

Spojivé struktury

Jan Faigl

Katedra počítačů
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 08

B0B36PRP – Procedurální programování

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)*
 - Velikost pole je určena při vytvoření pole
 - Velikost (maximální velikost) musí být známa v době vytváření
 - Změna velikost v podstatě není přímo možná
 - Nutné nové vytvoření (alokace paměti), resp. realloc*
 - Využití pouze malé části pole je mrháním paměti
 - V případě řazení pole přesouváme položky
 - Vložení prvku a především mazání prvku vyžaduje kopírování
 - Kopírování objemných prvků lze řešit ukazatelem, neřeší však problém přesunu*

Základní operace se spojivým seznamem

- Vložení prvku
 - Předchozí prvek odkazuje na nový prvek
 - *Nový prvek může odkazovat na předchozí prvek, který na něj odkazuje* *Tzv. obousměrný spojivý seznam*
- Odebrání prvku
 - Předchozí prvek aktualizuje hodnotu odkazu na následující prvek
 - Předchozí prvek tak nově odkazuje na následující hodnotu, na kterou odkazoval odebraný prvek
- Základní implementací spojivého seznamu je tzv. **jednosměrný spojivý seznam**


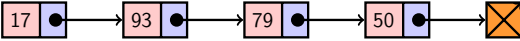

Přehled témat

- Část 1 – Spojivé struktury
 - Spojivé struktury
 - Spojivý seznam
 - Spojivý seznam s odkazem na konec seznamu
 - Vložení/odebrání prvku
 - Kruhový spojivý seznam
 - Obousměrný seznam
- Část 2 – Zadání 8. domácího úkolu (HW08)

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 různá:
 - Pole
 - Indexování je velmi rychlé
 - Vložení prvků může být pomalé (nová alokace a kopírování)
 - **Spojivé seznamy**

Jednosměrný spojivý seznam

- Příklad spojivého seznamu pro uložení číselných hodnot
 - 
- Přidání prvku 50 na konec seznamu
 - 
- Odebrání prvku 79
 - 
 1. Nejdříve sekvencně najdeme prvek s hodnotou 79
 2. Následně vyjmeme a napojíme prvek 93 na prvek 50

Hodnotu reference next prvku 93 nastavíme na hodnotu reference next odebraného prvku, tj. na prvek 50

Část I

Část 1 – Spojivé struktury

Spojivé seznamy

- Datová struktura realizující seznam dynamické délky
- Každý prvek seznamu obsahuje
 - Datovou část (hodnota proměnné / objekt)
 - Odkaz (ukazatel) na další prvek v seznamu
 - NULL v případě posledního prvku seznamu.*
- První prvek seznamu se zpravidla označuje jako **head** nebo **start**
 - Realizujeme jej jako ukazatel odkazující na první prvek seznamu*



Spojivý seznam

- Seznam tvoří struktura prvku
 - Vlastní data prvku
 - Odkaz (ukazatel) na další prvek
 - Vlastní seznam
 - 1. Ukazatel na první prvek **head**
 - 2. nebo vlastní struktura pro seznam
 - Vhodné pro uložení dalších informací, počet prvků, poslední prvek.*
 - Příklad tříd pro uložení spojivého seznamu celých čísel
 - Vlastní struktura, například

```
typedef struct entry {  
    int value;  
    struct entry *next;  
} entry_t;  
  
entry_t *head = NULL;  
  
typedef struct {  
    entry_t *head;  
    entry_t *end;  
    int count; // pocet prvku  
} linked_list_t;
```
- Pro jednoduchost prvky seznamu obsahují celé číslo.
 - Obecně mohou obsahovat libovolná data (ukazatel na strukturu).*

Přidání prvku – příklad

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

```
head = (entry_t*)malloc(sizeof(entry_t));
head->value = 10;
head->next = NULL;
```
- Další prvek (13) přidáme propojením s aktuálně 1. prvkem

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

Spojový seznam – size()

- Zjištění počtu prvků v seznamu vyžaduje projít seznam až k zarážce `NULL`, tj. položka `next` je `NULL`
- Proměnnou `cur` používáme jako „kurzor“ pro procházení seznamu

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

Použijeme ukazatel na konstantní proměnnou, neboť seznam pouze procházíme a nemodifikujeme. Z hlavičky funkce je tak zřejmé, že vstupní strukturu ve funkci nemodifikujeme.
- Pro zjištění počtu prvků v seznamu musíme projít kompletní seznam, tj. n položek *Lineární složitost operace size() – O(n)*

Příklad – jednoduchý spojový seznam

```
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-
simple_linked_list.c
simple_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/simple_linked_list.h
lec08/simple_linked_list.c
lec08/demo-simple_linked_list.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
  entry_t *new_entry = (entry_t*)malloc(sizeof(entry_t));
  assert(new_entry); // malloc may eventually fail
  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
}
```
- Přidání prvku není závislé na počtu prvků v seznamu *Konstantní složitost operace push() – O(1)*

Spojový seznam – back()

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

```
int back(const entry_t *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;
}
```
- Pro vrácení hodnoty posledního prvku v seznamu musíme projít všechny položky seznamu *Lineární složitost operace back() – O(n)*

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

- Operace `size()` a `back()` procházejí kompletní seznam
- Operaci `size()` můžeme urychlit pokud budeme udržovat aktuální počet položek v seznamu
 - Zavedeme datovou položku `int count`
 - Počet prvků inkrementujeme při každém přidání prvku a dekrementuje při každém odebrání prvku
- Operaci `back()` můžeme urychlit referenční proměnou odkazující na poslední prvek
- Zavedeme strukturu pro vlastní spojový seznam s položkami `head`, `count`, and `end`

```
typedef struct {
  entry_t *head;
  entry_t *end;
  int count;
} linked_list_t;
```

 - V případě přidání prvku na začátek, aktualizujeme pouze pokud byl seznam doposud prázdný
 - Aktualizujeme v případě přidání prvku na konec
 - Nebo při vyjmutí posledního prvku

Spojový seznam – pop()

- Odebrání prvního prvku ze seznamu

```
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;
  *head = prev_head->next;
  free(prev_head); // relase memory of the popped entry
  return ret;
}
```
- Odebrání prvku není závislé na počtu prvků v seznamu *Konstantní složitost operace pop() – O(1)*

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

Spojový seznam – urychlený size()

- Samostatná struktura pro seznam

```
typedef struct {
  entry_t *head;
  int count;
} linked_list_t;
```
- Položky `head` a `count`
- `head` je ukazatel na `entry_t`
- Ve funkci `size()` předpokládáme validní odkaz na seznam

```
int size(const linked_list_t *list)
{
  assert(list);
  return list->count;
}
```
- Proto voláme `assert(list)`
- Přímá inicializace `linked_list_t linked_list = { NULL, 0 };`
- Do funkce `push()` a `pop()` stačí předávat pouze ukazatel, proto pro zjednodušení použijeme proměnnou `list`

```
linked_list_t *list = &linked_list;
```
- Pro urychlení funkce `size()` stačí inkrementovat a dekrementovat proměnnou `count` ve funkcích `push()` a `pop()`

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

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

Spojový seznam – push() s odkazem na konec seznamu

```
void push(int value, linked_list_t *list)
{ // add new entry at front
  entry_t *new_entry = (entry_t*)malloc(sizeof(entry_t));
  assert(list && new_entry);
  new_entry->value = value; // set data
  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->end = new_entry; //1st entry is the end
  }
  list->head = new_entry; //update the head
  list->count += 1; // keep count up to date
}
```

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

Spojový seznam – pop() s odkazem na konec seznamu

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

Hodnotu referenční proměnné end nastavujeme pouze pokud byl odebrán poslední prvek, protože prvky odebíráme ze začátku.

Spojový seznamu – back() s odkazem na konec seznamu

- Proměnná end je buď NULL nebo odkazuje na poslední prvek seznamu

```
int back(const linked_list_t *list)
{
  // we do not allow to call back on empty list
  assert(list && list->end);
  return list->end->value;
}
```

- Udržováním hodnoty proměnné end jsme snížili časovou náročnost operace back() z lineární složitosti na počtu prvků 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 = (entry_t*)malloc(sizeof(entry_t));
  assert(list && new_entry);
  new_entry->value = value; // set data
  new_entry->next = NULL; // set the next
  if (list->end == NULL) { //adding the 1st entry
    list->head = list->end = new_entry;
  } else {
    list->end->next = new_entry; //update the current end
    list->end = new_entry;
  }
  list->count += 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->end; // save the end
  if (list->head == list->end) { // the last entry is
    list->head = list->end = 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->end = cur;
    list->end->next = NULL; //the end does not have next
  }
  int ret = end->value;
  free(end);
  list->count -= 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 *l1 = &list;
push(10, l1); push(5, l1); pushEnd(17, l1);
push(7, l1); pushEnd(21, l1);
print(l1);
```

```
printf("Pop 1st entry: %i\n", pop(l1));
printf("Lst: "); print(l1);
```

```
printf("Back of the list: %i\n", back(l1));
printf("Pop from the end: %i\n", popEnd(l1));
printf("Lst: "); print(l1);
```

```
free_list(l1); // 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                                lec08/linked_list.h
Back of the list: 21
Pop from the end: 21                            lec08/linked_list.c
Lst: 5 10 17                                    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 end (funkce pushEnd())
- obecně – potřebujeme prvek (entry), za který chceme nový prvek (new_entry) vložit

```
entry_t *new_entry = (entry_t*)malloc(sizeof(entry_t));
new_entry->value = value; // nastavení hodnoty
new_entry->next = entry->next; //propojení s nasledujícím
entry->next = new_entry; //propojení entry
```

- Do seznamu můžeme chtít prvek vložit na příslušné pořadí, tj. podle indexu v seznamu

Případně můžeme také požadovat vložení podle hodnoty prvku, tj. vložit před prvek s příslušnou hodnotou.

Spojový seznam – insertAt()

- Vložení nového prvku na pozici index v seznamu

```
void insertAt(int value, int index, linked_list_t *list)
{
  if (index < 0) { return; } // only positive position
  if (index == 0) { // handle the 1st position
    push(value, list);
    return;
  }
  entry_t *new_entry = (entry_t*)malloc(sizeof(entry_t));
  assert(list && new_entry);
  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->end) {
    list->end = new_entry; // update end
  }
  list->count += 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 vyšší 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.

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

Viz lec08/linked_list.c

Příklad vložení prvků do seznamu – insertAt()

- Příklad vložení do seznamu 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 *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 nejnepriznivějším 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 seznamu – removeAt(int index)

- Odebrání prvku na pozici int index a navážeme seznam
- 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->end) {
            list->end = entry_prev;
        }
        free(entry);
        list->count -- 1;
    }
}
```

Složitost v nejnepriznivějším případě $O(n)$ (nejdříve musíme najít prvek).

Příklad použití removeAt(int index)

```
void removeAndPrint(int index, linked_list_t *list)
{
    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 *list)
{
    int count = 0;
    const entry_t *cur = list->head;
    bool found = false;
    while (cur && !found) {
        found = cur->value == value;
        cur = cur->next;
        count += 1;
    }
    return found ? count - 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 obsah

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

```
void remove(int value, linked_list_t *list) {
    int idx = indexOf(value, list);
    while(idx != -1) {
        removeAt(idx, list);
        idx = indexOf(value);
    }
}
```

Odebíráme všechny výskyt hodnoty value v seznamu.

Příklad indexOf() pro spojový seznamu textových řetězců

- Porovnání hodnot textových řetězců—strcmp()
- Je nutné zvolit přístup pro alokaci hodnot textových řetězců

V lec08/linked_list-str.c je zvolena alokace paměti a kopírování hodnoty

- Příklad použití

```
#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("Lecture07", 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
Lecture07 PRP CTU FEE
Index of (PRP) is 1
Index of (Fee) is -1
```

lec08/demo-indexof-str.c

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

Zadání 8. domácího úkolu HW08

-
- Termín odevzdání: 17.12.2016, 23:59:59 AoE
AoE – Anywhere on Earth

Shrnutí přednášky

Diskutovaná témata

- Spojivé 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: **Stromy.**