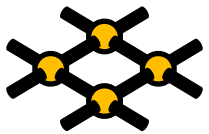
Vláknové programování část III

Lukáš Hejmánek, Petr Holub
{xhejtman,hopet}@ics.muni.cz



Laboratoř pokročilých síťových technologií

PV192
2012–04–03

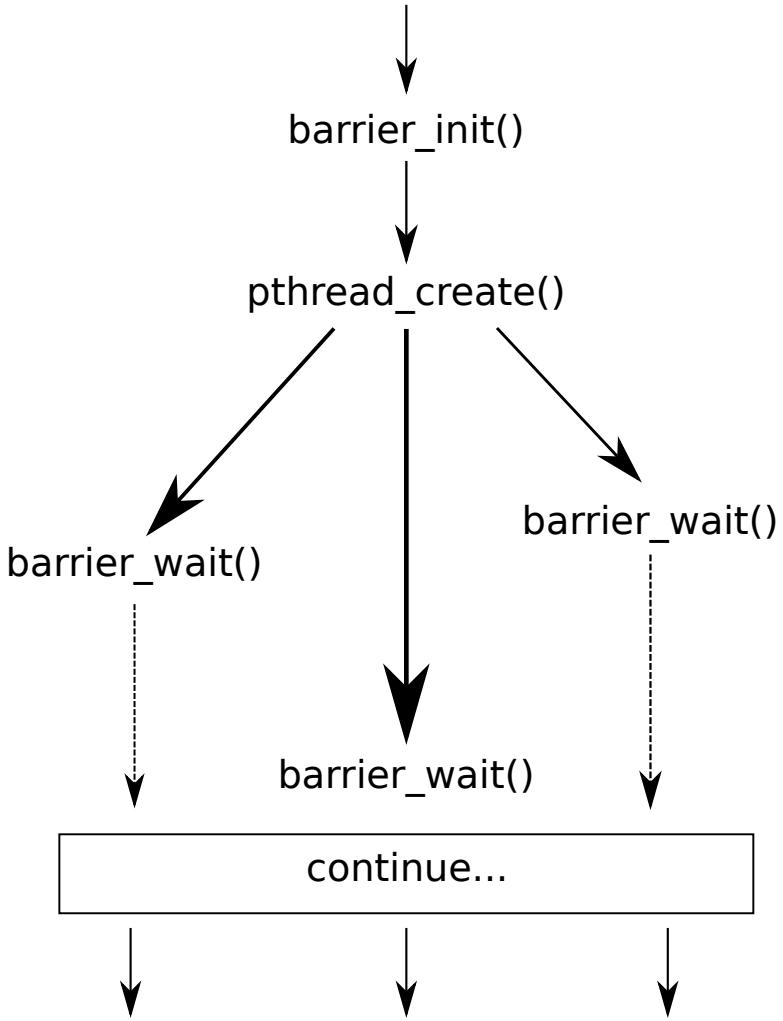
Přehled přednášky

Další nástroje pro synchronizaci

Bariéry

- Bariéry jsou v podstatě místa setkání.
- Bariéra je místo, kde se vlákna setkají.
- Bariéra zablokuje vlákno do doby než k bariéře dorazí všechna vlákna.
- Příklad:
  - Vláknové násobení matic: $M \times N \times O \times P$
  - Každé vlákno násobí a sčítá příslušný sloupec a řádek.
  - Po vynásobení $M \times N$ se vlákna setkají u *bariéry*.
  - Vynásobí předchozí výsledek $\times O$, opět se setkají u bariéry.
  - Dokončí výpočet vynásobením výsledku $\times P$.
- Ne všechny implementace POSIX threads poskytují bariéry!

Bariéry


barrier_init()
pthread_create()
barrier_wait()
barrier_wait()
barrier_wait()
continue...

Bariéry

- Datový typ **`pthread_barrier_t`**.
- Inicializace **`pthread_barrier_init()`**
  (Inicializaci je vhodné provádět ještě před vytvořením vlákna).
- Při inicializaci specifikujeme, pro kolik vláken bude bariéra sloužit.
- Zastavení na bariéře **`pthread_barrier_wait()`**.
- Zrušení bariéry **`pthread_barrier_destroy`**.

Příklad bariéry

```
1  #include <pthread.h>
2  #include <unistd.h>
3  #include <stdio.h>
4
5  pthread_barrier_t barrier;
6
7  void *
8  foo(void *arg) {
9          int slp = (int)arg;
10         printf("Working..\n");
11         sleep(slp);
12         printf("Waiting on barrier\n");
13         pthread_barrier_wait(&barrier);
14         printf("Synchronized\n");
15         return NULL;
16 }
```

Příklad bariéry

```
17 int
18 main(void)
19 {
20         pthread_t t1, t2;
21
22         pthread_barrier_init(&barrier, NULL, 2);
23         pthread_create(&t1, NULL, foo, (void*)2);
24         pthread_create(&t2, NULL, foo, (void*)4);
25
26         pthread_join(t1, NULL);
27         pthread_join(t2, NULL);
28         pthread_barrier_destroy(&barrier);
29         return 0;
30 }
```

Read Write zámky

- Read Write zámky dovolují násobné čtení ale jediný zápis.
- Příklad:
  - Několik vláken čte nějakou strukturu (velmi často!).
  - Jedno vlákno ji může měnit (velmi zřídka!).
  - Pozorování:
    - Je zbytečné strukturu zamykat mezi čtecími vlákny
      Nemohou ji měnit a netvoří tedy kritickou sekci.
    - Je nutné strukturu zamknout, mění-li ji zapisovací vlákno
      V této chvíli nesmí strukturu ani nikdo číst (není změněna atomicky).

Read Write zámky

- Nastupují Read Write zámky.
- Pravidla:
  - Není-li zámek zamčen v režimu *Write*, může být libovolněkrát zamčen v režimu *Read*.
  - Je-li zámek zamčen v režimu *Write*, nelze jej už zamknout v žádném režimu.
  - Je-li zámek zamčen v režimu *Read*, nelze jej zamknout v režimu *Write*.
- Opět ne všechny implementace POSIX threads implementují RW zámky (korektně)!

RW zámky

- Datový typ **`pthread_rwlock_t`**.
- Inicializace **`pthread_rwlock_init()`**
  (Inicializaci je vhodné provádět ještě před vytvořením vlákna).
- Zamknutí v režimu *Read* **`pthread_rwlock_rdlock()`**.
- Zamknutí v režimu *Write* **`pthread_rwlock_wrlock()`**.
- Opakované zamčení jednoho zámku stejným vláknem skončí chybou **`EDEADLK`**.
  Není možné povýšit *Read* zámek na *Write* zámek a naopak.
- Odemknutí v libovolném režimu **`pthread_rwlock_unlock()`**
  Pthreads nerozlišují odemknutí dle režimů, některé implementace vláken párují rdlock s příslušným rdunlock, stejně tak pro wrlock.
- Zrušení rw zámku **`pthread_rwlock_destroy`**.

Příklad

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <pthread.h>
3  #include <unistd.h>
4
5  struct x_t {
6          int a;
7          int b;
8          pthread_rwlock_t lock;
9  };
10
11 struct x_t x;
12
13 int quit = 0;
14
15 pthread_barrier_t start;
```

Příklad

```
16 void *
17 reader(void *arg)
18 {
19         int n = (int)arg;
20         pthread_barrier_wait(&start);
21 
22         while(!quit) {
23                 pthread_rwlock_rdlock(&x.lock);
24                 if((x.a + x.b)%n == 0)
25                         printf(".");
26                 else
27                         printf("+");
28                 pthread_rwlock_unlock(&x.lock);
29                 fflush(stdout);
30                 sleep(1);
31 
32         }
33         return NULL;
34 }
```

Příklad

```
35
36 void *
37 writer(void *arg)
38 {
39         int i;
40         pthread_barrier_wait(&start);
41         for(i=0; i < 10; i++) {
42                 pthread_rwlock_wrlock(&x.lock);
43                 x.a = i;
44                 x.b = (i % 2)+1;
45                 pthread_rwlock_unlock(&x.lock);
46                 sleep(5);
47         }
48         quit = 1;
49         return NULL;
50 }
```

Příklad

```
52
53 int
54 main(void)
55 {
56         pthread_t t1, t2, t3;
57
58         x.a = 1;
59         x.b = 2;
60         pthread_rwlock_init(&x.lock, 0);
61         pthread_barrier_init(&start, NULL, 3);
62         pthread_create(&t1, NULL, reader, (void*)2);
63         pthread_create(&t2, NULL, reader, (void*)3);
64         pthread_create(&t3, NULL, writer, NULL);
65         pthread_join(t1, NULL);
66         pthread_join(t2, NULL);
67         pthread_join(t3, NULL);
68         pthread_rwlock_destroy(&x.lock);
69         pthread_barrier_destroy(&start);
70         return 0;
71 }
```

Problémy RW zámků

- Nebezpečí stárnutí zámků.
- Pokud je zamčená část kódu vykonávána déle než nezamčená, nemusí se nikdy podařit získat některý ze zámků.
- V předchozím příkladě nesmí být **`sleep()`** v zamčené části kódu!

```
1         for(i=0; i < 10; i++) {
2                 pthread_rwlock_wrlock(&x.lock);
3                 x.a = i;
4                 x.b = (i % 2)+1;
5                 pthread_rwlock_unlock(&x.lock);
6                 sleep(5);
7         }
```

Try varianty synchronizace

- Pomocí try variant volání lze zjistit, zda vstup do kritické sekce je volný či nikoli.
- Funkce atomicky zkusí provést synchronizaci (např. zamknout zámek).
- V případě neúspěchu není funkce blokující, ale okamžitě provede návrat.
- Neúspěch je signalizován návratovým kódem funkce (dle manuálové stránky, pro jednotlivá volání se může *lišit*!).
- Try varianty:
  - **`pthread_mutex_trylock()`**
  - **`pthread_spin_trylock()`**
  - **`pthread_rwlock_tryrdlock()`**
  - **`pthread_rwlock_trywrlock()`**
  - **`sem_trywait()`**

Příklad try zámku

```
1  #include <errno.h>
2  #include <stdio.h>
3  #include <pthread.h>
4
5  pthread_mutex_t lock;
6
7  void
8  foo(void)
9  {
10         if(pthread_mutex_trylock(&lock) == EBUSY) {
11                 printf("Cannot acquire the lock right now\n");
12         } else {
13                 printf("Locked\n");
14         }
15 }
16
17 int
18 main()
19 {
20         pthread_mutex_init(&lock, NULL);
21         foo();
22         foo();
23 }
```

Timed varianty synchronizace

- Nástroje zabraňující „věčnému“ čekání.
- Příklad:
  - Jak ukončit vlákno čekající na zámek pomocí globální proměnné?
- K většině blokujících synchronizačních rozhraní existují ekvivalentní rozhraní s časovým omezením.
- Po vypršení časového omezení je vrácena chyba návratovým kódem (dle manuálové stránky, pro jednotlivá volání se může *lišit*!).
- Timed varianty:
  - **`pthread_cond_timedwait()`**
  - **`pthread_mutex_timedlock()`**
  - **`pthread_rwlock_timedrdlock()`**
  - **`pthread_rwlock_timedwrlock()`**
  - **`sem_timedwait()`**
- Ne všechny implementace poskytují *timed* varianty.

Příklad timed zámku

```
1  #include <time.h>
2  #include <errno.h>
3  #include <stdio.h>
4  #include <pthread.h>
5
6  pthread_mutex_t lock;
7
8  void
9  foo(void)
10 {
11         struct timespec tsp;
12
13         tsp.tv_sec = time(NULL)+5;
14         tsp.tv_nsec = 0;
15         if(pthread_mutex_timedlock(&lock, &tsp) == ETIMEDOUT) {
16                 printf("Timeout expired\n");
17         } else {
18                 printf("Locked\n");
19         }
20 }
21
22 int
23 main()
24 {
25         pthread_mutex_init(&lock, NULL);
26         foo();
27         foo();
28 }
```

Jednorázové zavolání funkce

- Funkce typu inicializace chceme zavolat jen jednou.
- Konstrukce s příznakem, zda inicializace ještě nebyla provedena a následná inicializace je race condition.
- Zamykaní zbytečně snižuje paralelismus.
- **`pthread_once()`** zavolá jednou danou funkci.

Příklad jednorázového zavolání

```
1  #include <pthread.h>
2  #include <stdio.h>
3
4
5  pthread_once_t once_init = PTHREAD_ONCE_INIT;
6  char initialized=0;
7
8  void
9  init(void)
10 {
11         /* do initialization */
12         printf("Initialized\n");
13         initialized = 1;
14 }
15
16 int
17 main(void)
18 {
19         if(!initialized) {
20                 pthread_once(&once_init, init);
21         }
22         return 0;
23 }
```

Afinita

Architektura systému

- Vývoj
  - Single procesor
  - SMP systémy (symetrický multiprocesing – více rovnocenných procesorů)
    - Obvykle společná paměť
    - Všechny procesory mají do paměti „stejně daleko“
  - NUMA systémy (více procesorů, nejsou rovnocenné)
    - Procesory mají lokální paměť
    - Přístup do ne-lokální paměti přes ostatní CPU
  - SMT systémy (symetrický multithreading – procesory mají více jader)

Architektura systému

- Procesory mají lokální cache
- SMT systémy mívají lokální cache pro jádro a společnou cache pro více jader

Nastavení afinity

- Vlákno může být obecně plánováno na libovolný procesor
- Nemusí být vždy vhodné
- Migrace mezi procesory bývá poměrně drahá
- Pokud jde o výkon aplikace, můžeme chtít zabránit migraci procesů/vláken
- Úskalí ve statickém přiřazení procesů/vláken na procesor
- Afinita – nastavení množiny procesorů, na kterých má proces/vlákno běžet

Nastavení afinity

- Nastavení afinity procesů
  - **`sched_setaffinity();`**
  - **`sched_getaffinity();`**
  - Nelze použít pro vlákna
- Nastavení afinity vláknům
  - **`pthread_setaffinity_np();`**
  - **`pthread_getaffinity_np();`**
- Svázání procesů/vláken a CPU je realizováno pomocí CPU SET

CPU SET

- Množina typu **cpu_set_t** do níž přidáváme/odebíráme CPU
- CPU číslujeme od 0
- **cpu_set_t *CPU_ALLOC();**
- **void CPU_ZERO_S();**
- **void CPU_SET_S();**
- **void CPU_CLR_S();**
- **int CPU_ISSET_S();**
- **void CPU_COUNT_S();**
- Logické operace mezi dvěma cpu_set_t: AND, OR, XOR, EQUAL

Příklad

```
1  #define _GNU_SOURCE
2  /* Musi byt jako prvni pred vsemi ostatnimi include */
3  #include <pthread.h>
4  #include <sched.h>
5  #define NUM_CPU 8
6
7  int
8  main()
9  {
10         cpu_set_t * set;
11
12         set = CPU_ALLOC(NUM_CPU);
13
14         CPU_ZERO_S(NUM_CPU, set);
15
16         CPU_SET(0, set);
17
18         pthread_setaffinity_np(pthread_self(), NUM_CPU, set);
19
20         CPU_FREE(set);
21
22         return 0;
23 }
```

Afinita před spuštěním aplikace

- Nastavení afinity u hotové aplikace
- **`numactl(8), taskset(1)`**
- Příklad

```
numactl -cpubind=0 aplikace
taskset 0x1 aplikace
```

  - Pustí aplikaci výhradně na CPU 0

Atributy funkcí pthread knihovny

Start vlákna

- **`pthread_create()`** funkci můžeme předávat atributy pro nově vytvářené vlákno.
- Atributy ovlivňují tři základní oblasti:
  - Osamostatnění vlákna
  - Nastavování priorit plánovače
  - Nastavení zásobníku
- Datový typ atributu **`pthread_attr_t`**.
- Inicializace **`pthread_attr_init()`**.
- Zrušení **`pthread_attr_destroy()`**.

Start vlákna – osamostatnění

- Osamostatněné vlákno uvolní všechny své zdroje jakmile skončí.
- Neosamostatněné vlákno je uvolní až při zavolání **`pthread_join()`**.
- Implicitně je každé vlákno neosamostatněné.
- **`pthread_attr_setdetachstate()`** nastaví vlákno osamostatněné (**`PTHREAD_CREATE_DETACHED`**) nebo neosamostatněné (**`PTHREAD_CREATE_JOINABLE`**).

Příklad osamostatnění

```
1  #include <pthread.h>
2
3  void *
4  foo(void * arg)
5  {
6          return NULL;
7  }
8
9  int
10 main(void)
11 {
12         pthread_t t;
13         pthread_attr_t attr;
14
15         pthread_attr_init(&attr);
16         pthread_attr_setdetachstate(&attr, PTHREAD_CREATE_DETACHED);
17
18         pthread_create(&t, &attr, foo, NULL);
19         pthread_attr_destroy(&attr);
20         return 0;
21 }
```

Start vlákna – nastavení priority plánovače

- Pro vlákna lze do jisté míry ovlivnit způsob plánování.
- Lze nastavit tři základní pravidla plánování:
  - **`SCHED_OTHER`** – vlákno je plánováno dle standardního jaderného plánovače.
  - **`SCHED_FIFO`** – vlákno je plánováno dokud samo neskončí, nezablokuje se nebo není zrušeno.
  - **`SCHED_RR`** – vlákno je plánováno dokud samo neskončí, nezablokuje se, není zrušeno nebo nevyprší přidělené časové kvantum.

Start vlákna – nastavení priority plánovače

- Pro pravidla lze dále nastavit prioritu.
- Abychom mohli prioritu plánování olivnit, je třeba nastavit explicitní plánování na **`PTHREAD_EXPLICIT_SCHED`**:
  - **`pthread_attr_setinheritsched()`**
- Nastavení priority blízké *realtime* prioritě (**`SCHED_FIFO`**, **`SCHED_RR`**) může udělat pouze proces s právy administrátora.
- Realtime procesy mají přednost před ostatními.

Příklad nastavení priorit plánovače

```
1  #include <pthread.h>
2  #include <stdio.h>
3  #include <unistd.h>
4  #include <string.h>
5
6  volatile int quit = 0;
7
8  void *
9  foo(void *arg)
10 {
11         long i=0;
12
13         while(!quit) {
14                 i++;
15                 if((i % 10000) == 0)
16                         usleep(10);
17         }
18         return (void*)i;
19 }
```

Příklad nastavení priorit plánovače

```
19 int
20 main(void)
21 {
22         pthread_t t[3];
23         pthread_attr_t attr;
24         struct sched_param param;
25         long res;
26         int i, prio=10;
27
28         memset(&param, 0, sizeof(param));
29
30         pthread_attr_init(&attr);
31
32         pthread_attr_setinheritsched(&attr, PTHREAD_EXPLICIT_SCHED);
33         pthread_attr_setschedpolicy(&attr, SCHED_FIFO);
34
35         for(i=0; i < 3; i++) {
36                 param.sched_priority = prio;
37                 pthread_attr_setschedparam(&attr, &param);
38                 pthread_create(&t[i], &attr, foo, NULL);
39                 prio+=10;
40         }
```

Příklad nastavení priorit plánovače

```
46
47          sleep(4);
48          quit = 1;
49          prio=10;
50          for(i=0; i < 3; i++) {
51                  pthread_join(t[i], (void*)&res);
52                  printf("Thread with prio %d %ld iterations\n", prio, res);
53                  prio+=10;
54          }
55          return 0;
56  }
```

Výstup příkladu

- Thread with prio 10 39930000 iterations
- Thread with prio 20 65870000 iterations
- Thread with prio 30 103812132 iterations
- Poznámka:
  - Vynechání volání **`usleep()`** má za následek takřka zablokování systému.
  - Z tohoto důvodu je povoleno nastavit realtime priority pouze administrátorským procesům.
  - Při jejich programování je nutno brát ohled na preempci ostatních procesů.

Nastavení zásobníku

- Implicitní velikost zásobníku pro vlákno je v Linuxu 8 MB.
- Chceme-li vytvořit 1000 vláken, potřebovali bychom 8 GB paměti jen pro zásobníky vláken.
- Pthread knihovna umožňuje změnit velikost zásobníku pro vlákno.
- **`pthread_attr_setstacksize()`**.
- Je nutné nastavit velikost zásobníku tak, aby se na něj vešly lokání proměnné všech funkcí, které se po sobě mohou zavolat. V opačném případě obdržíme signál **`SIGSEGV`** při vstupu do funkce, jejíž proměnné se na zásobník už nevlezou. Chyba vypadá na první pohled dost záhadně!

Příklad nastavení zásobníku

```
1  #include <pthread.h>
2  #include <stdio.h>
3
4  void*
5  foo(void* arg)
6  {
7          return NULL;
8  }
9
10 int
11 main(void)
12 {
13         pthread_attr_t attr;
14         pthread_t t;
15
16         pthread_attr_init(&attr);
17
18         pthread_attr_setstacksize(&attr, 65536);
19
20         pthread_create(&t, &attr, foo, NULL);
21
22         pthread_join(t, NULL);
23         pthread_attr_destroy(&attr);
24
25         return 0;
26 }
```

Atributy mutexů – inverze priorit

- Mějme 2 vlákna s různou prioritou, A nechť má vysokou prioritu, B nechť má nízkou prioritu.
- Nechť B zamkne sdílený objekt. Pak A při přístupu ke sdílenému objektu je zdržováno nízkou prioritou vlákna B i přes vlastní vysokou prioritu.

Atributy mutexů

- Prioritní protokoly zámků.
- Lze specifikovat:
  - Žádný protokol (implicitní chování) **`PTHREAD_PRIO_NONE`**.
  - Protokol dědění priorit **`PTHREAD_PRIO_INHERIT`**.
    - Vlákno po zamčení objektu získá (zdědí) prioritu od vlákna s nejvyšší prioritou.
  - Protokol omezení priorit **`PTHREAD_PRIO_PROTECT`**.
    - Vlákno po zamčení objektu získá definovanou prioritu (nastavenou pomocí **`pthread_mutex_setprioceiling`**), je-li tato vyšší než jeho aktuální.
  - Změna pomocí volání **`pthread_mutexattr_setprotocol()`**.
  - Po odemčení objektu vlákno získá svou původní prioritu.
- Mechanismus protokolů a priorit je silně implementačně závislý, není všude podporován!

Atributy mutexů

- Datový typ **`pthread_mutexattr_t`**.
- Inicializace **`pthread_mutexattr_init()`**.
- Zrušení atributu **`pthread_mutexattr_destroy()`**.

Příklad prioritních mutexů

- Nutno kompilovat: **`gcc -g -o priomutex priomutex.c -pthread -D__REENTRANT -D_XOPEN_SOURCE=500`**

```
1  #include <pthread.h>
2
3  int
4  main()
5  {
6          pthread_mutex_t lock;
7          pthread_mutexattr_t attr;
8
9          pthread_mutexattr_init(&attr);
10         pthread_mutexattr_setprotocol(&attr, PTHREAD_PRIO_PROTECT);
11         pthread_mutexattr_setprioceiling(&attr, 10);
12
13         pthread_mutex_init(&lock, &attr);
14
15         pthread_mutex_destroy(&lock);
16         pthread_mutexattr_destroy(&attr);
17         return 0;
18 }
```

Atributy mutexů

- Definování chování zámků v případě násobného zamčení/odemčení stejným vláknem.
- Ve většině případů je pokus zamknout mutex vláknem, které již tento zámek drží, chybou končící deadlockem.
- Pthreads umožní nastavit chování v takových případech.

Atributy mutexů

- **`PTHREAD_MUTEX_NORMAL`** vlákno se při násobném zamčení zámku deadlockne. Výsledek odemčení nezamčeného zámku není definován.
- **`PTHREAD_MUTEX_ERRORCHECK`** vláknu je vrácena chyba při pokusu o násobné zamčení zámku. *Je nutno kontrolovat návratový kód funkce zamčení zámku!* Pokus o odemčení nezamčeného zámku je signalizován chybovým návratovým kódem.
- **`PTHREAD_MUTEX_RECURSIVE`** vlákno smí provést násobné zamčení zámku. Výsledek je stejný jako by byl zámek zamčen jen jednou. Při pokusu o odemčení nezamčeného zámku je vrácena chyba.
- **`PTHREAD_MUTEX_DEFAULT`** násobné zamčení i odemčení nemají definované chování. Tato volba je implicitní.

Příklad násobných zámků

- Nutno kompilovat: **`gcc -g -o multilock multilock.c -pthread -D__REENTRANT -D_XOPEN_SOURCE=500`**

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <pthread.h>
3
4  int
5  main()
6  {
7          pthread_mutexattr_t attr;
8          pthread_mutex_t lock;
9
10         pthread_mutexattr_init(&attr);
11         pthread_mutexattr_settype(&attr, PTHREAD_MUTEX_RECURSIVE);
12
13         pthread_mutex_init(&lock, &attr);
14
15         printf("Return␣code␣of␣the␣first␣lock␣%d\n",
16                         pthread_mutex_lock(&lock));
17         printf("Return␣code␣of␣the␣second␣lock␣%d\n",
18                         pthread_mutex_lock(&lock));
19
20         pthread_mutex_unlock(&lock);
21         pthread_mutex_destroy(&lock);
```

Příklad násobných zámků

```
21
22          pthread_mutexattr_settype(&attr, PTHREAD_MUTEX_ERRORCHECK);
23
24          pthread_mutex_init(&lock, &attr);
25
26          printf("Return code of the first lock %d\n",
27                          pthread_mutex_lock(&lock));
28          printf("Return code of the second lock %d\n",
29                          pthread_mutex_lock(&lock));
30
31          pthread_mutex_unlock(&lock);
32          pthread_mutex_destroy(&lock);
33
34          pthread_mutexattr_destroy(&attr);
35          return 0;
36  }
```

Výstup programu

- Rekurzivní zámek:

```
Return code of the first lock 0
Return code of the second lock 0
```

- Errorcheck:

```
Return code of the first lock 0
Return code of the second lock 35
```

Atributy podmínek

- Atribut podmínek umožňuje specifikovat typ času pro volání **`pthread_cond_timedwait()`**.
- Implicitně se timeout podmínky řídí dle hodin reálného času.
- Hodiny reálného času mohou skákat dopředu ale i dozadu, což může způsobit problémy.
- Proto lze pro podmínky specifikovat časový zdroj **`CLOCK_MONOTONIC`**, který se vždy pouze zvyšuje.

Atributy podmínek

- Datový typ **`pthread_condattr_t`**.
- Inicializace **`pthread_condattr_init()`**.
- Nastavení/zjištění zdroje času **`pthread_condattr_setclock()`**, **`pthread_condattr_getclock()`**.
- Zrušení atributu **`pthread_condattr_destroy()`**.

Příklad atributů podmínek

```
1  #include <time.h>
2  #include <pthread.h>
3
4  int
5  main()
6  {
7          pthread_condattr_t attr;
8          pthread_cond_t cond;
9
10         pthread_condattr_init(&attr);
11
12         pthread_condattr_setclock(&attr, CLOCK_MONOTONIC);
13
14         pthread_cond_init(&cond, &attr);
15
16         pthread_cond_destroy(&cond);
17         pthread_condattr_destroy(&attr);
18         return 0;
19 }
```