

# Spojové struktury

Jan Faigl

Katedra počítačů

Fakulta elektrotechnická

České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 08

**B0B36PRP – Procedurální programování**

# Přehled témat

- Část 1 – Spojové struktury

  - Spojové struktury

  - Spojový seznam

  - Spojový seznam s odkazem na konec seznamu

  - Vložení/odebrání prvku

  - Kruhový spojový seznam

  - Obousměrný seznam

- Část 2 – Zadání 8. domácího úkolu (HW08)

# Část I

## Část 1 – Spojové struktury

## Kolekce prvků (položek)

- V programech je velmi běžný požadavek na uchování seznamu (množiny) prvků (proměnných/struktur).

- Základní kolekce je pole.

*Definované jménem typu a [], například `double[]`.*

- Jedná se o kolekci položek (proměnných) stejného typu.

+ Umožňuje jednoduchý přístup k položkám indexací prvku.

*Položky jsou stejného typu (velikosti), kompilátor tak může vytvořit kód, ve kterém se adresa prvku spočítá z indexu a velikosti prvku.*

– Velikost pole je určena při vytvoření pole.

- Velikost (maximální velikost) musí být známa v době vytváření.

- Změna velikost není přímo možná.

*Nutné nové vytvoření (alokace paměti), voláním `realloc()` může dojít k rozšíření, které závisí na aktuálním stavu paměti.*

- Využití pouze malé části pole (s objemnými prvky) může být plýtváním paměti.

- V případě řazení pole přesouváme jednotlivé položky pole.

- Vložení prvku a vyjmutí prvku vyžaduje kopírování (zachování souvislosti dat).

*Kopírování objemných prvků lze případně řešit ukládáním ukazatelů.*

## Seznam – list

- Seznam (proměnných nebo objektů) patří mezi základní datové struktury.

*Základní **ADT** – Abstract Data Type.*

- Seznam zpravidla nabízí sadu základních operací:

- Vložení prvku (**insert**);
- Odebrání prvku (**remove**);
- Vyhledání prvku (**indexOf**);
- Aktuální počet prvku v seznamu (**size**).

- Implementace seznamu může být založena na poli nebo spojové struktuře.

- Pole

- Indexování je velmi rychlé.
- Vložení prvku na konkrétní pozici může být pomalé.

*Nová alokace a kopírování.*

- **Spojové seznamy**

- Položky seznamu jsou sekvenčně propojeny, přímý náhodný přístup není jednoduše možný.
- Vložení nebo odebrání prvku může být velmi rychlé.

# Spojové seznamy

- Datová struktura realizující seznam dynamické délky.
- Každý prvek seznamu obsahuje:
  - Datovou část (hodnota proměnné / objekt / ukazatel na data);
  - Odkaz (ukazatel) na další prvek v seznamu.

*NULL v případě posledního prvku seznamu (zarážka).*
- První prvek seznamu se zpravidla označuje jako *head* nebo *start*.

*Realizujeme jej jako ukazatel odkazující na první prvek seznamu.*

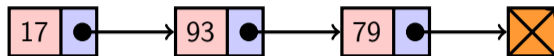


## Základní operace se spojovým seznamem

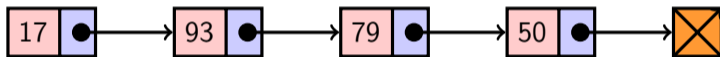
- Vložení prvku:
  - Předchozí prvek odkazuje na nový prvek;
  - *Nový prvek může odkazovat na předchozí prvek, který na něj odkazuje.*  
*Tzv. obousměrný spojový seznam.*
- Odebrání prvku:
  - Předchozí prvek aktualizuje hodnotu odkazu na následující prvek;
  - Předchozí prvek nově odkazuje na následující prvek, na který odkazoval odebíraný prvek.
- Základní implementací spojového seznamu je  
**jednosměrný spojový seznam.**

## Jednosměrný spojový seznam

- Příklad spojového seznamu pro uložení číselných hodnot.



- Přidání nové hodnoty 50 je přidání nového prvku na konec seznamu.



- Odebrání prvku s hodnotou 79.



1. Nejdříve sekvenčně najdeme prvek s hodnotou 79.
2. Následně vyjmeme prvek s hodnotou a propojíme prvek 93 s prvkem 50.

*Položku next prvku 93 nastavíme na hodnotu next odebíraného prvku, tj. na následující prvek s hodnotou 50.*



## Spojový seznam

- Seznam tvoří struktura prvku s dvěma základními položkami:
  - Data prvku (může být ukazatel);
  - Odkaz (ukazatel) na další prvek.
- Seznam je pak:
  1. Ukazatel na první prvek `head`;
  2. nebo vlastní struktura pro seznam.

*Vhodné pro uložení dalších informací, počet prvků, poslední prvek.*

- Příklad struktur pro uložení spojového seznamu celých čísel.

```
typedef struct entry {  
    int value;  
    struct entry *next;  
} entry_t;  
  
entry_t *head = NULL;
```

```
typedef struct {  
    entry_t *head;  
    entry_t *tail;  
    int counter; // pocet prvku  
} linked_list_t;
```

- Pro jednoduchost prvky seznamu obsahují celé číslo.

*Obecně mohou obsahovat libovolná data (ukazatel na strukturu).*

## Přidání prvku – příklad

1. Vytvoříme nový prvek (10) seznamu a uložíme odkaz v `head`.

```
head = myMalloc(sizeof(entry_t));  
head->value = 10;  
head->next = NULL;
```

2. Další prvek (13) přidáme propojením s aktuálně 1. prvkem.

```
entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(entry_t));  
new_entry->value = 13;  
new_entry->next = head;
```

3. a aktualizací proměnné `head`.

```
head = new_entry;
```

- Stále máme přístup na všechny prvky přes `head` a `head->next`.

- **Inicializace položek prvku je důležitá.**

- Hodnota `head == NULL` indikuje prázdný seznam.
- Hodnota `entry->next == NULL` indikuje poslední prvek seznamu.

## Kontrola dynamické alokace

```
#include <stdlib.h>  
  
void* myMalloc(size_t size)  
{  
    void *ret = malloc(size);  
    if (!ret) {  
        fprintf(stderr, "Malloc  
failed!\n");  
        exit(-1)  
    }  
    return ret;  
}
```

lec08/my\_malloc.h,lec08/my\_malloc.c

## Spojový seznam – push()

- Přidání prvku na začátek implementujeme ve funkci `push()`.
- Předáváme adresu, kde je uložen odkaz na start seznamu.

`head` je ukazatel, proto předáváme adresu proměnné, tj. `&head` a parametr je ukazatel na ukazatel.

```
void push(int value, entry_t **head)
{ // add new entry at front of the list
  entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(entry_t));

  new_entry->value = value; // set data
  if (*head == NULL) { // first entry in the list
    new_entry->next = NULL; // reset the next
  } else {
    new_entry->next = *head;
  }
  *head = new_entry; //update the head
}
```

Alternativně můžeme `push()` implementovat také jako `entry_t* push(int value, entry_t *head)`.

- Přidání prvku není závislé na počtu prvků v seznamu.

*Konstantní složitost operace `push()` –  $O(1)$ .*

## Spojový seznam – pop()

- Odebrání prvního prvku ze seznamu

Kdy použijeme `assert()` a kdy `myAssert()`?

```
int pop(entry_t **head)
{ // linked list must be non-empty
  assert(head != NULL && *head != NULL);
  entry_t *prev_head = *head; // save the current head
  int ret = prev_head->value; // retrieve data from the current head
  *head = prev_head->next; // set to NULL if the last item is popped
  free(prev_head); // release memory of the popped entry
  return ret;
}
```

Alternativně například také jako `int pop(entry_t *head)`, ale nenastaví `head` na `NULL` v případě vyjmutí posledního prvku.

- Odebrání prvku není závislé na počtu prvků v seznamu.

*Konstantní složitost operace `pop()` –  $O(1)$ .*

## Spojový seznam – size()

- Zjištění počtu prvků v seznamu vyžaduje projít seznam až k zarážce `NULL`.

Poslední položka je taková, pro kterou platí `next == NULL`, nebo je seznam prázdný a `head == NULL`.

- Proměnnou `cur` používáme jako „kurzor“ pro procházení seznamu.

```
int size(const entry_t *const head)
{ // const - we do not attempt to modify the list
  int counter = 0;
  const entry_t *cur = head;
  while (cur) { // or cur != NULL
    cur = cur->next;
    counter += 1;
  }
  return counter;
}
```

*Použijeme konstantní ukazatel na konstantní proměnnou, neboť seznam pouze procházíme a nemodifikujeme. Z hlavičky funkce je tak zřejmé, že vstupní strukturu ve funkci nemodifikujeme.*

- Procházíme kompletní seznam ( $n$  prvků), abychom spočítali počet prvků seznamu.

*Lineární složitost operace `size()` –  $O(n)$ .*

## Spojový seznam – back()

- Vrácení hodnoty posledního prvku ze seznamu – `back()`.

```
int back(const entry_t *const head)
{
    const entry_t *end = head;
    while (end && end->next) { // 1st test list is not empty
        end = end->next;
    }
    assert(end); //do not allow calling back on empty list
    return end->value;
}
```

*Kontrolou `assert()` vynucujeme, že při implementaci programu ladíme, že volání `back()` nebudeme provádět pro prázdný seznam. To musíme zajistit programově.*

- Musíme projít všechny prvky seznamu.

*Lineární složitost operace `back()` –  $O(n)$ .*

## Spojový seznam – procházení seznamu

- Procházení seznamu demonstrujeme na funkci `print()`.

```
void print(const entry_t *const head)
{
    const entry_t *cur = head; // set the cursor to head
    while (cur != NULL) {
        printf("%i%s", cur->value, cur->next ? " " : "\n");
        cur = cur->next; // move in the linked list
    }
}
```

- Použijeme konstantní ukazatel na konstantní proměnnou, neboť seznam pouze procházíme a nemodifikujeme. *Z hlavičky funkce je zřejmé, že vstupní strukturu nemodifikujeme.*
- Prvky seznamu tiskneme za sebou oddělené mezerou a poslední prvek je zakončen znakem nového řádku.

## Příklad – Spojový seznam celých čísel

```

entry_t *head;
head = NULL; // initialization is important

push(17, &head);
push(7, &head);
printf("List: ");
print(head);
push(5, &head);
printf("\nList size: %i\n", size(head));
printf("Last entry: %i\n\n", back(head));
printf("List: ");
print(head);
push(13, &head);
push(11, &head);
pop(&head);
printf("List:r");
print(head);
printf("\nPop until head is not empty\n");
while (head != NULL) {
    const int value = pop(&head);
    printf("Popped value %i\n", value);
}
printf("List size: %i\n", size(head));
printf("Last entry value %i\n", back(head));

```

```

clang -g demo-linked_list-int.c
        linked_list.c
./a.out
List: 7 17

List size: 3
Last entry: 17

List: 5 7 17
List: 13 5 7 17

Cleanup using pop until head is not
        empty
Popped value 13
Popped value 5
Popped value 7
Popped value 17
List size: 0

```

lec08/linked\_list-int.h

lec08/linked\_list-int.c

lec08/demo-linked\_list-int.c



## Spojový seznam – zrychlení operací `size()` and `back()`

- Operace `size()` a `back()` procházejí kompletní seznam.
- Operaci `size()` můžeme urychlit udržováním aktuálního počtu prvku v seznamu.
  - Zavedeme datovou položku `int counter`.
  - Počet prvků inkrementujeme při každém přidání prvku a dekrementujeme při každém odebrání prvku.
- Operaci `back()` můžeme urychlit proměnou odkazující na poslední prvek.
- Zavedeme strukturu pro vlastní spojový seznam s položkami `head`, `counter`, and `tail`.

```
typedef struct {  
    entry_t *head;  
    entry_t *tail;  
    int counter;  
} linked_list_t;
```

- V případě přidání prvku na začátek, aktualizujeme `tail` pouze pokud byl seznam doposud prázdný.
- Proměnnou `tail` aktualizujeme při přidání prvku na konec nebo vyjmutí posledního prvku.

## Spojový seznam – urychlený `size()`

- Samostatná struktura pro seznam.
- Položky `head` a `counter`.
- `head` je ukazatel na `entry_t`.
- Ve funkci `size()` předpokládáme validní odkaz na seznam.
- Proto voláme `assert(list)`.
- Přímá inicializace `linked_list_t linked_list = { NULL, 0 };`
- Do funkcí `push()` a `pop()` stačí předávat pouze ukazatel, proto použijeme proměnnou `list`  
`linked_list_t *list = &linked_list;`
- Pro urychlení funkce `size()` stačí inkrementovat a dekrementovat proměnnou `counter` ve funkcích `push()` a `pop()`.

```
typedef struct {  
    entry_t *head;  
    int counter;  
} linked_list_t;  
  
int size(const linked_list_t *list)  
{  
    assert(list);  
    return list->counter;  
}
```

```
void push(int data, linked_list_t *list)  
{  
    ...  
    list->counter += 1;  
}
```

```
int pop(linked_list_t *list)  
{  
    ...  
    list->counter -= 1;  
    return ret;  
}
```

## Spojový seznam – push() s odkazem na konec seznamu

```
void push(int value, linked_list_t *list)
{ // add new entry at front
  assert(list);
  entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(entry_t));
  new_entry->value = value; // set data; exit is called if myMalloc fails
  if (list->head) { // an entry already in the list
    new_entry->next = list->head;
  } else { //list is empty
    new_entry->next = NULL; // reset the next
    list->tail = new_entry; //1st entry is the tail
  }
  list->head = new_entry; //update the head
  list->counter += 1; // keep counter up to date
}
```

*Hodnotu ukazatele tail nastavujeme pouze pokud byl seznam prázdný, protože prvky přidáváme na začátek.*

## Spojový seznam – pop() s odkazem na konec seznamu

- Při volání musí být odkaz na spojový seznam platný (nikoliv `NULL`).
- `assert()` testujeme správnost volání, že jsme ve struktuře programu neudělali chybu. Po odladění můžeme test vypustit, např. `NDEBUG`.
- `myAssert()` testuje, že data jsou za běhu programu správně. Pokud ne, ukončujeme program a reportujeme.

*V našem konkrétním případě můžeme také zajistit programově použitím `assert()` a podmínit volání `pop()`, např. `if (!is_empty(list))`.*

```
int pop(linked_list_t *list)
{
    assert(list);
    myAssert(list->head, __LINE__, __FILE__); // non-empty list
    entry_t *prev_head = list->head; // save head
    list->head = prev_head->next;
    list->counter -= 1; // keep counter up to date
    int ret = prev_head->value;
    free(prev_head); // release the memory
    if (list->head == NULL) { // end has been popped
        list->tail = NULL;
    }
    return ret;
}
```

*Hodnotu proměnné `tail` nastavujeme pouze pokud byl odebrán poslední prvek, protože prvky odebíráme ze začátku.*

### myAssert()

```
#ifndef __MY_ASSERT_H__
#define __MY_ASSERT_H__

#include <stdio.h> //fprintf()
#include <stdlib.h> //exit() and malloc()

#define myAssert(x, line, file) \
    if (!(x)) { \
        fprintf(stderr, "my_assert fail, \
            line: %d, file %s\n", line, file);\
        exit(-1);\
    }

#endif
```

Výpis chyby s číslem řádku a jménem zdrojového souboru pro rychlejší nalezení kontextu a případnou opravu.

## Spojový seznam – `back()` s odkazem na konec seznamu

- Proměnná `tail` je buď `NULL` nebo odkazuje na poslední prvek seznamu.

```
int back(const linked_list_t *const list)
{ // const - we do not modify the linked list
  // we do not allow to call back on empty list that has to be
  // assured programmatically
  assert(list && list->tail);
  return list->tail->value;
}
```

- Udržováním hodnoty proměnné `tail` (ve funkcích `push()` a `pop()`) jsme snížili časovou náročnost operace `back()` z lineární složitosti na počtu prvků ( $n$ ) v seznamu  $O(n)$  na konstantní složitost  $O(1)$ .

## Spojový seznamu – pushEnd()

- Přidání prvku na konec seznamu.

```
void pushEnd(int value, linked_list_t *list)
{
    assert(list);
    entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(entry_t));
    new_entry->value = value; // set data
    new_entry->next = NULL; // set the next
    if (list->tail == NULL) { //adding the 1st entry
        list->head = list->tail = new_entry;
    } else {
        list->tail->next = new_entry; //update the current tail
        list->tail = new_entry;
    }
    list->counter += 1;
}
```

- Na asymptotické složitost metody přidání dalšího prvku (na konec seznamu) se nic nemění, je nezávislé na aktuálním počtu prvků v seznamu.

## Spojový seznamu – popEnd()

- Odebrání prvku z konce seznamu.

```
int popEnd(linked_list_t *list)
{
    assert(list && list->head);
    entry_t *end = list->tail; // save the end
    if (list->head == list->tail) { // the last entry is
        list->head = list->tail = NULL; // removed
    } else { // there is also penultimate entry
        entry_t *cur = list->head; // that needs to be
        while (cur->next != end) { // updated (its next
            cur = cur->next; // pointer to the next entry
        }
        list->tail = cur;
        list->tail ->next = NULL; //the tail does not have next
    }
    int ret = tail->value;
    free(end);
    list->counter -= 1;
    return ret;
}
```

*Složitost je  $O(n)$ , protože musíme aktualizovat předposlední prvek. Alternativně lze řešit obousměrným spojovým seznamem.*

## Příklad použití

- Příklad použití na seznam hodnot typu `int`.

```
#include "linked_list.h"

linked_list_t list = { NULL, NULL, 0 };
linked_list_t *lst = &list;
push(10, lst); push(5, lst); pushEnd(17, lst);
push(7, lst); pushEnd(21, lst);
print(lst);

printf("Pop 1st entry: %i\n", pop(lst));
printf("Lst: "); print(lst);

printf("Back of the list: %i\n", back(lst));
printf("Pop from the end: %i\n", popEnd(lst));
printf("Lst: "); print(lst);

free_list(lst); // cleanup!!!
```

- Výstup programu

```
clang linked_list.c demo-linked_list.c
    && ./a.out
7 5 10 17 21
Pop 1st entry: 7
Lst: 5 10 17 21
Back of the list: 21
Pop from the end: 21
Lst: 5 10 17
```

lec08/linked\_list.h

lec08/linked\_list.c

lec08/demo-linked\_list.c



## Spojový seznam – Vložení prvku do seznamu

- Vložení do seznamu:
  - na začátek – modifikujeme proměnnou **head** (funkce `push()`);
  - na konec – modifikujeme proměnnou posledního prvku a nastavujeme nový konec **tail** (funkce `pushEnd()`);
  - obecně – potřebujeme prvek (**entry**), za který chceme nový prvek (**new\_entry**) vložit.

```
entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(entry_t));  
new_entry->value = value; // nastaveni hodnoty  
new_entry->next = entry->next; //propojeni s nasledujicim  
entry->next = new_entry; //propojeni entry
```

- Do seznamu můžeme chtít prvek vložit na konkrétní pozici, tj. podle indexu v seznamu.

*Případně můžeme také požadovat vložení podle hodnoty prvku, tj. vložit před prvek s příslušnou hodnotou. Např. vložení prvku vždy před první prvek, který je větší vytvoříme uspořádaný seznam – realizujeme tak řazení vkládáním (insert sort).*

## Spojový seznam – insertAt()

- Vložení nového prvku na pozici *index* v seznamu.

```
void insertAt(int value, int index, linked_list_t *list)
```

```
{  
    assert(list); // list != NULL  
    if (index < 0) { return; } // only positive position  
    if (index == 0) { // handle the 1st position  
        push(value, list);  
        return;  
    }  
    entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(entry_t));  
    new_entry->value = value; // set data  
    entry_t *entry = getEntry(index - 1, list);  
    if (entry != NULL) { // entry can be NULL for the 1st  
        new_entry->next = entry->next; // entry (empty list)  
        entry->next = new_entry;  
    }  
    if (entry == list->tail) {  
        list->tail = new_entry; // update the tail  
    }  
    list->counter += 1;  
}
```

*Pro napojení spojového seznamu potřebuje položku **next**, proto hledáme prvek na pozici (*index - 1*)—getEntry().*

## Spojový seznam – `getEntry()`

- Nalezení prvku na pozici `index`.
- Pokud je `index` větší než počet prvků v poli, návrat posledního prvku.

```
static entry_t* getEntry(int index, const linked_list_t *list)
{ // here, we assume index >= 0
  entry_t *cur = list->head;
  int i = 0;
  while (i < index && cur != NULL && cur->next != NULL) {
    cur = cur->next;
    i += 1;
  }
  return cur; //return entry at the index or the last entry
}
```

*Pokud je seznam prázdný vrátí `NULL`, tj. `list->head == NULL`.*

- Funkci `getEntry()` chceme používat privátně pouze v rámci jednoho modulu (`linked_list.c`).
- Proto ji definujeme s modifikátorem `static`.

Viz `lec08/linked_list.c`

## Příklad vložení prvků do seznamu – insertAt()

### ■ Příklad vložení do seznam čísel

```
linked_list_t list = { NULL, NULL, 0 };
linked_list_t *lst = &list;

push(10, lst); push(5, lst); push(17, lst);
push(7, lst); push(21, lst);
print(lst);

insertAt(55, 2, lst);
print(lst);

insertAt(0, 0, lst);
print(lst);

insertAt(100, 10, lst);
print(lst);

free_list(lst); // cleanup!!!
```

### ■ Výstup programu

```
clang linked_list.c demo-insertat.c &&
./a.out
21 7 17 5 10
21 7 55 17 5 10
0 7 55 17 5 10
0 7 55 17 5 10 100
```

lec08/demo-insertat.c

## Spojový seznam – `getAt(int index)`

- Nalezení prvků v seznamu podle pozice v seznamu.
- V případě „adresace“ mimo rozsah seznamu vrátí `NULL`.

```
entry_t* getAt(int index, const linked_list_t *const list)
{
    if (index < 0 || list == NULL || list->head == NULL) {
        return NULL; // check the arguments first
    }
    entry_t* cur = list->head;
    int i = 0;
    while (i < index && cur != NULL && cur->next != NULL) {
        cur = cur->next;
        i++;
    }
    return (cur != NULL && i == index) ? cur : NULL;
}
```

*Složitost operace je v nejnepríznivějším případě  $O(n)$  (v případě pole je to  $O(1)$ ).*

## Příklad použití `getAt(int index)`

- Příklad vypsání obsahu seznamu funkcí `getAt()` v cyklu.

```
linked_list_t list = { NULL, NULL, 0 };
linked_list_t *lst = &list;

push(10, lst); push(5, lst); push(17, lst);
    push(7, lst); push(21, lst);
print(lst);
for (int i = 0; i < 7; ++i) {
    const entry_t* entry = getAt(i, lst);
    printf("Lst[%i]: ", i);
    (entry) ? printf("%2u\n", entry->value) :
    printf("NULL\n");
}

free_list(lst); // cleanup!!!
```

- Výstup programu

```
clang linked_list.c demo-getat.c
    && ./a.out
21 7 17 5 10
Lst[0]: 21
Lst[1]: 7
Lst[2]: 17
Lst[3]: 5
Lst[4]: 10
Lst[5]: NULL
Lst[6]: NULL
```

lec08/demo-getat.c

*V tomto případě v každém běhu cyklu je složitost funkce `getAt()`  $O(n)$  a výpis obsahu seznamu má složitost  $O(n^2)$ !*

## Spojový seznam – `removeAt(int index)`

- Odebrání prvku na pozici `int index` a navázání seznamu.
- Pokud `index > size - 1`, smaže poslední prvek, viz `getEntry()`.
- Pro navázání seznamu potřebujeme prvek na pozici `index - 1`.

```
void removeAt(int index, linked_list_t *list)
{ // check the arguments first
  if (index < 0 || list == NULL || list->head == NULL) { return; }
  if (index == 0) {
    pop(list);
  } else {
    entry_t *entry_prev = getEntry(index - 1, list);
    entry_t *entry = entry_prev->next;
    if (entry != NULL) { //handle connection
      entry_prev->next = entry_prev->next->next;
    }
    if (entry == list->tail) {
      list->tail = entry_prev;
    }
    free(entry);
    list->count -= 1;
  }
}
```

*Složitost v nejneprůznivějším případě  $O(n)$ , protože nejdříve musíme prvek najít.*

## Příklad použití `removeAt(int index)`

```
void removeAndPrint(int index, linked_list_t *lst)
{
    entry_t* e = getAt(index, lst);
    printf("Remove entry at %i (%i)\n", index,
           e ? e->value : -1);
    removeAt(index, lst);
    print(lst);
}

linked_list_t list = { NULL, NULL, 0 };
linked_list_t *lst = &list;
push(10, lst); push(5, lst); push(17, lst); push
(7, lst); push(21, lst);
print(lst);
removeAndPrint(3, lst);
removeAndPrint(3, lst);
removeAndPrint(0, lst);
free_list(lst); // cleanup!!!
```

### ■ Výstup programu

```
clang linked_list.c demo-removeat.c &&
./a.out
21 7 17 5 10
Remove entry at 3 (5)
21 7 17 10
Remove entry at 3 (10)
21 7 17
Remove entry at 0 (21)
7 17
```

lec08/demo-removeat.c



## Vyhledání prvku v seznamu podle obsahu – `indexOf()`

- Vrátí číslo pozice prvního výskytu prvku v seznamu.
- Pokud není prvek v seznamu nalezen vrátí funkce hodnotu `-1`.

```
int indexOf(int value, const linked_list_t *const list)
{
    int counter = 0;
    const entry_t *cur = list->head;
    bool found = false;
    while (cur && !found) {
        found = cur->value == value;
        cur = cur->next;
        counter += 1;
    }
    return found ? counter - 1 : -1;
}
```

## Příklad použití `indexOf()`

```
linked_list_t list = { NULL, NULL, 0 };
linked_list_t *lst = &list;

push(10, lst); push(5, lst); push(17, lst);
push(7, lst); push(21, lst);
print(lst);

int values[] = { 5, 17, 3 };
for (int i = 0; i < 3; ++i) {
    printf("Index of (%2i) is %2i\n",
           values[i],
           indexOf(values[i], lst)
    );
}

free_list(lst); // cleanup !!!
```

### ■ Výstup programu

```
clang linked_list.c demo-
indexof.c && ./a.out
21 7 17 5 10
Index of ( 5) is  3
Index of (17) is  2
Index of ( 3) is -1
```

lec08/demo-indexof.c

## Odebrání prvku ze seznamu podle jeho obsahu – `remove()`

- Podobně jako vyhledání prvku podle obsahu můžeme prvky podle obsahu odebrat.
- Můžeme implementovat přímo nebo s využitím již existujících funkcí `indexOf()` a `removeAt()`.
- Příklad implementace.

*Odebíráme všechny výskyty hodnoty `value` v seznamu.*

```
void remove(int value, linked_list_t *list) {  
    while ((idx = indexOf(value, list)) >= 0) {  
        removeAt(idx, list);  
    }  
}
```

*To co programátor/ka zpravidla řešení (má řešit), ve smyslu intelektuální náročnosti, není ani tak vlastní implementace, jako spíše návrh, jak se má funkce chovat, např. smazání prvního výskytu prvku vs. všech prvků s danou hodnotou. Implementace je do velká částí dovednost („řemeslo“), kreativní činnost je spíše návrh struktury programu, definování chování funkcí a definování jmen proměnných a funkcí (identifikátorů).*

## Příklad `indexOf()` pro spojový seznamu textových řetězců

- Porovnání hodnot textových řetězců—`strcmp()` – knihovna `<string.h>`.
- Je nutné zvolit přístup pro alokaci hodnot textových řetězců. Literály vs. proměnné.
- Příklad použití. V `lec08/linked_list-str.c` je zvolena **alokace paměti a kopírování hodnot**.

```
#include "linked_list-str.h"
linked_list_t list = { NULL }; // initialization is important
linked_list_t *lst = &list;
push("FEE", lst); push("CTU", lst); push("PRP", lst);
push("Lecture09", lst); print(lst);

char *values[] = { "PRP", "Fee" };
for (int i = 0; i < 2; ++i) {
    printf("Index of (%s) is %2i\n", values[i], indexOf(values[i],lst));
}
free_list(lst); // cleanup !!!
```

- Výstup programu.

```
clang linked_list-str.c demo-indexof-str.c && ./a.out
Lecture09 PRP CTU FEE
Index of (PRP) is 1
Index of (Fee) is -1
```

`lec08/demo-indexof-str.c`

## Spojový seznam s hodnotami typu textový řetězec

- Zajištění správné alokace a uvolnění paměti je v našem příkladě náročnější.
- V případě volání `pop()` je nutné následně paměť uvolnit.

*V C++ lze řešit například prostřednictvím „smart pointers“.*

```
/* WARNING printf("Popped value \"%s\"\n", pop(lst)); */  
/* Note, using this will cause memory leakage since we lost the address  
   value to free the memory!!! */
```

```
char *str = pop(lst);  
printf("Popped value \"%s\"\n", str);  
free(str); /* str must be deallocated */
```

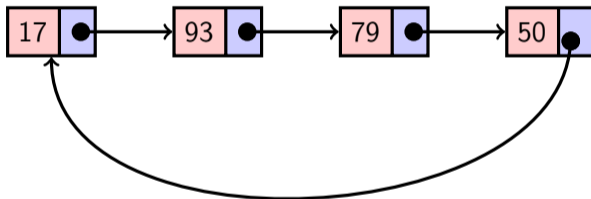
*Při práci s dynamickou pamětí a datovými strukturami je nutné zvolit vhodný model (např. kopírování dat) a zajistit správné uvolnění paměti.*

- Podobně jako textové řetězce se bude chovat ukazatel na nějakou komplexnější strukturu.
- **Projděte si přiložené příklady, zkuste si naimplementovat vlastní řešení a otestovat správnou alokaci a uvolnění paměti!**

`lec08/linked_list-str.h, lec08/linked_list-str.c, lec08/demo-indexof-str.c`

## Kruhový spojový seznam

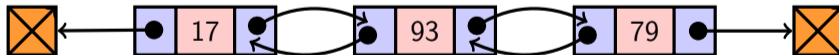
- Položka `next` posledního prvku může odkazovat na první prvek.
- Tak vznikne kruhový spojový seznam.



- Při přidání prvku na začátek je nutné aktualizovat hodnotu `next` posledního prvku.

# Obousměrný spojový seznam

- Každý prvek obsahuje odkaz na následující a předchozí položku v seznamu, položky `prev` a `next`.
- První prvek má nastavenou položku `prev` na hodnotu `NULL`.
- Poslední prvek má `next` nastavenou na `NULL`.
- Příklad obousměrného seznamu celých čísel.



## Příklad – Obousměrný spojový seznam

- Prvek listu má hodnotu (`value`) a dva odkazy (`prev` a `next`).
- Alokaci prvku provedeme funkcí s inicializací na základní hodnoty.

```
typedef struct dll_entry {  
    int value;  
    struct dll_entry *prev;  
    struct dll_entry *next;  
} dll_entry_t;
```

```
typedef struct {  
    dll_entry_t *head;  
    dll_entry_t *tail;  
} doubly_linked_list_t;
```

```
dll_entry_t* allocate_dll_entry(int value)  
{  
    dll_entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(  
        dll_entry_t));  
  
    new_entry->value = value;  
    new_entry->next = NULL;  
    new_entry->prev = NULL;  
  
    return new_entry;  
}
```

`lec08/doubly_linked_list.h`, `lec08/doubly_linked_list.c`



## Obousměrný spojový seznam – vložení prvku

- Vložení prvku před prvek `cur`:

1. Napojení vloženého prvku do seznamu, hodnoty `prev` a `next`;
2. Aktualizace `next` předchozí prvku k prvku `cur`;
3. Aktualizace `prev` proměnné prvku `cur`.

```
void insert_dll(int value, dll_entry_t *cur)
{
    assert(cur);
    dll_entry_t *new_entry = allocate_dll_entry(value);
    new_entry->next = cur;
    new_entry->prev = cur->prev;
    if (cur->prev != NULL) {
        cur->prev->next = new_entry;
    }
    cur->prev = new_entry;
}
```

`lec08/doubly_linked_list.c`

## Obousměrný spojový seznam – přidání prvku na začátek seznamu push()

```
void push_dll(int value, doubly_linked_list_t *list)
{
    assert(list);
    dll_entry_t *new_entry = allocate_dll_entry(value);
    if (list->head) { // an entry already in the list
        new_entry->next = list->head; // connect new -> head
        list->head->prev = new_entry; // connect new <- head
    } else { //list is empty
        list->tail = new_entry;
    }
    list->head = new_entry; //update the head
}
```

lec08/doubly\_linked\_list.c

## Obousměrný spojový seznam – tisk seznamu

```
void print_dll(const doubly_linked_list_t *list)
{
    if (list && list->head) {
        dll_entry_t *cur = list->head;
        while (cur) {
            printf("%i%s", cur->value, cur->next ? " " : "\n");
            cur = cur->next;
        }
    }
}

void printReverse(const doubly_linked_list_t *list)
{
    if (list && list->tail) {
        dll_entry_t *cur = list->tail;
        while (cur) {
            printf("%i%s", cur->value, cur->prev? " " : "\n");
            cur = cur->prev;
        }
    }
}
```

lec08/doubly\_linked\_list.c

## Příklad použití

```
#include "doubly_linked_list.h"

doubly_linked_list_t list = { NULL, NULL };
doubly_linked_list_t *lst = &list;

push_dll(17, lst); push_dll(93, lst);
push_dll(79, lst); push_dll(11, lst);

printf("Regular print: ");
print_dll(lst);

printf("Revert print: ");
printReverse(lst);

free_dll(lst);
```

### ■ Výstup programu

```
clang doubly_linked_list.c demo-
    double_linked_list.c
./a.out
```

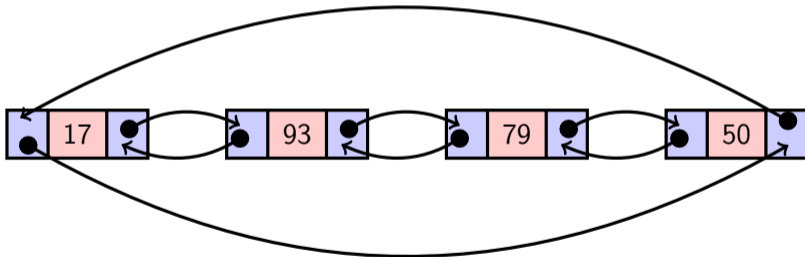
```
Regular print: 11 79 93 17
Revert print: 17 93 79 11
```

lec08/doubly\_linked\_list.c

lec08/demo-doubly\_linked\_list.c

## Kruhový obousměrný seznam

- Položka `next` posledního prvku odkazuje na první prvek.
- Položka `prev` prvního prvku odkazuje na poslední prvek.



## Část II

### Část 2 – Zadání 8. domácího úkolu (HW08)

## Zadání 8. domácího úkolu HW08

### Téma: **Kruhová fronta v poli**

Povinné zadání: **3b**; Volitelné zadání: **2b**; Bonusové zadání: **není**

- **Motivace:** Práce s pamětí a datovými strukturami.
- **Cíl:** Prohloubit si znalost paměťové reprezentace a dynamické alokace paměti s uvolňováním.
- **Zadání:** <https://cw.fel.cvut.cz/wiki/courses/b0b36prp/hw/hw08>
  - Implementace kruhové fronty s využitím předalokovaného pole pro vkládané prvky.
  - **Volitelné zadání** rozšiřuje úlohu o dynamické zvětšování a zmenšování kapacity fronty podle aktuálních požadavků na počet vkládaných/odebíraných prvků.
- **Termín odevzdání:** **10.12.2022, 23:59:59 PST.**

*PST – Pacific Standard Time*

# Shrnutí přednášky



## Diskutovaná témata

- Spojové struktury
  - Jednosměrný spojový seznam;
  - Obousměrný spojový seznam;
  - Kruhový obousměrný spojový seznam.
- Implementace operací `push()`, `pop()`, `size()`, `back()`, `pushEnd()`, `popEnd()`, `insertAt()`, `getEntry()`, `getAt()`, `removeAt()`, `indexOf()`.
- Použití spojového seznamu pro dynamicky alokované hodnoty prvků seznamu.
- Příště abstraktní datový typ (ADT).