

Abstraktní datový typ

Jan Faigl

Katedra počítačů
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 09

BOB36PRP – Procedurální programování

Přehled témat

- Část 1 – Abstraktní datový typ
- Datové struktury
- Zásobník
- Fronta
- Prioritní fronta
- Prioritní fronta spojovým seznamem

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 vracující 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. pole, řetězec, struktura

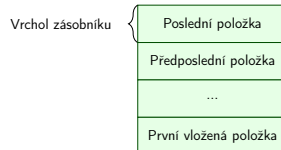
Např. vložení nebo odebrání určitého prvku

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.


```
int stack_push(void *value, void **stack);
void* stack_pop(void **stack);
_Bool stack_is_empty(void **stack);
void* stack_peek(void **stack);

void stack_init(void **stack); // init. dat. reprez.
void stack_delete(void **stack); // kompletní smazání
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.

Implementace zásobníku polem 1/3

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


```
typedef struct {
    void **stack; // array of void pointers
    int count;
} stack_t;
```
- Pro inicializaci a uvolnění paměti implementujeme pomocné funkce.


```
void stack_init(stack_t **stack);
void stack_delete(stack_t **stack);
void stack_free(stack_t **stack);
```
- Základní operace se zásobníkem mají tvar


```
int stack_push(void *value, stack_t *stack);
void* stack_pop(stack_t *stack);
_Bool stack_is_empty(const stack_t *stack);
void* stack_peek(const stack_t *stack);
```
- a jsou pro všechny tři implementace totožné. `lec09/stack_array.h`

Zásobník – Příklad použití 1/3

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


```
int* getRandomInt()
{
    int *r = myMalloc(sizeof(int)); // dynamicky alokovaný int
    *r = rand() % 256;
    return r;
}

stack_t *stack;
stack_init(&stack);

for (int i = 0; i < 15; ++i) {
    int *pv = getRandomInt();
    int r = stack_push(pv, stack);
    printf("Add %2i entry '%3i' to the stack r = %i\n", i, *pv, r);
    if (r != STACK_OK) {
        fprintf(stderr, "Error: Stack is full!\n");
        fprintf(stderr, "Info: Release pv memory and quit pushing\n");
        free(pv); // Nutně uvolnit alokovanou paměť
        break;
    }
}
```
- V případě zaplnění zásobníku **nezapomenout uvolnit paměť**. `lec09/demo-stack_array.c`

Příklad ADT – Rozhraní zásobníku 2/2

- Součástí definice rozhraní ADT je také popis chování operací.


```
/*
 * Function: stack_push
 * -----
 * This routine push the given value onto the top of the stack.
 *
 * value - value to be placed on the stack
 * stack - stack to push
 *
 * returns: The function returns status value:
 *
 * OK - success
 * CLIB_MEMFAIL - dynamic memory allocation failure
 *
 * This function requires the following include files:
 *
 * prp_stack.h prp_errors.h
 */
int stack_push(void *value, void **stack);
```

Implementace zásobníku polem 2/3

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


```
#ifndef MAX_STACK_SIZE
#define MAX_STACK_SIZE 5
#endif

void* myMalloc(size_t size)
{
    void *ret = malloc(size);
    if (!ret) {
        fprintf(stderr, "Malloc failed!\n");
        exit(-1);
    }
    return ret;
}

void stack_init(stack_t **stack)
{
    *stack = myMalloc(sizeof(stack_t));
    (*stack)->stack = myMalloc(sizeof(void*)
    *MAX_STACK_SIZE);
    (*stack)->count = 0;
}

void stack_free(stack_t **stack)
{
    while (!stack_is_empty(stack)) {
        void *value = stack_pop(stack);
        free(value);
    }
}

void stack_delete(stack_t **stack)
{
    stack_free(*stack);
    free((*stack)->stack);
    free(*stack);
    *stack = NULL;
}

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

```
void stack_free(stack_t **stack)
void stack_delete(stack_t **stack)
```
- `while (!stack_is_empty(stack))`

```
while (!stack_is_empty(stack)) {
    void *value = stack_pop(stack);
    free(value);
}
```
- `stack_free()`

```
stack_free(*stack);
free((*stack)->stack);
free(*stack);
*stack = NULL;
```
- `lec09/stack_array.c`

Zásobník – Příklad použití 2/3

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


```
printf("\nPop the entries from the stack\n");
while (!stack_is_empty(stack)) {
    int *pv = (int*)stack_pop(stack);
    printf("Popped value is %3i\n", *pv);
    free(pv);
}
stack_delete(&stack);
```
- 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
```

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`
- Dále si ukážeme použití maker preprocesoru a jejich definici při překladu.
- Ukázkové implementace také slouží jako příklady, jak zacházet s dynamickou pamětí a jak se vyhnout tzv. únikům paměti (**memory leaks**).

Implementace zásobníku polem 3/3

- ```
int stack_push(void *value, stack_t *stack)
{
 int ret = STACK_OK;
 if (stack->count < MAX_STACK_SIZE) {
 stack->stack[stack->count++] = value;
 } else {
 ret = STACK_MEMFAIL;
 }
 return ret;
}

void* stack_pop(stack_t *stack)
{
 return stack->count > 0 ? stack->stack[--(stack->count)]: NULL;
}

void* stack_peek(const stack_t *stack)
{
 return stack_is_empty(stack) ? NULL : stack->stack[stack->count - 1];
}

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

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

### 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 178
Popped value is 225
Popped value is 77
```
- Vyzkoušejte si zakomentovat různá volání `free()` a sledovat chování programu – nástrojem **valgrind!**

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

### 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 #define INIT_STACK_SIZE 3 #endif
#ifndef STACK_RESIZE #define STACK_RESIZE 3 #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.
```

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 21 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

### Implementace zásobníku rozšiřitelným polem 2/3

- Volání `realloc()` rozšíří alokovanou paměť nebo alokuje novou a obsah původní paměti přepokopíruje a následně paměť uvolní.

```
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
 stack->stack = tmp; // has been freed
 stack->size += STACK_RESIZE;
 }
 if (stack->count < stack->size) {
 stack->stack[stack->count++] = value;
 } else {
 ret = STACK_MEMFAIL;
 }
 }
 return ret;
}

lec09/stack_array-alloc.c
```

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 22 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

### 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

lec09/stack_array-alloc.h
lec09/stack_array-alloc.c
lec09/demo-stack_array-alloc.c
```

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 23 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

### Implementace zásobníku spojovým seznamem 1/3

- Zásobník také můžeme implementovat spojovým seznamem, viz 9. 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 tak pouze alokuje strukturu stack_t.
```

```
void stack_init(stack_t **stack)
{
 *stack = myMalloc(sizeof(stack_t));
 (*stack)->head = NULL;
}

lec09/demo-stack.c
```

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 24 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

### 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 uvolníme.
```

```
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;
}

lec09/stack_linked_list.c
```

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 25 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

### 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;
}

lec09/stack_linked_list.c

Použití je identické jako v obou předchozích případech.
```

lec09/demo-stack\_linked\_list.c

- Výhoda spojového seznamu proti implementaci `stack_array` je v neomezené kapacitě zásobníku. *Omezení pouze do výše volné paměti.*
- 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`).

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 26 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

### ADT – Zásobník příklad použití různých implementací

- S využitím preprocesoru můžeme různé implementace kombinovat v jediném zdrojovém souboru

```
#if STACK_ARRAY
#include "stack_array.h"
#elif STACK_ARRAY_ALLOC
#include "stack_array-alloc.h"
#elif STACK_LINKED_LIST
#include "stack_linked_list.h"
#endif

lec09/demo-stack.c

Při kompilaci definujeme jedno z maker a při linkování pak volíme jednu konkrétní implementaci (.o soubor nebo .c soubor).
- Pole


```
clang -DSTACK_ARRAY stack_array.c demo-stack.c && ./a.out
```
- Pole s realokací


```
clang -DSTACK_ARRAY_ALLOC stack_array-alloc.c demo-stack.c && ./a.out
```
- Spojový seznam


```
clang -DSTACK_LINKED_LIST stack_linked_list.c demo-stack.c && ./a.out
```


Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 27 / 50


```

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

### 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).
  - 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 9. přednášky
    - Nebo přidáváme na konec a odebíráme ze začátku (`head`). `pushEnd()` a `pop()` z 9. přednášky.
    - Z hlediska vnějšího (ADT) chování fronty na vnitřní implementaci nezáleží.

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 29 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

### 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 vrací nejprve vložený prvek do fronty. *Na rozdíl od zásobníku, u kterého je to poslední vložený prvek.*

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 30 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

## 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);

```

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 31 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

## 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, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 32 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

## Příklad implementace fronty polem 2/2

- Funkce `queue_pop()` vrací hodnotu na indexu `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, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 33 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

## Příklad implementace fronty spojovým seznamem 1/3

- Spojový seznam s udržováním začátku `head` a konce `end` seznamu.
  - Vložení prvku do fronty `queue_push()` dáme 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 tak lineárně procházet seznam a aktualizovat `end` při odebrání prvku z fronty.

`Viz lec08/linked_list.c`

```

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, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 34 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

## 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, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 35 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

## Implementace fronty spojovým seznamem 3/3

- `pop()` odebrá 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;
}

```
- `isEmpty()` a `peek()` je triviální.
- `_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, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 36 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

## 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
Popped value is 77
Popped value is 225
Popped value is 178

```

`lec09/queue_linked_list.h`  
`lec09/queue_linked_list.c`  
`lec09/demo-queue_linked_list.c`

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 37 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

## 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()` odebrá z fronty prvek s nejvyšší prioritou.  
*Vrchol fronty je prvek s nejvyšší prioritou. Alternativně též prvek s nejnižší hodnotou.*

*FIFO*

- Rozhraní prioritní fronty může být identické jako u běžné fronty, avšak specifikace upřesňuje chování dílčích metod.

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 39 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

## 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()`.  
*Základní implementace fronty viz předchozí přednáška.*
    - Například tak, že ve funkci `pop()` a `peek()` projdeme všechny dosud vložené prvky a najdeme prvek nejprioritnější.
  - S využitím pokročilé datové struktury pro efektivní vyhledání prioritního prvku (halda).
- Prioritní prvek může být ten s nejmenší hodnotou, pak
  - 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, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 40 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

### Prioritní fronta – příklad rozhraní

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

*Alternativně můžeme specifikovat funkce porovnání datových položek.*

- Rozhraní funkcí je identické frontě až na specifikaci priority při vložení prvku do fronty.

```
typedef struct entry {
 void *value;
 // Nová položka
 int priority;
 struct entry *next;
} queue_entry_t;

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

```
void queue_init(queue_t **queue);
void queue_delete(queue_t **queue);
void queue_free(queue_t *queue);

int queue_push(void *value, int priority, queue_t *queue);

void* queue_pop(queue_t *queue);
_Bool queue_is_empty(const queue_t *queue);
void* queue_peek(const queue_t *queue);
```

lec09/priority\_queue.h

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 42 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

### 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.c

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 43 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

### Prioritní fronta spojovým seznamem 2/4

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

```
void* queue_peek(const queue_t *queue)
{
 void *ret = NULL;
 if (queue && queue->head) {
 ret = queue->head->value;
 int lowestPriority = queue->head->priority;
 queue_entry_t *cur = queue->head->next;
 while (cur != NULL) {
 if (lowestPriority > cur->priority) {
 lowestPriority = cur->priority;
 ret = cur->value;
 }
 cur = cur->next;
 }
 }
 return ret;
}
```

lec09/priority\_queue.c

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 44 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

### 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.

```
void* queue_pop(queue_t *queue)
{
 void *ret = NULL;
 if (queue->head) { // having at least one entry
 queue_entry_t* cur = queue->head->next;
 queue_entry_t* prev = queue->head;
 queue_entry_t* best = queue->head;
 queue_entry_t* bestPrev = NULL;
 while (cur) {
 if (cur->priority < best->priority) {
 best = cur; // update the entry with
 bestPrev = prev; // the lowest priority
 }
 prev = cur;
 cur = cur->next;
 }
 ...
 }
 ...
}
```

lec09/priority\_queue.c

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

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 45 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

### Prioritní fronta spojovým seznamem 4/4

- Po nalezení největšího (nejmenšího) prvku propojíme seznam.

```
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; //retrive 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.c

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 46 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

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

- Inicializaci fronty provedeme polem textových řetězců a priorit.

```
queue_t *queue;
queue_init(&queue);
char *values[] = { "2nd", "4th", "1st", "5th", "3rd" };
int priorities[] = { 2, 4, 1, 5, 3 };
const int n = sizeof(priorities) / sizeof(int);
for (int i = 0; i < n; ++i) {
 int r = queue_push(values[i], priorities[i], queue);
 printf("Add %2i entry '%s' with priority '%i' to the queue\n", i, values[i],
 priorities[i]);
 if (r != QUEUE_OK) {
 fprintf(stderr, "Error: Queue is full!\n");
 break;
 }
}
printf("\nPop the entries from the queue\n");
while (!queue_is_empty(queue)) {
 char* pv = (char*)queue_pop(queue);
 printf("%s\n", pv);
 // Do not call free(pv);
}
queue_delete(&queue);
```

lec09/demo-priority\_queue.c

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 47 / 50

Datové struktury Zásobník Fronta Prioritní fronta Prioritní fronta spojovým seznamem

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

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

```
char *values[] = { "2nd", "4th", "1st", "5th", "3rd" };
int priorities[] = { 2, 4, 1, 5, 3 };
...
while (!queue_is_empty(queue)) {
 // 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.h, lec09/priority\_queue.c  
lec09/demo-priority\_queue.c

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 48 / 50

Diskutovaná témata

## Shrnutí přednášky

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 49 / 50

Diskutovaná témata

- Abstraktní datový typ
- ADT typu zásobník (stack)
- ADT typu fronta (queue)
- Příklady implementací zásobníku a fronty
  - polem
  - rozsířitelným polem
  - a spojovým seznamem
- Příklady rozhraní a implementace ADT s prvky ukazatel a řešení uvolňování paměti
- Prioritní fronta – příklad implementace spojovým seznamem
- Přístě: Stromy.**

Jan Faigl, 2022 BOB36PRP – Přednáška 09: Abstraktní datový typ 50 / 50