# B4B35OSY: Operační systémy

## Lekce 3. Procesy a vlákna

Petr Štěpán
stepan@fel.cvut.cz

6. října, 2022

# Outline

1 Procesy a vlákna

2 Vlákna

3 Od programu k procesu

4 Plánování procesů/vláken

5 Bod aktivity

# Obsah

1 Procesy a vlákna

2 Vlákna

3 Od programu k procesu

4 Plánování procesů/vláken

5 Bod aktivity

# Co byste měli vědět z minulé hodiny

- Proces je běžící program
- Proces obsahuje
  - program, data, zásobník
  - CPU registry, otevřené soubory, dynamické proměnné
- Vytvoření, ukončení procesu jsou systémová volání (služby jádra)
- Vytvoření procesu - služba fork
  - Všechna data, program, zásobník, otevřené soubory, dynamické proměnné se ”zkopírují”do nového virtuálního prostoru
  - Nově vytvořený proces a rodičovský proces se liší pouze v návratové hodnotě systémového volání fork

# Služby OS - exec

```
int execl(const char *pathname, const char *arg, ... /*,
(char *) NULL */);:
```

- existují další varianty execlp, execle, execv, execvp, execvpe – liší se pouze způsobem zadání parametrů
- služba smaže program, data (všechna statická i dynamická) a zásobník běžícího procesu a nahradí ho programem, daty zadaného programu a vytvoř nový zásobník
- **Důležité** služba ponechá otevřené soubory
  - to lze využít k přesměrování vstupu a výstupů
  - každý program má otevřené tři základní soubory
    0. standardní vstup – stdin
    1. standardní výstup – stdout
    2. standardní chybový výstup – stderr
  - např. zavřením souboru 0 a otevřením souboru *name* se přesměruje čtení na čtení ze souboru, protože soubor 0 nyní reprezentuje soubor *name*
    - využije se to, že open najde nejmenší volné číslo pro otevření souboru

# Služby OS - wait

`pid_t wait(int *status):`

- čeká na ukončení libovolného potomka

`pid_t wait_pid(pid_t pid, int *status, int opt)`

- čeká na konkrétního potomka

Obě funkce:

- přijmou jeho návratovou hodnotu
- `WEXITSTATUS(status)` dekóduje 8-bitů od končícího potomka
- `WIFEXITED(status)` dekóduje, zda potomek skončil normálně - tedy volání služby exit
- `WIFSIGNALED(status)` dekóduje, zda potomek skončil přijetím signálu
- další makra na detailní zjištění ukončení potomka

# Kvíz – Volání Wait

Co se stane, když rodič nezavolá systémové volání wait?

A - Proces nemůže skončit a neustále běží

B - Proces skončí, ale program a všechna data zůstávají v paměti

C - Proces zůstane v počítači jako živá mrtvola – zombie

D - Nic se nestane, proces je vymazán ze systému

# Zombie

Pokud potomek skončí a rodičovský proces ještě neskončil a nezavolal systémové volání wait, tak potomek nemůže být odstraněn z tabulky procesů.
Důvod:

- potomek musí předat rodiči výsledek svého běhu
- toto číslo musí být někde uloženo - ve struktuře, která popisuje proces potomka
- potomek nemůže běžet, ale ještě nemůže být úplně ukončen - stav zombie
- viz praktický příklad k přednášce

# Bash

Pokud v bashi zadáte příkaz, znamená to, že se vytvoří nový proces. Čeká bash na ukončení tohoto procesu?

- ANO – čeká vždy, aby mohl přijmout výsledek procesu
- Výsledek procesu je v proměnné `$?`
- Potomek nahlásí například příkazem exit svoji návratovou hodnotu a bash ji uloží do `$?`

# Fork bomb

Jednoduchý proces, který sám sebe spustí alespoň dvakrát.
Proces se začne nekontrolovaně množit a hrozí zahlcení systému.

- BASH `:() :|:& ;:`
  - definice funkce se jménem `:`
  - funkce `:` spustí funkci `:` dvakrát spojenou rourou
  - spustí se první provedení funkce `:`
- Windows – fork.bat: `%0 | %0`
  - `%0` - obdobně jako v bashi jméno spuštěného programu
  - spusť se dvakrát propojený rourou
- Perl – `perl -e "fork while fork"&`
- `https://en.wikipedia.org/wiki/Fork_bomb`

# Ukončení procesu

- Proces provede poslední instrukci programu a žádá OS o ukončení voláním služby `exit(status)`
  - Stavová data procesu-potomka (status) se musí předat procesu-rodiči, který typicky čeká na potomka pomocí `wait()`
  - Zdroje (paměť, otevřené soubory) končícího procesu jádro samo uvolní
- Proces může skončit také:
  - přílišným nárokem na paměť (požadované množství paměti není a nebude k dispozici) – *OOM killer* v Linux
  - běžící kód vygeneruje výjimku CPU, kterou jádro neumí vyřešit:
    - aritmetickou chybou (dělení nulou, arcsin(2), ...)
    - pokusem o narušením ochrany paměti („zabloudění“ programu)
    - pokusem o provedení nedovolené (privilegované) operace (zakázaný přístup k hardwarovému prostředku)
    - ...
  - žádostí rodičovského procesu (v POSIXu signál)
    - Může tak docházet ke kaskádnímu ukončování procesů
    - V POSIXu lze proces „odpojit“ od rodiče – démon
  - a v mnoha dalších chybových situacích

# Obsah

1 Procesy a vlákna

2 Vlákna

3 Od programu k procesu

4 Plánování procesů/vláken

5 Bod aktivity

# Kvíz – Vlákna

Co jsou vlákna?

A - Vlákna mohou vykonávat různé funkce v rámci jednoho procesu s vlastním zásobníkem

B - Vlákna musí vykonávat stejnou funkci, ale běží paralelně v rámci jednoho procesu

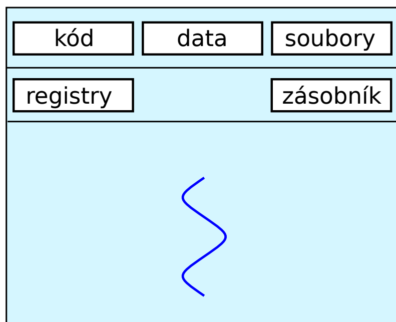
C - Jedná se vlastně o paralelní běh různých procesů se stejným programem

D - Vlákna nemohou běžet na různých jádrech CPU

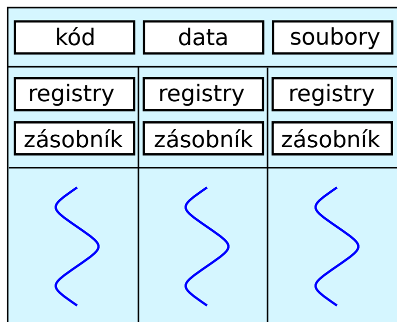
# Program, proces, vlákno

- Program:
  - je soubor (např. na disku) přesně definovaného formátu obsahující
    - instrukce,
    - data
    - údaje potřebné k zavedení do paměti a inicializaci procesu
- Proces:
  - je spuštěný program – objekt jádra operačního systému provádějící výpočet podle programu
  - je charakterizovaný svým paměťovým prostorem a kontextem (prostor v RAM se přiděluje procesům – nikoli programům!)
  - může vlastnit (kontext obsahuje položky pro) otevřené soubory, I/O zařízení a komunikační kanály, které vedou k jiným procesům, …
  - obsahuje jedno či více vláken
- Vlákno:
  - je sekvence instrukcí vykonávaných procesorem
  - sdílí s ostatními vlákny procesu paměťový prostor a další atributy procesu (soubory, …)
  - má vlastní hodnoty registrů CPU

# Procesy a vlákna




jednovláknový proces




vícevláknový proces

# Vlákno – thread

Vlákno – thread

- Objekt vytvářený v rámci procesu a viditelný uvnitř procesu
- Tradiční proces je proces tvořený jediným vláknem
- Vlákna podléhají plánování a přiděluje se jim strojový čas i procesory
- Vlákno se nachází ve stavech: běží, připravené, čekající, ukončené
- Když vlákno neběží, je kontext vlákna uložený v TCB (Thread Control Block) – analogie PCB
  - Linux má stejnou strukturu `task_struct` pro procesy i pro vlákna
    - na informace společné s procesem (např. správa paměti) se vlákno odkazuje k procesu
  - Každý proces je tedy vlastně alespoň jedno vlákno
- Vlákno může přistupovat k globálním proměnným a k ostatním zdrojům svého procesu, data jsou sdílena všemi vlákny stejného procesu
  - Změnu obsahu globálních proměnných procesu vidí všechna ostatní vlákna téhož procesu
  - Soubor otevřený jedním vláknem je viditelný pro všechna ostatní vlákna téhož procesu

# Proces

Co patří komu?

| | |
|---|---|
| kód programu | proces |
| lokální proměnné | vlákno |
| globální proměnné | proces |
| otevřené soubory | proces |
| zásobník | vlákno |
| správa paměti | proces |
| čítač instrukcí | vlákno |
| registry CPU | vlákno |
| plánovací stav | vlákno |
| uživatelská práva | proces |

# Účel vláken

- Přednosti
  - Vlákno se vytvoří i ukončí rychleji než proces
  - Přepínání mezi vlákny je rychlejší než mezi procesy
  - Dosáhne se lepší strukturalizace programu
- Příklady
  - Souborový server v LAN
    - Musí vyřizovat během krátké doby několik požadavků na soubory
    - Pro vyřízení každého požadavku se zřídí samostatné vlákno
  - Symetrický multiprocesor
    - na různých procesorech mohou běžet vlákna souběžně
  - Menu vypisované souběžně se zpracováním prováděným jiným vláknem
    - Překreslování obrazovky souběžně se zpracováním dat
  - Paralelizace algoritmu v multiprocesoru

# Možnosti implementace vláken

Vlákna na uživatelské úrovni

- OS zná jenom procesy
- Vlákna vytváří uživatelská knihovna, která střídavě mění spuštěná vlákna procesu
- Pokud jedno vlákno na něco čeká, ostatní vlákna nemohou běžet, protože jádro OS označí jako čekající celý proces
- Pouze staré systémy, nebo jednoduché OS, kde nejsou vlákna potřeba

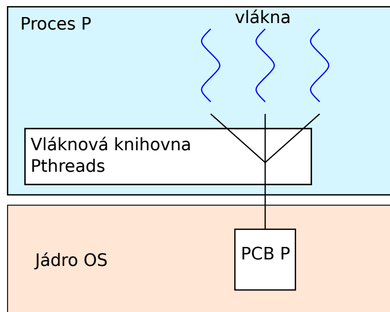
Vlákna na úrovni jádra OS

- Procesy a vlákna jsou plně podporované v jádře
- Moderní operační systémy (Windows, Linux, OSX, Android)
- Vlákno je jednotka plánování činnosti systému

# Vlákna na uživatelské úrovni

Problémy vláken na uživatelské úrovni

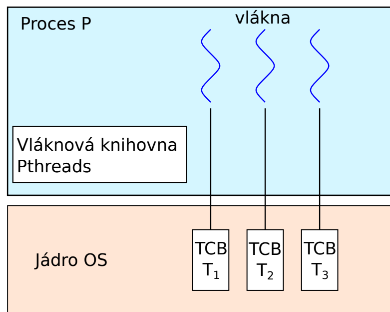
- Jedno vlákno čeká, všechny vlákna čekají
- Proces čeká, ale stav vlákna je běžící
- Dvě vlákna nemohou běžet skutečně paralelně, i když systém obsahuje více CPU



# Vlákna v jádře OS

Kernel-Level Threads (KLT)

- Veškerá správa vláken je realizována OS
- Každé vlákno v uživatelském prostoru je zobrazeno na vlákno v jádře (model 1:1)
- JOS vytváří, plánuje a ruší vlákna
- Jádro může plánovat vlákna na různé CPU, skutečný multiprocessing
- Nyní všechny moderní OS: Windows, OSX, Linux, Android



# Vlákna v jádře OS

- Výhody:
  - Volání systému neblokuje ostatní vlákna téhož procesu
  - Jeden proces může využít více procesorů
  - Skutečný paralelismus uvnitř jednoho procesu – každé vlákno běží na jiném procesoru
  - Tvorba, rušení a přepínání mezi vlákny je levnější než přepínání mezi procesy
  - Netřeba dělat cokoliv s přidělenou pamětí
- Nevýhody:
  - Systémová správa je režijně nákladnější než u čistě uživatelských vláken
  - Klasické plánování není ”spravedlivé”: Dostává-li vlákno své časové kvantum, pak procesy s více vlákny dostávají více času
    - Moderní OS ale používají spravedlivé plánování

# Pthreads

- Pthreads je knihovna poskytující API pro vytváření a synchronizaci vláken definovaná standardem POSIX.
- Knihovna Pthreads poskytuje unifikované API:
  - Nepodporuje-li JOS vlákna, knihovna Pthreads bude pracovat čistě s ULT
  - Implementuje-li příslušné jádro KLT, pak toho knihovna Pthreads bude využívat
  - Pthreads je tedy systémově závislá knihovna
- Vlákna Linux:
  - Linux nazývá vlákna tasks
  - Linux má stejnou strukturu `task_struct` pro procesy i pro vlákna
  - Lze použít knihovnu pthreads
  - Vytváření vláken je realizováno službou OS `clone()`

# Pthreads API

Příklad: Samostatné vlákno, které počítá součet prvních n celých čísel

```
#include <pthread.h>
#include <stdio.h>

int sum;                                     /* sdílená data */
void *runner(void *param) {   /* funkce realizující vlákno */
    int upper = atoi(param);  int i;  sum = 0;
    if (upper > 0) {
        for (i = 1; i <= upper; i++)
            sum += i;
    }
    pthread_exit(0);
}

int main(int argc, char *argv[]) {
    pthread_t tid;                       /* identifikátor vlákna*/
    pthread_attr_t attr;                 /* atributy vlákna */
    pthread_attr_init(&attr);                    /* inicializuj implicitní atributy
    pthread_create(&tid, &attr, runner, argv[1]);   /* vytvoř vlákno */
    pthread_join(tid,NULL);                      /* čekej až vlákno skončí */
    printf("sum = %d\n",sum);
}
```

# Vlákna ve Windows

- Aplikace ve Windows běží jako proces tvořený jedním nebo více vlákny
- Windows implementují mapování 1:1
- Někteří autoři dokonce tvrdí, že Proces se nemůže vykonávat, neboť je jen kontejnerem pro vlákna a jen ta jsou schopná běhu
- Každé vlákno má:
  - svůj identifikátor vlákna
  - sadu registrů (obsah je ukládán v TCM)
  - samostatný uživatelský a systémový zásobník
  - privátní datovou oblast

# Kvíz – Vlákna v Javě

Mohou být v Javě vlákna?

A - Nemohou, Java je interpretovaný jazyk

B - Mohou, jsou jen implementovány na úrovni Java virtual machine

C - Mohou, jen když je Java přeložena do strojového kódu

D - Mohou, jde o nová vlákna Java virtual machine

# Vlákna v Javě

- Vlákna v Javě:
  - Java má třídu „Thread“ a instancí je vlákno
  - Samozřejmě lze z třídy Thread odvodit podtřídu a některé metody přepsat
  - JVM pro každé vlákno vytváří jeho Java zásobník, kde jsou lokální třídy nedostupné pro ostatní vlákna
  - JVM spolu se základními Java třídami vlastně vytváří virtuální stroj obsahující jak vlastní JVM tak i na něm běžící OS podporující vlákna
  - Pokud se jedná o OS podporující vlákna pak jsou vlákna JVM mapována 1:1 na vlákna OS

# Vlákna v Javě

Dva příklady jak vytvořit vlákno v Javě

```
class CounterThread extends Thread {
    public void run() {
        for(int i = 0; i < 10; i++) {
            System.out.println(i);
        }
    }
}


Thread counterThread = new CounterThread();

counterThread.start();
```

```
class Counter implements Runnable {
    public void run() {
        for(int i = 0; i < 10; i++) {
            System.out.println(i);
        }
    }
}

Runnable counter = new Counter();
Thread counterThread = new Thread(counter);

counterThread.start();
```

# Obsah

1 Procesy a vlákna

2 Vlákna

3 Od programu k procesu

4 Plánování procesů/vláken

5 Bod aktivity

# Psaní programů

- Psaní programu je prvním krokem po analýze zadání a volbě algoritmu
- Program zpravidla vytváříme textovým editorem a ukládáme do souboru s příponou indikující programovací jazyk
  - zdroj.c pro jazyk C
  - prog.java pro jazyk Java
  - text.cc, text.cpp pro C++
- Každý takový soubor obsahuje úsek programu označovaný dále jako modul
- V závislosti na typu dalšího zpracování pak tyto moduly podléhají různým sekvencím akcí, na jejichž konci je jeden nebo několik výpočetních procesů
- Rozlišujeme dva základní typy zpracování:
  - Interpretace (bash, python)
  - Kompilace – překlad (C, Pascal)
  - existuje i řada smíšených přístupů (Java – vykonává předkompilovaný a uložený kód, vytvořený překladačem, který je součástí interpretačního systému)

# Interpretace

Interpretem rozumíme program, který provádí příkazy napsané v nějakém programovacím jazyku

- vykonává přímo zdrojový kód
  - mnohé skriptovací jazyky a nástroje (např. bash), starší verze BASIC
- překládá zdrojový kód do efektivnější vnitřní reprezentace a tu pak okamžitě „vykonává“
  - jazyky typu Perl, Python, MATLAB apod.

Výhody interpretů:

- rychlý vývoj bez potřeby explicitního překladu a dalších akcích
- nezávislost na cílovém stroji

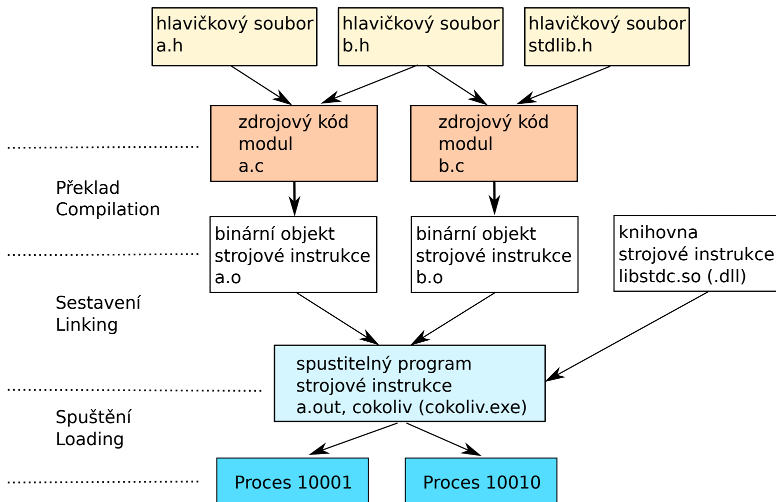
Nevýhody:

- nízká efektivita „běhu programu“
- interpret stále analyzuje zdrojový text (např. v cyklu) nebo se „simuluje“ jiný stroj

Poznámka:

- strojový kód je interpretován hardwarem – CPU

# Překlad



# Překladač

Úkoly překladače (kompilátoru)

- kontrolovat správnost zdrojového kódu
- „porozumět“ zdrojovému textu programu a převést ho do vhodného „meziproduktu“, který lze dále zpracovávat bez jednoznačné souvislosti se zdrojovým jazykem
- základní výstup kompilátoru bude záviset na jeho typu
  - tzv. nativní překladač generuje kód stroje, na kterém sám pracuje
  - křížový překladač (cross-compiler) vytváří kód pro jinou hardwarovou platformu (např. na PC vyvíjíme program pro vestavěný mikropočítač s procesorem úplně jiné architektury, než má naše PC)
- mnohdy umí překladač generovat i ekvivalentní program v jazyku symbolických adres (assembler)
- častou funkcí překladače je i optimalizace kódu
  - např. dvě po sobě jdoucí čtení téže paměťové lokace jsou zbytečná
  - jde často o velmi pokročilé techniky závislé na cílové architektuře, na zdrojovém jazyku
  - optimalizace je časově náročná, a proto lze úrovně optimalizace volit jako parametr překladu
  - při vývoji algoritmu chceme rychlý překlad, při konečném překladu provozní verze programu žádáme rychlost a efektivitu

# Struktura překladače jazyka C

- Předzpracování – preprocesing, vložení souborů a nahrazení maker (#define), podmíněný překlad, odstranění komentářů
  - výsledkem je upravený jeden textový soubor pro překlad
- Lexikální analýza
  - výsledek jsou tokeny – rozpoznání stavebních prvků
- Syntaktická a sémantická analýza
  - výsledkem je strom odvození a tabulka symbolů
- Generátor mezikódu
  - výsledkem je abstraktní strojový jazyk – three address code, java – soubory class
- Optimalizace – odstranění redundantních operací, optimalizace cyklů, atp.
  - výsledek – optimalizovaný abstraktní kód
- Generátor kódu – přiřazení proměnných registrům
  - výsledkem je binární objekt, který obsahuje strojové instrukce a inicializovaná data

# Lexikální analýza

- Lexikální analýza
- převádí textové řetězce na série tokenů (též lexemů), tedy textových elementů detekovaného typu
- např. příkaz: sedm = 3 + 4 generuje tokeny
  - (sedm, IDENT), (=, ASSIGN_OP), (3, NUM), (+, OPERATOR), (4, NUM)
- Již na této úrovni lze detekovat chyby typu „nelegální identifikátor“ (např. 1q)
- Tvorbu lexikálních analyzátorů lze mechanizovat pomocí programů typu lex nebo flex

# Syntaktická a sémantická analýza

- základem je bezkontextová gramaticka
- bezkontextová gramatika je speciálním případem formální gramatiky
- bezkontextová gramatika je čtveřice $G = (V_N, V_T, P, S)$, kde
  - $V_N$ je množina neterminálních symbolů, tj. symbolů které se nevyskytují v popisovaném jazyce
  - $V_T$ je množina terminálních symbolů, tj. symbolů ze kterých je tvořen jazyk, v případě překladače jsou terminální symboly lexemy, které jsou výsledkem lexikání analýzy
  - $P$ je množina přepisovacích pravidel, pro bezkontextovou gramatiku jsou pouze pravidla $A \to \beta$, kde $A \in V_N$ a $\beta \in (V_N \cup V_T)^*$, tzn. $\beta$ je libovolné slovo složené z terminálů i neterminálů
  - $S$ je počáteční symbol z množiny $V_N$

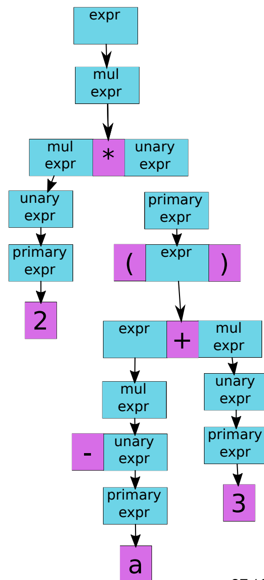
# Syntaktická a sémantická analýza

Příklad bezkontextová gramatika pro výrazy:

```
expr         : mul_expr
             | expr '+' mul_expr
             | expr '-' mul_expr;
mul_expr     : unary_expr
             | mul_expr '*' unary_expr
             | mul_expr '/' unary_expr;
unary_expr   : primary_expr
             | unary_op primary_expr;
unary_op     : '&' | '*' | '+' | '-' | '~' | '!';
primary_expr : id | constant | '(' expr ')';
```

Odvození je pak již vlastně sémantická analýza (definuje význam věty - programu)

Vpravo vidíte strom odvození výrazu `2*(-a+3)`



# Syntaktická a sémantická analýza

- většinou bývá prováděna společným kódem překladače, zvaným parser
- Tvorba parserů se mechanizuje pomocí programů typu yacc či bison
- `yacc` = Yet Another Compiler Compiler; `bison` je zvíře vypadající jako jak (yacc)
- Programovací jazyky se formálně popisují nejčastěji gramatikami pomocí Extended Backus-Naurovy Formy (EBNF)

```
digit_excluding_zero = "1"|"2"|"3"|"4"|"5"|"6"|"7"|"8"|"9".
digit                = "0" | digit_excluding_zero.
natural_number       = digit_excluding_zero,{digit}.
integer              = "0" | ["-"], natural_number.
arit_operator        = "+" | "-" | "*" | "/".
simple_int_expr      = integer,arit_operator,integer.
```

- EBNF pro jazyk C lze nalézt na
  `http://www.cs.man.ac.uk/~pjj/bnf/c_syntax.bnf`
- EBNF pro jazyk Java
  `http://cui.unige.ch/isi/bnf/JAVA/AJAVA.html`

# Three adress code

- Celý program se popíše trojicemi: operand1 operace operand2
  - Některé operace mají jen jeden operand, druhý je nevyužit, např goto adresa.
- Každá trojice má svoje číslo, které obsahuje výsledek operace
- Nejčastější zápis: **t1:=op1 + op2**

Příklad: $x = sqrt(a * a - b * b)$

```
t1 := a * a
t2 := b * b
t3 := t1 - t2
t4 := push_param(t3)
t5 := call sqrt
t6 := x = t5
```

Příklad: for (i=0; i<10; i++) a+=i

```
t1 := i = 0
t2 := goto t7
t3 := a + i
t4 := a = t3
t5 := i + 1
t6 := i = t5
t7 := i < 10
t8 := if t7 goto t3
```

# Optimalizace při překladu

Co může překladač optimalizovat

- Elementární optimalizace
  - předpočítání konstant
    - `n = 1024 * 64` – během překladu se vytvoří konstanta 65536
  - znovupoužití vypočtených hodnot
    - `if(x**2 + y**2 <= 1) { a = x**2 + y**2; } else { a=0; }`
  - detekce a vyloučení nepoužitého kódu
    - `if((a>=0) && (a<0)) { never used code; };`
    - obvykle se generuje „upozornění“ (warning)
- Sémantické optimalizace
  - značně komplikované
  - optimalizace cyklů
  - lepší využití principu lokality (bude vysvětleno v části virtuální paměti)
  - minimalizace skoků v programu – lepší využití instrukční cache
- Celkově mohou být optimalizace velmi náročné během překladu, avšak za běhu programu mimořádně účinné (např. automatická paralelizace)

# Kvíz – Chyba při překladu

Pokud napíšete:

```
for (i=0; i<10; i++; j++)
```

A - Je to chyba lexikální analýzy

B - Je to chyba syntaktické analýzy

C - Je to chyba sémantické analýzy

D - Není to chyba

# Kvíz – Chyba při překladu

Pokud napíšete:

```
a = 1f;
```

A - Je to chyba lexikální analýzy

B - Je to chyba syntaktické analýzy

C - Je to chyba sémantické analýzy

D - Není to chyba

# Generování kódu

- Generátor kódu vytváří vlastní sémantiku ”mezikódu”
  - Obecně: Syntaktický a sémantický analyzátor buduje strukturu programu ze zdrojového kódu, zatímco generátor kódu využívá tuto strukturální informaci (např. datové typy) k tvorbě výstupního kódu.
  - Generátor kódu mnohdy dále optimalizuje, zejména při znalosti cílové platformy
    - např.: Má-li cílový procesor více střádačů (datových registrů), dále nepoužívané mezivýsledky se uchovávají v nich a neukládají se do paměti.
- Podle typu překladu generuje různé výstupy
  - assembler (jazyk symbolických adres)
  - absolutní strojový kód
    - pro „jednoduché“ systémy (firmware vestavných systémů)
  - přemístitelný (object) modul
  - speciální kód pro pozdější interpretaci virtuálním strojem
    - např. Java byte-kód pro JVM
- V interpretačních systémech je generátor kódu nahrazen vlastním „interpretem“

# Binární objektový modul

Každý objektový modul obsahuje sérii sekcí různých typů a vlastností

- Prakticky všechny formáty objektových modulů obsahují
  - Sekce `text` obsahuje strojové instrukce a její vlastností je zpravidla EXEC|ALLOC
  - Sekce `data` slouží k alokaci paměťového prostoru pro inicializovaných proměnných, RW|ALLOC
  - Sekce `BSS` (Block Started by Symbol) popisuje místo v paměti, které netřeba alokovat ve spustitelném souboru, při start procesu je inicializováno na nulu, RW
- Mnohé formáty objektových modulů obsahují navíc
  - Sekce `rodata` slouží k alokaci paměťového prostoru konstant, RO|ALLOC
  - Sekci `symtab` obsahující tabulku globálních symbolů, kterou používá sestavovací program
  - Sekci `dynamic` obsahující informace pro dynamické sestavení
  - Sekci `dynstr` obsahující znakové řetězce (jména symbolů pro dynamické sestavení
  - Sekci `dynsym` obsahující popisy globálních symbolů pro dynamické sestavení
  - Sekci `debug` obsahující informace pro symbolický ladicí program
  - Detaily viz např. `http://www.freebsd.org/cgi/man.cgi?query=elf&sektion=5`

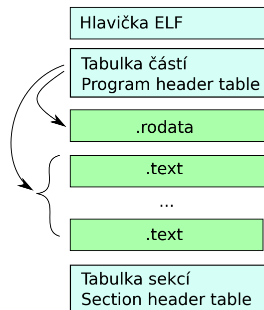
# Formáty binárního objektového modulu

- Různé operační systémy používají různé formáty jak objektových modulů tak i spustitelných souborů
- Existuje mnoho různých obecně užívaných konvencí
  - .com, .exe, a .obj
    - formát spustitelných souborů a objektových modulů v MSDOS
  - ELF – Executable and Linkable Format
    - nejpoužívanější formát spustitelných souborů, objektových modulů a dynamických knihoven v moderních implementacích POSIX systémů (Linux, Solaris, FreeBSD, NetBSD, OpenBSD, ...). Je též užíván např. i v PlayStation 2, PlayStation 3 a Symbian OS v9 mobilních telefonů.
    - Velmi obecný formát s podporou mnoha platforem a způsobů práce s virtuální pamětí, včetně volitelné podpory ladění za běhu
  - Portable Executable (PE)
    - formát spustitelných souborů, objektových modulů a dynamických knihoven (.dll) ve MS-Windows. Označení ”portable”poukazuje na univerzalitu formátu pro různé HW platformy, na nichž Windows běží.
  - COFF – Common Object File Format
    - formát spustitelných souborů, objektových modulů a dynamických knihoven v systémech na bázi UNIX V
    - Jako první zavedl sekce s explicitní podporou segmentace a virtuální paměti a obsahuje také sekce pro symbolické ladění

# Formát ELF

Formát ELF je shodný pro objektové moduly i pro spustitelné soubory

- ELF Header obsahuje celkové
  - popisné informace
  - např. identifikace cílového stroje a OS
  - typ souboru (obj vs. exec)
  - počet a velikosti sekci
  - odkaz na tabulku sekcí
  - ...
- Pro spustitelné soubory je podstatný seznam sekcí i modulů.
- Pro sestavování musí být moduly popsány svými sekcemi.
- Sekce jsou příslušných typů a obsahují „strojový kód“ či data
- Tabulka sekcí popisuje jejich typ, alokační a přístupové informace a další údaje potřebné pro práci sestavovacího či zaváděcího programu



# ELF struktura

Systém NOVA používá formát ELF, proto obsahuje definici jeho hlavičky kern/include/elf.h

```
class Eh {
  public:
    uint32  ei_magic;
    uint8   ei_class, ei_data,
            ei_version, ei_pad[9];
    uint16  type, machine;
    uint32  version;
    mword   entry, ph_offset,
            sh_offset;
    uint32  flags;
    uint16  eh_size, ph_size, ph_count,
            sh_size, sh_count, strtab;
};

enum {
    PF_X = 0x1,
    PF_W = 0x2,
    PF_R = 0x4,
};
```

```
class Ph {
  public:
    enum {
      PT_NULL      = 0,
      PT_LOAD      = 1,
      PT_DYNAMIC   = 2,
      PT_INTERP    = 3,
      PT_NOTE      = 4,
      PT_SHLIB     = 5,
      PT_PHDR      = 6,
    };
    uint32  type;
    uint32  f_offs;
    uint32  v_addr;
    uint32  p_addr;
    uint32  f_size;
    uint32  m_size;
    uint32  flags;
    uint32  align;
};
```

# ELF struktura použití – soubor ec.cc

funkce void Ec::root_invoke()

```
int f = open(argv[1], O_RDONLY), i;
unsigned char buf[2048];
if (f>=0) {
  read(f, buf, sizeof(Eh));
  Eh *eh=(Eh *)buf;
  printf("Magic %08x - %c%c%c%c\n",eh->ei_magic,eh->ei_magic&0xff,
    (eh->ei_magic>>8)&0xff,(eh->ei_magic>>16)&0xff,(eh->ei_magic>>24)&0xff);
  printf("Entry point %08lx\n", eh->entry);
  printf("Program headers Num=%i, offset=%lu size Eh %i\n", eh->ph_count,
    eh->ph_offset, sizeof(Ph));

  int num = eh->ph_count;
  int read_num = eh->ph_offset+num*32;
  read(f, buf+sizeof(Eh), read_num-sizeof(Eh));

  for (i=0; i<num; i++) {
    Ph *ph=(Ph *)&buf[eh->ph_offset+i*32];
    printf("Program header n%i: type %i f_offs %08x, v_addr %08x, f_size %04x,
      flags %0x, align %i\n",
      i, ph->type & 0xff, ph->f_offs, ph->v_addr, ph->f_size, ph->flags, ph->align);
  }
}
```

# Kvíz

Je nutné uvést deklaraci funkce z cizího modulu?

A - Není to nutné

B - Není to nutné, ale mělo by se to dělat kvůli přehlednosti kódu

C - Je to nutné, aby překladač věděl, že jsme zadali správně jméno funkce

D - Je to nutné, aby překladač správně vygeneroval kód pro volání funkce

# Sestavování a externí symboly

- V objektovém modulu jsou (aspoň z hlediska sestavování) potlačeny lokální symboly (např. lokální proměnné uvnitř funkcí – jsou nahrazeny svými adresami, symbolický tvar má smysl jen pro případné ladění - debugging)
- globální symboly slouží pro vazby mezi moduly a jsou 2 typů
  - exportované symboly – jsou v příslušném modulu plně definovány, je známo jejich jméno a je známa i sekce, v níž se symbol vyskytuje a relativní adresa symbolu vůči počátku sekce.
  - importované symboly – symboly z cizích modulů, o kterých je známo jen jejich jméno, případně typ sekce, v níž by se symbol měl nacházet (např. pro odlišení, zda symbol představuje jméno funkce či jméno proměnné)

# Sestavování a externí symboly

Příklad z materiálů k přednáškám.

Soubor a.h:

```
extern int i_a;
int f_a(short int x);
```

Soubor b.c:

```
#include "a.h"

int i_b;
int f_b(int x) {
   i_b = f_a((short)x);
   i_a = (x/2);
   return (x>>16);
}
```

Tabulka symbolů (zkráceno)

```
Symbol table '.symtab' contains 12 entries:
Num: Value   Size Type    Bind   Vis     Ndx Name
 8: 000004     4 OBJECT GLOBAL DEFAULT COM i_b
 9: 000000    52 FUNC   GLOBAL DEFAULT   1 f_b
10: 000000     0 NOTYPE GLOBAL DEFAULT UND f_a
11: 000000     0 NOTYPE GLOBAL DEFAULT UND i_a
```

Sekce modulu `b.o` (readelf -a b.o)

```
Section Headers:
[Nr] Name        Type     Addr Off  Size ES Flg Lk Inf Al
[ 0]             NULL     0000 0000 0000 00      0   0  0
[ 1] .text       PROGBITS 0000 0034 0034 00  AX  0   0  1
[ 2] .rel.text   REL      0000 01a4 0018 08   I  9   1  4
[ 3] .data       PROGBITS 0000 0068 0000 00  WA  0   0  1
[ 4] .bss        NOBITS   0000 0068 0000 00  WA  0   0  1
[ 5] .comment    PROGBITS 0000 0068 002a 01  MS  0   0  1
[ 6] .note.GNU-stack
                 PROGBITS 0000 0092 0000 00      0   0  1
[ 7] .eh_frame   PROGBITS 0000 0094 0038 00   A  0   0  4
[ 8] .rel.eh_frame
                 REL      0000 01bc 0008 08   I  9   7  4
[ 9] .symtab     SYMTAB   0000 00cc 00c0 10     10   8  4
[10] .strtab     STRTAB   0000 018c 0015 00      0   0  1
[11] .shstrtab   STRTAB   0000 01c4 0057 00      0   0  1
```

# Sestavování a externí symboly

## Překlad funkce `f_b`

```
00000000 <f_b>:
 0: 55                push   %ebp
 1: 89 e5             mov    %esp,%ebp
 3: 83 ec 08          sub    $0x8,%esp
 6: 8b 45 08          mov    0x8(%ebp),%eax
 9: 98                cwtl
 a: 83 ec 0c          sub    $0xc,%esp
 d: 50                push   %eax
 e: e8 fc ff ff ff    call   f <f_b+0xf>
13: 83 c4 10          add    $0x10,%esp
16: a3 00 00 00 00    mov    %eax,0x0
1b: 8b 45 08          mov    0x8(%ebp),%eax
1e: 89 c2             mov    %eax,%edx
20: c1 ea 1f          shr    $0x1f,%edx
23: 01 d0             add    %edx,%eax
25: d1 f8             sar    %eax
27: a3 00 00 00 00    mov    %eax,0x0
2c: 8b 45 08          mov    0x8(%ebp),%eax
2f: c1 f8 10          sar    $0x10,%eax
32: c9                leave
33: c3                ret
```

## Modul `b.o`

## Relokační sekce `b.o` (`readelf -a b.o`)

```
Relocation section '.rel.text' at
          offset 0x1a4 contains 3 entries:
 Offset     Info    Type          Sym.Value  Sym. Name
0000000f  00000a02 R_386_PC32    00000000   f_a
00000017  00000801 R_386_32      00000004   i_b
00000028  00000b01 R_386_32      00000000   i_a
```

- Relokační tabulka musí obsahovat odkazy na symboly jejichž poloha není známá v době překladu (`f_a`, `i_a`)
- Relokační tabulka potřebuje i známý symbol `i_b`, protože ve výsledném programu může být na jiném místě

# Sestavování a externí symboly

Funkce `f_b` uvnitř výsledného programu

Před sestavením

```
00000000 <f_b>:
   0: 55                push   %ebp
   1: 89 e5             mov    %esp,%ebp
   3: 83 ec 08          sub    $0x8,%esp
   6: 8b 45 08          mov    0x8(%ebp),%eax
   9: 98                cwtl
   a: 83 ec 0c          sub    $0xc,%esp
   d: 50                push   %eax
   e: e8 fc ff ff ff    call   f <f_b+0xf>
  13: 83 c4 10          add    $0x10,%esp
  16: a3 00 00 00 00    mov    %eax,0x0
  1b: 8b 45 08          mov    0x8(%ebp),%eax
  1e: 89 c2             mov    %eax,%edx
  20: c1 ea 1f          shr    $0x1f,%edx
  23: 01 d0             add    %edx,%eax
  25: d1 f8             sar    %eax
  27: a3 00 00 00 00    mov    %eax,0x0
  2c: 8b 45 08          mov    0x8(%ebp),%eax
  2f: c1 f8 10          sar    $0x10,%eax
  32: c9                leave
  33: c3                ret
```

Po vytvoření programu

```
0000057f <f_b>:
 57f: 55                push   %ebp
 580: 89 e5             mov    %esp,%ebp
 582: 83 ec 08          sub    $0x8,%esp
 585: 8b 45 08          mov    0x8(%ebp),%eax
 588: 98                cwtl
 589: 83 ec 0c          sub    $0xc,%esp
 58c: 50                push   %eax
 58d: e8 8b ff ff ff    call   51d <f_a>
 592: 83 c4 10          add    $0x10,%esp
 595: a3 10 20 00 00    mov    %eax,0x2010
 59a: 8b 45 08          mov    0x8(%ebp),%eax
 59d: 89 c2             mov    %eax,%edx
 59f: c1 ea 1f          shr    $0x1f,%edx
 5a2: 01 d0             add    %edx,%eax
 5a4: d1 f8             sar    %eax
 5a6: a3 0c 20 00 00    mov    %eax,0x200c
 5ab: 8b 45 08          mov    0x8(%ebp),%eax
 5ae: c1 f8 10          sar    $0x10,%eax
 5b1: c9                leave
 5b2: c3                ret
```

# Kvíz

Jaký je rozdíl mezi statickou knihovnou a dynamickou knihovnou?

A - Žádný rozdíl není

B - Obě knihovny jsou součástí programu, ale dynamická může změnit místo uložení v uživatelském prostoru

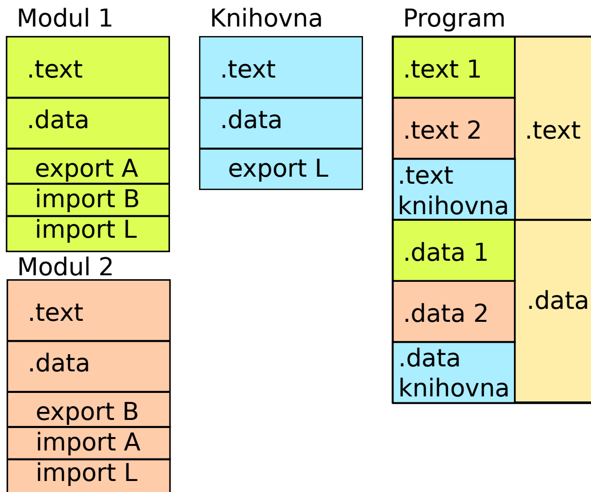
C - Statická knihovna je součástí programu, dynamická knihovna se stane součástí programu až při využití funkce z této knihovny

D - Statická knihovna je součástí programu, dynamická knihovna je součástí jádra OS

# Statické knihovny

- Knihovna je vlastně balík binárních objektových modulů
- Podle symbolů požadovaných moduly programu se hledají moduly v knihovnách, které tyto symboly exportují
- Nový modul z knihovny může vyžadovat další symboly z dalších modulů
- Pokud po projití všech modulů programu i všech modulů knihovny není symbol nalezen, je ohlášena chyba a nelze sestavit výsledný program

# Externí symboly - statická knihovna



# Dynamické knihovny

- Sestavovací program pracuje podobně jako při sestavování statickém, ale dynamické knihovny nepřidává do výsledného programu.
- Odkazy na symboly z dynamických knihoven je nutné vyřešit až při běhu programu. Existují v zásadě dva přístupy:
  - Vyřešení odkazů **při zavádění programu** do paměti – všechny nepropojené symboly extern se propojí před spuštěním programu
  - **Opožděné sestavování** – na místě nevyřešených odkazů připojí sestavovací program malé kousky kódu (zvané stub), které zavolají systém, aby odkaz vyřešil. Při běhu pak „stub“ zavolá operační systém, který zkontroluje, zda potřebná dynamická knihovna je v paměti (není-li zavede ji do paměti počítače), ve virtuální paměti knihovnu připojí tak, aby ji proces viděl. Následně stub nahradí správným odkazem do paměti a tento odkaz provede.
    - Výhodné z hlediska využití paměti, neboť se nezavádí knihovny, které nebudou potřeba.

# Dynamické knihovny PLT/GOT

V předcházejícím případě jsme použili dynamickou knihovnu glibc.
Začátek programu (zkráceno)

```
080482f0 <_start>:
 80482f0:       31 ed                   xor    %ebp,%ebp
 ...
 8048307:       68 03 84 04 08          push   $0x8048403
 804830c:       e8 cf ff ff ff          call   80482e0 <__libc_start_main@plt>
```

Funkce `__libc_start_main@plt` je zodpovědná za dynaminckou funkci start_main z knihovny libc

```
080482e0 <__libc_start_main@plt>:
 80482e0:       ff 25 10 a0 04 08       jmp    *0x804a010
 80482e6:       68 08 00 00 00          push   $0x8
 80482eb:       e9 d0 ff ff ff          jmp    80482c0 <_init+0x2c>
```

V okamžiku kompilace a spuštění je v paměti na adrese `0x804a010` hodnota `0x80482e6`

```
Disassembly of section .got.plt:
0804a000 <_GLOBAL_OFFSET_TABLE_>:
        ...
 804a010:       e6 82 04 08
```

- Po zavedení knihovna dojde k přepsání GOT položky pro tuto funkci na správnou adresu funkce v paměti
- Při dalším volání tedy již instrukce `jmp *0x804a010` skočí přímo do funkce `__libc_start_main`

# PIC a DLL

Dynamické knihovny jsou sdíleny různými procesy. Buď musí být na stejné pozici/relokovatelná (dll) nebo musí být na pozici nezávislé (PIC)

- PIC = Position Independent Code
  - Překladač generuje kód nezávislý na umístění v paměti
  - Skoky v kódu a odkazy na data jsou buď relativní vůči IP, nebo podle GOT – Global offset table
  - Pokud nelze k adresaci použít registr IP, je nutné zjistit svoji polohu v paměti:

```
        call .tmp1
.tmp1:  pop %edi
        addl $_GLOBAL_OFFSET_TABLE - .tmp1, %edi
```

  - pro x86_64 lze použít pro adresaci registr `RIP` (číslo `0x2009db` je posunutí GOT od prováděné instrukce, spočítáno překladačem)

```
mov  $0x2009db(%rip), %rax
```

  - kód je sice obvykle delší, avšak netřeba cokoliv modifikovat při sestavování či zavádění
  - užívá se zejména pro dynamické knihovny
  - v poslední době se využívá i pro programy

# DLL

- DLL – knihovna je na stejném místě pro všechny procesy
    - pokud se zavádí nová knihovna pro další process, pak musí být na volném místě
    - pokud není volné místo tam, kam je připravena, musí se relokovat – posunout všechny vnitřní pevné odkazy (skoky a data)
    - MS přiděluje místa v paměti na požádání vývojářů, aby minimalizoval možnost kolize
    - Vaše knihovna bude pravděpodobně v kolizi a bude se proto přesouvat – pomalejší provedení programu s touto knihovnou

# Zavaděč

- Zavaděč – loader – je zodpovědný za spuštění programu
- V POSIX systémech je to vlastně obsluha služby „execve“
- Úkoly zavaděče
  - vytvoření „obrazu procesu“ (memory image) v odkládacím prostoru na disku a částečně i v hlavní paměti v závislosti na strategii virtualizace, případné vyřešení nedefinovaných odkazů
  - sekce ze spustitelného souboru se stávají segmenty procesu (pokud správa paměti nepodporuje segmentaci, pak stránkami)
  - segmenty získávají příslušná „práva“ (RW, RO, EXEC, ...)
  - inicializace „registrů procesu“ v PCB
    - např. ukazatel zásobníku a čítač instrukcí
  - předání řízení na vstupní adresu procesu