Katedra informatiky
Přírodovědecká fakulta
Univerzita Palackého v Olomouci

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Demonstrace práce s datovými strukturami

2018

Patrik Becher

Vedoucí práce: Mgr. Tomáš Kühr, Ph.D.

Studijní obor: Aplikovaná informatika, prezenční forma

Bibliografické údaje

Autor:	Patrik Becher
Název práce:	Demonstrace práce s datovými strukturami
Typ práce:	bakalářská práce
Pracoviště:	Katedra informatiky, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci
Rok obhajoby:	2018
Studijní obor:	Aplikovaná informatika, prezenční forma
Vedoucí práce:	Mgr. Tomáš Kühr, Ph.D.
Počet stran:	57
Přílohy:	1 CD/DVD
Jazyk práce:	český

Bibliograhic info

Author:	Patrik Becher
Title:	Data Structure Demonstration
Thesis type:	bachelor thesis
Department:	Department of Computer Science, Faculty of Science, Palacký University Olomouc
Year of defense:	2018
Study field:	Applied Computer Science, full-time form
Supervisor:	Mgr. Tomáš Kühr, Ph.D.
Page count:	57
Supplements:	1 CD/DVD
Thesis language:	Czech

Anotace

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit nástroj pro podporu výuky algoritmizace, konkrétně práce se základními stromovými datovými strukturami (binární vyhledávací stromy, AVL stromy, červeno-černé stromy). Výsledná aplikace podporuje vizualizaci vybraných datových struktur, včetně názorné demonstrace běžně prováděných operací s těmito datovými strukturami se souběžným zobrazením pseudokódu prováděné operace.

Synopsis

Klíčová slova: Binární vyhledávací strom, Binární strom, AVL strom, Červeno-černý strom

Keywords: Binary search tree, Binary tree, AVL tree, Red-black tree

Rád bych poděkoval panu Mgr. Tomáši Kührovi Ph.D. za vedení této bakalářské práce a panu RNDr. Arnoštu Večerkovi za odbornou pomoc a poskytnuté materiály k práci. Dále bych chtěl poděkoval mé rodině a přítelkyni za podporu při tvorbě.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou práci včetně příloh vypracoval/a samostatně a za použití pouze zdrojů citovaných v textu práce a uvedených v seznamu literatury.

datum odevzdání práce podpis autora

Obsah

Seznam obrázků

Seznam zdrojových kódů

1 Úvod

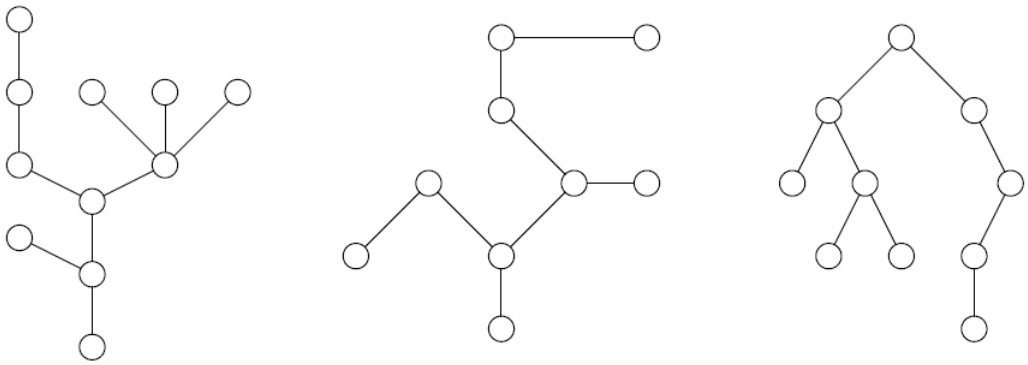
Tato aplikace vznikla za účelem výuky základních binárních stromů. Obsahuje podporu pro *Binární vyhledávací*, *AVL* a *Červenočerné stromy*. Program pomocí animací zobrazuje operace: *Vyhledávání*, *Vkládání* a *Odebírání* prvků ze stromů. Souběžně s animací zobrazuje stručný pseudokód aktuálně prováděné operace. Dále umožňuje *Opakovat poslední operaci* a *Generování náhodných stromů*.

Text samotné práce se dělí na tři části: *Teoretickou část* – zabývá se teorií vybraných stromů, *programovací část* – popisuje architekturu a samotnou implementaci programu, a *část s uživatelskou příručkou* – zde je vysvětleno uživatelské prostředí a funkcionalita.

2 Stromy

V kapitole jsou vysvětleny základní pojmy, které jsou nezbytné k pochopení vlastností *stromů* obsažených v aplikaci. V podkapitolách jsou osvětleny principy pro tvorbu a následnou práci s konkrétními *binárními vyhledávacími stromy*. Využitím těchto principů byl naprogramován tento výukový nástroj.

Definice 1 (Strom)
Strom je neorientovaný [1] souvislý [2] graf bez kružnic [3] [1].



Obrázek 1: Příklady neorientovaných stromů

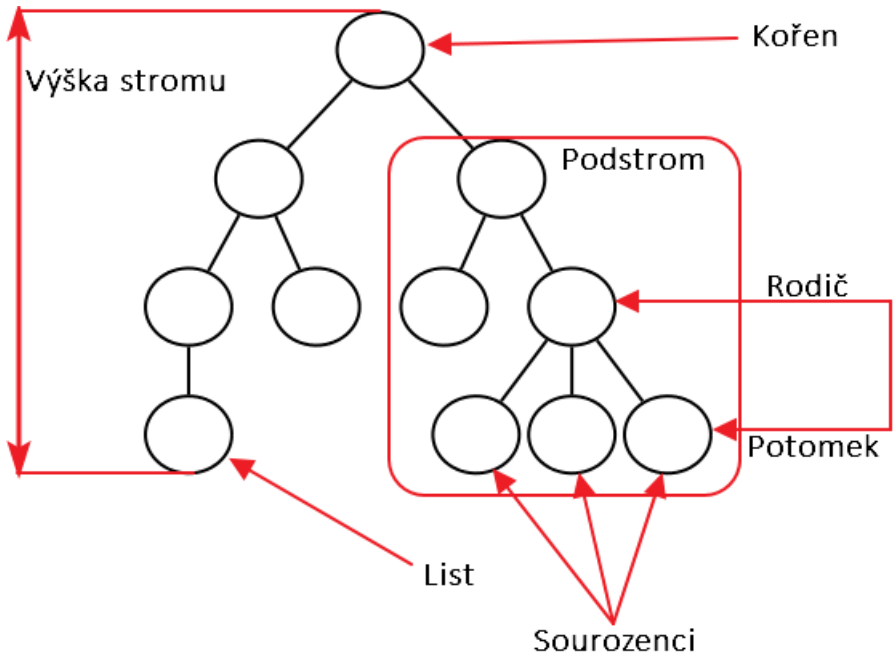
Strom je datová struktura, která představuje stromovou strukturu propojených *uzlů* [4]. Uzly jsou mezi sebou vzájemně spojeny pomocí *hran* [5]. Strom složený z uzlů U má $|U - 1|$ hran.

Definice 2 (Kořenový strom)
Kořenový strom je strom, ve kterém je vybrán jeden vrchol (kořen). Může to být kterýkoliv vrchol. Bývá to ale vrchol, který je v nějakém smyslu na vrcholu hierarchie objektů, která je stromem reprezentována. [1]

[1] Mezi každými dvěma vrcholy existuje právě jedna cesta.
[2] Vynecháním libovolné hrany vznikne nesouvislý graf.
[3] Přidáním jakékoli hrany vznikne graf s kružnicí.
[4] Prvek obsahující hodnotu.
[5] Představuje cestu mezi spojenými uzly.

Důležité pojmy:

- **Uzel** – Jednoduše jakýkoliv prvek stromu.
- **Kořen** – Jeden konkrétní uzel, který se nachází na vrcholu stromu. Pouze tento uzel nemá *rodiče*.
- **Potomek, následník** – Uzel, který je hranou přímo připojen k jinému uzlu, cestou od kořene.
- **Rodič, předchůdce** – Uzel, který má alespoň jednoho potomka.
- **Sourozenci** – Skupina uzlů, které mají stejného rodiče.
- **Podstrom** – Část stromu, která je úplným stromem s tím, že kořen tohoto podstromu má svého rodiče.
- **Koncový uzel, list** – Uzel bez potomků.
- **Výška stromu** – Nejdelší délka cesty od kořene k uzlu.



Obrázek 2: Popis struktury stromu

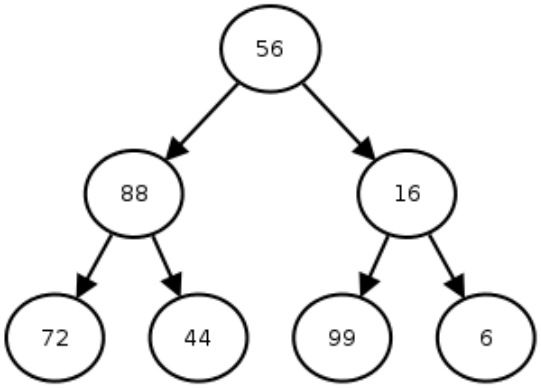
Definice 3 (m-ární stromy)
Kořenový strom se nazývá *m-ární*, právě když každý jeho vrchol má nejvýše m potomků. 2-ární strom se nazývá binární. Kořenový strom se nazývá úplný *m-ární*, právě když každý jeho vrchol nemá buď žádného nebo má právě m potomků.[2]

2.1 Binární strom

Definice 4 (Binární strom)
Binární strom je typ kořenových stromů, ve kterém každý obsažený uzel má maximálně 2 potomky.

Každý uzel obsahuje vlastnosti:

- **Klíč** – Hodnota uložená v uzlu.
- **Ukazatel na levého potomka**
- **Ukazatel na pravého potomka**
- **Ukazatel na jednoho rodiče** – Tento ukazatel není povinný.



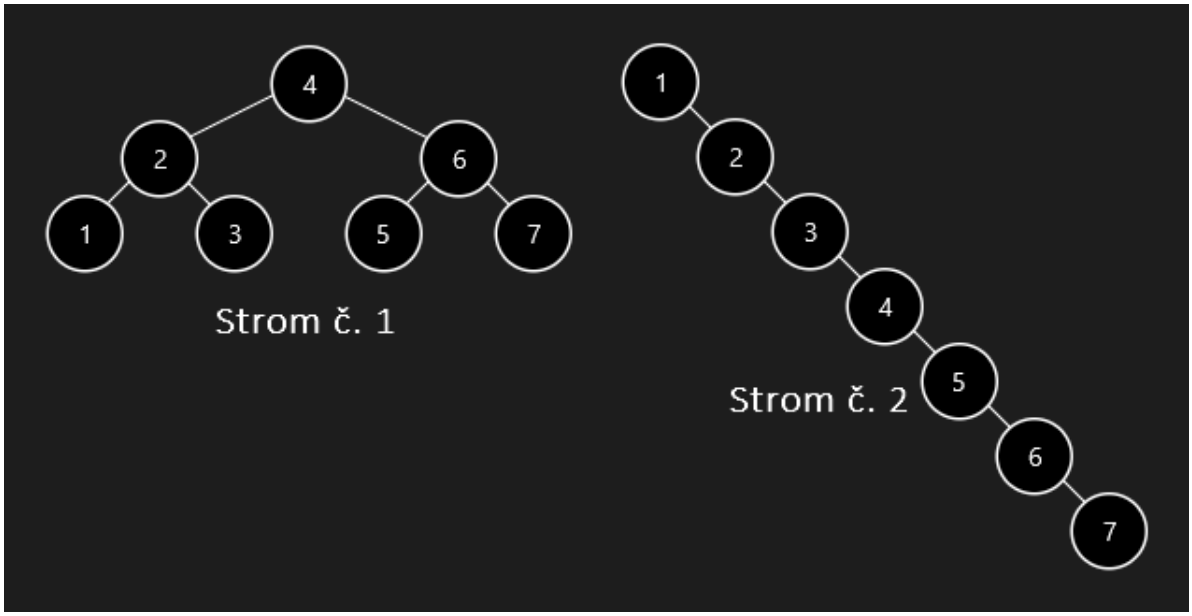
Obrázek 3: Příklad zobrazení binárního stromu

2.2 Binární vyhledávací strom

Binární *vyhledávací* strom (zkratka BVS) je speciální typ binárního stromu, kde platí následující:

- **Každý *pravý* potomek P rodiče R má vyšší hodnotu h než jeho rodič.** Platí tedy: $P.h > R.h \Rightarrow$ Pravý podstrom uzlu R obsahuje pouze uzly, které mají vyšší hodnotu než uzel R.
- **Každý *levý* potomek L rodiče R má nižší hodnotu h než jeho rodič.** Platí tedy: $P.h > L.h \Rightarrow$ Levý podstrom uzlu R obsahuje pouze uzly, které mají nižší hodnotu než uzel R.
- **Ve stromě se nenachází dva uzly se stejnou hodnotou.**

Toto uspořádání uzlů v BVS usnadňuje vyhledávání. Operace nad BVS stromem s výškou h mají časovou složitost $\theta(h)$. V nejhorším případě může mít BVS výšku rovnu n - 1, kde n je počet uzlů. Oba případy jsou zobrazeny na obrázku 4.



Obrázek 4: BVS - stejné hodnoty, ale rozdílná výška

2.2.1 Vyhledávání

Operace *vyhledávání* patří k nejčastěji používané operaci s BVS. Při *vyhledávání* je potřeba zadat hodnotu x, kterou chceme vyhledat. Postupně dochází k porovnávání hodnot uzlů s x. Výsledkem vyhledávání je buď uzel, který obsahuje hodnotu x nebo takový uzel neexistuje.

Přesný postup vyhledávání:

1. **krok** – počáteční
   Na začátku vyhledávání je třeba určit aktuální uzel, který označíme u. Hledanou hodnotu označíme x.
   V tomto kroku u bude kořen stromu, pokud strom nemá kořen, hodnota x je nenalezena a tím vyhledávání končí.

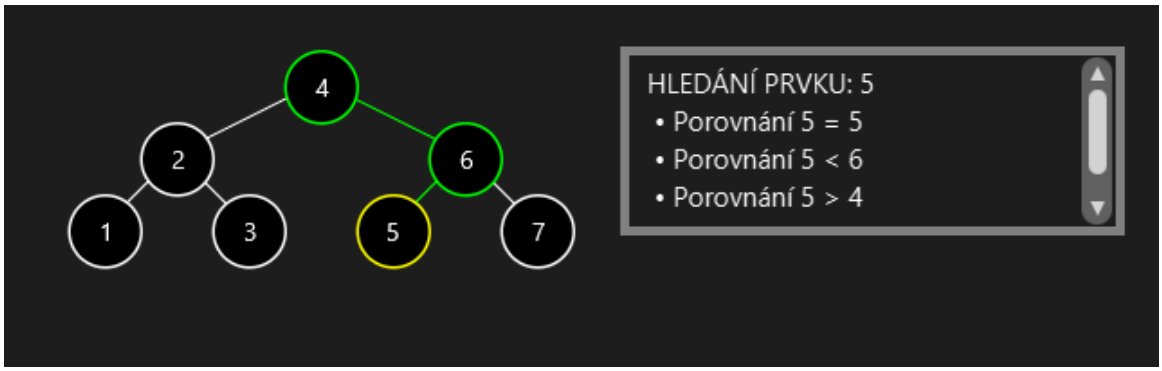
2. **krok** – průběžný
   Zde dochází k porovnávání x a hodnoty aktuálního uzlu u. Hodnotu u označíme $u.h$.
   Pokud je u prázdný, vyhledávání končí neúspěchem.

   Při porovnávání mohou nastat tyto možnosti:

   - $x > u.h$
     V tomto případě jako u nastavíme pravého potomka u. A znovu provedeme 2. krok.

- $x < u.h$
  V tomto případě jako u nastavíme levého potomka u. A znovu provedeme 2. krok.
- $x = u.h$
  Hledaná hodnota x byla nalezena v u. Vyhledávání tedy končí.

Na obrázku 5 je zvýrazněna cesta průchodů stromem při vyhledávání uzlu s hodnotou 5. Na obrázku je i zaznamenána historie porovnávání.



Obrázek 5: BVS - postup vyhledávání hodnoty 5

Zdrojový kód vyhledávání v jazyku Java:

```
1  Node search(int value, Node node) { //value je hledaná hodnota, node
       je při prvním volání kořen
2    if (node == null) {
3      return null; //uzel nebyl nalezen
4    }
5
6    if (value > node.getValue()) {//pokud je hledaná hodnota vyšší než
         má aktuální uzel
7      search(value, node.getRight());//nastavím uzel na pravého potomka
8    } else if (value < node.getValue()) { //pokud je hledaná hodnota
       vyšší než má aktuální uzel
9      search(value, node.getLeft()); //nastavím uzel na levého potomka
10   } else { //pokud není vyšší ani nižší, tak se musí rovnat
11     return node; //vrátím nalezený uzel
12   }
13 }
```

Zdrojový kód 1: search - funkce vyhledávání v BVS

2.2.2 Vkládání

Při *vkládání* zadané hodnoty x je nejprve nutné prohledat strom, jestli se zde x již nenachází. Pokud je nalezen uzel s hodnotou x, je výsledkem operace nalezený uzel. V případě, že daný strom tento uzel neobsahuje, je jako potomek posledního prohledávaného uzlu vložen nový uzel s hodnotou x.

Přesný postup vkládání:

1. **krok** – počáteční
   Na začátku vkládání je třeba určit aktuální uzel, který označíme u. Vkládanou hodnotu označíme x.
   V tomto kroku u bude kořen stromu. Pokud strom nemá kořen, vytvoříme nový uzel s hodnotou x a ten vložíme do stromu. Uzel se stane kořenem stromu, čímž vkládání končí.

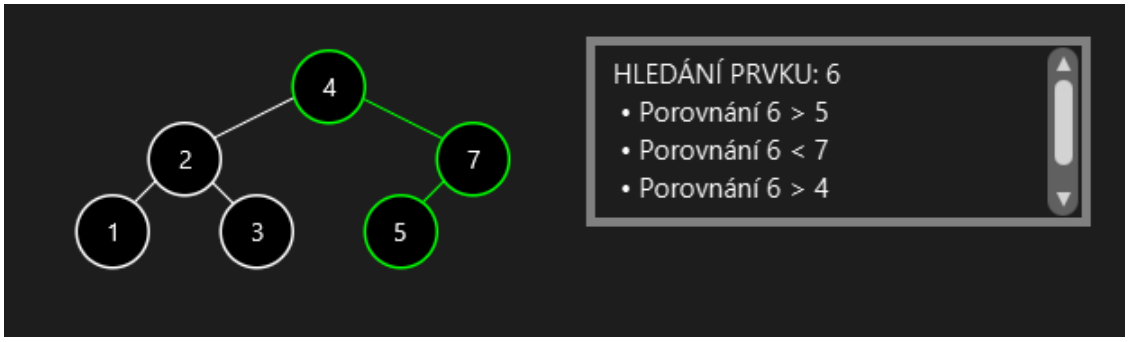
2. **krok** – vyhledávání, vkládání
   Před vkládáním je nejprve nutno ověřit, zda se ve stromu nenachází uzel s hodnotou x.

   Vyhledávání může dopadnout těmito způsoby:

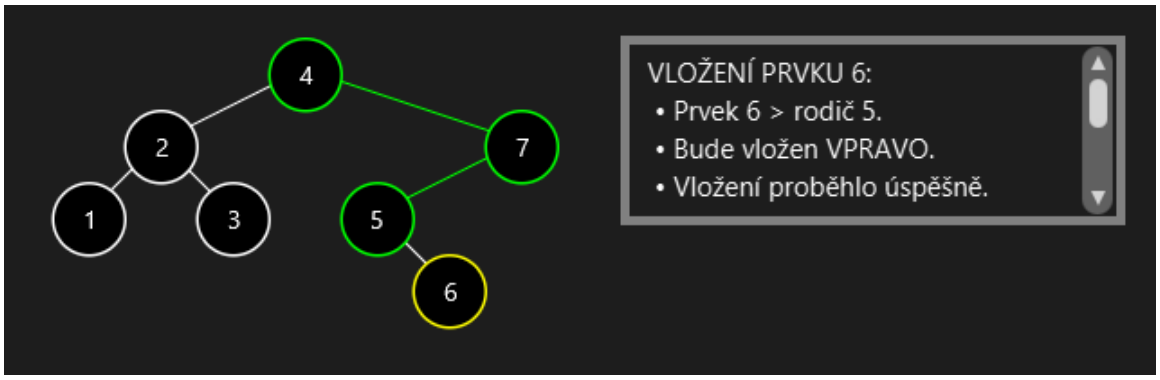
   - Prvek byl nalezen.
     Pokud byl uzel s hodnotou x nalezen, vkládání končí neúspěchem.
   - Prvek nebyl nalezen, přičemž platí $x > u.h$[6].
     Vytvoříme nový uzel s hodnotou x a vložíme jako pravého potomka u[7].
   - Prvek nebyl nalezen, přičemž platí $x < u.h$[6].
     Vytvoříme nový uzel s hodnotou x a vložíme jako levého potomka u[7].

Na obrázku 6 je zvýrazněna cesta průchodů stromem při vyhledávání uzlu s hodnotou 6. Samotné vložení je na obrázku 7.

[6] Hodnota posledního navštíveného uzlu při hledání.
[7] Poslední navštívený uzel při hledání.



Obrázek 6: BVS - postup vkládání hodnoty 6 – hledání



Obrázek 7: BVS - postup vkládání hodnoty 6 – vložení

Zdrojový kód vkládání v jazyku Java:

Před samotnou funkcí `insert` je třeba vytvořit třídu `Result`, která bude dále použita:

```
Class Result() {
  private Node node; //poslední navštívený uzel (hledaný/rodič)
  private boolean isFind; //atribut pro určení zda byl uzel nalezen

  public Result(Node node, boolean isFind) { //konstruktor
    ...
  }
  ...
}
```

Zdrojový kód 2: Result - třída pro reprezentaci výsledku

Dále je potřeba trochu poupravit již známou funkci `search` 1:

```
1  Result search(int value, Node node) { //value je hledaná hodnota,
       node je při prvním volání kořen
2    if (value > node.getValue()) {
3      if (node.getRight() != null) {
4        search(value, node.getRight()); //pokud má pravého potomka
5      } else {
6        return new Result(node, false); //pokud nemá pravého potomka,
             node = rodič vkládaného
7      }
8    } else if (value < node.getValue()) {
9      if (node.getLeft() != null) {
10       search(value, node.getLeft()); //pokud má levého potomka
11     } else {
12       return new Result(node, false); //pokud nemá levého potomka,
             node = rodič vkládaného
13     }
14   } else {
15     return new Result(node, true);
16   }
17 }
```

Zdrojový kód 3: search - úprava funkce vyhledávání s použitím Result

Nyní funkce `insert`:

```
1  Node insert(int value) {
2    Result result = search(value); //nejprve vyhledáme value
3    if (result.isFind()) { //pokud byl uzel s danou hodnotou nalezen
4      return result.getNode();
5    } else { //dále vkládáme nově vytvořený uzel:
6      if (value > result.getNode().getValue()) {
7        result.getNode().setRight(new Node(value));//bude pravý potomek
8      } else {
9        result.getNode().setLeft(new Node(value));//bude levý potomek
10     }
11   }
12   return null;
```

Zdrojový kód 4: insert - funkce vkládání v BVS

2.2.3 Odebírání

Při *odebírání* zadané hodnoty x je stejně jako u vkládání nejprve nutné prohledat strom, zda se odebíraný uzel s hodnotou x ve stromě nachází. Pokud je uzel nalezen, je následně smazán a struktura stromu případně upravena.

Přesný postup odebírání:

1. **krok** – počáteční
   Na začátku odebírání je třeba určit aktuální uzel, který označíme u. Odebíranou hodnotu označíme x.
   V tomto kroku u bude kořen stromu. Pokud strom nemá kořen odebírání končí, uzel s hodnotou x nebyl nalezen.

2. **krok** – vyhledávání
   Před odebíráním je nejprve nutno uzel s hodnotou x vyhledat.

   Vyhledávání může dopadnout těmito způsoby:

   - Prvek nebyl nalezen.
     Pokud se uzel s hodnotou x ve stromě nenachází, odebírání končí neúspěchem.
   - Prvek byl nalezen.
     Nyní můžeme nalezený uzel u odebrat.

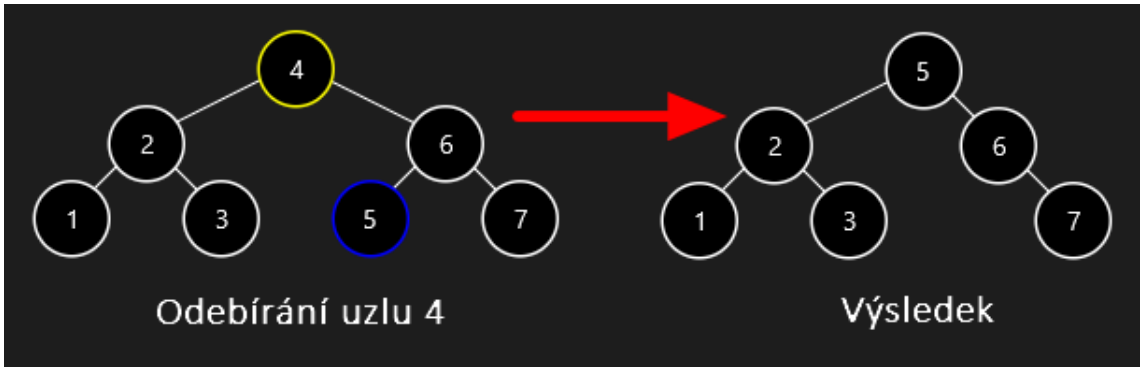
3. **krok** – odebírání

   Odebírání u má tyto možnosti:

   - Pokud u je list[8].
     List u může být odebrán.
   - u má jednoho potomka.
     u bude nahrazen podstromem potomka.
   - u má dva potomky.
     - u bude nahrazen *nejlevějším* prvkem z *pravého* podstromu.
     - u bude nahrazen *nejpravějším* prvkem z *levého* podstromu.

V následujícím obrázku 8 je ukázka mazání uzlu s hodnotou 4, který je následně nahrazen uzlem s hodnotou 5, který je *nejlevější* prvek z *pravého* podstromu.

[8] Nemá žádné potomky.



Obrázek 8: BVS - postup odebírání hodnoty 4

Zdrojový kód[9] odebírání v jazyku Java:

[9]Tento kód je pouze zjednodušená implementace k lepšímu pochopení odebírání.

```
1  boolean delete(int value) {
2    Node removeNode = result.getNode();
3    Node helpNode; //pomocná proměnná
4
5    Result result = search(value); //vyhledám hodnotu
6
7    if (!result.isFind()) { //pokud ho nenajdu
8      return false;
9    }
10
11   if ((removedNode.getLeft() != null) && (removedNode.getRight() !=
         null)) { //Pokud má dva potomky
12     helpNode = removeNode.getRight(); //dosadím pravého potomka
13
14     while (helpNode.getLeft() != null) { //a hledám nejlevějšího
15       helpNode = helpNode.getLeft();
16     }
17
18     removeNode.setNode(helpNode);
19   } else if (removedNode.getLeft() != null) { //pouze levý potomek
20     removeNode.setNode(removedNode.getLeft());
21   } else if (removedNode.getRight() != null) { //pouze pravý potomek
22     removeNode.setNode(removedNode.getRight());
23   } else { //pokud je to list
24     removeNode.delete(); //odstraním list ze stromu
25   }
26
27   return true;
28 }
```

Zdrojový kód 5: delete - funkce pro odebírání v BVS

2.3 AVL strom

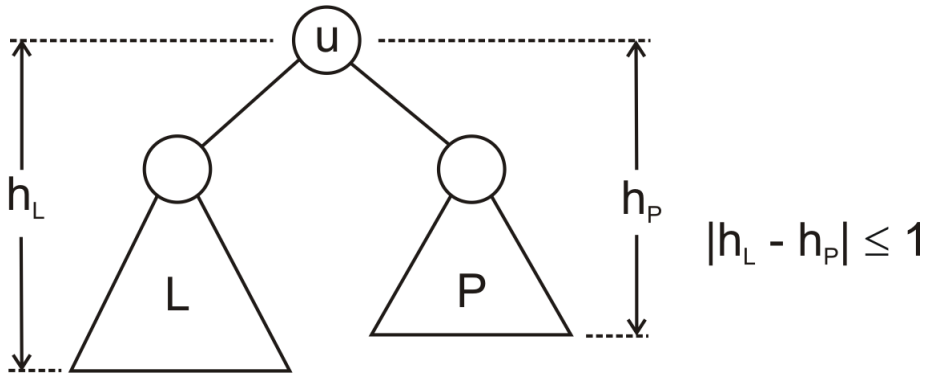
Určitým způsobem by se dalo tvrdit, že *AVL strom* je binární vyhledávací strom, který má ale jednu zásadní odlišnost. Složitost všech operací u BVS je závislá na výšce stromu, je tedy žádoucí udržovat výšku stromu co nejnižší. *AVL strom* je tedy vyvážený binární vyhledávací strom.

Definice 5 (Vyvážený strom)
Strom je vyvážený tehdy a jen tehdy, je-li rozdíl výšek každého uzlu nejvýše 1.[6][4]

Kvůli udržování vyváženosti stromu mají operace *vkládání* a *odebírání* složitost $\theta(log(n))$.

V následujícím obrázku 9 je předchozí definice o vyváženém stromu názorně vysvětlena. Nejprve je třeba zavést pojmy:

- u – aktuální uzel.
- L – levý podstrom u.
- P – pravý podstrom u.
- h_L – výška levého podstromu.
- h_P – výška pravého podstromu.

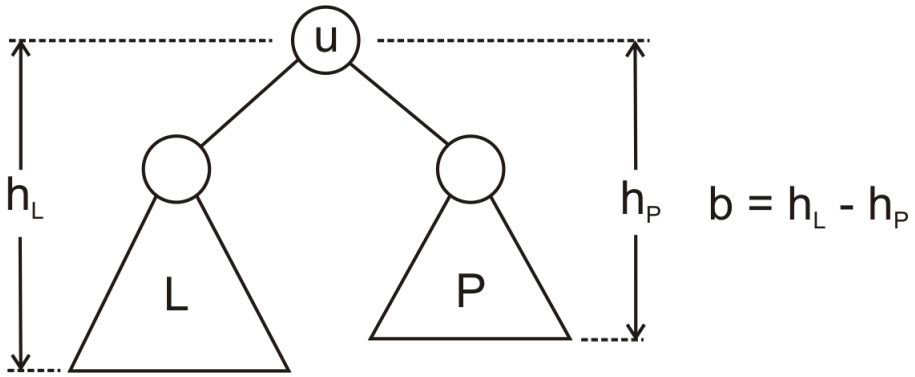


Obrázek 9: Vlastnosti vyváženého stromu

Faktor vyvážení

Pro kontrolu dodržení pravidla o vyvážení je třeba pro každý uzel zavést novou vlastnost *faktor vyvážení uzlu*. Tuto vlastnost budeme značit b (anglicky balance). b obsahuje informaci o aktuálním vyvážení daného podstromu.

Nabývá hodnot <-2, 2>, přičemž uzel je vyvážený pokud jeho faktor b je 1, 0 nebo -1. Při operaci přidávání nebo odebírání může být b 2 nebo -2, pak je ale nutné provést transformaci, která dosáhne vyvážení daného uzlu.

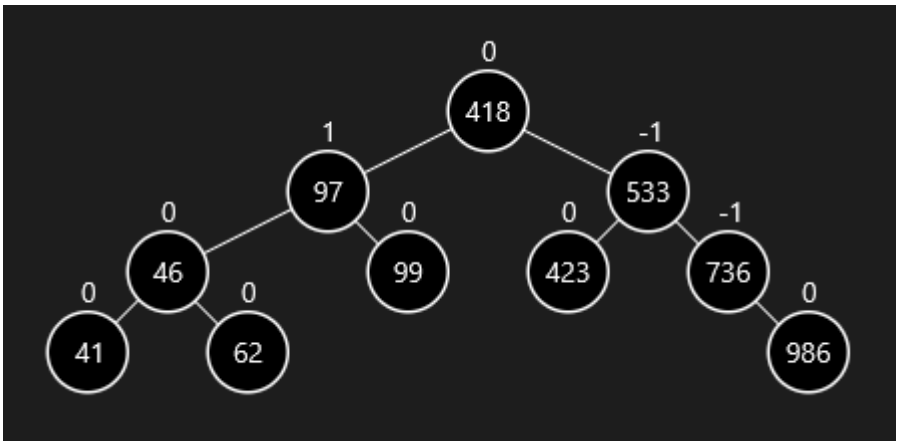


Obrázek 10: Výpočet faktoru vyvážení pro uzel u

Zdrojový kód rekurzivního výpočtu faktoru v jazyku Java:

```
1  int computeFactor() {
2    int lHeight = 0; //výška levého podstromu
3    int rHeight = 0; //výška pravého podstromu
4
5    if (left != null) { //pokud má levý podstrom
6      lHeight = left.computeFactor();
7    }
8
9    if (right != null) { //pokud má pravý podstrom
10     rHeight = right.computeFactor();
11   }
12
13   factor = lHeight - rHeight;
14
15   return Math.max(rHeight, lHeight) + 1;
16 }
```

Zdrojový kód 6: computeFactor - funkce pro výpočet faktoru vyvážení v AVL stromu



Obrázek 11: Ukázka vyváženého AVL stromu

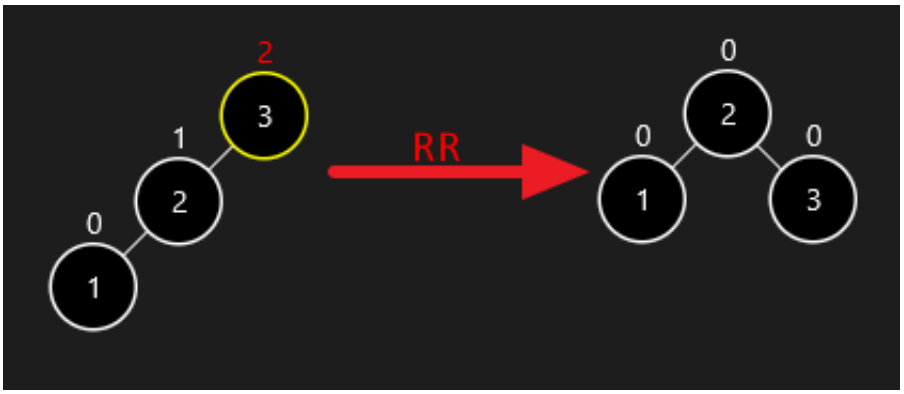
Každý uzel ALV stromu obsahuje tyto vlastnosti:

- **Klíč** – Hodnota uložená v uzlu.
- **Faktor vyvážení** – Faktor vyvážení daného uzlu.
- **Ukazatel na levého potomka**
- **Ukazatel na pravého potomka**
- **Ukazatel na jednoho rodiče**

2.3.1 Rotace

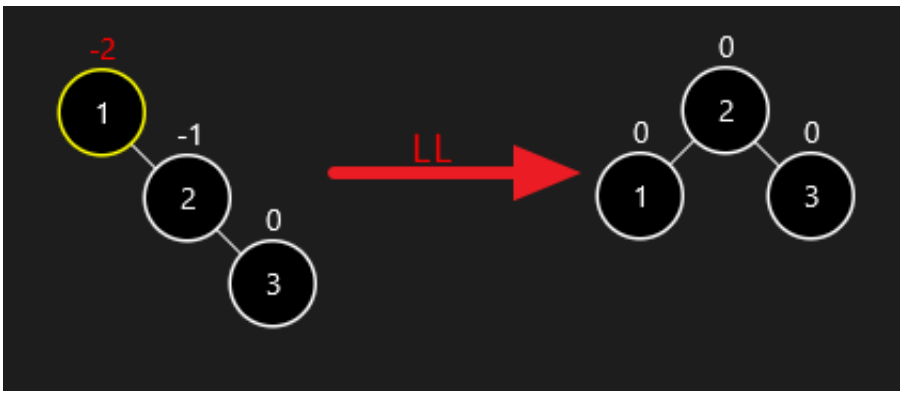
K obnově vyváženosti uzlů se používají *rotace*. *Rotace* pouze změní ukazatele uzlů v nevyvážené části stromu, aby došlo k opětovnému vyvážení. V AVL stromu se k vyvažování podle typu nevyvážené části stromu používají tyto rotace:

Jednoduchá rotace RR
Nevyvážený uzel má $b = 2$, jeho *levý potomek* má $b = 0$ nebo $b = 1$.



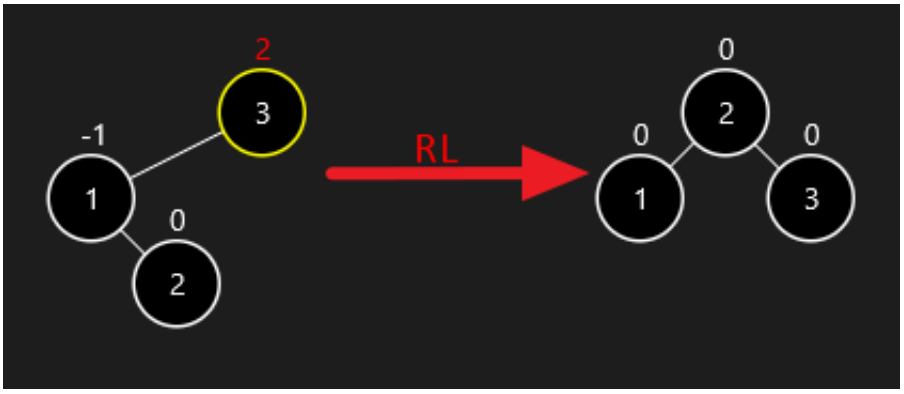
Obrázek 12: AVL - jednoduchá rotace RR

Jednoduchá rotace LL
Nevyvážený uzel má $b = -2$, jeho *pravý potomek* má $b = -1$ nebo $b = 0$.



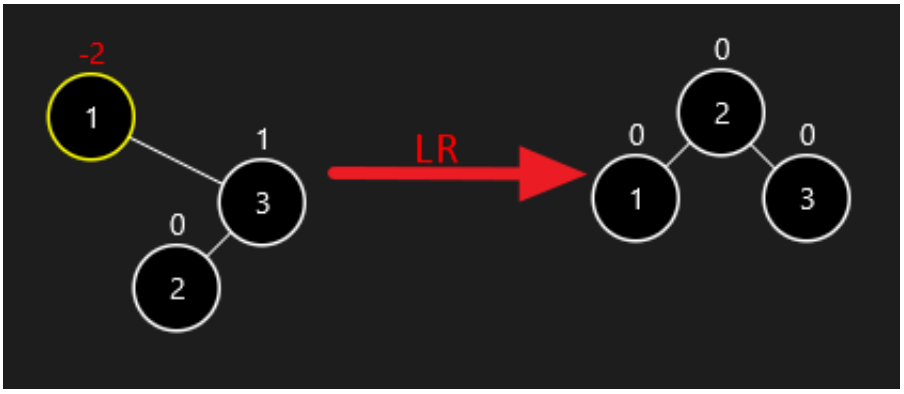
Obrázek 13: AVL - jednoduchá rotace LL

Dvojitá rotace RL
Nevyvážený uzel má $b = 2$, jeho *levý potomek* má $b = 1$.



Obrázek 14: AVL - dvojitá rotace RL

Dvojitá rotace LR
Nevyvážený uzel má $b = -2$, jeho *pravý potomek* má $b = 1$.



Obrázek 15: AVL - dvojitá rotace LR

2.3.2 Vyhledávání

Vyhledávání u AVL stromu se nijak neliší od toho v BVS.

2.3.3 Vkládání

Vkládání je založeno na *vkládání* u BVS. Navíc je zde přidán krok aktualizace faktoru vyvážení, kde od nově vloženého uzlu postupně u určitých uzlů přepočítáváme b. Pokud se strom kvůli vložení nového uzlu stává nevyváženým, provedeme jednu z rotací, čímž daný strom vyvážíme.

Přesný postup vkládání:

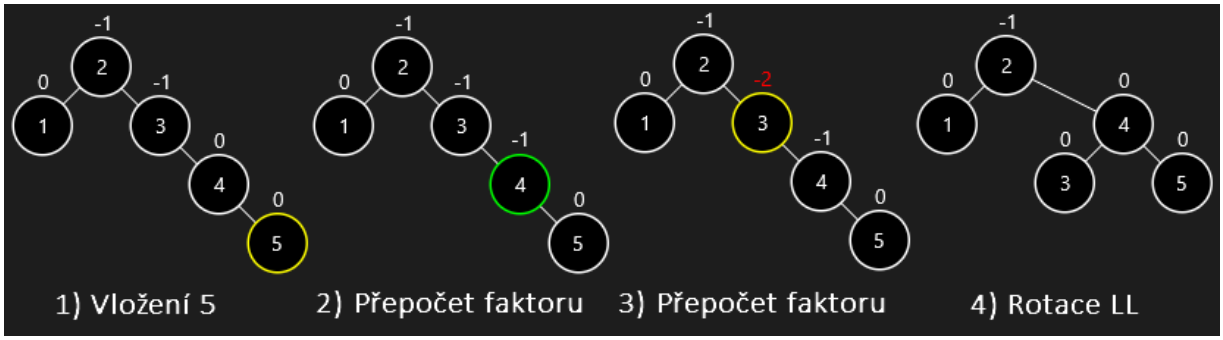
1. **krok** – počáteční
   Stejně jako u BVS.

2. **krok** – vyhledávání, vkládání
   Novému uzlu po vložení nastavíme faktor vyvážení na 0 a u nastavíme na předchůdce nově vloženého uzlu.
   Pokud nově vložený uzel je kořen, vkládání úspěšně končí.

3. **krok** – výpočet faktoru vyvážení
   V tomto kroku v aktuálním uzlu u aktualizujeme faktor vyvážení b.

   Po aktualizaci $u.b$ mohou nastat tyto případy:

   - $u.b = 1$ nebo $u.b = -1$
     Pokud u je kořen, vkládání úspěšně končí. Jinak u nastavíme na rodiče u a znovu opakujeme krok 3.
   - $u.b = 2$ nebo $u.b = -2$
     Provede se příslušná rotace.
     Pokud po provedení rotace je $u.b = 0$ nebo je nyní u kořen, vkládání úspěšně končí. Jinak u nastavíme na předchůdce u a znovu opakujeme krok 3.
   - $u.b = 0$
     Vkládaní úspěšně končí.



Obrázek 16: AVL - postup vkládání hodnoty 5

2.3.4 Odebírání

Odebírání je založeno na stejnojmenné operaci u BVS. Navíc je zde jako u *vkládání* přidán krok aktualizace faktoru vyvážení, kde od odstraněného uzlu postupně u určitých uzlů přepočítáváme b. Pokud se strom kvůli odebrání uzlu stává nevyváženým, tak provedeme jednu z rotací, čímž daný strom vyvážíme.

Přesný postup odebírání:

1. **krok** – počáteční
   Stejně jako u BVS.

2. **krok** – vyhledávání
   Stejně jako u BVS.

3. **krok** – odebírání

   Odebírání u má tyto možnosti:

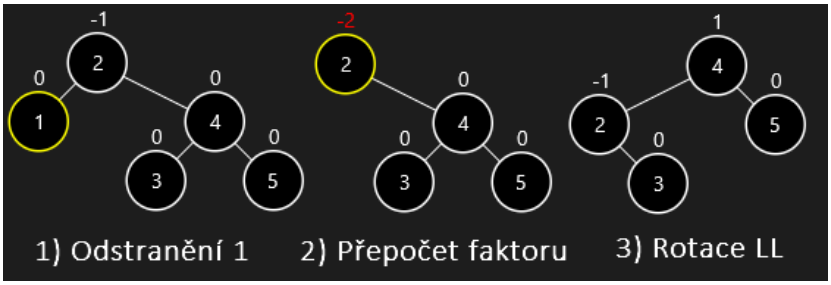
   - Pokud u je list.
     List u může být odebrán.
     Pokud byl u kořen, odebírání úspěšně končí. Jinak nastavíme u na rodiče u.
   - u má jednoho potomka.
     u bude nahrazen podstromem potomka. Pokud byl u kořen, odebírání úspěšně končí. Jinak nastavíme u na rodiče u.
   - u má dva potomky.
     - u bude nahrazen *nejlevějším* prvkem z *pravého* podstromu, zároveň tento prvek získá faktor vyvážení z u.
     - u bude nahrazen *nejpravějším* prvkem z *levého* podstromu, zároveň tento prvek získá faktor vyvážení z u.

     Rodiče uzlu, který nahradil u, uložíme do u.

4. **krok** – výpočet faktoru vyvážení
   V tomto kroku v aktuálním uzlu u aktualizujeme faktor vyvážení b.

   Po aktualizaci $u.b$ mohou nastat tyto případy:

   - $u.b =< -1, 1 >$
     Pokud u je kořen, odebírání úspěšně končí. Jinak u nastavíme na rodiče u a znovu opakujeme krok 4.
   - $u.b = 2$ nebo $u.b = -2$
     Provede se příslušná rotace.
     Pokud po provedení rotace je $u.b = 0$ nebo je nyní u kořen, odebírání úspěšně končí. Jinak u nastavíme na předchůdce u a znovu opakujeme krok 4.



Obrázek 17: AVL - postup odebírání hodnoty 1

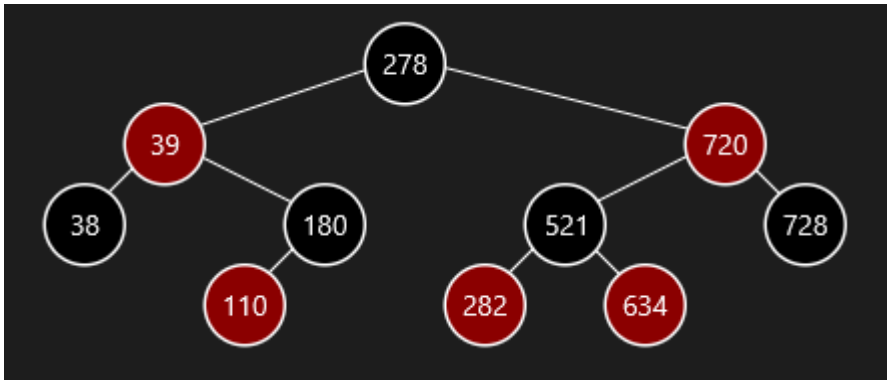
2.4 Červeno-černý strom

Červeno-černý strom (zkratka ČČ) vyvážený BVS. Na rozdíl od AVL stromu je ČČ strom vyvažován na základě barevného označení uzlů. Tímto vyvažováním má časovou složitost operací *vkládání* a *odebírání* $\theta(log(n))$.

„Červeno-černý strom zajišťuje, že žádná cesta z kořene do libovolného listu stromu nebude dvakrát delší než kterákoli jiná, to znamená, že strom je přibližně vyvážený.“[4]

ČČ strom musí splňovat tyto vlastnosti:

- Každý uzel má červenou nebo černou barvu.
- Kořen stromu má vždy barvu černou.
- Ve stromu se nenacházejí dva po sobě jdoucí červené uzly.
- Každý červený uzel, který není list, má dva černé potomky.
- Cesta od kořene ke všem listům obsahuje vždy stejný počet černých uzlů.[10]



Obrázek 18: Ukázka vyváženého ČČ stromu

[10]Je zde započítán i samotný list, pokud má černou barvu.

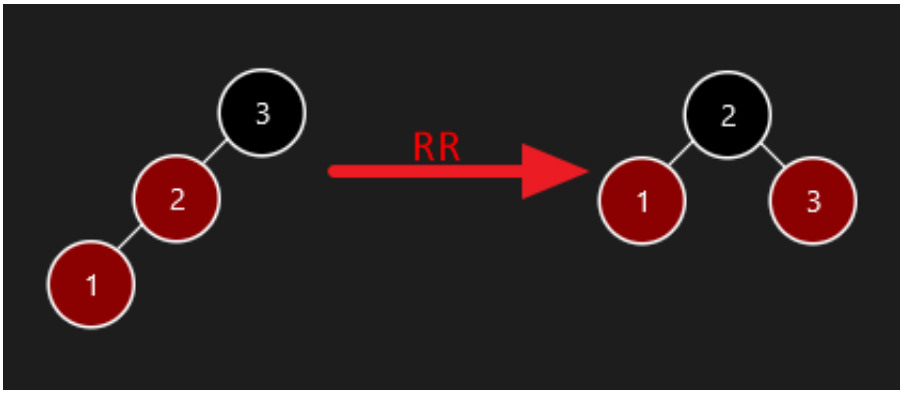
Každý uzel ČČ stromu obsahuje tyto vlastnosti:

- **Klíč** – Hodnota uložená v uzlu.
- **Obarvení uzlu** – Barva uzlu.
- **Ukazatel na levého potomka**
- **Ukazatel na pravého potomka**
- **Ukazatel na jednoho rodiče**

2.4.1 Transformace

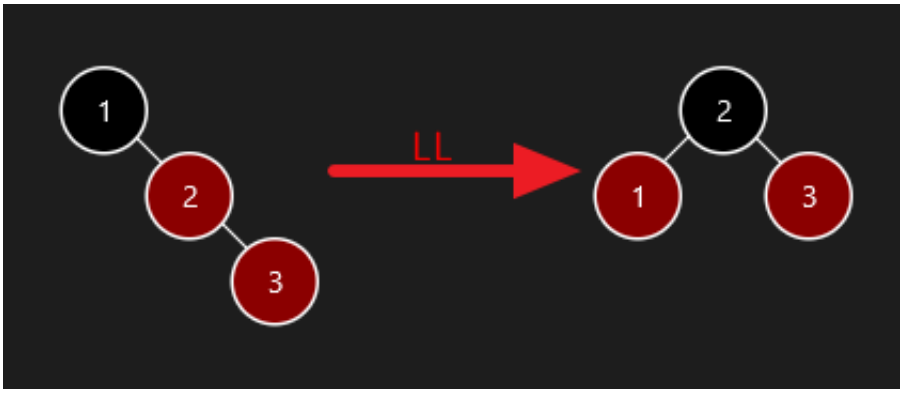
K obnově vyváženosti uzlů se používají *transformace*. Používají se zde stejně jako u AVL stromu *Rotace* a navíc je zde nová transformace *přebarvení*. Tyto *transformace* se používají k opětovnému vyvážení nevyváženého stromu.

Jednoduchá rotace RR



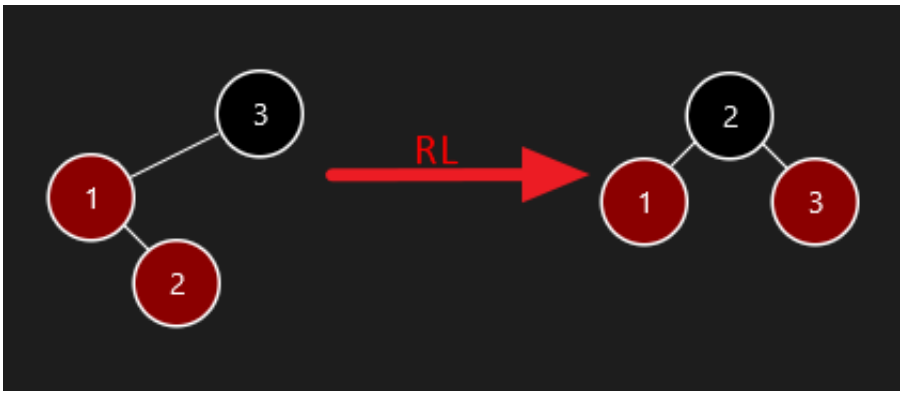
Obrázek 19: ČČ - jednoduchá rotace RR

Jednoduchá rotace LL



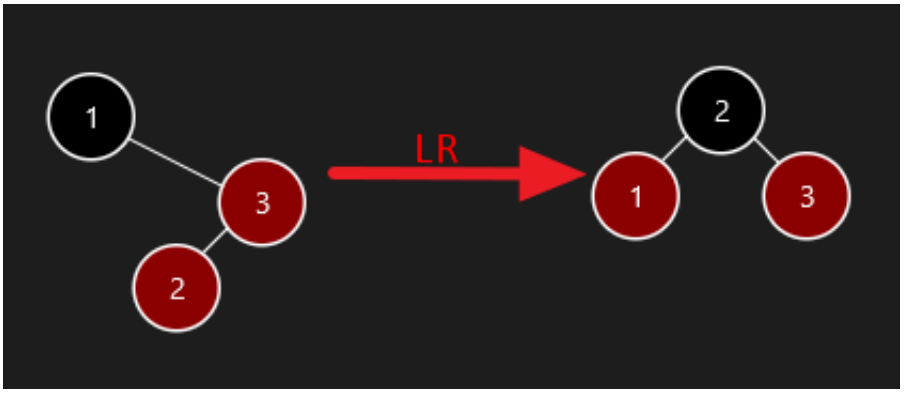
Obrázek 20: ČČ - jednoduchá LL

Dvojitá rotace RL



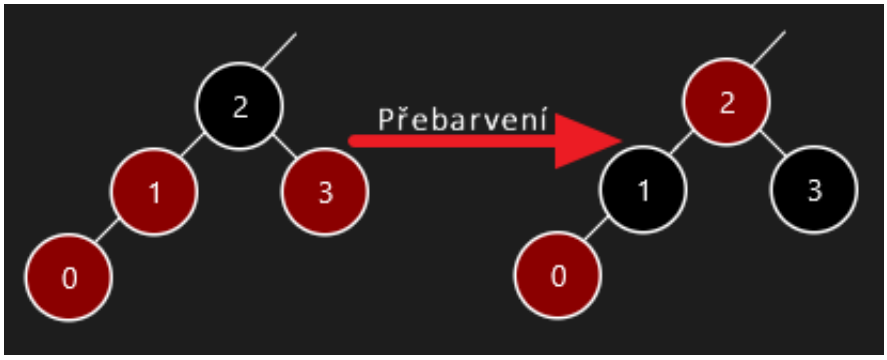
Obrázek 21: ČČ - dvojitá rotace RL

Dvojitá rotace LR

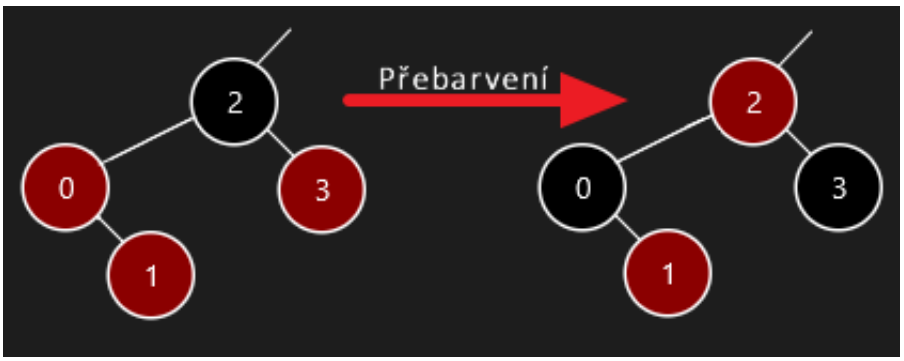


Obrázek 22: ČČ - dvojitá rotace LR

Přebarvení + symetrické případy
Pokud má ten vyšší z dvojice červených po sobě jdoucích uzlů červeného sourozence, tak on i jeho sourozenec získá černou barvu a jejich rodič, pokud se nejedná o kořen, získá červenou barvu.



Obrázek 23: ČČ - přebarvení 1



Obrázek 24: ČČ - přebarvení 2

2.4.2 Vyhledávání

Vyhledávání u ČČ stromu se nijak neliší od toho v BVS.

2.4.3 Vkládání

Vkládání je založeno na *vkládání* u BVS. Navíc je zde kvůli vyvážení stromu přidán krok kontroly barev. Pokud se ve stromu po vložení objeví dva po sobě jdoucí uzly s červenou barvou, provedeme příslušné transformace, aby strom splňoval vlastnosti ČČ stromu.

Každý nový uzel má při vkládáni automaticky červenou barvu.

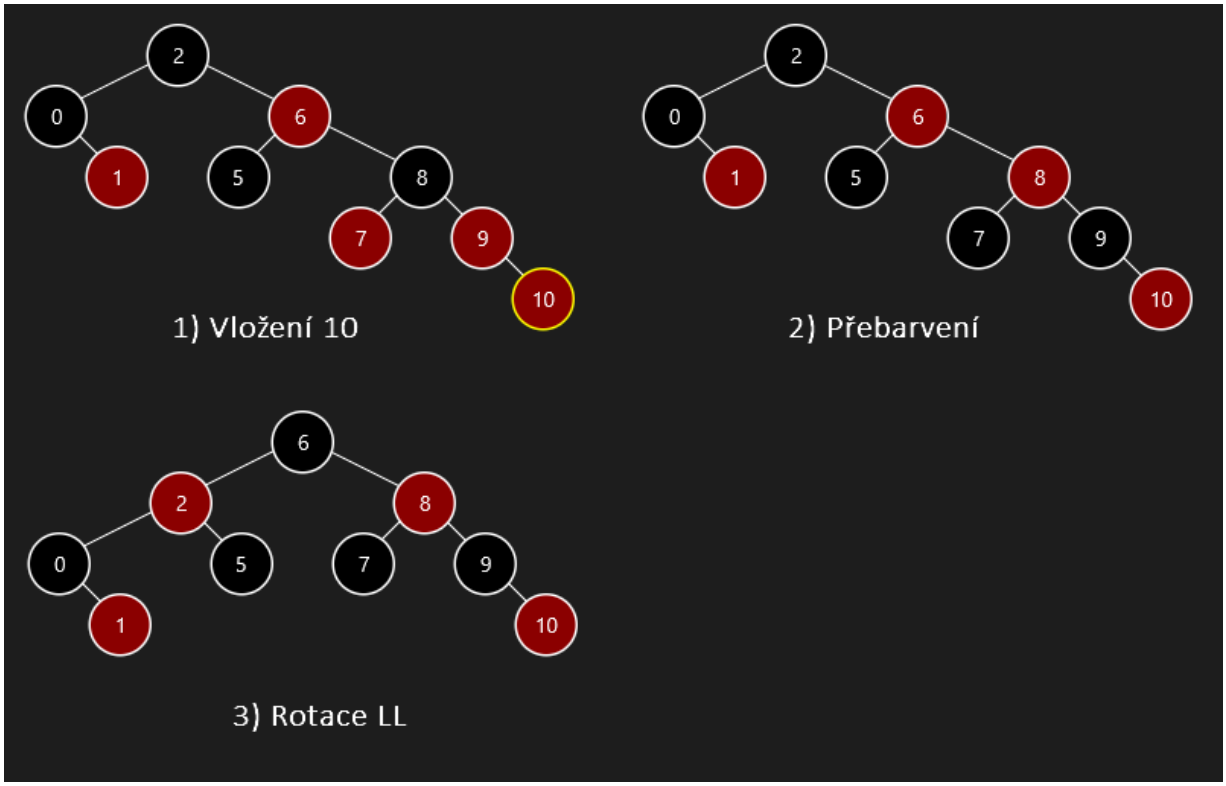
Přesný postup vkládání:

1. **krok** – počáteční
   Stejně jako u BVS.

2. **krok** – vyhledávání, vkládání
   Vložíme nový uzel u na příslušné místo a u nastavíme na předchůdce tohoto uzlu, je-li nový uzel kořen, nastavíme mu černou barvu a vkládání úspěšně končí.

3. **krok** – kontrola obarvení stromu
   Pokud má u černou barvu, vkládání úspěšně končí. Jinak provedeme příslušnou transformaci:

   - Rotaci
     Po provedení rotace se strom stává vyváženým a vkládání úspěšně končí.
   - Přebarvení
     Po přebarvení nastavíme u na předchůdce u.
     Pokud je nyní u černý, tak se jedná o kořen a vkládání úspěšně končí.
     Jinak nastavíme u na rodiče u a znovu provedeme krok 3.



Obrázek 25: ČČ - postup vkládání hodnoty 10

2.4.4 Odebírání

Odebírání u ČČ stromu je o trochu složitější než u předchozích stromů. Je to způsobeno tím, že musíme zaručit dodržování počtu a umístění černých uzlů, aby po odstranění byla dále splněna vlastnost: *cesta od kořene ke všem listům obsahuje vždy stejný počet černých uzlů.*

U *odebírání* tedy musíme sledovat barvu odebíraného uzlu i těch, které nahrazují odebraný uzel. Pokud odebraný (přesunutý) černý uzel nahradí červený, získá

černou barvu a strom zůstává vyvážený. Jinak na jeho původní místo vložíme do stromu *dvojitě obarvený černý uzel s NULL hodnotou*. Tento uzel i samotné *dvojité obarvení* nám značí, že je daný strom nevyvážený a pomocí transformací strom upravíme, aby jsme *NULL uzel* i *dvojité označení* odstranili a tím strom vyvážili.

Přesný postup odebírání:

1. **krok** – počáteční
   Stejně jako u BVS.

2. **krok** – vyhledávání
   Stejně jako u BVS.

3. **krok** – odebírání

   Odebírání u má tyto možnosti:

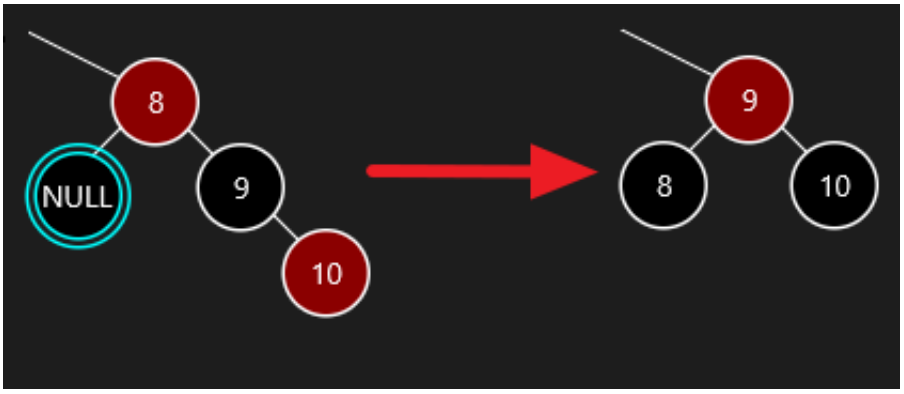
   - Pokud u je list.
     List u odebereme.
     Pokud u neměl černou barvu nebo se jednalo o kořen, odebírání úspěšně končí.
   - u má jednoho potomka.
     Do u dosadíme hodnotu potomka. Pokud je potomek červený můžeme ho odstranit a odebírání úspěšně končí. Jinak u nastavíme na tohoto potomka a znovu zopakujeme krok 3.
   - u má dva potomky.
     - do u dosadíme hodnotu z *nejlevějšího* prvku z *pravého* podstromu. Pokud je tento prvek červený, odstraníme ho a odebírání úspěšně končí. Jinak u nastavíme na tento prvek a znovu zopakujeme krok 3.
     - do u dosadíme hodnotu z *nejpravějšího* prvku z *levého* podstromu. Pokud je tento prvek červený, odstraníme ho a odebírání úspěšně končí. Jinak u nastavíme na tento prvek a znovu zopakujeme krok 3.

4. **krok** – Odstranění NULL listu
   V tomto kroku na místo smazaného uzlu u vložíme dvojitě obarvený NULL list. Dále pokračujeme odstraňováním dvojitě obarveného černého uzlu, které je vysvětleno níže.

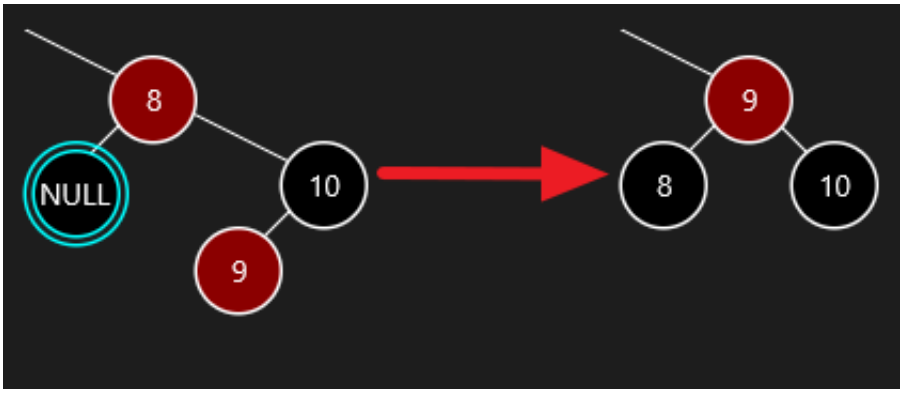
Odstranění dvojitě obarveného černého uzlu:

Případ 1 *– rotace + symetrické případy:*
Pokud má dvojitě obarvený uzel černého sourozence, který má pravého nebo levého potomka červené barvy. Předchůdce dvojitě obarveného uzlu může mít jakoukoliv barvu a tuto barvu pak získá uzel, který se po dokončení rotace dostane na jeho místo.

V obrázku 26 a 27 může před rotací uzel s hodnotou 8 mít černou barvu. Tuto barvu by po rotaci pak získal uzel s hodnotou 9.

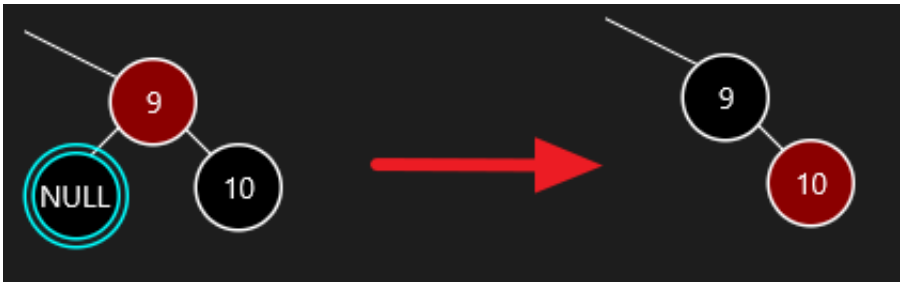


Obrázek 26: ČČ - odstranění dvojitě obarveného uzlu – jednoduchá rotace



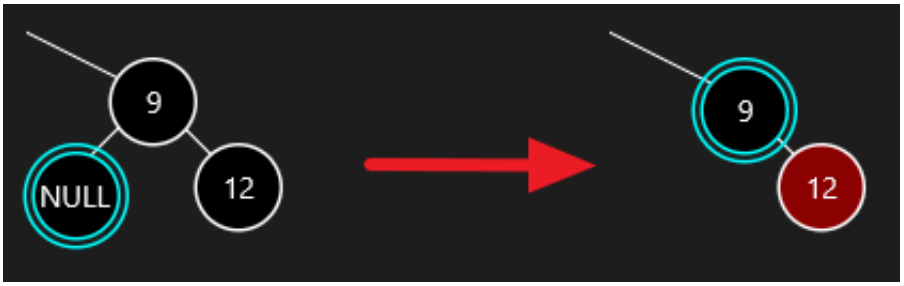
Obrázek 27: ČČ - odstranění dvojitě obarveného uzlu – dvojitá rotace

Případ 2 *– přebarvení + symetrický případ:*
Pokud sourozenec dvojitě obarveného uzlu je černý, ale nemá červené potomky a zároveň dvojitě obarvený uzel má červeného předchůdce.



Obrázek 28: ČČ - odstranění dvojitě obarveného uzlu – přebarvení

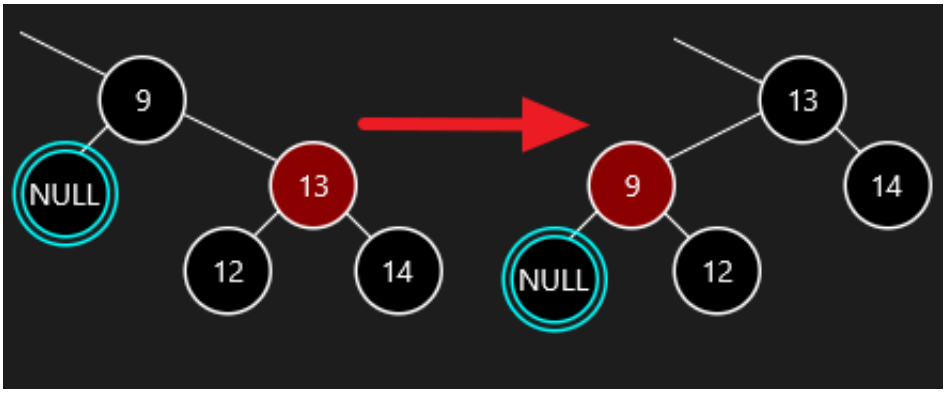
Případ 3 *– přebarvení a přesun označení + symetrický případ:*
Pokud sourozenec dvojitě obarveného uzlu je černý, ale nemá červené potomky a zároveň dvojitě obarvený uzel nemá červeného předchůdce.



Obrázek 29: ČČ - odstranění dvojitě obarveného uzlu – přebarvení a přesun označení

Pokud předchůdce dvojitě obarveného uzlu není kořen, tak získá dvojité obarvení a dále pokračujeme s odstraněním tohoto označení.

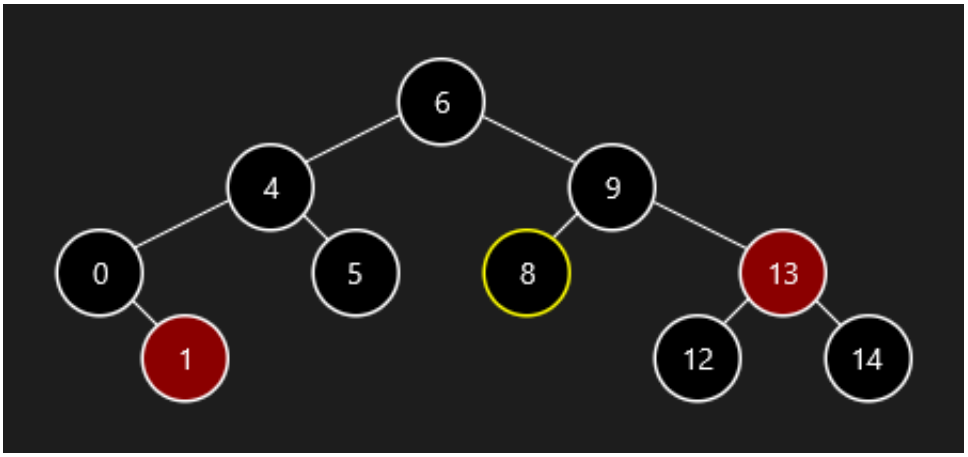
Případ 4 *– rotace (bez odstranění dvojitě obarveného uzlu) + symetrický případ:*
Pokud sourozenec dvojitě obarveného uzlu je červený.



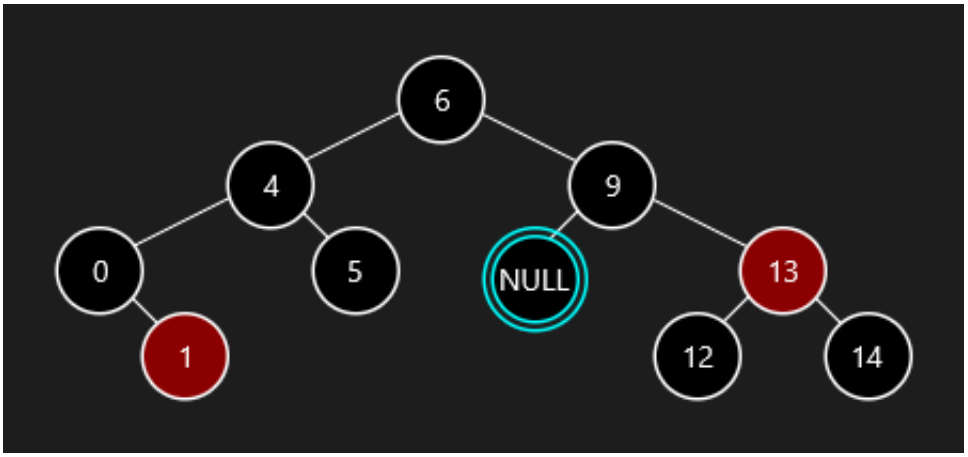
Obrázek 30: ČČ - rotace s dvojitě obarveným uzlem – jednoduchá rotace

Po rotaci dále pokračujeme s odstraněním dvojitě obarveného uzlu.

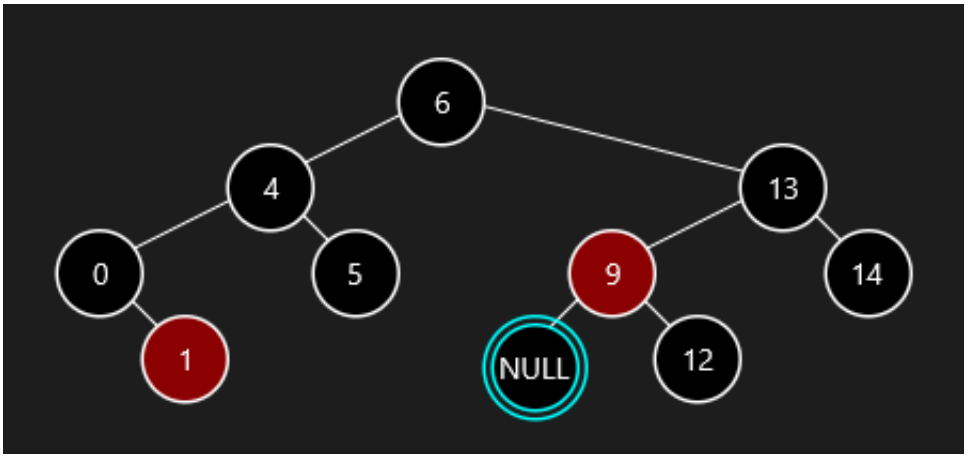
Ukázka odebírání v ČČ stromu:



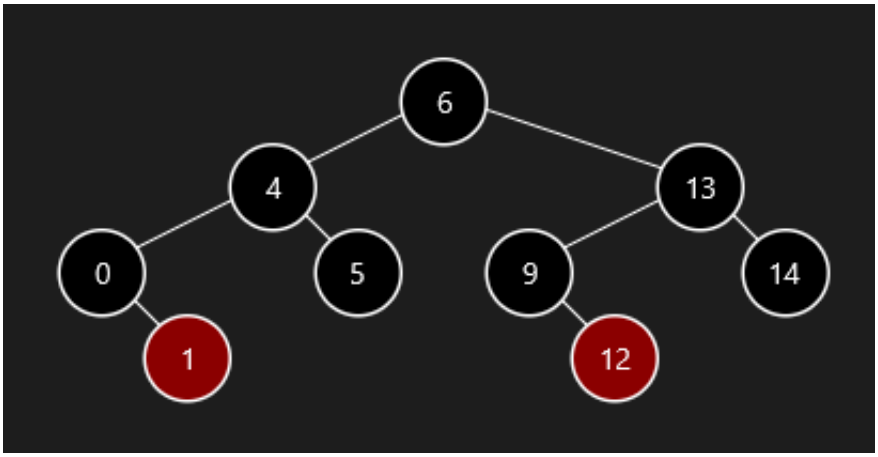
Obrázek 31: ČČ - ukázka odebírání – 1) odebrání 8



Obrázek 32: ČČ - ukázka odebírání – 2) vložen NULL list



Obrázek 33: ČČ - ukázka odebírání – 3) případ 4



Obrázek 34: ČČ - ukázka odebírání – 4) případ 2

3 Programátorská dokumentace

V této kapitole budou popsány technologie, které byly použity pro tvorbu aplikace. Dále zde bude popsána architektura a implementace programu.

3.1 Programovací jazyk a použité technologie

Program je napsán v jazyce Java, přesněji ve verzi 8. Na uživatelské prostředí je použita platforma JavaFX. Při výběru vhodného programového jazyka pro tuto aplikaci byla pro mě důležitá zkušenost s tímto jazykem a taky přenositelnost mezi operačními systémy, protože aplikaci jsem psal střídavě ve Windows 10 a macOS 10.13 High Sierra. Pro psaní zdrojového kódu jsem použil vývojové prostředí Eclipse Oxygen.

3.1.1 Java

Java je objektově orientovaný programovací jazyk, který vznikl v roce 1995. Nyní je nově (od březnu roku 2018) ve verzi 10. Dle *TIOBY indexu* se Java v poslední době nachází stále na 1. místě nejpoužívanějších programovacích jazyků.[12] Program v Javě je možné spustit i bez instalace, stačí mít nainstalovanou správnou verzi JVM[11].

3.1.2 JavaFX

Pro tvorbu grafického uživatelského prostředí (zkratka GUI) aplikace jsem využil *JavaFX*. Je to platforma pro tvorbu GUI v programech Java, která je součástí knihovny Java od verze 8. Nahrazuje zastaralý *Swing*. *JavaFX* navíc umožňuje tvorbu animací a podporuje stylování pomocí CSS[12].

3.1.3 FXML

FXML je značkovací jazyk založen na jazyku XML[13]. Tento jazyk se používá k návrhu GUI v JavaFX.

3.2 Architektura programu

Program obsahuje tyto balíky:

- application
- trees
- graphic

[11] Java Virtual Machine.
[12] Cascading Style Sheets.
[13] Extensible Markup Language.

3.2.1 Balík *application*

Tento balík vytváří a má kontrolu nad GUI. Dále zprostředkovává komunikaci mezi logickou a grafickou částí programu.

Seznam souborů v balíku:

- `Main`
- `WindowController`
- `styles` – typu CSS
- `Window` – typu FXML

Třída *Main*

Třída dědí z třídy `Application`, která umožňuje vytvořit JavaFX aplikaci. Tato třída obsahuje funkci `main(String[] args)`, což je hlavní funkce programu, která se spustí hned při spuštění aplikace. Poté se spustí funkce `start(Stage primaryStage)`, která inicializuje GUI.

Třída *WindowController*

Tato třída obsluhuje všechny prvky okna vytvořené v FXML. Pomocí anotace *@FXML* získá tato třída reference na prvky GUI. Její hlavní činnost spočívá ve vykonávání metod, které jsou v souboru `Window.fxml` definovány pro prvky okna. Mezi hlavní metody navázané na prvky okna patří:

- `changeTree(ActionEvent event)` – metoda pro změnu aktuálního stromu, ta volá další funkce, které připraví prostředí pro zvolený strom.
- `searchNumber()`, `insertNumber()`, `deleteNumber()` – metody pro práci s aktuálním stromem, tyto metody zavolají příslušnou obsluhu aktuálního stromu `tree`, což je objekt typu `ITree` (3.2.2). Tento objekt provede operaci s daným stromem a vrátí výsledek typu `Result` (3.2.2). Ten je dále předán příslušné metodě objektu `graphicTree` typu `DrawingTree` (3.2.3).
- `repeatLastAnimation` – zaručuje obnovení předchozího stromu a zopakování poslední operace.
- `dialogNewTree` – obsluha pro tlačítko *Nový...*, které vyvolá dialog pro možnosti nového stromu.
- `checkEnableButtons` – funkce, která aktivuje a deaktivuje tlačítka podle logiky jejich možnosti použití (*např. pokud je aktuální strom prázdný, je deaktivováno tlačítko Vyhledat a Smazat*).

Její další činnost spočívá v komunikaci mezi logickou a grafickou částí programu. Což hlavně zajišťují již zmíněné metody: `searchNumber()`, `insertNumber()`, `deleteNumber()`. Navíc jsou zde funkce pro generování náhodného stromu: `newRandomTree()` a `generateRandomTreeList()` nebo pro ukládání předchozího stromu a jeho následné obnovení: `createHistory()`, `createHistoryRecursion(Object object)` (*pomocná metoda pro rekurzivní uložení rozložení hodnot v aktuálním stromu*) a `getHistoryTree()`.

Soubor kaskádových stylů *styles*

Obsahuje popis způsobu zobrazování elementů v okně aplikace. Tyto styly jsou zapsány podobně jako CSS styly pro jazyk *HTML*, s tím rozdílem, že se před každou vlastnost známou ze stylování HTML stránek dává prefix -fx- např.:

```
1 .menu-text, Label {
2     -fx-font-size: 14.0pt;
3     -fx-font-family: "Segoe UI Light";
4     -fx-fill: white;
5 }
```

Zdrojový kód 7: styles.css - ukázka zápisu

Celá podrobná dokumentace CSS pro JavaFX aplikace je dostupná na adrese: https://docs.oracle.com/javafx/2/api/javafx/scene/doc-files/cssref.html.

Soubor FXML *Window*

V tomto FXML souboru je napsána celá struktura GUI aplikace, která je navázána na příslušný controller `application.WindowController`. Jsou zde na jednotlivé elementy okna navázány příslušné metody pro obsloužení akcí s těmito elementy (*např. pokud uživatel klikne na tlačítko Vložit, je zavolána metoda* `insertNumber()` *z třídy* `WindowController`).

3.2.2 Balík *trees*

Tento balík se stará o logiku stromů. Jsou zde implementovány všechny stromy a jejich příslušné operace, které byly výše popsány.

Seznam souborů v balíku:

- `ITree` – interface[14]
- `INode` – interface

[14] Rozhraní Java.

- `BinaryTree`
- `AVLTree`
- `RedBlackTree`
- `BinaryNode`
- `AVLNode`
- `RedBlackNode`
- `RecordOfAnimation`
- `Result`
- `AnimatedAction` – enum[15]
- `Color` – enum
- `Side` – enum

Rozhraní *ITree*

Toto rozhraní zobecňuje práci se stromy, kdy každý typ stromu implementuje toto rozhraní a tím prakticky většina metod nerozlišuje s jakým typem stromu pracuje, ale pouze používá objekt typu `ITree` a volá metody, které mají pro všechny typy stromů stejný název, ale rozdílnou implementaci. Kvůli tomuto rozhraní je zdrojový kód programu velmi zjednodušen a ušetřen o spoustu řádků, které by musely řešit o jaký strom se jedná a teprve potom volat příslušné metody. Například již zmíněné metody třídy `WindowController`: `searchNumber()`, `insertNumber()`, `deleteNumber()` (3.2.1) pracují pouze s objektem typu `ITree`.

Hlavní definované metody rozhraní jsou:

- `search(int value)`, `insert(int value)`, `delete(int value)` – definice metod pro základní operace se stromy. Metody vrací objekt typu `Result`.
- `getRoot()` – metoda vrátí kořen daného stromu typu `INode`.

Třídy *BinaryTree*, *AVLTree*, *RedBlackTree*

Jsou to třídy, které reprezentují typy stromů. Implementují rozhraní `ITree`, což zaručuje, že každá instance těchto tříd obsahuje všechny základní operace. Kvůli rozdílnému fungování těchto stromů musí každá z těchto tříd tyto operace implementovat po svém. `BinaryTree` prakticky implementuje pouze metody definované v rozhraní `ITree`, zatímco `AVLTree` a `RedBlackTree` obsahují metody navíc.

[15] Výčtový typ Javy.

Vybrané metody `AVLTree`:

- `balanceTree(Result result, AVLNode startNode)` – metoda, která se volá kvůli vyvážení AVL stromu. Tato metoda ověří faktory vyvážení příslušných uzlů, jestliže je strom nevyvážený volá potřebnou rotaci. Metoda vrací objekt typu `Result`.

- `llBalance(Result result, AVLNode nodeB)`,
  `rrBalance(Result result, AVLNode nodeB)`,
  `lrBalance(Result result, AVLNode nodeC)`,
  `rlBalance(Result result, AVLNode nodeC)` – metody, které provádí rotace. Vrací objekt typu `Result`.

Vybrané metody `RedBlackTree`:

- `balanceTree(Result result, RedBlackNode startNode)` – metoda, která se volá kvůli vyvážení ČČ stromu. V této metodě se ověří vyváženost stromu, případně je zde provedeno přebarvení, pokud je potřeba jsou volány i metody rotace. Metoda vrací objekt typu `Result`.

- `llBalance(Result result, RedBlackNode nodeB)`,
  `rrBalance(Result result, RedBlackNode nodeB)`,
  `lrBalance(Result result, RedBlackNode nodeC)`,
  `rlBalance(Result result, RedBlackNode nodeC)` – metody, které provádí rotace a s tím související přebarvení. Vrací objekt typu `Result`.

- `doubleBlack(Result result, RedBlackNode parent, Side side)` – tato funkce řeší odstranění dvojitě obarvených uzlů, které se mohou vyskytnou při operaci odebírání. Funkce vrací objekt typu `Result`.

Rozhraní *INode*

Rozhraní `INode` obsahuje definice všech důležitých `get` a `set` metod, které jsou potřeba k práci s jakýmkoliv uzlem. Je zde definována i metoda `equals(Object obj)`, která slouží k porovnávání uzlů. Toto rozhraní zobecňuje práci s uzly stromů a umožňuje měnit a číst jejich atributy, aniž by muselo být známo o jaký typ stromu, a tedy i uzlu, se jedná.

Třídy *BinaryNode*, *AVLNode*, *RedBlackNode*

Reprezentují uzly stejnojmenných stromů. Implementují rozhraní `INode`. Třídy obsahují tyto atributy:

- `value` – číselná hodnota uzlu.

- `parent` – ukazatel na rodiče.

- `left` – ukazatel na levého potomka.

- `right` – ukazatel na pravého potomka.

- `graphicNode` – grafická reprezentace uzlu.
- `factor`(pouze u `AVLNode`) – číselná hodnota faktoru vyvážení.
- `color`(pouze u `RedBlackNode`) – barva uzlu. Reprezentována pomocí výčtového typu `Color`.

Třída `AVLNode` navíc implementuje zmíněnou rekurzivní funkci `computeFactor()` 6.

Třída *RecordOfAnimation*

Tato třída slouží k zaznamenávání animací, které budou následně zpracovány v grafické části aplikace.
Třída obsahuje tyto atributy:

- `action` – typ animace reprezentovaný výčtovým typem `AnimatedAction`.
- `node` – ukazatel na grafický uzel, kterého se daná animace týká. Tato proměnná je typu `IGraphicNode` (3.2.3).
- `object` – pomocná proměnná, která je používána na různé typy objektu podle druhu animace.

Třída *Result*

Objekty této třídy jsou používány jako návratové hodnoty všech logických operací se stromy. Tento objekt má v sobě uloženy důležité informace pro následné zpracování všech grafických operací včetně animací. Ve třídě `WindowController` metody: `searchNumber()`, `insertNumber()`, `deleteNumber()` (3.2.1) nejprve zavolají příslušnou metodu u aktuálního logického stromu typu `ITree`. Ta vytvoří objekt typu `Result`, do kterého postupně uloží všechny animace potřebné ke grafickému zobrazení volané operace a tento objekt na závěr vrátí. Tyto metody vrácený výsledek dále předávají objektu typu `DrawingTree` (3.2.3), který strom vykreslí a vykoná příslušné animace.
Třída obsahuje tyto atributy:

- `node` – výsledný uzel dané operace reprezentován pomocí `INode`.
- `side` – pozice výsledného uzlu (*při vkládání je to například strana na kterou má být uzel vložen*), která je výčtového typu `Side`.
- `way` – seznam všech navštívených uzlů při provádění dané operace. Je typu `ArrayList<IGraphicNode>`. Využívá se při animování vyhledávání uzlu.
- `recordOfAnimations` – seznam záznamů všech animací. Je typu `ArrayList <RecordOfAnimation>`.

Vybrané metody:

- `addNodeToWay(IGraphicNode node)` – přidává do kolekce `way` navštívený uzel.
- `addAnimation(AnimatedAction action, IGraphicNode node, Object object )` – metoda, která přidá do `recordOfAnimations` nový záznam animace.

Výčtový typ *AnimatedAction*
Obsahuje například hodnoty: `SEARCH, INSERT, DELETE, MOVEVALUE, MOVENODE, RR, LL, RL, LR`... a další.

Výčtový typ *Color*
Obsahuje hodnoty: `RED, BLACK;`.

Výčtový typ *Side*
Obsahuje hodnoty: `LEFT, RIGHT, NONE;`.

3.2.3 Balík *graphic*

Tento balík se stará o grafické zobrazování stromů, animování všech operací a zobrazování zjednodušeného popisu.

Seznam souborů v balíku:

- `IGraphicNode` – interface
- `AVLGraphicNode`
- `BinaryGraphicNode`
- `RedBlackGraphicNode`
- `DrawingTree`

Rozhraní *IGraphicNode*
Toto rozhraní definuje všechny důležité `get`, `set` a další metody, které jsou potřeba pro práci s jakýmkoliv objektem reprezentující grafický uzel zmíněných stromů. Je ním zobecněna práce třídy `DrawingTree`, která může vykreslovat a provádět animace aniž by znala typ stromu.

Objekty typu `IGraphicNode` reprezentují obecný grafických uzel všech stromů a jsou prakticky používány ve všech částech programu. Výjimku tvoří funkce, které jsou specifické pro určitý typ stromu, ty si objekty typu `IGraphicNode` přetypují do `BinaryGraphicNode`, `AVLGraphicNode` nebo `RedBlackGraphicNode` (*Například u AVL stromu je potřeba změnit atribut* `factor` *, který obsahuje a má k němu přístup pouze* `AVLGraphicNode`).

Hlavní definované metody jsou:

- `createStackPaneNode()` – vytvoří grafickou reprezentaci listu (*vytvoří kruh a doprostřed vloží hodnotu listu, to celé pak vloží do* `StackPane`).
- `highlightFindNode()` – metoda pro zvýraznění nalezeného grafického uzlu.
- `countChildren()` – metoda, které vypočítá a uloží počet všech pravých a levých potomků daného uzlu. Metoda vrací součet všech potomků. Používá se pro rozpočítání vzdáleností mezi uzly, aby se ve vykresleném stromu žádné nepřekrývaly. Implementace metody je zde 8.

Třída *BinaryGraphicNode*

Třída implementuje rozhraní `IGraphicNode`. Reprezentuje grafický uzel stejnojmenného stromu. Pouze implementuje všechny metody z rozhraní. Obsahuje tyto atributy:

- `radiusSize` – velikost vykreslených uzlů. Hodnota je typu `final int` inicializovaná na 20.
- `parent` – ukazatel na rodiče uzlu. Typu `IGraphnicNode`.
- `left` – ukazatel na levého potomka. Typu `IGraphnicNode`.
- `right` – ukazatel na pravého potomka. Typu `IGraphnicNode`.
- `side` – pozice vůči rodiči. Výčtového typu `Side`.
- `leftChildrenCount` – počet všech levých potomků.
- `rightChildrenCount` – počet všech pravých potomků.
- `value` – ukazatel na hodnotu uzlu. Typu `Text`.
- `circle` – grafický prvek kruh o poloměru `radiusSize`. Typu `Circle`.
- `stacPaneNode` – `StackPane`, který představuje grafický uzel. V něm je vložen objekt `value` a `circle`.
- `x` – souřadnice `stacPaneNode` x. Typu `DoubleProperty`.
- `y` – souřadnice `stacPaneNode` y. Typu `DoubleProperty`.
- `branch` – představuje větev[16] mezi tímto uzlem a jeho rodičem. Typu `Line`.

[16]Spoj mezi uzlem a jeho rodičem.

```
1  @Override
2  public int countChildren() {
3    if (left != null) {
4      leftChildrenCount = 1 + left.countChildren();
5    } else {
6      leftChildrenCount = 0;
7    }
8
9    if (right != null) {
10     rightChildrenCount = 1 + right.countChildren();
11   } else {
12     rightChildrenCount = 0;
13   }
14
15   return leftChildrenCount + rightChildrenCount;
16 }
```

Zdrojový kód 8: countChildren() - rekurzivní funkce pro určení počtu potomků

Třídy *AVLGraphicNode* a *RedBlackGraphicNode*

Tyto třídy dědí ze třídy `BinaryGraphicNode` => zároveň pro ně automaticky platí, že implementují rozhraní `IGraphicNode`. Tyto třídy reprezentují grafické uzly svých stejnojmenných stromů, ale prakticky se od `BinaryGraphicNode` příliš neliší.

`AVLGraphicNode` pouze přidává atribut `factor` a k němu příslušnou `get` a `set` metodu. Faktor vyvážení je reprezentován objektem typu `Text`. Tento atribut následně vloží do zděděného atributu `stackNode`.

`RedBlackGraphicNode` používá červenou a černou barvu výplně zděděného atributu `circle`, kvůli tomu je přidán atribut `color` výčtového typu `Color` a jeho příslušnou `get` a `set` metodu. Dále přidává metodu pro označení dvojitě obarveného listu.

Třída *DrawingTree*

Nejrozsáhlejší třída aplikace, která ovládá grafické zobrazování všech stromů, animací a zobrazování popisku aktuálně prováděných operací. `WindowController` při vytvoření nového stromu vytvoří objekt `graphicTree`, který je instancí `DrawingTree`. Objektu `graphicTree` jsou pak pomocí metod předávány výsledky (typu `Result`) zpracovaných operací v logické reprezentaci stromu. Tyto výsledky jsou následně graficky zpracovány a po provedení poslední animace je program připraven na přijímání dalších požadavků od uživatele.

Parametry konstruktoru:

1. `paneTree` – ukazatel na prvek okna typu `Pane`, do kterého se stromy budou kreslit.

2. `animationSpeed` – ukazatel na `property`[17] prvku okna typu `Slider`. Parametr je typu `DoubleProperty`. Tato hodnota reprezentuje aktuální zvolenou hodnotu uživatelem pomocí *slideru* pro nastavení rychlosti animace.

3. `stageWidthProperty` – ukazatel na `property` šířku okna aplikace. Je typu `ReadOnlyDoubleProperty`.

4. `stageHeightProperty` – ukazatel na `property` výšku okna aplikace. Je typu `ReadOnlyDoubleProperty`.

5. `WindowController` – ukazatel na samotný objekt `windowController`, který tento konstruktor volá. To proto, aby tato třída měla přístup k metodám pro deaktivování prvků okna při průběhu animace.

```
1 g = new DrawingTree(paneTree, sliderSpeed.valueProperty(), window.
    widthProperty(), window.heightProperty(), this);
2 /**
3 * window - je okno aplikace
4 * this - WindowController ve kterém je tento konstruktor volán
5 */
```

Zdrojový kód 9: Ukázka použití konstruktoru třídy DrawingTree

Třída má spoustu atributů, které jsou hlavně využívány funkcemi týkajících se animací. Animace po skončení automaticky volají funkce, které nemají přístup k lokálně uloženým datům a proto musí pracovat s atributy třídy, ke kterým je přístup ze všech funkcí dané třídy. Některé atributy třídy:

- `value` – hodnota vložená uživatelem načtená z `TextArea`.
- `newIGraphicNode` – ukazatel na nově vkládaný uzel.
- `graphicNodeSize` – rozměr grafického uzlu. Při vkládání kořene je do tohoto atributu vložen jeho rozměr.
- `xAnimatedNode, yAnimatedNode` – `DoubleProperty` sloužící k ukládání, které jsou dále používány v animacích.
- `DOWNMARGIN` – představuje velikost zobrazené mezery mezi potomkem a rodičem. Je typu `final int` a má hodnotu 40.
- `listGraphicNodes` – seznam všech aktuálně zobrazených uzlů. Typu `ArrayList <IGraphicNode>`.

[17] Vlastnost objektu v JavaFX, které lze *naslouchat* a reagovat na změny. Tyto vlastnosti jsou obvykle typovány na typ objektu, který uchovávají např. `DoubleProperty`. Jdou propojit (*nabindovat*) s jinými property stejného typu => pokud se změní hodnota v property, tak se změní i hodnota ve všech, které jsou s ní propojeny.

- `recordOfAnimations` – seznam aktuálně prováděný animací. Typu `ArrayList <RecordOfAnimation>`.
- `animationIndex` – index poslední provedené animace.
- `wayList` – aktuální seznam všech navštívených uzlů, pro animování vyhledávání. Typu `ArrayList<IGraphicNode>`.
- `wayIndex` – index posledního zvýrazněného uzlu.
- `balanceIndex` – index aktuálně kontrolovaného uzlu, používá se ve funkci `balanceTreeNext()`.
- Dále obsahuje všechny uložené parametry z konstruktoru jako je: `paneTree`, `animationSpeed`, `stageWidthProperty`, `stageHeightProperty`, `windowController`.

Vybrané metody:

- `insertRoot(INode root)` – metoda animuje vložení kořene. Kvůli skutečnosti, že uživatel může měnit velikost okna aplikace, musí mít kořen souřadnice, které se přizpůsobují aktuální šířce okna. K tomu slouží již zmíněná `stageWidthProperty`. S tímto atributem propojím `x` (`DoubleProperty`) kořene, navíc ji vydělím dvěma, abych pozicoval uzel přímo doprostřed okna. Tím zaručím, že kořen bude vždy uprostřed okna.
- `insertNode(Result result, int value)` – metoda je volána z `WindowController` při kliknutí uživatele na tlačítko *Vložit*. Nejprve se vkládanému uzlu uloženého v `result` nastaví počáteční souřadnice a je vložen do okna, zároveň je uložen do `newIGraphicNode`. Poté je zavolána metoda `startAnimation(result.getRecordOfAnimations()`.
- `deleteNode(Result result, int value)` – pokud je mazaný uzel nalezen volá `startAnimation(result.getRecordOfAnimations()`. Při nenalezení pouze zobrazí animaci hledání.
- `searchNode(Result result, int value)` – připraví prostředí na hledání a zavolá `startAnimation(result.getRecordOfAnimations()`.
- `startAnimation(ArrayList<RecordOfAnimation> recordOfAnimations)` – tato funkce pouze připraví prostředí pro spuštění animací. Tato příprava spočívá v nastavení všech potřebných atributů na výchozí hodnoty, určení rychlosti animace, uložení aktuálního seznamu animací, atd.). Dále volá funkci `nextAnimation()`.
- `nextAnimation()` – funkce má na starost postupné vykonávání animací ze seznamu `recordOfAnimations`. Obsahuje `switch`, který podle typu animace zavolá příslušnou funkci. Ukázka této funkce naleznete zde 11.

- `insertNodeAnimation()` – zde je prováděna animace vkládání nového uzlu. Souřadnice nově umístěného uzlu určím pomocí tohoto kódu 10. Po dokončení animace je zavolána funkce `insertNodeAnimationFinished()`, která tyto souřadnice uloží do vloženého uzlu a zařídí pokračování dalších animací, tak že navýší `animationIndex` o 1 a zavolá funkci `nextAnimation()`.

- `createBranch(IGraphicNode node)` – funkce vytvoří pro daný uzel *větev*, nebo-li hranu mezi tímto uzlem a jeho rodičem.

- `checkBranches()` – funkce ověří, zda všechny vykreslené uzly, mají zobrazené příslušné *větve*. Pokud se tam nějaká větev nenachází, tak jí zobrazí. Neobsahuje-li uzel větev, která by se měla zobrazit, tak je nejprve vytvořena a pak i zobrazena.

- `balanceTree()` a `balanceTreeNext()` – funkce, která zajišťuje korektní zobrazení stromů. `balanceTree()` je volána při dokončení všech animací. Uvnitř funkce se pomocí rekurzivní funkce `countChildren()` aktualizuje počet potomků u všech uzlů. Pak je zavolána funkce `balanceTree()` a ta pomocí rekurze postupně prochází `listGraphicNodes`. Pro každý uzel vypočítá správné souřadnice a porovná je s aktuálním umístění uzlu. Pokud se souřadnice liší, tak je potřeba uzel posunout na správné místo. Tímto postupem je zaručeno, že se žádný uzel nebude překrývat. Ukázka funkce je zde 12.

- Dále jsou zde implementovány metody na příslušné animace: `deleteNodeAnimation()`, `moveNodeAnimation()`, `moveValueAnimation()`, `updateFactor()`, `rrAnimation()`, `rlAnimation()`, `llAnimation()`, `lrAnimation()`.

```
1  DoubleProperty x = new SimpleDoubleProperty();
2  DoubleProperty y = new SimpleDoubleProperty();
3
4  if (result.getSide() == Side.LEFT) {
5    x.bind(newIGraphicNode.getParent().getX().subtract(graphicNodeSize
       ));
6  } else {
7    x.bind(newIGraphicNode.getParent().getX().add(graphicNodeSize));
8  }
9
10 y.bind(newIGraphicNode.getParent().getY().add(DOWNMARGIN));
11 newIGraphicNode.setX(x);
12 newIGraphicNode.setY(y);
```

Zdrojový kód 10: Ukázka určení souřadnic nově vloženého uzlu

```
1  private void nextAnimation() {
2    //pokud už proběhly všechny animace
3    if (animationIndex >= recordOfAnimations.size()) {
4      balanceTree();
5      return;
6    }
7
8    switch (recordOfAnimations.get(animationIndex).getAction().) {
9    case SEARCH:
10     wayIndex = 0;
11     nextSearchNode();
12     break;
13
14   case INSERT:
15     insertNodeAnimation();
16     break;
17
18   case DELETE:
19     deleteNodeAnimation();
20     break;
21
22   case MOVENODE:
23     moveNodeAnimation();
24     break;
25   ...
```

Zdrojový kód 11: Zkrácená ukázka nextAnimation()

```
1  xAnimatedNode = new SimpleDoubleProperty();
2  IGraphicNode iGraphicNode = listGraphicNodes.get(balanceIndex);
3
4  if (iGraphicNode.getSide() == Side.LEFT) {
5    xAnimatedNode.bind(iGraphicNode.getParent().getX().subtract(
         graphicNodeSize).subtract(graphicNodeSize * iGraphicNode.
         getRightChildrenCount()));
6
7  } else {
8    xAnimatedNode.bind(iGraphicNode.getParent().getX().add(
         graphicNodeSize).add(graphicNodeSize * iGraphicNode.
         getLeftChildrenCount()));
9  }
10
11 //pokud uzel nemá správné souřadnice provedu posunutí
12 if (iGraphicNode.getX().get() != xAnimatedNode.get()) {
13   ...
14 }
```

Zdrojový kód 12: Ukázka výpočtu správného umístění uzlu

4 Uživatelská příručka

Uživatelská příručka obsahuje návod, který popisuje jak aplikaci spustit a její funkčnost. Jsou zde popsány i všechny komponenty okna a práce s nimi.

4.1 Minimální požadavky aplikace

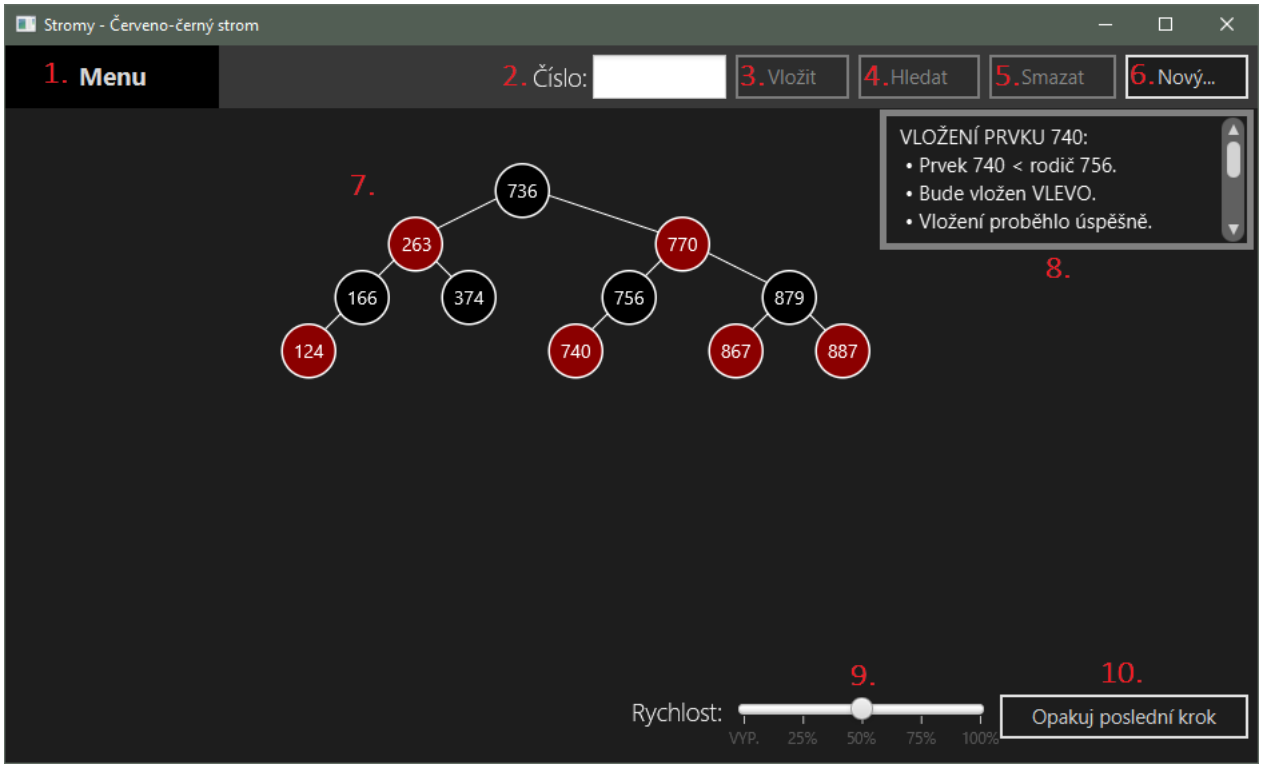
- Windows 10 nebo macOS 10.12 Sierra.
- JVM verze 8.
- Rozlišení obrazovky aspoň 1366×768.

4.2 Spuštění

Aplikaci není třeba instalovat. Před samotným spuštěním je pouze potřeba mít nainstalovaný JVM verze 8, který dostupný z adresy: https://java.com/en/download/. Samotnou aplikaci STROMY.JAR stačí zkopírovat z adresáře `bin/` a spustit.

4.3 Okno aplikace

Po spuštění se zobrazí hlavní okno programu viz. obrázek 35. V titulku okna je název aktuálně zvoleného stromu.



Obrázek 35: Hlavní okno programu.

4.3.1 Popis okna aplikace

1. Menu – slouží k výběru stromu viz. obrázek 36. Aktuální strom je v menu zvýrazněn bílou barvou. Při vybrání stromu se objeví dialogové okno 37. Menu skryjeme po kliknutí na položku *Zpět*.

   Další funkce menu:

   - *Nový* – Smaže aktuální strom, může zobrazit dialogové okno 38.
   - *Načíst...* – Zobrazí standardní okno pro výběr umístění uloženého souboru *název.tree*. Načítání může zobrazit dialog 39 nebo chybovou hlášku 40.
   - *Uložit...* – Zobrazí standardní okno pro výběr umístění a názvu ukládaného souboru. Na dané místo uloží aktuální strom jako *název.tree*. Ukládání může zobrazit chybovou hlášku 41.
   - *Exportovat jako obrázek...* – Zobrazí standardní okno pro výběr umístění a názvu obrázku. Na dané místo uloží obrázek aktuálního stromu jako *název.png*.
   - *Ukončit* – Ukončí aplikaci.

2. Textové pole – pro uživatelské zadávání číselných hodnot. Rozmezí čísla je 0 až 10 000. Při zadání čísla se automaticky tlačítka, které je možné v daném případě použít stávají aktivními.

3. Tlačítko *Vložit* – slouží ke vkládání uživatelem zadané hodnoty do aktuálního zobrazeného stromu. Je aktivní vždy, pokud uživatel zadá nějakou hodnotu.

4. Tlačítko *Hledat* – slouží k hledání uživatelem zadané hodnoty v aktuálním zobrazeném stromu. Je aktivní, pokud strom má alespoň kořen a textové pole obsahuje nějakou uživatelem zadanou hodnotu.

5. Tlačítko *Smazat* – slouží k odebírání uzlu s uživatelem zadanou hodnotou v aktuálně zobrazeném stromu. Je aktivní, pokud strom má alespoň kořen a textové pole obsahuje nějakou uživatelem zadanou hodnotu

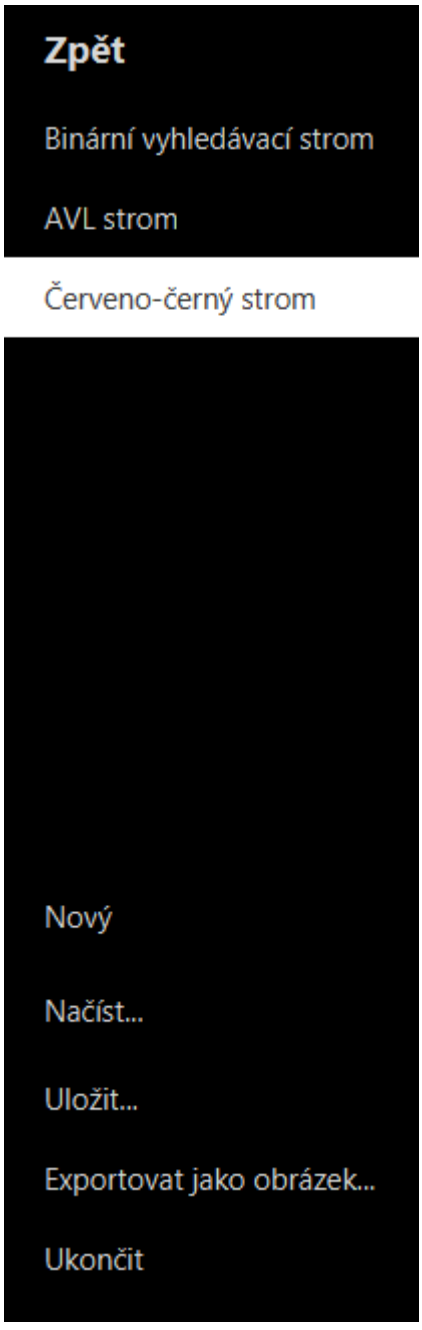
6. Tlačítko *Nový...* – po kliknutí zobrazí dialog 42. V tomto dialogu je možno aktuální strom vymazat nebo vytvořit náhodný strom. Při výběru *Nový náhodný...* se zobrazí dialog 43, kde zadáme počet hodnot ve stromě a po potvrzení je strom vytvořen.

7. Kreslící plocha – zde je vykreslován strom, jsou zde i prováděny animace.

8. Popis operací – stručný popis aktuálně prováděných operací, který si lze pročíst i po provedení animace. Tento popis lze přesunout, pomocí chytnutí šedého okraje, kamkoliv po kreslící ploše programu.

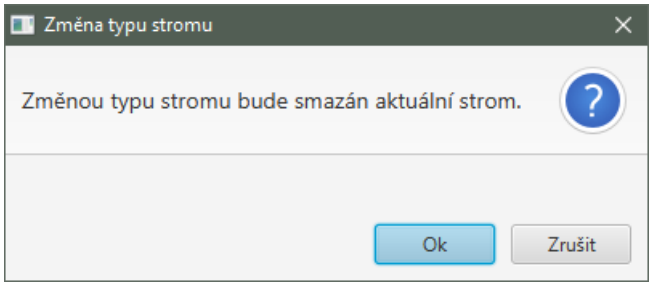
9. Rychlost animací – před prováděním animace, lze vybrat její rychlost, případně i animace vypnout.

10. Tlačítko *Opakuj poslední krok* – po kliknutí na tlačítko se zopakuje poslední provedená operace. Toto tlačítko je aktivní, pokud je uložená nějaká předchozí operace.

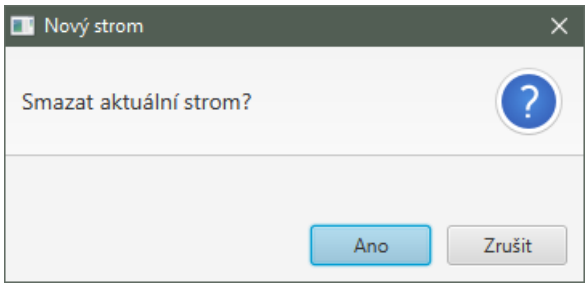


Obrázek 36: Menu programu.

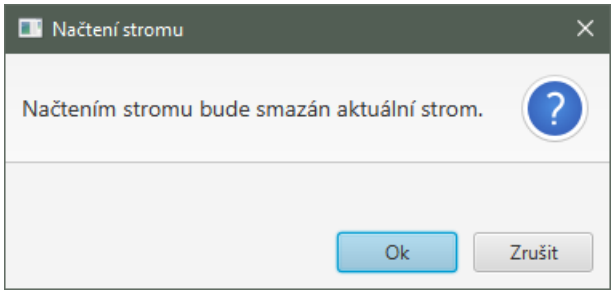
Dialogové okna aplikace:



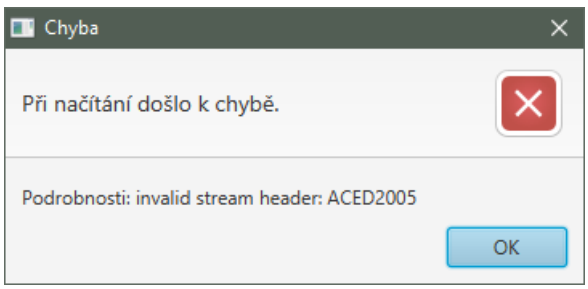
Obrázek 37: Dialogové okno při změně stromu.



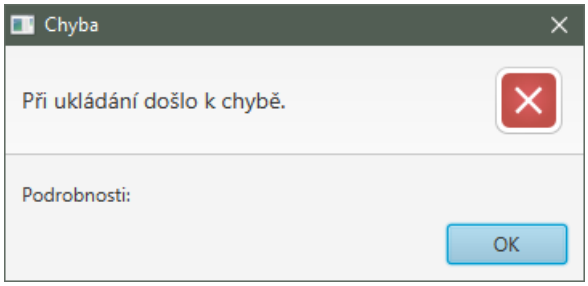
Obrázek 38: Dialogové okno kliknutí na *Nový* v menu.



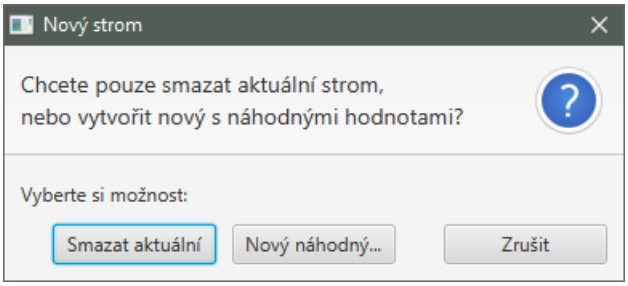
Obrázek 39: Dialogové okno při načítání stromu.



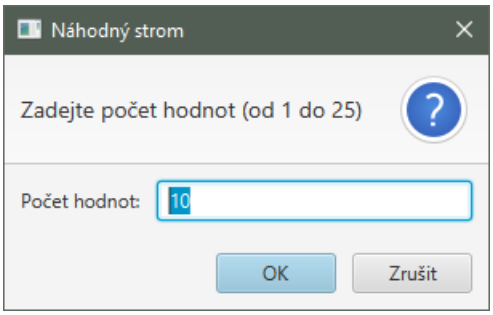
Obrázek 40: Chyba při načítání uloženého stromu.



Obrázek 41: Chyba při ukládání stromu.



Obrázek 42: Dialogové okno navázané na tlačítko *Nový...*.



Obrázek 43: Dialogové okno pro náhodný strom.

4.3.2 Klávesové zkratky

Při zadávání hodnoty do textového pole, je možné volat operace pomocí klávesových zkratek:

- *ENTER* – zavolá operaci *Vložit*.
- *F* – zavolá operaci *Hledat*.
- *DELETE* – zavolá operaci *Smazat*.

Závěr

Výsledkem bakalářské práce je aplikace Stromy, která může sloužit k potřebě výuky *Binárních vyhledávacích*, *AVL* a *červeno-černých stromů*. Aplikace názorně animuje operace *Vyhledávání*, *Vkládání* a *Odebírání*. Tyto operace jsou zároveň stručně popsány, navíc je možnost je znovu zopakovat, což umožňuje lepší pochopení dané operace.

Aplikace je naprogramována s důrazem na jednoduchost a obecnost. Toto zobecnění hlavních částí programu umožňuje v budoucnu doprogramovat další typy stromů, aniž by se musela předělávat celá aplikace.

Conclusions

Thesis conclusions in “English”.

A Obsah přiloženého CD/DVD

Na samotném konci textu práce je uveden stručný popis obsahu přiloženého CD/DVD, tj. jeho závazné adresářové struktury, důležitých souborů apod.

bin/
: Program Stromy, spustitelné přímo z CD/DVD.

doc/
: Text práce ve formátu PDF, vytvořený s použitím závazného stylu KI PřF UP v Olomouci pro závěrečné práce, včetně všech příloh, a všechny soubory potřebné pro bezproblémové vygenerování PDF dokumentu textu (v ZIP archivu), tj. zdrojový text textu, vložené obrázky, apod.

src/
: Kompletní zdrojové kódy programu Stromy.

readme.txt
: Instrukce pro instalaci a spuštění programu Stromy, včetně všech požadavků pro jeho bezproblémový provoz.

Navíc CD/DVD obsahuje:

literature/
: Vybrané položky bibliografie, příp. jiná užitečná literatura vztahující se k práci.

U veškerých cizích převzatých materiálů obsažených na CD/DVD jejich zahrnutí dovolují podmínky pro jejich šíření nebo přiložený souhlas držitele copyrightu. Pro všechny použité (a citované) materiály, u kterých toto není splněno a nejsou tak obsaženy na CD/DVD, je uveden jejich zdroj (např. webová adresa) v bibliografii nebo textu práce nebo v souboru `readme.txt`.

Literatura

[1] BĚLOHLÁVEK, Radim. Algoritmická matematika 2 – část 1 [online]. 2012-05-15. [cit. 2018-07-07]. Dostupné z: http://belohlavek.inf.upol.cz/vyuka/algoritmicka-matematika-2-1.pdf

[2] BĚLOHLÁVEK, Radim; VYCHODIL, Vilém. Diskrétní matematika pro informatiky II [online]. 2010-10-16. [cit. 2018-07-07]. Dostupné z: http://belohlavek.inf.upol.cz/vyuka/dm2.pdf

[3] VEČERKA, Arnošt. Studijní materiály ALM-2

[4] DVORSKÝ, Jiří. Algoritmy I.[online]. 2007-02-27. [cit. 2018-07-07]. Dostupné z: http://www.cs.vsb.cz/dvorsky/Download/SkriptaAlgoritmy/Algoritmy.pdf

[5] FINLAYSON, Ian. Binary Search Trees [online]. [cit. 2018-07-07]. Dostupné z: http://cs.umw.edu/ finlayson/class/fall12/cpsc230/notes/17-binary-search-trees.html

[6] ADELSON-VELSKII, G. M.; LANDIS, E. M. An algorithm for the organization of information. Soviet Mathematics Doklady, 3:1259–1263, 1962. [online]. [cit. 2018-07-07] Dostupné z: http://professor.ufabc.edu.br/ jesus.mena/courses/mc3305-2q-2015/AED2-10-avl-paper.pdf

[7] CORMEN, Thomas H.; LEISERSON, Charles E.; RIVEST, Ronald L.; STEIN, Clifford. Introduction to Algorithms, 978-0-262-03384-8, 1990. [online]. 2011-04-04 [cit. 2018-07-07]. Dostupné z: http://belohlavek.inf.upol.cz/vyuka/Cormen-RB-trees.pdf

[8] GALLES, David. Data Structure Visualizations [online]. [cit. 2018-07-07] Dostupné z: https://www.cs.usfca.edu/ galles/visualization/Algorithms.html

[9] ORACLE Java documentation [online]. [cit. 2018-07-07] Dostupné z: https://docs.oracle.com/javase/8/javase-clienttechnologies.htm

[10] BLOCH, Joshua. Effective Java – Second Edition, 978-0321356680, 2001.

[11] POMALORI, Andreas. JavaFX Programming Cookbook [online]. [cit. 2018-07-07] Dostupné z: https://www.javacodegeeks.com/minibook/javafx-programming-cookbook

[12] TIOBY [online]. [cit. 2018-07-07] Dostupné z: https://www.tiobe.com/tiobe-index/