  WA       0      0     32
  ...
  [30] .symtab           SYMTAB           0000000000000000  000bc940
       000000000000aae8  0000000000000018          31    680     8
```



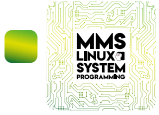
ELF file: обобщение - третиране на сегменти и секции



pic. based on `https://www.keil.com/support/man/docs/armlink/armlink_pge1406297322750.htm`

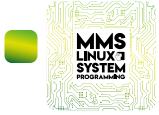
Процедура по зареждане в Линукс - фаза I

- Опростена последователност:
  - **командният интерпретатор** прочита ELF файла и се пристъпва към системно извикване **(execve)**, чрез което контролът се подава на ядрото;
  - **заглавните байтове на ELF файла** определят кой вграден в ядрото обработчик **(handler)** да се извика;
  - **(fs/binfmt_elf.c ->load_binary)** се изпълнява, за да разчете ELF файла



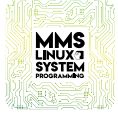
Процедура по зареждане в Линукс - фаза II

- Опростена последователност:
  - обработчикът в ядрото се грижи за **първоначалната конфигурация на паметта**, в която сегментите ще бъдат заредени;
  - ако се намери **.interp** секция, ядрото изобразява външната зареждаща програма в паметта и я стартира, за да може тя да продължи с обработката на изпълнимия файл;
  - ако не се намери .interp секция, ядрото зарежда ELF файла в паметта непосредствено и го изпълнява



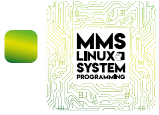
ELF file: обобщение

- Особености:
  - не е задължително размерът на един сегмент в ELF файла да кореспондира на размера на областта от паметта, в която този сегмент се поставя и изобразява;
  - стартовият адрес на програмата обикновено обозначава стартовия адрес на **програмния интерпретатор**, който обезпечава среда за действителното изпълнение на програмата;
  - има още много подробности, които са описани в реферираната документация;
  - **динамичното свързване** и **механизмите на свързване** заслужват отделна презентация



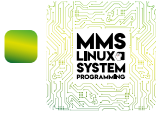
Какво предстои да разглеждаме по-натам?

- **Политики за управление на процеси**;
- **Виртуална памет и механизми на изобразяване на сегментите на един изпълним файл**;
- **Очертаем механизмите на свързване и зареждане**



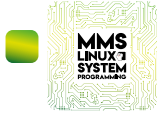
Бележки по материалите и изложението

- материалът е изготвен с образователна цел;
- съставителите не носят отговорност относно употребата и евентуални последствия;
- съставителите се стремят да използват публично достъпни източници на информация и разчитат на достоверността и статута на прилаганите или реферирани материали;
- текстът може да съдържа наименования на корпорации, продукти и/или графични изображения (изобразяващи продукти), които може да са търговска марка или предмет на авторско право - ексклузивна собственост на съотнесените лица;
- референциите могат да бъдат обект на други лицензи и лицензни ограничения;
- съставителите не претендират за пълнота, определено ниво на качество и конкретна пригодност на изложението;
- съставителите не носят отговорност и за допуснати фактологически или други неточности;
- свободни сте да създавате и разпространявате копия съгласно посочения лиценз;



Референции към полезни източници на информация

- https://en.wikipedia.org/
- https://search.creativecommons.org/
- https://en.wikipedia.org/wiki/Process_state
- https://en.wikipedia.org/wiki/Linux_kernel_interfaces
- https://man7.org/linux/man-pages/man2/syscalls.2.html
- https://web.archive.org/web/20100218115342/http://www.linfo.org/context_switch.html
- https://en.wikipedia.org/wiki/Computer_architecture
- https://en.wikipedia.org/wiki/Instruction_set_architecture
- https://en.wikipedia.org/wiki/Executable_and_Linkable_Format
- https://refspecs.linuxfoundation.org/elf/elf.pdf
- https://elixir.bootlin.com/linux/latest/source/include/uapi/linux/elf.h
- https://lwn.net/Articles/631631/
- https://www.keil.com/support/man/docs/armlink/armlink_pge1406297322750.htm



Благодаря Ви за вниманието!