

МАТЕМАТИЧКА ГИМНАЗИЈА

МАТУРСКИ РАД
- из рачунарства и информатике -

32bit X86 језгро оперативног система

Ученик:
Алекса Вучковић IVд

Ментор:
Милош Арсић

Београд, јун 2021.

Садржај

1	Увод	1
2	X86 архитектура	3
2.1	Регистри процесора	3
2.2	Регистри опште намене	4
2.3	Сегментни регистри	5
2.4	Real mode	6
2.5	Сегментација	6
2.6	Protected mode	6
3	Boot	9
3.1	Редослед покретања	9
3.2	Bootloader	9
3.3	Multiboot2	10
3.4	ELF	10
4	Коришћени алати	11
4.1	Binutils	11
4.1.1	Пре додавања C библиотеке	12
4.1.2	Након додавања C библиотеке	12
4.1.3	GNU Asembler	13
4.1.4	GNU Linker	13
4.2	GCC	13
4.2.1	Пре додавања C библиотеке	14
4.2.2	Након додавања C библиотеке	14
4.3	GRUB	14
4.4	QEMU	14
4.5	Make	15
4.6	Мање битни алати	15
4.6.1	NeoVim	15
4.6.2	git	15
4.6.3	xorriso(libisoburn)	15

4.6.4	GDB	16
5	Инспирација	17
5.1	Minix	17
5.2	Linux	17
5.3	BSD	18
6	Build system	19
6.1	aleksa-toolchain	19
6.2	Makefile	20
7	Језгро оперативног система	21
7.1	Почетак	21
7.2	Испис на екран - VGA	22
7.3	Global Descriptor Table	25
7.4	Interrupt Descriptor Table	27
7.5	IRQ и PIC	28
7.6	Тастатура	29
7.7	PIT - Programmable Interval Timer	33
7.8	Heap	34
7.9	Paging	37
7.10	Минимална C biblioteka	38
8	Закључак	41
	Литература	43

1

Увод

Идеја за овај рад проишла је из екстензивног коришћења GNU/Linux система, као и жеља за разумевањем рада рачунара на најнижем нивоу.

Цео код је писан у GNU Asembler-у и C-у и може се наћи на GitHub-у на страници <https://github.com/aleksav013/mykernel>. Код, заједно са свим алатима за његово коришћење и употребу, је доступан под GPLv3 лиценцом.

Овај пројакат се константно унапређује и немогуће је одржавати синхронизованим фајлове који сачињавају оперативни систем, а који се истовремено помињу у овом раду. Из тог разлога, рад ће бити написан за верзију оперативног система 1.0.0. На страници GitHub-а ова верзија се може наћи под tag/s секцијом на страници пројекта.

Ради лакшег компајловања кода од стране читаоца, креиран је toolchain - сет алата, специфично за компајловање овог оперативног система, који се може наћи на страници <https://github.com/aleksav013/aleksa-toolchain>, такође доступан под GPLv3 лиценцом отвореног кода. Сет алата aleksa-toolchain креиран је такође и из разлога што је заправо неизбежан процес креирања cross-compilerа - компајлера који компајлује код за други систем/архитектуру на тренутном систему/архитектури. На тај начин и други људи осим аутора могу допринети изради и побољшању овог оперативног система у будућности.

Овај пројакат има за циљ да прикаже поступак креирања једног за сада врло једноставног оперативног система, као и да поткрепи читаоце теоријом потребном за његово разумевање.

2

X86 архитектура

X86 је фамилија архитектура CISC сета инструкција развијена од стране Интел-а која је базирана на 8086 микропроцесору. 8086 је настао 1978. као шеснаесто-битна екстензија 8080 осмобитног микропроцесора, да би 1985. године настао 80386 са величином регистра од чак 32 бита. Сви процесори из ове фамилије носе заједнички назив управо по суфиксу 86 који се појављује у именима свих ових процесора.

У периоду од 1999. до 2003. AMD је проширио величину регистра на 64 бита и та архитектура има више назива од којих су најкоришенији: x86_64, amd64 и x64. Велика већина уређаја данас користи x86_64 архитектуру процесора.

Језго оперативног система приказано у овом раду базирано је на X86 архитектури са регистром величине 32 бита. Конкретна верзија ове архитектуре је i386. Ова верзија добила је име по Интеловом микропроцесору под именом 80386 што означава трећу генерацију X86 архитектуре.

2.1 Регистри процесора

Постоји више врста регистара процесора[1, п. 75]. Неки од основних регистара које је потребно поменути дати су у тексту који следи. Разлог због којег су наведена и имена регистара претходних верзија X86 архитектуре је због тога што је могуће адресирати првих x бита ако се користи име регистра за x -тобитну верзију X86 архитектуре. Наравно, ово важи само уколико је дужина регистра већа или једнака дужини регистра чију нотацију користимо.

Регистри опште намене:

8bit	al	bl	cl	dl	sil	dil	spl	bpl
16bit	ax	bx	cx	dx	si	di	sp	bp
32bit	eax	ebx	ecx	edx	esi	edi	esp	ebp
64bit	rax	rbx	rcx	rdx	rsi	rdi	rsp	rdp

Сегментни регистри:

cs	ds	ss	es	fs	gs
----	----	----	----	----	----

Контролни регистри:

cr0	cr2	cr3	cr4	cr8
-----	-----	-----	-----	-----

Системски регистри (показивачи на табеле):

gdt	ldtr	idt
-----	------	-----

Осим поменутих, почев од 16бит-не X86 архитектуре постоје и регистри ah, bh, ch, dh (h-higher) који представљају горњу половину (од 9. до 16. бита) ax, bx, cx, dx регистара редом. У даљем тексту биће приказан однос између регистара о коме је раније било речи, као и приказ и на то од ког до ког бита регистра се односи дата нотација.

63-56	55-48	47-40	39-32	31-24	23-16	15-8	7-0
						ah	al
						ax	
				eax			
rax							

Приметимо да уколико нас интересује вредност другог бајта у 64битној X86 архитектури, до ње можемо доћи на 4 начина: ah, ax&0xFF00, eax&0x0000FF00 или rax&0x000000000000FF00.

2.2 Регистри опште намене

Регистри опште намене имају улогу у чувању операнди и показивача:

- Операнди за логичке и аритметицке операције
- Операнди за адресне калкулације
- Показиваче на меморијску локацију

Регистри опште намене се могу користити произвољно према потреби. Међутим, дизајнери хардвера су увидели да постоји могућност даљих оптимизација уколико се сваком од ових регистара додели нека специфична улога у којој је мало бољи од осталих регистара опште намене.

На тај начин компајлери већину времена креирају бољи асемблерски код него људи, просто из разлога јер сваки од регистара опште намене такође користе и за њихову специфичну функцију сваки пут где је то могуће.

Специфична улога регистара опште намене:

- `eax` - акумулатор за операнде и податке резултата
- `ebx` - показивач на податке у `ds` сегменту
- `ecx` - бројач за петље и операције над стринговима
- `edx` - показивач на `У/И`
- `esi` - показивач на податке на који показује `ds` регистар; почетни показивач за операције над стринговима
- `edi` - показивач на податке у сегменту на који показује `es` регистар; крајњи показивач за операције над стринговима
- `esp` - показивач на почетак стека
- `ebp` - показивач на податке у стеку

2.3 Сегментни регистри

Сегментни регистри садрже 16битне селекторе сегмента. Селектор сегмента је специјалан показивач који идентификује сегмент у меморији. Да би приступили одређеном сегменту у меморији, селектор сегмента који показује на тај сегмент мора бити доступан у одговарајућем сегментном регистру.

Специфична улога сегментних регистара:

- `cs` - code segment. `cs` регистар садржи селектор сегмента који показује на сегмент кода у коме се налазе инструкције које се извршавају.
- `ds` - data segment. Осим `ds`, сегментни регистри за сегменте података су и `es`, `fs`, као и `gs`.

- ss - stack segment ss регистар садржи селектор сегмента који показује на сегмент стека где се чува стек програма који се тренутно извршава. За разлику од регистра за сегмент кода, ss регистар се може експлицитно поставити што дозвољава апликацијама да поставе више стекова и да алтернирају између њих.

2.4 Real mode

Реални мод карактерише 20-тобитна сегментирана меморија што значи да се може адресирати само мало више од једног мегабајта. Сви процесори почев од 80286 започињу у овом моду након паљења рачунара због компатибилности. Да би могли да адресирамо више меморије потребно је да користимо сегментне регистре.

Поступак којим из реалног мода прелазимо у заштићен мод назива се далеки скок ("far jump") где при постављању сегментних регистара "скачемо" из једног сегмента у други. Далеки скок најчешће подразумева промену селектора сегмента, који се налази у сегменту кода, и који показује на сегмент кода у коме се налазе инструкције које се тренутно извршавају.

2.5 Сегментација

Сегментација је решење којим се омогућава адресирање више меморије него што је то хардверски предвиђено. Сегментација се постиже коришћењем offset-а. Са сегментацијом смо у реалном моду да адресирамо меморију са 20 уместо предвиђених 16 битова.

2.6 Protected mode

Заштићен мод је стање процесора у којем процесор има пун приступ целом опсегу меморије за разлику од реалног мода. Максимална величина RAM меморије коју архитектура i386 подржава је 4GB управо због величине регистра од 32 бита ($2^{32}B = 4GB$). Неки процесори који подржавају PAE - Physical Address Extension подржавају и адресирање меморија преко 64 бита. Касније је на овом стандарду утемељено и адресирање меморија на X86_64.

Адресирање свих 32 бита меморије постиже се коришћењем страничења ("paging"), које нам дозвољава да мапирамо физичку меморију на виртуелну. На

тај начин приликом извршавања сваког програма може се заварати програм тако да мисли да његово извршавање креће од почека меморије. На тај начин значајно нам је олакшано извршавање програма јер нам сви програми постају независни од адресе физичке меморије где се они заправо налазе, док приликом креирања програма можемо фиксно поставити адресу прве инструкције.

3

Boot

3.1 Редослед покретања

Од притиска дугмета за паљење рачунара, па до учитавања оперативног система постоји цео један процес. Након притиска дугмета рачунар прво извршава POST (Power On Self Test) рутину која је једна од почетних фаза BIOS-а (Basic Input Output System). У POST-у рачунар покушава да иницијализује компоненте рачунарског система и проверава да ли оне испуњавају све услове за стартовање рачунара. Уколико је цео процес прошао без грешака наставља се даље извршавање BIOS-а. BIOS сада има улогу да пронађе медијум који садржи програм који ће учитати језгро оперативног система у рам меморију рачунара. Тај програм се назива Bootloader.

3.2 Bootloader

Bootloader је програм који се налази у првих 512 бајтова медијума у MBR одељку, и његов задатак је да прочита језгро оперативног система у RAM меморију и преда му даље управљање. Због комплексности данашњег софтвера, 512 бајтова је врло мало за учитавање целог bootloader-а. Из тог разлога неки bootloader-и раздвојени су у више делова (најчешће) 2. Први део је врло мали и стаје у 512 бајтова MBR-а и он служи само да би прочитао други део у коме се налази главни код који даље предаје управљање језгру оперативног система.

Неки од најпопуларнијих bootloader-а јесу GRUB, LILO, systemd-boot, rEFInd, као и Windows Boot Manager. За потребе овог оперативног система коришћен је GRUB о коме ће бити више речи у одељку Коришћени алати.

3.3 Multiboot2

Multiboot спецификација је отворени стандард који језгрима обезбеђује уједначен начин покретања од стране боотлоадера усаглашених са овом спецификацијом. Једна од првих ствари који наше језгро уради је постављање константи дефинисаних multiboot стандардом да би било препознато од стране bootloader-a и да му било предато даље управљање.

3.4 ELF

ELF је формат за складиштење програма или фрагмената програма на диску, креиран као резултат компајловања и линковања. ELF фајл је подељен на одељке. За програм који може да се изврши, постоје следећи одељци: одељак са текстом за код, одељак са подацима за глобалне променљиве и одељак "Родата" који обично садржи константне ниске (Read only data). ELF фајл садржи заглавља која описују како ови одељци треба да буду усклађени у меморији.

Овај формат дефинисан је у System V ABI (System V Application Binary Interface) који је сет спецификација који дефинише позивање функција, формат објектних фајлова, формат фајлова који могу да се изврше, динамичо линковање као и многе друге.

Функције архитектуре i386 по конвенцији повратне вредности чувају у еах регистру, док се вредности које не стају у 32 бита еах регистра "преливају" у едх регистар. Ова информација ће нам бити кључна када будемо позивали функција написане у C-у из Assembler-a.

4

Коришћени алати

У даљем тексту се могу видети неки од алата коришћених у креирању овог рада. Већина коришћених алата поседује GPLv3 лиценцу. GNU Public License је лиценца отвореног кода која дозвољава модификовање и дистрибуирање кода све док тај је тај код јавно доступан. Једини програми са ове листе који није креирао GNU су QEMU виртуелна машина, git и NeoVim.

Оперативни систем коришћен у изради овог пројекта је Artix Linux. Artix Linux је GNU/Linux дистрибуција базирана на Arch Linux-у. Већина коришћених програма је већ компајлована и спремна за употребу и налази се у официјалним репозиторијима.

За програме који су морали бити мануелно компајловани дате су инструкције у њиховој подсекцији. Програми који су морали бити накнадно компајловани су binutils и gcc и то да не би користили стандардну библиотеку коју нам је обезбедио оперативни систем домаћин (онај на коме се компајлује овај пројекат) већ посебну библиотеку креирану за ово језгро. За остале програме који су коришћени препорука је користити оне који су доступни као спремни пакети у изворима одабране дистрибуције GNU/Linux-а.

4.1 Binutils

Изворни код софтвера се може наћи на страници <https://www.gnu.org/software/binutils/>, заједно са упутством за компајловање и коришћење.

Овај софтверски пакет садржи програме неопходне за израду програма од којих су најкоришћенији асемблер (as), линкер (ld), као и програм за креирање

библиотека (ar).

4.1.1 Пре додавања С библиотеке

Из разлога што се не користи стандардна библиотека већ самостално написана специфично за овај пројекат, потребно је мануелно компајловати GNU Binutils. Међутим, постоји могућност коришћења већ спремног пакета који се за дистрибуције базиране на Arch Linux-у може наћи на станици <https://aur.archlinux.org/packages/i686-elf-binutils/>. Поједине дистрибуције већ имају овај пакет компајлован, али је препорука мануелно компајловати да би се избегла некомпатибилност, а и просто из разлога што ће након формирања наше С библиотеке бити неопходно компајловати овај програм за сваки систем посебно.

За оне које желе сами да компајлују дат је део инструкција који се разликује од упутства датог на званичном сајту а тиче се конфигурирања пре компилације.

```
mkdir build
cd build

../configure \
--target=i686-elf \
--with-sysroot \
--prefix=/usr \
--bindir=/usr/bin \
--libdir=/usr/lib/i686-elf \
--disable-nls \
--disable-werror

make
make install
```

4.1.2 Након додавања С библиотеке

Након додавања наше С библиотеке потребно је компајловати GNU Binutils тако да ту библиотеку и користи приликом компајловања нашег оперативног система.

Напомена: Потребно је поставити \$SYSROOT на локацију која садржи библиотеку. То је могуће урадити на следећи начин:

```
export SYSROOT=/put/do/biblioteke
```

Инструкције за компајловање дате су у наставку:

```
../configure \
--target=i686-elf \
--with-sysroot=$SYSROOT \
--prefix=/usr \
--bindir=/usr/bin \
--libdir=/usr/lib/i686-elf \
--disable-nls \
--disable-werror
```

4.1.3 GNU Asembler

Иако тренутно постоје много популарније алтернативе попут NASM (Netwide Assembler) и MASM (Microsoft Assembler) који користе новију Интелову синтаксу, аутор се ипак одлучио за GASM због компатибилности са GCC компајлером. GASM користи старију AT&T синтаксу коју карактерише: обрнут поредак параметара, префикс пре имена регистара и вредности константи, а и величина параметара мора бити експлицитно дефинисана. Због тога ће можда неким читаоцима бити користан програм "intel2gas" који се за Arch Linux може наћи на станици <https://aur.archlinux.org/packages/intel2gas/>.

GNU Asembler је коришћен за компајловање дела кода написаног у асемблеру.

4.1.4 GNU Linker

GNU Linker је коришћен за линковање, тј. "спајање" свог комапјлованог кода у једну бинарну датотеку типа ELF која представља кернел.

4.2 GCC

Изворни код софтвера се може наћи на страници <https://gcc.gnu.org/>, заједно са упутством за компајловање и коришћење.

Исто као и за GNU Binutils могуће је пронаћи већ спреман пакет у појединим дистрибуцијама али је препорука мануелно компајловати из претходно наведених разлога. За Arch Linux овај пакет се може наћи на станици <https://aur.archlinux.org/packages/i686-elf-gcc/>.

GCC је GNU-ов сет компајлера који је коришћен за компајловање овог оперативног систем који је коришћен за компајловање овог оперативног система.

4.2.1 Пре додавања С библиотеке

```
mkdir build
cd build

../configure \
--target=i686-elf \
--prefix=/usr \
--disable-nls \
--disable-plugin \
--enable-languages=c,c++ \
--without-headers

make all-gcc
make all-target-libgcc

make -k check || true

make install-gcc
make install-target-libgcc
```

4.2.2 Након додавања С библиотеке

```
../configure \
--target=i686-elf \
--prefix=/usr \
--with-sysroot=$SYSROOT \
--disable-nls \
--disable-plugin \
--enable-languages=c,c++
```

4.3 GRUB

Изворни код софтвера се може наћи на страници <https://www.gnu.org/software/grub/>, заједно са упутством за компајловање и коришћење.

GRUB је bootloader који је коришћен на овом пројекту.

4.4 QEMU

Више информација о софтверу се може наћи на страници <https://www.qemu.org/>, заједно са упутством за коришћење.

QEMU је виртуелна машина у којој ће језгро бити тестирано и приказано зарад практичних разлога. QEMU је одабран за овај пројекат јер за разлику од других виртуалних машина поседује cli (command line interface) из кога се лако може позивати помоћу скрипти као што су Makefile-ови.

4.5 Make

Изворни код софтвера се може наћи на страници <https://www.gnu.org/software/make/> заједно са упутством за компајловање и коришћење.

Make[2] нам омогућава да са лакоћом одржавамо и манипулишемо изворним фајловима. Могуће је све компајловати, обрисати, креирати iso фајл као и покренути QEMU виртуелну машину са само једном кљчном речи у терминалу. Креирани Makefile за потребе овог пројекта биће детаљно објашњен у даљем тексту.

4.6 Мање битни алати

4.6.1 NeoVim

NeoVim је уређивач текста настао од Vim-a (Vi improved) [3]. Конфигурацијски фајлови аутора, могу се наћи на <https://github.com/aleksav013/nvim>, и имају за циљ да створе окружење погодно за рад на овом пројекту.

4.6.2 git

Креатор овог програма је Linus Torvalds, човек који је креирао Linux kernel. Изворни код софтвера се може наћи на страници <https://git.kernel.org/pub/scm/git/git.git>.

Git је програм који нам помаже да одржавамо изводне фајлове синхронизованим са репозиторијом. Осим тога значајан је и његов систем "контроле" верзија - могућност да се за сваки commit(промену) види тачно који су се фајлови изменили и која је разлика између неке две верзије пројекта.

4.6.3 xorriso(libisoburn)

Изворни код софтвера се може наћи на страници <https://www.gnu.org/software/xorriso/> заједно са упутством за компајловање и коришћење.

Служи за креирање ISO фајлова који се могу "нарезати" на CD диск или USB флеш и који се касније могу користити као оптички диск који садржи све стхo је неопходно за успешно подизање система.

4.6.4 GDB

<https://www.sourceware.org/gdb/>

GDB је GNU-ов debugger који служи за проналажење грешака у коду, као и активно праћење извршавања програма (у овом случају језгра). Уз помоћ овог програма установљено је шта свако дугме на тастатури враћа након притиска што је значајно убзало процес мапирања тастатуре.

5

Инспирација

5.1 Minix

Minix је оперативни систем базиран на UNIX-у који користи микрокернелску архитектуру. Почев од верзије 2.0 задовољава POSIX (Portable Operating System Interface) стандард. Почетне верзије Minix оперативног система креирао је Ендрју С. Таненбаум као професор Врије универзитета у Амстердаму. Професор Таненбаум креирао је оперативни систем као пример принципа који су приказани у његовој књизи "Оперативни системи: Дизајн и Имплементација" (Operating Systems: Design and Implementation)[4]. Осим ове књиге Таненбаум написао је и многе друге које могу бити од користи свима који желе да се баве дизајном оперативних система као што су [5] [6]. Занимљива чињеница је да је Minix најпопуларнији оперативни систем чије језгро користи микрокернелску архитектуру.

Спекулише се да сви Интелови процесори након Core2Duo серије који имају чип под називом Intel ME (Intel Management Engine), заправо покрећу Minix оперативни систем. Ово би Minix учинило најкоришенијим оперативним системом икада.

5.2 Linux

Већ дуже од две године користим оперативни систем са Linux језгром што је био и главни разлог зашто сам изабрао рад на ову тему. У току израде овог пројекта пожелео сам да боље разумем како функционише израда Linux кернела и како је то "заједница" она која га покреће и одржава, а не нека велика корпорација. Стога сам одлучио да дам свој допринос и послао сам неколико

закрпа ("patch"-ева) који су примљени и имплементирани у новој 5.17 верзији Linux кернела. Ово искуство показало ми је колико је озбиљна организација која стоји иза целог тог пројекта и колико је битно радити на свим сферама неког пројекта као што су и израда документације и спремност да се едукују и заинтересују млади људи којима ће овакво искуство значити у даљем професионалном усавршавању. Драго ми је што ме је овај пројекат одважио да начиним тај корак и допринесем можда највећем софтверском пројекту икада.

5.3 BSD

Најпопуларнији BSD оперативни системи су редом FreeBSD[7], OpenBSD и NetBSD. Сваки од њих има различите циљеве али сви се слажу у једном: софтвер мора остати минималан. Сви ови оперативни системи своје системске програме и библиотеке имају написано у дупло ако не и неколико пута мање линија кода него GNU/Linux. То их чини много лакшим за одржавање, али и много сигурнијим.

6

Build system

6.1 aleksa-toolchain

```
main ()
{
    download
    extract
    patch-gnu
    build_binutils
    install_headers
    build_gcc
    setup_compiler
}
```


6.2 Makefile

```
all: compile

$(BINARY): $(OBJ)
    $(CC) -T $(LINKER) -o $(BINARY) $(CFLAGS) -nostdlib -lgcc $(OBJ)

install_headers:
    ./scripts/install_headers.sh

compile:
    $(MAKE) install_headers
    @$$(MAKE) --directory $(SOURCE_DIR)
    $(MAKE) $(BINARY)

$(ISO): $(BINARY)
    grub-file --is-x86-multiboot $(BINARY)
    $(MKDIR) $(ISO_DIR)/boot/grub
    $(CP) $(BINARY) $(ISO_DIR)/boot/$(TARGET).bin
    $(CP) $(GRUB.CFG) $(ISO_DIR)/boot/grub/grub.cfg
    grub-mkrescue -o $(ISO) $(ISO_DIR)

run: compile
    $(QEMU) -kernel $(BINARY) $(QEMUDEBUG)

run-iso: compile
    $(MAKE) $(ISO)
    $(QEMU) -cdrom $(ISO)

clean:
    $(RM) $(BUILD_DIR) $(ISO_DIR) $(ISO)
```

7

Језгро оперативног система

Рад је првобитно био замишљен као поступно излагање настајања овог оперативног система, али се касније аутор одлучио да ипак изложи само тренутну верзију рада, с обзиром на то да би рад био непотребно дужи.

7.1 Почетак

as/boot.s:

У првом делу постављамо променљиве на вредности које су одређене Multiboot2 стандардом да би bootloader препознао наше језгро.

```
.set ALIGN,      1<<0
.set MEMINFO,    1<<1
.set FLAGS,      ALIGN | MEMINFO
.set MAGIC,      0x1BADB002
.set CHECKSUM,   -(MAGIC + FLAGS)
```

Након тога постављамо првих 512 бита на претходно поменуте вредности али тако да за сваку променљиву остављамо 32 бита простора.

```
.section .multiboot
.align 4
.long MAGIC
.long FLAGS
.long CHECKSUM
```

Постављамо променљиве које чувају адресе на којима почињу сегменти кода и података, редом.

```
.set CODESEGMENT, 0x08
.set DATA_SEGMENT, 0x10
```

Дефинишемо секцију bss у којој креирамо стек и додељујемо му 16 килобајта.

```
.section .bss
.align 16
stack_bottom:
.skip 16384
stack_top:
```

Дефинишемо почетну функцију `_start` позивајући функцију за иницијализацију `gdt` табеле и ”скачемо” на сегмент кода. Овај поступак има назив ”far jump” јер скачемо ван текућег сегмента.

```
.section .text
.global _start
.type _start, @function
_start:
    call init_gdt_table
    jmp $CODE_SEGMENT, $code
```

У сегменту кода постављамо сегментне регистре на адресу сегмента података. Затим постављамо `esp` регистар на почетак стека који смо иницијализовали у `bss` секцији и предајемо управљање `kernel_main` функцији.

```
code:
    movw $DATA_SEGMENT, %ax
    movw %ax, %ds
    movw %ax, %es
    movw %ax, %fs
    movw %ax, %gs
    movw %ax, %ss
    movl $stack_top, %esp
    cli
    call _init
    call kernel_main
    hlt
```

Постављамо величину функције `_start` што нам касније може бити корисно при `debug`-овању.

```
.size _start, . - _start
```

7.2 Испис на екран - VGA

`c/vga.c:`

```
#include<source/vga.h>
#include<types.h>
#include<source/string.h>
#include<asm.h>
```

Приметимо да у `C`-у користимо `uintX_t` променљиве. То је због тога што нам је у оваквом окружењу врло битно да пазимо на величину коју заузимају променљиве.

```
size_t terminal_row;
size_t terminal_column;
uint8_t terminal_color;
uint16_t* terminal_buffer;
```

4 значајнија бита означавају боју позадине, док остала 4 бита означавају боју карактера.

```
void set_color(enum vga_color fg, enum vga_color bg)
{
    terminal_color = (uint8_t)(fg|bg<<4);
}
```

```
static inline uint16_t vga_entry(char uc, uint8_t color);
static inline uint16_t vga_entry(char uc, uint8_t color)
{
    return (uint16_t)(uc|color<<8);
}
```

На VGA излаз исписујемо тако што почев од адресе 0xB80000 пишемо шеснаестобитне вредности које се преводе у карактере и њихову боју. 8 значајнијих битова одређују боју карактера док преосталих 8 битова означавају карактер.

```
void terminal_initialize(void)
{
    terminal_row=0;
    terminal_column=0;
    set_color(VGA_COLOR_LIGHT_GREY, VGA_COLOR_BLACK);
    terminal_buffer=(uint16_t*) 0xB8000;
    for(size_t y=0;y<VGA_HEIGHT;y++)
    {
        for(size_t x=0;x<VGA_WIDTH;x++)
        {
            const size_t index=y*VGA_WIDTH+x;
            terminal_buffer[index]=vga_entry(' ', terminal_color);
        }
    }
}
```

Функција која исписује одређени карактер на екрану.

```
void terminal_putentryat(char c, uint8_t color, size_t x, size_t y)
{
    const size_t index=y*VGA_WIDTH+x;
    terminal_buffer[index]=vga_entry(c, color);
}
```

Функција која помера све до сада исписано за један ред на горе и ослобађа нови ред за испис када понестане места на екрану.

```

void movescreen(void)
{
    terminal_row--;
    for(size_t i=0;i<VGA_HEIGHT;i++) for(size_t j=0;j<VGA_WIDTH;j++)
        terminal_buffer[i*VGA_WIDTH+j]=terminal_buffer[(i+1)*VGA_WIDTH+j];
}

```

Функција која поставља бројаче колоне и реда на следеће, углавном празно, поље на екрану.

```

void next_field(void)
{
    if(++terminal_column==VGA_WIDTH) terminal_column=0,terminal_row++;
}

```

Функција која поставља бројаче колоне и реда на претходно поље на екрану и користи се приликом брисања претходно исписаних карактера.

```

void previous_field(void)
{
    if(terminal_column) terminal_column--;
    else terminal_row--,terminal_column=VGA_WIDTH-1;
}

```

Функција која исписује један карактер на екрану. Функција проверава да ли је потребно исписати нови ред уместо карактера '\n', као и да ли је потребно ослободити нови ред уколико се екран попунио.

```

void terminal_putchar(char c)
{
    if(c=='\n') terminal_column=0,terminal_row++;
    else
    {
        terminal_putentryat(c, terminal_color, terminal_column, terminal_row);
        next_field();
    }
    if (terminal_row==VGA_HEIGHT) movescreen();
}

```

Функција која исписује низ карактера на екран.

```

void terminal_writestring(const char* data)
{
    for(int i=0;data[i]!='\0';i++) terminal_putchar(data[i]);
}

```

Функција која исписује целобројну вредност на екран тако што је прво претвори у низ карактера а затим искористи претходну функцију.

```

void terminal_writeint(uint32_t num)
{
    char string[100];
    for(int i=0;i<100;i++) string[i]='\0';
    char *str=string;
    itos(num, str);
    terminal_writestring(str);
}

```

Функција која испишује реалну вредност на екран тако што је прво претвори у низ карактера а затим искористи функцију за испис низа карактера.

```

void terminal_writefloat(double num)
{
    char string[100];
    for(int i=0;i<100;i++) string[i]='\0';
    char *str=string;
    ftos(num, str);
    terminal_writestring(str);
}

```

Функција која брише све до сада исписане карактере са екрана и поставља бројаче колоне и реда на почетну позицију.

```

void clear(void)
{
    for(size_t i=0;i<VGA_HEIGHT;i++) for(size_t j=0;j<VGA_WIDTH;j++)
        terminal_putchar(' ');
    terminal_column=0;
    terminal_row=0;
}

```

7.3 Global Descriptor Table

include/source/gdt.h:

```

#ifndef SOURCE_GDT_H
#define SOURCE_GDT_H

```

```

#include<types.h>

```

Формат у ком рачунар прихвата унос појединачних дефиниција сегмената. Приметимо `__attribute__((packed))`, на крају дефиниције структуре. То нам означава да се неће остављати места у меморији између променљивих унутар структуре, већ ће се ”паковати” једна до друге у меморији.

```

struct gdt_entry
{
    uint16_t limit;
    uint16_t base1;
    uint8_t base2;
    uint8_t access;
    uint8_t limit_flags;
    uint8_t base3;
} __attribute__((packed));

```

Формат који рачунар прихвата за табелу свих дефиниција сегмената.

```

struct gdt_pointer
{
    uint16_t size;
    uint32_t offset;
} __attribute__((packed));

```

```

void init_gdt_entry(size_t num, uint16_t limit, uint32_t base, uint8_t access,
    uint8_t limit_flags);
void init_gdt_table(void);

```

```

#endif

```

c/gdt.c:

```

#include<source/gdt.h>
#include<types.h>

```

```

extern void load_gdt(struct gdt_pointer *gdt);

```

```

struct gdt_entry gdt[5];
struct gdt_pointer gdt;

```

```

void init_gdt_entry(size_t num, uint16_t limit, uint32_t base, uint8_t access,
    uint8_t limit_flags)
{
    gdt[num].limit=limit;
    gdt[num].base1=(base & 0xffff);
    gdt[num].base2=(uint8_t)((base & 0xff0000) >> 16);
    gdt[num].access=access;
    gdt[num].limit_flags=limit_flags;
    gdt[num].base3=(uint8_t)((base & 0xff000000) >> 24);
}

```

```

void init_gdt_table(void)
{
    gdt.size=sizeof(gdt)-1;
    gdt.offset=(uint32_t)&gdt;
}

```

```

init_gdt_entry(0,0,0,0,0);           // null segment
init_gdt_entry(1,0xffff,0,0x9a,0xcf); // code segment
init_gdt_entry(2,0xffff,0,0x92,0xcf); // data segment
init_gdt_entry(3,0xffff,0,0xfa,0xcf); // user mode code segment
init_gdt_entry(4,0xffff,0,0xf2,0xcf); // user mode data segment

```

```

load_gdt(&gdtp);
}

```

7.4 Interrupt Descriptor Table

include/source/idt.h:

```

#ifndef SOURCE_IDT_H
#define SOURCE_IDT_H

```

```

#include<types.h>

```

```

#define INTERRUPT_GATE_32 0x8E

```

```

#define KERNEL_CODE 0x08
#define KERNEL_DATA 0x10

```

```

#define PIC1_COMMAND_PORT 0x20
#define PIC1_DATA_PORT 0x21
#define PIC2_COMMAND_PORT 0xA0
#define PIC2_DATA_PORT 0xA1

```

```

struct idt_entry
{
    uint16_t offset1;
    uint16_t selector;
    uint8_t zero;
    uint8_t type_attr;
    uint16_t offset2;
} __attribute__((packed));

```

```

struct idt_pointer
{
    uint16_t size;
    uint32_t offset;
} __attribute__((packed));

```

```

void init_idt_entry(size_t num, uint32_t offset, uint16_t selector, uint8_t
    type_attr);
void add_idt_entry(size_t num, uint32_t offset);
void init_pic(void);
void init_idt_table(void);

```



```
#endif
```

7.5 IRQ и PIC

c/idt.c:

```
#include<source/idt.h>
#include<types.h>
#include<source/irq.h>
#include<asm.h>
```

```
extern void load_idt(struct idt_pointer *idtp);
```

```
struct idt_entry idt[256];
struct idt_pointer idtp;
```

```
void init_idt_entry(size_t num, uint32_t offset, uint16_t selector, uint8_t
    type_attr)
{
    idt[num].offset1=(uint16_t)(offset & 0xffff);
    idt[num].selector=selector;
    idt[num].zero=0;
    idt[num].type_attr=type_attr;
    idt[num].offset2=(uint16_t)((offset & 0xffff0000)>>16);
}
```

```
void add_idt_entry(size_t num, uint32_t offset)
{
    init_idt_entry(num, offset, KERNEL_CODE, INTERRUPT_GATE_32);
}
```

```
void init_pic(void)
{
    ioport_out(PIC1_COMMAND_PORT, 0x11);
    ioport_out(PIC2_COMMAND_PORT, 0x11);
    ioport_out(PIC1_DATA_PORT, 0x20);
    ioport_out(PIC2_DATA_PORT, 0x28);
    ioport_out(PIC1_DATA_PORT, 0x04);
    ioport_out(PIC2_DATA_PORT, 0x02);
    ioport_out(PIC1_DATA_PORT, 0x01);
    ioport_out(PIC2_DATA_PORT, 0x01);
    ioport_out(PIC1_DATA_PORT, 0xff);
    ioport_out(PIC2_DATA_PORT, 0xff);
    ioport_out(PIC1_DATA_PORT, 0xFC);
}
```

```

void init_idt_table(void)
{
    init_pic();
    add_idt_entry(0,(uint32_t)irq0);
    add_idt_entry(1,(uint32_t)irq1);
    add_idt_entry(2,(uint32_t)irq2);
    add_idt_entry(30,(uint32_t)irq30);
    add_idt_entry(31,(uint32_t)irq31);
    add_idt_entry(32,(uint32_t)timer_irq);
    add_idt_entry(33,(uint32_t)keyboard_irq);

```

```

    idtp.size=sizeof(struct idt_entry)*256-1;
    idtp.offset=(uint32_t)&idt;

```

```

    load_idt(&idtp);
}

```

7.6 Tactatypa

c/keyboard.c:

```

#include<source/keyboard.h>
#include<types.h>
#include<asm.h>
#include<source/stdio.h>
#include<source/keymap.h>
#include<source/vga.h>
#include<source/tty.h>

```

```

char buffer[BUFFER_LOG][BUFFER_SIZE];
size_t buffer_size[BUFFER_LOG];
size_t buffer_current=0;
size_t buffer_all=0;
size_t buffer_index=0;

```

```

char charcode[256];
char shift_charcode[256];
bool ispressed[128];

```

```

void init_keyboard()
{
    us_en(charcode);
    us_en_shift(shift_charcode);
}

```

```
void deletelast()
{
    previous_field();
    printf(" ");
    previous_field();
}
```

```
void backspace()
{
    if(buffer_index <= 0) return;
```

```
    deletelast();
    buffer[buffer_current][--buffer_index] = '\0';
    return;
}
```

```
void enter()
{
    printf("\n");
    if(buffer_index > 0)
    {
        tty(buffer[buffer_current]);
        buffer_size[buffer_current] = buffer_index;
        if(buffer_current == buffer_all) buffer_current = (++buffer_all);
        else
        {
            for(size_t i = 0; i < BUFFER_SIZE; i++) buffer[buffer_all][i] = '\0';
            buffer_current = buffer_all;
        }
        buffer_index = 0;
    }
    prompt();
    return;
}
```

```
void space()
{
    buffer[buffer_current][buffer_index++] = ' ';
    printf(" ");
}
```

```
void keyup()
{
    if(buffer_current > 0)
    {
        buffer_size[buffer_current] = buffer_index;
        for(size_t i = 0; i < buffer_index; i++) deletelast();
        buffer_current--;
        buffer_index = buffer_size[buffer_current];
        printf("%s", buffer[buffer_current]);
    }
}
```

```
void keydown()
{
    if (buffer_current < buffer_all)
    {
        buffer_size [ buffer_current ] = buffer_index;
        for (size_t i = 0; i < buffer_index; i++) deletelast ();
        buffer_current++;
        buffer_index = buffer_size [ buffer_current ];
        printf ("%s", buffer [ buffer_current ]);
    }
}
```

```
void keyleft ()
{
}
```

```
void keyright ()
{
}
```

```
void keyboard_handler ()
{
    ioport_out (PIC1.COMMAND.PORT, 0x20);
    uint8_t status = ioport_in (KEYBOARD.STATUS.PORT);
```

```
    if (status & 0x1)
    {
        uint8_t keycode = ioport_in (KEYBOARD.DATA.PORT);
        if (keycode < 0x80)
        {
            char c = charcode [ keycode ];
            ispressed [ keycode ] = 1;
            // printf ("%d ", &keycode);
```

```
switch(keycode)
{
    case 0x0E:
        backspace();
        break;
    case 0x1C:
        enter();
        break;
    case 0x39:
        space();
        break;
    case 72:
        keyup();
        break;
    case 80:
        keydown();
        break;
    case 75:
        keyleft();
        break;
    case 77:
        keyright();
        break;
```

```
default:
    if(c!=' ')
    {
        if(ispressed[lctrl]||ispressed[rctrl])
        {
            if(c=='l')
            {
                clear();
                prompt();
                printf("%s",buffer[buffer_current]);
                return;
            }
        }
        if(ispressed[lshift]||ispressed[rshift])
        {
            c=shift_charcode[keycode];
        }
        if(buffer_index<BUFFER_SIZE)
        {
            buffer[buffer_current][buffer_index++]=c;
            printf("%c",c);
        }
    }
    break;
}
```

```

    }
    else
    {
        ispressed[keycode-0x80]=0;
    }
}
}

```

7.7 PIT - Programmable Interval Timer

c/timer.c:

```

#include<source/timer.h>
#include<types.h>
#include<asm.h>
#include<source/stdio.h>

```

```

uint32_t tick=0;
const uint32_t TICKS_PER_SECOND=50;
extern uint32_t time;
uint32_t time=0;

```

```

void timer_handler(void)
{
    tick++;
    if(tick==TICKS_PER_SECOND)
    {
        tick=0;
        time++;
    }
}

```

```

    ioport_out(0x20, 0x20);
    ioport_out(0xa0, 0x20);
}

```

```

void init_timer(uint32_t frequency)
{
    uint32_t divisor = 1193180 / frequency;
    ioport_out(0x43, 0x36);
}

```

```

uint8_t l = (uint8_t)(divisor & 0xFF);
uint8_t h = (uint8_t)((divisor >> 8) & 0xFF );

```

```

    ioport_out(0x40, l);
    ioport_out(0x40, h);
}

```

7.8 Heap

c/heap.c:

[8]

```
#include<source/heap.h>
#include<types.h>
```

```
void k_heapBMInit(KHEAPBM *heap)
{
    heap->fblock = 0;
}
```

```
int k_heapBMAddBlock(KHEAPBM *heap, uintptr_t addr, uint32_t size, uint32_t
    bsize)
{
    KHEAPBLOCKBM      *b;
    uint32_t           bcnt;
    uint32_t           x;
    uint8_t            *bm;
```

```
    b = (KHEAPBLOCKBM*)addr;
    b->size = size - sizeof(KHEAPBLOCKBM);
    b->bsize = bsize;
```

```
    b->next = heap->fblock;
    heap->fblock = b;
```

```
    bcnt = b->size / b->bsize;
    bm = (uint8_t*)&b[1];
```

```
    /* clear bitmap */
    for (x = 0; x < bcnt; ++x) {
        bm[x] = 0;
    }
```

```
    /* reserve room for bitmap */
    bcnt = (bcnt / bsize) * bsize < bcnt ? bcnt / bsize + 1 : bcnt / bsize;
    for (x = 0; x < bcnt; ++x) {
        bm[x] = 5;
    }
```

```
    b->lfb = bcnt - 1;
    b->used = bcnt;
    return 1;
}
```

```

static uint8_t k_heapBMGetNID(uint8_t a, uint8_t b);
static uint8_t k_heapBMGetNID(uint8_t a, uint8_t b)
{
    uint8_t      c;
    for (c=a+1;c==b||c==0;++c);
    return c;
}

```

```

void *k_heapBMAAlloc(KHEAPBM *heap, uint32_t size)
{
    KHEAPBLOCKBM    *b;
    uint8_t          *bm;
    uint32_t          bcnt;
    uint32_t          x, y, z;
    uint32_t          bneed;
    uint8_t           nid;

```

```

    /* iterate blocks */
    for (b = heap->fblock; b; b = b->next)
    {
        /* check if block has enough room */
        if (b->size - (b->used * b->bsize) >= size)
        {

```

```

            bcnt = b->size / b->bsize;
            bneed = (size / b->bsize) * b->bsize < size ? size / b->bsize + 1 :
                size / b->bsize;
            bm = (uint8_t*)&b[1];

```

```

            for (x = (b->lfb + 1 >= bcnt ? 0 : b->lfb + 1); x != b->lfb; ++x)
            {
                /* just wrap around */
                if (x >= bcnt) x = 0;

```

```

                if (bm[x] == 0)
                {
                    /* count free blocks */
                    for (y = 0; bm[x + y] == 0 && y < bneed && (x + y) < bcnt;
                        ++y);

```

```

                    /* we have enough, now allocate them */
                    if (y == bneed)
                    {
                        /* find ID that does not match left or right */
                        nid = k_heapBMGetNID(bm[x - 1], bm[x + y]);

```

```

                        /* allocate by setting id */
                        for (z = 0; z < y; ++z) bm[x + z] = nid;

```

```

                        /* optimization */
                        b->lfb = (x + bneed) - 2;

```



```

        /* count used blocks NOT bytes */
        b->used += y;

```

```

        return (void*)(x * b->bsize + (uintptr_t)&b[1]);
    }

```

```

        /* x will be incremented by one ONCE more in our FOR loop
        * */
        x += (y - 1);
        continue;
    }
}
}
return 0;
}

```

```

void k_heapBMFree(KHEAPBM *heap, void *ptr)
{
    KHEAPBLOCKBM    *b;
    uintptr_t        ptroff;
    uint32_t          bi, x;
    uint8_t           *bm;
    uint8_t           id;
    uint32_t          max;

```

```

    for (b = heap->fblock; b; b = b->next)
    {
        if ((uintptr_t)ptr > (uintptr_t)b && (uintptr_t)ptr < (uintptr_t)b +
            sizeof(KHEAPBLOCKBM) + b->size) {
            /* found block */
            ptroff = (uintptr_t)ptr - (uintptr_t)&b[1];
            /* get offset to get block */

            /* block offset in BM */
            bi = ptroff / b->bsize;
            /* .. */
            bm = (uint8_t*)&b[1];
            /* clear allocation */
            id = bm[bi];
            /* oddly.. GCC did not optimize this */
            max = b->size / b->bsize;
            for (x = bi; bm[x] == id && x < max; ++x) bm[x] = 0;
            /* update free block count */
            b->used -= x - bi;
            return;
        }
    }
}

```

```

    /* this error needs to be raised or reported somehow */
    return;
}

```

```
KHEAPBM kheap;
```

```
void kheapinit()
{
    k_heapBMInit(&kheap);
}
```

```
int kheapaddblock(uintptr_t addr, uint32_t size, uint32_t bsize)
{
    return k_heapBMAAddBlock(&kheap, addr, size, bsize);
}
```

```
void *kmalloc(uint32_t size)
{
    return k_heapBMAlloc(&kheap, size);
}
```

```
void kfree(void *ptr)
{
    k_heapBMFree(&kheap, ptr);
}
```

7.9 Paging

c/paging.c:

```
#include<source/paging.h>
#include<types.h>
```

```
extern void loadPageDirectory(uint32_t*);
extern void enablePaging(void);
```

```
uint32_t page_directory[1024] __attribute__((aligned(4096)));
```

```
void set_pd(void)
{
    //set each entry to not present
    for(size_t i=0;i<1024;i++)
    {
        // This sets the following flags to the pages:
        // Supervisor: Only kernel-mode can access them
        // Write Enabled: It can be both read from and written to
        // Not Present: The page table is not present
        page_directory[i] = 0x00000002;
    }
}
```

```
uint32_t page_table[1024][1024] __attribute__((aligned(4096)));
```

```

void set_pt(size_t num,uint32_t address)
{
    // holds the physical address where we want to start mapping these pages
    // to.
    // in this case, we want to map these pages to the very beginning of
    // memory.

    //we will fill all 1024 entries in the table, mapping 4 megabytes
    for(size_t i=0;i<1024;i++)
    {
        // As the address is page aligned, it will always leave 12 bits zeroed.
        // Those bits are used by the attributes ;)
        page_table[num][i] = (address + i * 0x1000) | 3;
        // attributes: supervisor level, read/write, present.
    }

    page_directory[num] = ((uint32_t)page_table[num]) | 3;
    // attributes: supervisor level, read/write, present
}

void set_paging(void)
{
    set_pd();
    for(size_t i=0;i<1024;i++) set_pt(i,0x00400000 * i); // all 4GB mapped
    loadPageDirectory(page_directory);
    enablePaging();
}

```

7.10 Минимална C biblioteka

include/errno.h:

include/stdio.h:

```
#ifndef _STDIO_H
#define _STDIO_H

#include <stdarg.h>
#include <stddef.h>

#define SEEK_SET 0
typedef struct { int unused; } FILE;

extern FILE* stderr;
#define stderr stderr
int fclose(FILE*);
int fflush(FILE*);
FILE* fopen(const char*, const char*);
int fprintf(FILE*, const char*, ...);
size_t fread(void*, size_t, size_t, FILE*);
int fseek(FILE*, long, int);
long ftell(FILE*);
size_t fwrite(const void*, size_t, size_t, FILE*);
void setbuf(FILE*, char*);
int vfprintf(FILE*, const char*, va_list);

#endif
```

include/stdlib.h:

```
#ifndef _STDLIB_H
#define _STDLIB_H

void abort(void);
int atexit(void (*)(void));
int atoi(const char*);
void free(void*);
char* getenv(const char*);
void* malloc(size_t);

#endif
```

include/string.h:

```
#ifndef _STRING_H
#define _STRING_H

#include <stddef.h>

void* memcpy(void*, const void*, size_t);
void* memset(void*, int, size_t);
char* strcpy(char*, const char*);
size_t strlen(const char*);

#endif
```

include/time.h:

include/unistd.h:

```
#ifndef _UNISTD_H
#define _UNISTD_H

#include <sys/types.h>

int execl(const char*, char* const []);
int execve(const char*, char* const [], char* const []);
int execvp(const char*, char* const []);
pid_t fork(void);

#endif
```

include/sys/types.h:

```
#ifndef _SYS_TYPES_H
#define _SYS_TYPES_H

typedef int pid_t;

#endif
```

8

Закључак

Овај пројекат је био сјајан показатељ колико је заправо комплексна израда језгра оперативног система који треба да представља мост између хардвера и софтвера. Драго ми је што сам одабрао овако тежак пројекат за матурски рад из разлога што ми је то помогло да пробијем баријеру и уложим пуно труда да бих заправо разумео како раде оперативни системи и колико је софистициран њихов дизајн.

Литература

- [1] Intel. *Intel® 64 and IA-32 architectures software developer's manual combined volumes: 1, 2A, 2B, 2C, 2D, 3A, 3B, 3C, 3D, and 4*. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/developer/articles/technical/intel-sdm.html>.
- [2] Robert Mecklenburg. *Managing Projects with GNU Make*. 3rd ed. Nutshell Handbooks. O'Reilly Media, 2004. ISBN: 0596006101,9780596006105. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=6754a2b1ac7071ea1ccedc05801f5424>.
- [3] Arnold Robbins, Elbert Hannah, and Linda Lamb. *Learning the Vi and Vim Editors*. 7th ed. O'Reilly Media, 2008. ISBN: 9780596529833,059652983X. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=bc6fb75f968bcc39e4446c29bf04d2d1>.
- [4] Andrew S. Tanenbaum and Albert S. Woodhull. *Operating Systems: Design and Implementation*. 3rd ed. Pearson, 2006. ISBN: 0131429388, 9780131429383. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=fdafa32272838b3eff5583d668e3192b>.
- [5] Andrew S. Tanenbaum. *Modern Operating Systems*. 3rd ed. Pearson Prentice Hall, 2008. ISBN: 0136006639,9780136006633. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=ac8cd7d4fd0467e923a0c04b7a939f84>.
- [6] Andrew S. Tanenbaum and Todd Austin. *Structured Computer Organization*. 6th ed. Prentice Hall, 2012. ISBN: 0132916525,9780132916523. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=f6fc02a547e862360e743754fc06375b>.
- [7] Marshall Kirk McKusick, George V. Neville-Neil, and Robert N.M. Watson. *The Design and Implementation of the FreeBSD Operating System*. 2nd ed. Addison-Wesley Professional, 2014. ISBN: 0321968972,9780321968975. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=bc62cc0f2ad546d5a7b2d2c610ee14ae>.

- [8] Sanjoy Dasgupta, Christos Papadimitriou, and Umesh Vazirani. *Algorithms*. 1st ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2006. ISBN: 0073523402,9780073523408. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=529078edeb67e6ca26edc683ad3f6a51>.
- [9] *OsDev Wiki*. URL: https://wiki.osdev.org/Expanded_Main_Page.
- [10] David Salomon. *Assemblers and loaders*. Ellis Horwood series in computers and their applications. Ellis Horwood, 1992. ISBN: 9780130525642,0130525642. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=A5065F7D488058B77DD8F8BF85DF7490F>.
- [11] Alfred V. Aho et al. *Compilers - Principles, Techniques, and Tools*. 2nd ed. Pearson/Addison Wesley, 2006. ISBN: 0321486811. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=90db32d070cfb70ca617e655d5c35529>.
- [12] John L. Hennessy and David A. Patterson. *Computer Architecture, Fifth Edition: A Quantitative Approach*. 5th ed. The Morgan Kaufmann Series in Computer Architecture and Design. Morgan Kaufmann, 2011. ISBN: 012383872X,9780123838728. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=041f6d8fb8e6b6d1ed26a824775b5a0d>.
- [13] Bryant Randal E. and O'Hallaron David Richard. *Computer Systems: A Programmer's Perspective*. 2nd ed. Pearson, 2010. ISBN: 0136108040,9780136108047. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=3E84B730EC874FFDB1A069FF482D112C>.
- [14] Benjamin Lunt. *USB: The Universal Serial Bus (FYSOS: Operating System Design Book 8)*. 2013. ISBN: 1717425364. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=D4A70ECFDC3F4EB7DC62723D7BCB222C>.
- [15] Abraham Silberschatz, Peter B Galvin, and Greg Gagne. *Operating system concepts*. 9th ed. Wiley, 2012. ISBN: 9781118063330,1118063333. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=be3559401fec4b4ba93cc8e2f2e05601>.
- [16] William Stallings. *Operating systems: internals and design principles*. 7th ed. Prentice Hall, 2011. ISBN: 013230998X, 9780132309981, 0273751506, 9780273751502, 1299318266, 9781299318267. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=6990c44cecea007aa328a9a86c3027d1>.

- [17] Remzi H. Arpaci-Dusseau and Andrea C Arpaci-Dusseau. *Operating Systems: Three Easy Pieces*. Paperback. Createspace Independent Publishing Platform, 2018. ISBN: 198508659X,9781985086593. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=aa2c64b8cee2819de114afdebd113e7a>.
- [18] Samuel P. Harbison and Guy L. Steele. *C: A Reference Manual*. 5th ed. Prentice Hall, 2002. ISBN: 013089592X,9780130895929. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=fe81d808c24e1a0c0d479520db57cd86>.
- [19] Brian W. Kernighan and Dennis M. Ritchie. *C Programming Language*. 2nd ed. Prentice Hall, 1988. ISBN: 0131103628,9780131103627. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=5013a19e2b20b82d104bae34ac7e5320>.
- [20] Bill Rosenblatt and Cameron Newham. *Learning the bash shell*. 3rd ed. Nutshell handbook. O'Reilly, 2005. ISBN: 9780596009656,0596009658. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=F0B2387CFA911873144412D2DF51E16C>.
- [21] Stephen A. Rago and W. Richard Stevens. *Advanced Programming in the UNIX Environment*. 3rd ed. Addison-Wesley professional computing series. Addison-Wesley Professional, 2013. ISBN: 0321637739,9780321637734. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=8f4dd448cc992b8ab4a38dd056b09478>.