

Abstraktní datový typ

Jan Faigl

Katedra počítačů
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 09

BAB36PRGA – Programování v C

Přehled témat

- Část 1 – Abstraktní datový typ
- Datové struktury
- Zásobník
- Fronta
- Spojový seznam - zásobník vs. fronta
- Prioritní fronta
- Halda

Část I

Část 1 – Abstraktní datový typ

Zdroje

Introduction to Algorithms, 3rd Edition, Cormen, Leiserson, Rivest, and Stein, The MIT Press, 2009, ISBN 978-0262033848.



Algorithms (4th Edition) Robert Sedgwick and Kevin Wayne Addison-Wesley Professional, 2010, ISBN: 978-0321573513.



<http://algs4.cs.princeton.edu/home>

Data Structure & Algorithms Tutorial http://www.tutorialspoint.com/data_structures_algorithms

Algorithms and Data Structures with implementations in Java and C++ <http://www.algolist.net>

Algoritmy jednoduše a srozumitelně Algoritmy + Datové struktury = Programy <http://algoritmy.eu>

Datové struktury a abstraktní datový typ

- **Datová struktura** (typ) je množina dat a operací s těmito daty.
- **Abstraktní datový typ** formálně definuje data a operace s nimi.
 - Fronta (Queue)
 - Zásobník (Stack)
 - Pole (Array)
 - Tabulka (Table)
 - Seznam (List)
 - Strom (Tree)
 - Množina (Set)

Nezávislé na konkrétní implementaci

Abstraktní datový typ

- Množina druhů dat (hodnot) a příslušných operací, které jsou přesně specifikovány a to **nezávisle na konkrétní implementaci**.
- Můžeme definovat
 - Matematicky – signatura a axiomy
 - Rozhraním (interface) a popisem operací, kde rozhraní poskytuje
 - Konstruktor vracející odkaz (na strukturu nebo objekt).
- Operace, které akceptují odkaz na argument (data) a mají přesně definovaný účinek na data.

Procedurální i objektově orientovaný přístup.

Abstraktní datový typ (ADT) – Vlastnosti

- Počet datových položek může být
 - Neměnný – **statický datový typ** – počet položek je konstantní.
 - Proměnný – **dynamický datový typ** – počet položek se mění v závislosti na provedené operaci.
- Typ položek (dat)
 - **Homogenní** – všechny položky jsou stejného typu.
 - **Nehomogenní** – položky mohou být různého typu.
- Existence bezprostředního následníka.
 - **Lineární** – existuje bezprostřední následník prvku, např. pole, fronta, seznam, ...
 - **Nelineární** – neexistuje přímý jednoznačný následník, např. strom.

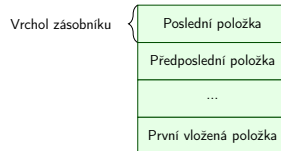
Např. vložení nebo odebrání určitého prvku

Příklad ADT – Zásobník

Zásobník je **dynamická datová struktura** umožňující vkládání a odebírání hodnot tak, že naposledy vložená hodnota se odebere jako první.

LIFO – Last In, First Out

- Základní operace:
 - Vložení hodnoty na vrchol zásobníku;
 - Odebrání hodnoty z vrcholu zásobníku;
 - Test na prázdnotu zásobníku.



Příklad ADT – Operace nad zásobníkem

Základní operace nad zásobníkem jsou

- **push()** – vložení prvku na vrchol zásobníku;
- **pop()** – vyjmutí prvku z vrcholu zásobníku;
- **isEmpty()** – test na prázdnotu zásobníku.

Další operace nad zásobníkem mohou být

- **peek()** – čtení hodnoty z vrcholu zásobníku;
- **search()** – vrátí pozici prvku v zásobníku;
- **size()** – vrátí aktuální počet prvků (hodnot) v zásobníku.

Alternativně také třeba top().

Pokud se nachází v zásobníku, jinak -1.

Zpravidla není potřeba.

Příklad ADT – Rozhraní zásobníku 1/2

- Zásobník můžeme definovat rozhraním (funkcemi), bez konkrétní implementace.


```

1 int stack_push(void *value, void **stack);
2 void* stack_pop(void **stack);
3 _Bool stack_is_empty(void **stack);
4 void* stack_peek(void **stack);

5 void stack_init(void **stack); // init. dat. reprezent.
6 void stack_delete(void **stack); // kompletní smazání
7 void stack_free(void **stack); // uvolnění paměti

```
- V tomto případě používáme obecný zápis s ukazatelem typu `void`.
- Je plně v režii programátora (uživatele) implementace, aby zajistil správné chování programu.
 - Alokaci proměnných a položek vkládaných do zásobníku.
 - A také následné uvolnění paměti.
- Do zásobníku můžeme dávat rozdílné typy, musíme však zajistit jejich správnou interpretaci.

Příklad ADT – Rozhraní zásobníku 2/2

- Součástí definice rozhraní ADT je také popis chování operací.


```

1 /*
2 * Function: stack_push
3 * -----
4 * This routine push the given value onto the top of the stack.
5 *
6 * value - value to be placed on the stack
7 * stack - stack to push
8 *
9 * returns: The function returns status value:
10 *
11 * OK - success
12 * CLIB_MEMFAIL - dynamic memory allocation failure
13 *
14 * This function requires the following include files:
15 *
16 * prg_stack.h prg_errors.h
17 */
18 int stack_push(void *value, void **stack);

```

Implementace zásobníku

- ADT není závislý naa konkrétní implementaci – zásobník můžeme implementovat různě.
 - Polem fixní velikosti (definujeme chování při zaplnění);
 - Polem s měnitelnou velikostí (realokace);
 - Spojovým seznamem.
- Ukážeme si tři různé implementace, každá se shodným rozhraním a jménem typu `stack_t`, ale definované v samostatných modulech.
 - `lec09/stack_array.h, lec09/stack_array.c`
 - `lec09/stack_array_alloc.h, lec09/stack_array_alloc.c`
 - `lec09/stack_linked_list.h, lec09/stack_linked_list.c`
- Ukázkové implementace také slouží jako příklady, jak zacházet s dynamickou pamětí a jak se vyhnout tzv. únikům paměti (**memory leaks**).

Implementace zásobníku polem 1/3

- Struktura zásobníku se skládá z dynamicky alokovaného pole hodnot ukazatelů odkazujících na jednotlivé prvky uložené do zásobníku.


```

1 typedef struct {
2     void **stack; // array of void pointers
3     int count;
4 } stack_t;

```
- Pro inicializaci a uvolnění paměti implementujeme pomocné funkce.


```

6 void stack_init(stack_t **stack);
7 void stack_delete(stack_t **stack);
8 void stack_free(stack_t *stack);

```
- Základní operace se zásobníkem mají tvar


```

10 int stack_push(void *value, stack_t *stack);
11 void* stack_pop(stack_t *stack);
12 _Bool stack_is_empty(const stack_t *stack);
13 void* stack_peek(const stack_t *stack);

```
- a jsou pro všechny tři implementace totožné. `lec09/stack_array.h`

Implementace zásobníku polem 2/3

- Maximální velikost zásobníku je definována hodnotou makra `MAX_STACK_SIZE`.


```

1 #ifndef MAX_STACK_SIZE
2 #define MAX_STACK_SIZE 5
3 #endif
4 void stack_init(stack_t **stack)
5 {
6     *stack = myMalloc(sizeof(stack_t));
7     (*stack)->stack = myMalloc(sizeof(
8         void*)*MAX_STACK_SIZE);
9     (*stack)->count = 0;
10 }

```

Lze předdefinovat při překladu, např. `clang -DMAX_STACK_SIZE=100.`

```

1 #include <stdlib.h>
2 void* myMalloc(size_t size)
3 {
4     void *ret = malloc(size);
5     if (!ret) {
6         fprintf(stderr, "Malloc failed!\n");
7         exit(-1);
8     }
9     return ret;
10 }

```

`lec09/my_malloc.c`
- `stack_free()` uvolní paměť vložených položek v zásobníku.
- `stack_delete()` kompletně uvolní paměť alokovanou zásobníkem.


```

12 void stack_free(stack_t *stack)
13 {
14     while (!stack_is_empty(stack)) {
15         void *value = stack_pop(stack);
16         free(value);
17     }
18 }

```

`lec09/stack_array.c`

Implementace zásobníku polem 3/3

```

28 int stack_push(void *value, stack_t *stack)
29 {
30     int ret = STACK_OK;
31     if (stack->count < MAX_STACK_SIZE) {
32         stack->stack[stack->count++] = value;
33     } else {
34         ret = STACK_MEMFAIL;
35     }
36     return ret;
37 }
38 void* stack_pop(stack_t *stack)
39 {
40     return stack->count > 0 ? stack->stack[--(stack->count)]: NULL;
41 }
42 void* stack_peek(const stack_t *stack)
43 {
44     return stack_is_empty(stack) ? NULL : stack->stack[stack->count - 1];
45 }
46 _Bool stack_is_empty(const stack_t *stack)
47 {
48     return stack->count == 0;
49 }

```

Proč v metodě pop() používáme `--(stack->count)` a v peek() `count-1`?

Zásobník – Příklad použití 1/3

- Položky (hodnoty typu `int`) alokujeme dynamicky.


```

1 int* getRandomInt()
2 {
3     int *r = myMalloc(sizeof(int)); // dynamicky alokovaný int
4     *r = rand() % 256;
5     return r;
6 }
7 stack_t *stack;
8 stack_init(stack);
9 for (int i = 0; i < 15; ++i) {
10     int spv = getRandomInt();
11     int r = stack_push(spv, stack);
12     printf("Add %2i entry '%3i' to the stack r = %i\n", i, *pv, r);
13     if (r != STACK_OK) {
14         fprintf(stderr, "Error: Stack is full!\n");
15         fprintf(stderr, "Info: Release pv memory and quit pushing\n");
16         free(pv); // Nutné uvolnit alokovanou paměť
17         break;
18     }
19 }

```

`lec09/demo-stack_array.c`
- V případě zaplnění zásobníku **nezapomenout uvolnit paměť**.

Zásobník – Příklad použití 2/3

- Po vyjmutí položky a jejím zpracování je nutné uvolnit paměť.


```

22 printf("\nPop the entries from the stack\n");
23 while (!stack_is_empty(stack)) {
24     int spv = (int*)stack_pop(stack);
25     printf("Popped value is %3i\n", *pv);
26     free(pv);
27 }
28 stack_delete(stack);

```

`lec09/demo-stack_array.c`
- Na závěr uvolníme paměť zásobníku funkcí `stack_delete()`.
- Při výchozí kompilaci má zásobník dle `MAX_STACK_SIZE` kapacitu 3.


```

$ clang stack_array.c demo-stack_array.c && ./a.out
Add 0 entry ' 77' to the stack r = 0
Add 1 entry '225' to the stack r = 0
Add 2 entry '178' to the stack r = 0
Add 3 entry ' 83' to the stack r = 1
Error: Stack is full!
Info: Release pv memory and quit pushing
Pop the entries from the stack
Popped value is 178
Popped value is 225
Popped value is 77

```

Zásobník – Příklad použití 3/3

- Při kompilaci můžeme specifikovat hodnotu makra `MAX_STACK_SIZE`.


```

$ clang -DMAX_STACK_SIZE=5 stack_array.c demo-stack_array.c && ./a.out
Add 0 entry ' 77' to the stack r = 0
Add 1 entry '225' to the stack r = 0
Add 2 entry '178' to the stack r = 0
Add 3 entry ' 83' to the stack r = 0
Add 4 entry ' 4' to the stack r = 0
Add 5 entry '143' to the stack r = 1
Error: Stack is full!
Info: Release pv memory and quit pushing
Pop the entries from the stack
Popped value is 4
Popped value is 83
Popped value is 178
Popped value is 225
Popped value is 77

```

`lec09/stack_array.h`
`lec09/stack_array.c`
`lec09/demo-stack_array.c`
- Vyzkoušejte si zakomentovat různá volání `free()` a sledovat chování programu – nástrojem **valgrind!**

Implementace zásobníku rozšiřitelným polem 1/3

- V případě naplnění pole vytvoříme nové o „něco“ větší pole, zvětšení je definované hodnotou makra `STACK_RESIZE`.
 - Počáteční velikost je definována makrem `INIT_STACK_SIZE`.
- ```
#ifndef INIT_STACK_SIZE #ifndef STACK_RESIZE
#define INIT_STACK_SIZE 3 #define STACK_RESIZE 3
#endif #endif
void stack_init(stack_t **stack)
{
 *stack = myMalloc(sizeof(stack_t));
 (*stack)->stack = myMalloc(sizeof(void*)*INIT_STACK_SIZE);
 (*stack)->count = 0;
 (*stack)->size = INIT_STACK_SIZE;
}

Dále pak funkci push(), kterou modifikujeme o realokaci pole stack->stack.


```

### Implementace zásobníku rozšiřitelným polem 2/3

```
int stack_push(void *value, stack_t *stack)
{
 int ret = STACK_OK;
 if (stack->count == stack->size) { // try to realloc
 void **tmp = (void**)realloc(
 stack->stack,
 sizeof(void*) * (stack->size + STACK_RESIZE)
);
 if (tmp) { // realloc has been successful, stack->stack has been eventually freed
 stack->stack = tmp; //
 stack->size += STACK_RESIZE;
 }
 if (stack->count < stack->size) {
 stack->stack[stack->count++] = value;
 } else {
 ret = STACK_MEMFAIL;
 }
 return ret;
 }
}

```

### Implementace zásobníku rozšiřitelným polem 3/3

```
Použití stack_array-alloc je identické jako stack_array.
Soubor demo-stack_array-alloc.c pouze vkládá stack_array-alloc.h místo stack_array.h.

$ clang stack_array-alloc.c demo-stack_array-alloc.c && ./a.out
Add 0 entry ' 77' to the stack r = 0
Add 1 entry '225' to the stack r = 0
Add 2 entry '178' to the stack r = 0
Add 3 entry ' 83' to the stack r = 0
Add 4 entry ' 4' to the stack r = 0
Pop the entries from the stack
Popped value is 4
Popped value is 83
Popped value is 178
Popped value is 225
Popped value is 77

```

### Implementace zásobníku spojovým seznamem 1/3

- Zásobník také můžeme implementovat spojovým seznamem. *Viz 8. přednáška.*
  - Definujeme strukturu `stack_entry_t` pro položku seznamu.
- ```
typedef struct entry {
    void *value; //ukazatel na hodnotu vloženého prvku
    struct entry *next;
} stack_entry_t;

Struktura zásobníku stack_t obsahuje pouze ukazatel na head.
```
- ```
typedef struct {
 stack_entry_t *head;
} stack_t;

Inicializace pouze alokuje strukturu stack_t.
```
- ```
void stack_init(stack_t **stack)
{
    *stack = myMalloc(sizeof(stack_t));
    (*stack)->head = NULL;
}

```

Implementace zásobníku spojovým seznamem 2/3

```
Při vkládání prvku push() alokujeme položku spojového seznamu.
```

```
int stack_push(void *value, stack_t *stack)
{
    int ret = STACK_OK;
    stack_entry_t *new_entry = malloc(sizeof(stack_entry_t));
    if (new_entry) {
        new_entry->value = value;
        new_entry->next = stack->head;
        stack->head = new_entry;
    } else {
        ret = STACK_MEMFAIL;
    }
    return ret;
}

Při vyjmutí prvku funkcí pop() paměť uvolňujeme.
```

```
void* stack_pop(stack_t *stack)
{
    void *ret = NULL;
    if (stack->head) {
        ret = stack->head->value; //retrieve the value
        stack_entry_t *tmp = stack->head;
        stack->head = stack->head->next;
        free(tmp); // release stack_entry_t
    }
    return ret;
}

```

Implementace zásobníku spojovým seznamem 3/3

```
Implementace stack_is_empty() a stack_peek() je triviální.
```

```
_Bool stack_is_empty(const stack_t *stack)
{
    return stack->head == 0;
}

void* stack_peek(const stack_t *stack)
{
    return stack_is_empty(stack) ? NULL : stack->head->value;
}

Použití je identické jako v obou předchozích případech.
Výhoda spojového seznamu proti implementaci stack_array je v „neomezené“ kapacitě zásobníku.
Výhoda spojového seznamu proti stack_array-alloc je v automatickém uvolnění paměti při odebrání prvků ze zásobníku.
Nevýhodou spojového seznamu je větší paměťová režie (položka next).
```

Příklad ADT – Fronta

- Fronta** je dynamická datová struktura, kde se odebírají prvky v tom pořadí, v jakém byly vloženy.
 - Jedná se o strukturu typu **FIFO** (First In, First Out).
-
- ```
Vložení hodnoty na konec fronty -> [] [] [] [] [] -> Odebrání hodnoty z čela fronty
```
- Implementace
    - Pole – *Pamatujeme si pozici začátku a konce fronty v poli.*
      - Pozice cyklicky rotují (modulo velikost pole). *Kruhová fronta.*
    - Spojovým seznamem — *Pamatujeme si ukazatel na začátek a konec fronty.*
      - Můžeme implementovat tak, že přidáváme na začátek (`head`) a odebíráme z konce. `push()` a `popEnd()` z 8. přednášky
      - Nebo přidáváme na konec a odebíráme ze začátku (`head`). `pushEnd()` a `pop()` z 8. přednášky.
      - Z hlediska vnějšího (ADT) chování fronty na vnitřní implementaci nezáleží.

### ADT – Operace nad frontou

- Základní operace nad frontou jsou vlastně identické jako pro zásobník:
  - `push()` – vložení prvku na konec fronty;
  - `pop()` – vyjmutí prvku z čela fronty;
  - `isEmpty()` – test na prázdnotu fronty.
- Další operace mohou být
  - `peek()` – čtení hodnoty z čela fronty;
  - `size()` – vrátí aktuální počet prvků ve frontě.
- Hlavní rozdíl je v operacích `pop()` a `peek()`, které vracejí nejdříve vložený prvek do fronty. *Na rozdíl od zásobníku, u kterého je to poslední vložený prvek.*

### ADT – Příklad implementace fronty

```
Implementace fronty pole a spojovým seznamem.
Využijeme shodné rozhraní a jméno typu queue_t definované v samostatných modulech.
```

```
lec09/queue_array.h, lec09/queue_array.c
lec09/queue_linked_list.h, lec09/queue_linked_list.c

Implementace vychází ze zásobníku, liší se zejména ve funkci pop() a peek() spolu s udržováním prvního a posledního prvku.
```

```
typedef struct {
 ...
} queue_t;

void queue_delete(queue_t **queue);
void queue_free(queue_t *queue);
void queue_init(queue_t **queue);
int queue_push(void *value, queue_t *queue);
void* queue_pop(queue_t *queue);
_Bool queue_is_empty(const queue_t *queue);
void* queue_peek(const queue_t *queue);

```

Datové struktury Zásobník Fronta Spojový seznam - zásobník vs. fronta Prioritní fronta Halda

### Příklad implementace fronty polem 1/2

- Téměř identická implementace s implementací `stack_array`.
- Zásadní změna ve funkci `queue_push()`.

```
int queue_push(void *value, queue_t *queue)
{
 int ret = QUEUE_OK;
 if (queue->count < MAX_QUEUE_SIZE) {
 queue->queue[queue->end] = value;
 queue->end = (queue->end + 1) % MAX_QUEUE_SIZE;
 queue->count += 1;
 } else {
 ret = QUEUE_MEMFAIL;
 }
 return ret;
}
```

Ukládáme na konec (proměnná `end`), která odkazuje na další volné místo (pokud `count < MAX_QUEUE_SIZE`). `end` vždy v rozsahu  $0 \leq \text{end} < \text{MAX\_QUEUE\_SIZE}$ .

- Dále implementujeme `queue_pop()` a `queue_peek()`.

lec09/queue\_array.c

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 31 / 56

Datové struktury Zásobník Fronta Spojový seznam - zásobník vs. fronta Prioritní fronta Halda

### Příklad implementace fronty polem 2/2

- Funkce `queue_pop()` vrací hodnotu na pozici `start` tak jako metoda `queue_peek()`.

```
void* queue_pop(queue_t *queue)
{
 void* ret = NULL;
 if (queue->count > 0) {
 ret = queue->queue[queue->start];
 queue->start = (queue->start + 1) % MAX_QUEUE_SIZE;
 queue->count -= 1;
 }
 return ret;
}

void* queue_peek(const queue_t *queue)
{
 return queue_is_empty(queue) ? NULL : queue->queue[queue->start];
}
```

lec09/queue\_array.c

- Příklad použití viz `lec09/demo-queue_array.c`.

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 32 / 56

Datové struktury Zásobník Fronta Spojový seznam - zásobník vs. fronta Prioritní fronta Halda

### Příklad implementace fronty spojovým seznamem 1/3

- Spojový seznam s udržováním začátku `head` a konce `end` seznamu.
- Strategie vkládání a odebírání prvků. *Viz `lec08/linked_list.c`*
  - Vložení prvku do fronty `queue_push()` dříve prvek na konec seznamu `end`. *Aktualizujeme pouze `end`→`next` s konstantní složitostí  $O(1)$ .*
  - Odebrání prvku z fronty `queue_pop()` vezmeme prvek z počátku seznamu `head`. *Aktualizujeme pouze `head`→`next` opět s konstantní složitostí  $O(1)$ .*
  - Nemusíme lineárně procházet seznam a aktualizovat `end` při odebrání prvku z fronty.

```
typedef struct entry {
 void *value;
 struct entry *next;
} queue_entry_t;

typedef struct {
 queue_entry_t *head;
 queue_entry_t *end;
} queue_t;

void queue_init(queue_t **queue)
{
 *queue = myMalloc(sizeof(queue_t));
 (*queue)->head = NULL;
 (*queue)->end = NULL;
}
```

lec09/queue\_linked\_list.h  
lec09/queue\_linked\_list.c

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 33 / 56

Datové struktury Zásobník Fronta Spojový seznam - zásobník vs. fronta Prioritní fronta Halda

### Implementace fronty spojovým seznamem 2/3

- `push()` vkládá prvky na konec seznamu `end`.

```
int queue_push(void *value, queue_t *queue)
{
 int ret = QUEUE_OK;
 queue_entry_t *new_entry = malloc(sizeof(queue_entry_t));
 if (new_entry) { // fill the new entry
 new_entry->value = value;
 new_entry->next = NULL;
 if (queue->end) { // if queue has end
 queue->end->next = new_entry; // link new entry
 } else { // queue is empty
 queue->head = new_entry; // update head as well
 }
 queue->end = new_entry; // set new_entry as end
 } else {
 ret = QUEUE_MEMFAIL;
 }
 return ret;
}
```

lec09/queue\_linked\_list.c

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 34 / 56

Datové struktury Zásobník Fronta Spojový seznam - zásobník vs. fronta Prioritní fronta Halda

### Implementace fronty spojovým seznamem 3/3

- `pop()` odebírá prvky ze začátku seznamu `head`.

```
void* queue_pop(queue_t *queue)
{
 void *ret = NULL;
 if (queue->head) { // having at least one entry
 ret = queue->head->value; // retrieve the value
 queue_entry_t *tmp = queue->head;
 queue->head = queue->head->next;
 free(tmp); // release queue_entry_t
 if (queue->head == NULL) { // update end if last
 queue->end = NULL; // entry has been popped
 }
 }
 return ret;
}
```

- Implementace `isEmpty()` a `peek()` je přímočará.

```
_Bool queue_is_empty(const queue_t *queue) {
 return queue->head == 0;
}

void* queue_peek(const queue_t *queue) {
 return queue_is_empty(queue) ? NULL : queue->head->value;
}
```

lec09/queue\_linked\_list.c

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 35 / 56

Datové struktury Zásobník Fronta Spojový seznam - zásobník vs. fronta Prioritní fronta Halda

### ADT – Fronta spojovým seznamem – příklad použití

```
for (int i = 0; i < 3; ++i) {
 int *pv = getRandomInt();
 int r = queue_push(pv, queue);
 printf("Add %2i entry '%3i' to the queue r = %i\n", i, *pv, r);
 if (r != QUEUE_OK) { free(pv); break; } // release allocated pv
}

printf("\nPop the entries from the queue\n");
while (!queue_is_empty(queue)) {
 int *pv = (int*)queue_pop(queue);
 printf("Popped value is %3i\n", *pv);
 free(pv);
}

queue_delete(&queue);
```

- Příklad výstupu

```
clang queue_linked_list.c demo-queue_linked_list.c && ./a.out
Add 0 entry ' 77' to the queue r = 0
Add 1 entry '225' to the queue r = 0
Add 2 entry '178' to the queue r = 0
Pop the entries from the queue
```

lec09/queue\_linked\_list.h

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 36 / 56

Datové struktury Zásobník Fronta Spojový seznam - zásobník vs. fronta Prioritní fronta Halda

### ADT – zásobník a fronta

- Obě datové struktury mají stejné rozhraní, např. `push()`, `pop()`, `isEmpty()`.
- Zásobník vs. fronta se liší chováním, tj. jaký prvek vrací při vyjmutí.
- Obě struktury můžeme implementovat polem nebo spojovým seznamem.
- Implementace polem (definované kapacity)
  - Zásobník inkrementujeme/dekrementujeme pouze index na volný prvek v poli.
  - Frontu implementujeme kruhovou frontou v poli, indexy na první a poslední prvek pouze inkrementujeme modulu kapacita pole.
- Postací jednosměrný spojový seznam, implementace se liší kam přidáváme nové prvky.
  - Přidávání je snadné před první prvek (`head`) nebo za poslední prvek.
  - Odebrání je snadné pro první prvek (`head`).

Zásobník

Fronta

- `push()` i `pop()` realizujeme přes `head`.
- `push()` realizujeme přes `tail` a `pop()` přes `head`.

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 38 / 56

Datové struktury Zásobník Fronta Spojový seznam - zásobník vs. fronta Prioritní fronta Halda

### Prioritní fronta

- Fronta
  - První vložený prvek je první odebraný prvek.
- Prioritní fronta
  - Některé prvky jsou při vyjmutí z fronty preferovány. *Některé vložené objekty je potřeba obsloužit naléhavěji, např. fronta pacientů u lékaře.*
  - Operace `pop()` odebírá z fronty prvek s nejvyšší prioritou. *Vrchol fronty je prvek s nejvyšší prioritou. Alternativně též prvek s nejnižší hodnotou.*
- Rozhraní prioritní fronty může být identické jako u běžné fronty, avšak specifikace upřesňuje chování dílčích metod.

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 40 / 56

Datové struktury Zásobník Fronta Spojový seznam - zásobník vs. fronta Prioritní fronta Halda

### Prioritní fronta – specifikace rozhraní

- Prioritní frontu můžeme implementovat různě složitě a také s různými výpočetními nároky, např.
  - Polem nebo spojovým seznamem s modifikací funkcí `push()` nebo `pop()` a `peek()`.
    - Například tak, že ve funkci `pop()` a `peek()` projdeme všechny dosud vložené prvky a najdeme prvek nejprioritnější.
    - S využitím pokročilých datové struktury pro efektivní vyhledání prioritního prvku (halda).
- Prioritní prvek může být ten s nejmenší hodnotou.
  - Metody `pop()` a `peek()` vrací nejmenší prvek dosud vložený do fronty.
  - Hodnoty prvků potřebujeme porovnávat, proto potřebujeme funkci pro porovnávání prvků. *Obecně můžeme realizovat například ukazatelem na funkci.*

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 41 / 56

### Prioritní fronta spojovým seznamem nebo polem a výpočetní náročnost

- V naivní implementaci prioritní fronty můžeme zohlednění priority „odložit“ až do doby, kdy potřebujeme odebrat prvek z fronty. *Použijeme „lazy“ (odložený) výpočet.*
- Při odebrání (nebo vrácení) nejmenšího prvku v nejnepříznivějším případě musíme projít všechny položky.
- To může být **výpočetně náročné** a raději bychom chtěli „udržovat“ prvek připravený.
  - Můžeme to například udělat zavedením položky **head**, ve které bude aktuálně nejnižší (nejvyšší) vložený prvek do fronty.
  - Prvek **head** aktualizujeme v metodě **push()** porovnáním hodnoty aktuálně vkládaného prvku.
  - Tím zefektivníme operaci **peek()**.
- V případě odebrání prvku, však musíme frontu znovu projít a najít nový prvek. *Nebo můžeme použít sofistikovanější datovou strukturu, která nám umožní efektivně udržovat hodnotu nejmenšího prvku a to jak při operaci vložení **push()** tak při operaci vyjmutí **pop()** prvku z prioritní fronty.*

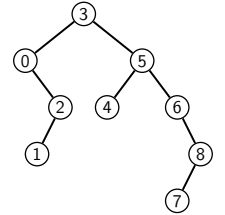
### Halda

- Halda je dynamická datová struktura, která má „tvar“ binárního stromu a uspořádání prioritní fronty.
- Každý prvek haldy obsahuje hodnotu a dva potomky, podobně jako binární strom.
- Vlastnosti haldy – „Heap property“.**
  - Hodnota každého prvku je menší než hodnota libovolného potomka.
  - Každá úroveň binárního stromu haldy je plná, kromě poslední úrovně, která je zaplněna zleva doprava. **Binární plný strom**
  - Prvky mohou být odebrány pouze přes kořenový uzel.
- Vlastnost haldy zajišťuje, že **kořen je vždy prvek s nejnižším/nejvyšším ohodnocením.**
  - V případě binárního plného stromu je složitost procházení úměrná hloubce stromu, která je pro  $n$  prvků úměrná  $\log_2(n)$ . Složitost operací **push()**, **pop()**, **peek()** tak můžeme očekávat nikoliv  $O(n)$  (jako v případě předchozí implementace prioritní fronty polem a spojovým seznamem), ale  $O(\log n)$  a pro **peek()** dokonce  $O(1)$ .

### Binární vyhledávací strom vs halda

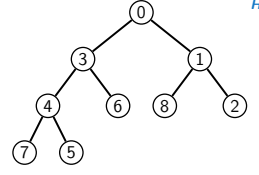
#### Binární vyhledávací strom

- Může obsahovat prázdná místa.
- Hloubka stromu se může měnit. *Zajistit vyvážený strom je implementačně náročnější než implementace haldy.*



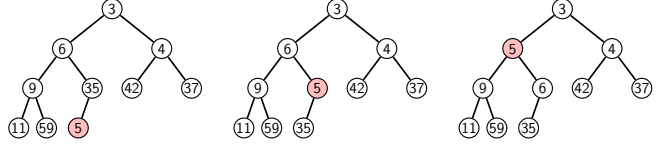
#### Halda

- Binární plný strom *Hloubka stromu vždy  $\lfloor \log_2(n) \rfloor$ .*
- Kořen stromu je vždy prvek s nejnižší (nejvyšší) hodnotou.
- Každý podstrom splňuje vlastnost haldy. *Heap property*



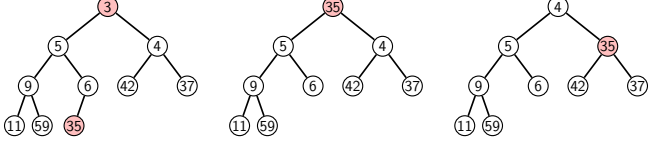
### Halda – přidání prvku push()

- Po každém provedení operace **push()** musí být splněny vlastnosti haldy.
- Prvek přidáme na konec haldy, tj. na první volnou pozici (vlevo) na nejnižší úrovni haldy.
- Zkontrolujeme, zdali je splněna podmínka haldy, pokud ne, zaměníme prvek s nadřazeným prvkem (předkem). *V nejnepříznivějším případě prvek „probublá“ až do kořene stromu.*



### Halda – odebrání prvku pop()

- Při operaci **pop()** odebereme kořen stromu.
- Prázdné místo nahradíme nejpravějším listem.
- Zkontrolujeme, zdali je splněna podmínka haldy, pokud ne, zaměníme prvek s potomkem a postup opakujeme. *V nejnepříznivějším případě prvek „probublá“ až do listu stromu.*



- Jak zjistit nejpravější list?
  - V případě implementace spojovou strukturou (nelineární) můžeme explicitně udržovat odkaz.
  - Binární plný strom můžeme efektivně reprezentovat polem** – pak nejpravější list je poslední prvek v poli.

### Prioritní fronta haldou

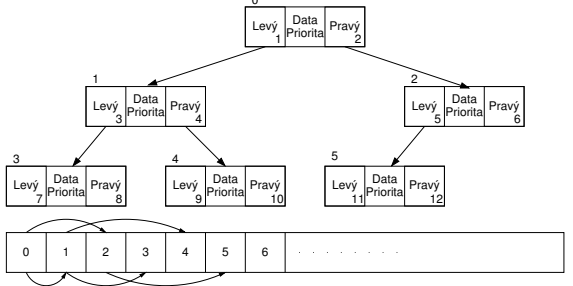
- Prvky ukládáme do haldy a při každém vložení / odebrání zajišťujeme, aby platily vlastnosti **haldy**.
- Operace **peek()** má konstantní složitost a nezáleží na počtu prvků ve frontě, nejnižší prvek je vždy kořen.

*Asymptotická složitost v notaci velké O je  $O(1)$ .*

- Operace **push()** a **pop()** udržují vlastnost haldy záměnami prvku až do hloubky stromu. *Pro binární plný strom je hloubka stromu  $\log_2(n)$ , kde  $n$  je aktuální počet prvků ve stromu, odtud složitost operace  $O(\log(n))$ .*

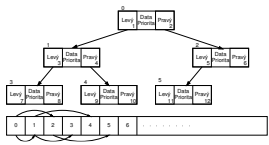
### Reprezentace binárního stromu polem

- Binární plný strom můžeme reprezentovat lineární strukturou.
- V případě známého maximálního počtu prvků v haldě, pak jednoduše předalokovaným polem.



### Halda jako binární plný strom reprezentovaný polem

- Pro definování maximálního počtu prvků v haldě si předalokujeme pole o daném počtu prvků.
- Binární **plný strom** má všechny vrcholy na úrovni rovné hloubce stromu co nejvíce vlevo.
- Kořen stromu je první prvek s indexem 0, následníky prvku na pozici  $i$  lze v poli určit jako prvky s indexy:
  - levý následník:  $i_{levý} = 2i + 1$ ;
  - pravý následník:  $i_{pravý} = 2i + 2$ .*Podobně lze odvodit vztah pro předchůdce.*
- Kořen stromu reprezentuje **nejprioritnější prvek.**



*Např. s nejmenší hodnotou nebo maximální prioritou.*

### Operace vkládání a odebrání prvků

- I v případě reprezentace polem pracují operace vkládání a odebrání identicky.
  - Funkce **push()** přidá prvek jako další prvek v poli a následně propaguje prvek směrem nahoru až je **splněna vlastnost haldy**.
  - Při odebrání prvku funkcí **pop()** je poslední prvek v poli umístěn na začátek pole (kořen stromu) a propagován směrem dolů až je **splněna vlastnost haldy**.
- Dochází pouze k vzájemnému zameňování hodnot na pozicích v poli (haldě). *Z indexu prvku v poli vždy můžeme určit jak levého a pravého následníka, tak i předcházející prvek (rodič) v pohledu na haldu jako binární strom.*
- Hlavní výhodou reprezentace polem je přístup do předem alokovaného bloku paměti. *Všechny prvky můžeme jednoduše projít v jedné smyčce, například při výpisu.*
- Ověření zdali implementace operací **push()** a **pop()** zachovává **podmínku haldy** můžeme realizovat ověřující funkcí **is\_heap()**.

Datové struktury Zásobník Fronta Spojový seznam - zásobník vs. fronta Prioritní fronta **Halda**

### Příklad implementace pq\_is\_heap()

- Pro každý prvek haldy musí platit, že jeho hodnota je menší než levý i pravý následník.

```

18 typedef struct {
19 int size; // the maximal number of entries
20 int len; // the current number of entries
21 int *cost; // array with costs - lowest cost is highest priority
22 int *label; // array with labels (each label has cost/priority)
23 } pq_heap_s;
161 _Bool pq_is_heap(pq_heap_s *pq, int n)
162 {
163 _Bool ret = true;
164 int l = 2 * n + 1; // left successor
165 int r = l + 1; // right successor
166 if (l < pq->len) {
167 ret = (pq->cost[l] < pq->cost[n]) ? false : pq_is_heap(pq, l);
168 }
169 if (r < pq->len) {
170 ret = ret // if ret is false, further expression is not evaluated
171 &&
172 ((pq->cost[r] < pq->cost[n]) ? false : pq_is_heap(pq, r));
173 }
174 return ret;
175 }

```

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 52 / 56

Datové struktury Zásobník Fronta Spojový seznam - zásobník vs. fronta Prioritní fronta **Halda**

### Příklad implementace push()

- Prvek přidáme na konec pole a iterativně kontrolujeme, zdali je splněna vlastnost haldy. Pokud ne, prvek zaměníme s předchůdcem.

```

84 #define GET_PARENT(i) ((i-1) >> 1) // parent is (i-1)/2
85 _Bool pq_push(pq_heap_s *pq, int label, int cost)
86 {
87 _Bool ret = false;
88 if (pq && pq->len < pq->size && label >= 0 && label < pq->size) {
89 pq->cost[pq->len] = cost; //add the cost to the next free slot
90 pq->label[pq->len] = label; //add label of new entry
91 int cur = pq->len; // index of the entry added to the heap
92 int parent = GET_PARENT(cur);
93 while (cur >= 1 && pq->cost[parent] > pq->cost[cur]) {
94 pq_swap(pq, parent, cur); // swap parent<->cur
95 cur = parent;
96 parent = GET_PARENT(cur);
97 }
98 pq->len += 1;
99 ret = true;
100 }
101 // assert(pq_is_heap(pq, 0)); // testing the implementation
102 return ret;
103 }

```

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 53 / 56

Datové struktury Zásobník Fronta Spojový seznam - zásobník vs. fronta Prioritní fronta **Halda**

### Příklad volání pop()

- Halda je reprezentovaná binárním polem.
- Nejmenší prvek je kořenem stromu.
- Voláním pop() odebíráme kořen stromu.
- Na jeho místo umístíme poslední prvek.
- Strom však nesplňuje podmínku haldy.
- Proto provedeme záměnu s následníky.
  - V tomto případě volíme pravého následníka, neboť jeho hodnota je nižší než hodnota levého následníka.
- A strom opět splňuje vlastnost haldy.
- Záměny provádíme v poli a využíváme vlastnosti plného binárního stromu.
  - Levý potomek prvku haldy na pozici i je 2i+1, pravý potomek je na pozici 2i+2.

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 54 / 56

Diskutovaná témata

## Shrnutí přednášky

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 55 / 56

Diskutovaná témata

- Abstraktní datový typ
- ADT typu zásobník (stack)
- ADT typu fronta (queue)
- Příklady implementací zásobníku a fronty
  - polem
  - rozšířitelným polem
  - a spojovým seznamem
- Příklady rozhraní a implementace ADT s prvky ukazatel a řešení uvolňování paměti
- Prioritní fronta.

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 56 / 56

Kódovací příklad – Prioritní fronta polem

## Část III

## Appendix

Kódovací příklad – Prioritní fronta spojovým seznamem

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 57 / 56

Kódovací příklad – Prioritní fronta polem

### Prioritní fronta polem – rozhraní

- V případě implementace prioritní fronty polem můžeme využít jedno pole pro hodnoty a druhé pole pro uložení priority daného prvku.
 

```

Implementace vychází z lec09/queue/queue_array.h a lec09/queue/queue_array.c
typedef struct {
 void **queue; // Pole ukazatelů na jednotlivé prvky
 int *priorities; // Pole hodnot priorit jednotlivých prvků
 int count; // Uvažujeme pouze MAX_INT prvků, zpravidla 2147483647
 int head;
 int tail;
} queue_t;

```
- Další rozhraní (jména a argumenty funkcí) mohou zůstat identické jako u implementace spojovým seznamem.
 

```

void queue_init(queue_t **queue); int queue_push(void *value, int priority, queue_t *queue);
void queue_delete(queue_t **queue); void * queue_pop(queue_t *queue);
void queue_free(queue_t *queue); void * queue_peek(const queue_t *queue);
_Bool queue_is_empty(const queue_t *queue);

```

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 59 / 56

Kódovací příklad – Prioritní fronta polem

### Prioritní fronta polem 1/3 – push()

- Funkce push() je až na uložení priority identická s verzí bez priorit.
 

```

46 int queue_push(void *value, int priority, queue_t *queue)
47 {
48 int ret = QUEUE_OK; // by default we assume push will be OK
49 if (queue->count < MAX_QUEUE_SIZE) {
50 queue->queue[queue->tail] = value;
51 queue->priorities[queue->tail] = priority; // store priority of the new value entry
52 queue->tail = (queue->tail + 1) % MAX_QUEUE_SIZE;
53 queue->count += 1;
54 } else {
55 ret = QUEUE_MEMFAIL;
56 }
57 return ret;
58 }

```
- Funkce peek() a pop() potřebují prvek s nejnižší (nejvyšší) prioritou.
  - Nalezení prvku z „čela“ fronty realizujeme funkcí getEntry(), kterou následně využijeme jak v peek(), tak v pop().

lec09/priority\_queue-array/priority\_queue-array.c

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 60 / 56

Kódovací příklad – Prioritní fronta polem

### Prioritní fronta polem 2/3 – getEntry()

- Nalezení nejmenšího (největšího) prvku provedeme lineárním prohledáním aktuálních prvků uložených ve frontě (poli).
 

```

61 static int getEntry(const queue_t *const queue)
62 {
63 int ret = -1; // return -1 if queue is empty.
64 if (queue->count > 0) {
65 for (int cur = queue->head, i = 0; i < queue->count; ++i) {
66 if (
67 ret == -1 ||
68 (queue->priorities[ret] > queue->priorities[cur])
69) {
70 ret = cur;
71 }
72 cur = (cur + 1) % MAX_QUEUE_SIZE;
73 }
74 }
75 return ret;
76 }

```

lec09/priority\_queue-array/priority\_queue-array.c

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 61 / 56



Kódovací příklad – Prioritní fronta polem

### Prioritní fronta polem 3/3 – peek() a pop()

- Funkce `peek()` využívá lokální (static) funkce `getEntry()`.

```

101 void* queue_peek(const queue_t *queue)
102 {
103 return queue_is_empty(queue) ? NULL : queue->queue[getEntry(queue)];
104 }

```

- Ve funkci `pop()` zaplníme položku vyjmutého prvku prvkem ze startu.

```

77 void* queue_pop(queue_t *queue) Tim zajistíme, že prvky tvoří souvislý blok v rámci kruhové fronty.
78 {
79 void *ret = NULL;
80 int bestEntry = getEntry(queue);
81 if (bestEntry >= 0) { // entry has been found
82 ret = queue->queue[bestEntry];
83 if (bestEntry != queue->head) { //replace the bestEntry by head
84 queue->queue[bestEntry] = queue->queue[queue->head];
85 queue->priorities[bestEntry] = queue->priorities[queue->head];
86 }
87 queue->head = (queue->head + 1) % MAX_QUEUE_SIZE;
88 queue->count -= 1;
89 }
90 return ret;
91 }

```

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 62 / 56

Kódovací příklad – Prioritní fronta polem

### Prioritní fronta polem – příklad použití

- Použití je identické s implementací spojovým seznamem.

```

$ make && ./demo-priority_queue-array
ccache clang -c priority_queue-array.c -O2 -o priority_queue-array.o
ccache clang priority_queue-array.o demo-priority_queue-array.o -o demo-priority_queue-array
Add 0 entry '2nd' with priority '2' to the queue
Add 1 entry '4th' with priority '4' to the queue
Add 2 entry '1st' with priority '1' to the queue
Add 3 entry '5th' with priority '5' to the queue
Add 4 entry '3rd' with priority '3' to the queue
Pop the entries from the queue
1st
2nd
3rd
4th
5th

```

lec09/priority\_queue-array/priority\_queue-array.h  
lec09/priority\_queue-array/priority\_queue-array.c  
lec09/priority\_queue-array/demo-priority\_queue-array.c

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 63 / 56

Kódovací příklad – Prioritní fronta polem

### Prioritní fronta – příklad rozhraní

- V implementaci spojového seznamu upravíme funkce `peek()` a `pop()`.
- *Využijeme přímo kód lec09/queue/queue\_linked\_list.h a lec09/queue/queue\_linked\_list.c.*
- Prvek fronty `queue_entry_t` rozšíříme o položku určující prioritu.

```

1 typedef struct entry {
2 void *value;
3 // Nová položka
4 int priority;
5 struct entry *next;
6 } queue_entry_t;
7 typedef struct {
8 queue_entry_t *head;
9 queue_entry_t *end;
10 } queue_t;

```

```

16 void queue_init(queue_t **queue);
17 void queue_delete(queue_t **queue);
18 void queue_free(queue_t *queue);
19 int queue_push(void *value, int priority, queue_t *queue);
20 void* queue_pop(queue_t *queue);
21 _Bool queue_is_empty(const queue_t *queue);
22 void* queue_peek(const queue_t *queue);

```

Alternativně můžeme specifikovat funkce porovnání datových položek.  
■ Rozhraní funkcí je identické frontě až na specifikaci priority při vložení prvku do fronty.

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 65 / 56

Kódovací příklad – Prioritní fronta polem

### Prioritní fronta spojovým seznamem 1/4

- Ve funkci `push()` přidáme pouze nastavení priority.

```

int queue_push(void *value, int priority, queue_t *queue)
{
 ...
 if (new_entry) { // fill the new_entry
 new_entry->value = value;
 new_entry->priority = priority;
 }
 ...
}

```

lec09/priority\_queue-linked\_list/priority\_queue.c

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 66 / 56

Kódovací příklad – Prioritní fronta polem

### Prioritní fronta spojovým seznamem 2/4

- `peek()` lineárně prochází seznam a vybere prvek s nejnižší prioritou.

```

38 void* queue_peek(const queue_t *queue)
39 {
40 void *ret = NULL;
41 if (queue && queue->head) {
42 ret = queue->head->value;
43 int lowestPriority = queue->head->priority;
44 queue_entry_t *cur = queue->head->next;
45 while (cur != NULL) {
46 if (lowestPriority > cur->priority) {
47 lowestPriority = cur->priority;
48 ret = cur->value;
49 }
50 cur = cur->next;
51 }
52 }
53 return ret;
54 }

```

lec09/priority\_queue-linked\_list/priority\_queue.c

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 67 / 56

Kódovací příklad – Prioritní fronta polem

### Prioritní fronta spojovým seznamem 3/4

- Podobně `pop()` lineárně prochází seznam a vybere prvek s nejnižší prioritou, je však nutné zajistit propojení seznamu po vyjmutí prvku.

```

59 void* queue_pop(queue_t *queue)
60 {
61 void *ret = NULL;
62 if (queue->head) { // having at least one entry
63 queue_entry_t* cur = queue->head->next;
64 queue_entry_t* prev = queue->head;
65 queue_entry_t* best = queue->head;
66 queue_entry_t* bestPrev = NULL;
67 while (cur) {
68 if (cur->priority < best->priority) {
69 best = cur; // update the entry with
70 bestPrev = prev; // the lowest priority
71 }
72 prev = cur;
73 cur = cur->next;
74 }
75 ...
76 }
77 }

```

lec09/priority\_queue-linked\_list/priority\_queue.c

- Proto si při procházení pamatujeme předchozí prvek `bestPrev`.

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 68 / 56

Kódovací příklad – Prioritní fronta polem

### Prioritní fronta spojovým seznamem 4/4

- Po nalezení nejmenšího (největšího) prvku a jeho vyjmutí seznamem propojíme.

```

void* queue_pop(queue_t *queue)
{
 ...
 while (cur) { ... } // Finding the best entry
 if (bestPrev) { // linked the list after
 bestPrev->next = best->next; // best removal
 } else { // best is the head
 queue->head = queue->head->next;
 }
 ret = best->value; //retrieve the value
 if (queue->end == best) { //update the list end
 queue->end = bestPrev;
 }
 free(best); // release queue_entry_t
 if (queue->head == NULL) { // update end if last
 queue->end = NULL; // entry has been
 } // popped
}
return ret;

```

lec09/priority\_queue-linked\_list/priority\_queue.c

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 69 / 56

Kódovací příklad – Prioritní fronta polem

### Prioritní fronta spojovým seznamem – příklad použití 1/2

- Inicializaci fronty provedeme polem textových řetězců a priorit.

```

14 queue_t *queue;
15 queue_init(&queue);
16 char *values[] = { "2nd", "4th", "1st", "5th", "3rd" };
17 int priorities[] = { 2, 4, 1, 5, 3 };
18 const int n = sizeof(priorities) / sizeof(int);
19 for (int i = 0; i < n; ++i) {
20 int r = queue_push(values[i], priorities[i], queue);
21 printf("Add %2i entry '%s' with priority '%i' to the queue\n", i, values[i], priorities[i]);
22 if (r != QUEUE_OK) {
23 fprintf(stderr, "Error: Queue is full!\n");
24 break;
25 }
26 }
27 printf("\nPop the entries from the queue\n");
28 while (!queue_is_empty(queue)) {
29 char* pv = (char*)queue_pop(queue);
30 printf("%s\n", pv);
31 // Do not call free(pv); We pushed text literals into the queue.
32 }
33 queue_delete(&queue);

```

lec09/priority\_queue-linked\_list/demo-priority\_queue.c

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 70 / 56

Kódovací příklad – Prioritní fronta polem

### Prioritní fronta spojovým seznamem – příklad použití 2/2

- Hodnoty jsou neuspořádané a očekáváme jejich uspořádaný výpis při vyjmutí funkcí `pop()`.

```

17 char *values[] = { "2nd", "4th", "1st", "5th", "3rd" };
18 int priorities[] = { 2, 4, 1, 5, 3 };
19 ...
20 while (!queue_is_empty(queue)) {
21 // Do not call free(pv);

```

- V tomto případě nevoláme `free()` neboť vložené textové řetězce jsou textovými literály!

*Narozdí od příkladu lec09/demo-queue\_linked\_list.c*

- Příklad výstupu (v tomto případě preferujeme nižší hodnoty):

```

$ make && ./demo-priority_queue
Add 0 entry '2nd' with priority '2' to the queue
Add 1 entry '4th' with priority '4' to the queue
Add 2 entry '1st' with priority '1' to the queue
Add 3 entry '5th' with priority '5' to the queue
Add 4 entry '3rd' with priority '3' to the queue
Pop the entries from the queue
1st
2nd
3rd
4th
5th

```

lec09/priority\_queue-linked\_list/priority\_queue.h  
lec09/priority\_queue-linked\_list/priority\_queue.c  
lec09/priority\_queue-linked\_list/demo-priority\_queue.c

Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 71 / 56