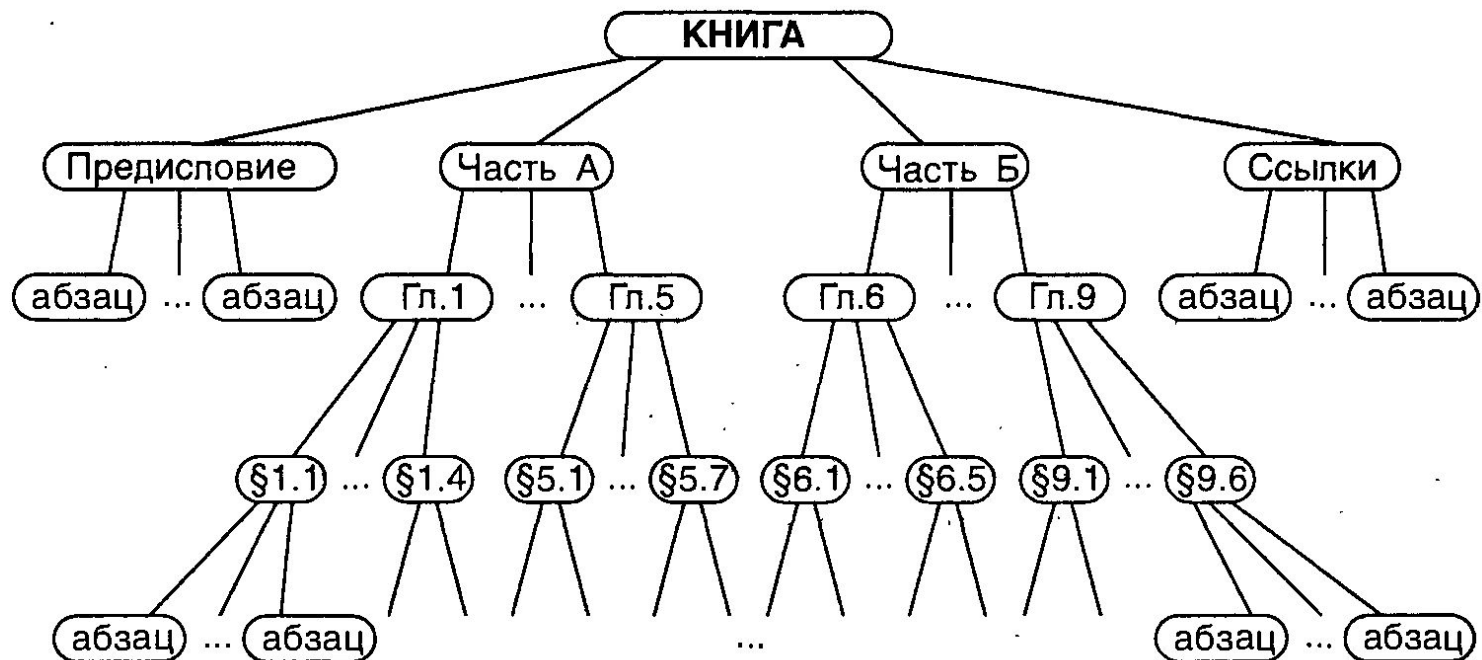


АТД «Дерево» - общее представление

Дерево — это абстрактный тип данных (АТД) для иерархического хранения элементов. За исключением элемента во главе дерева (*root*), каждый элемент структуры имеет родителя (*parent*) и ноль или более дочерних элементов (*children*).



Дерево, ассоциируемое с книгой

АТД «Дерево» - терминология (1)

Дерево (tree) T — это набор узлов (**node**), хранящих элементы, состоящие в отношениях «отцы и дети», со следующими свойствами:

- T имеет особый узел r , называемый корнем данного дерева (**root of T**);
- каждый узел v этого T , отличный от r , имеет родительский узел u .

В соответствии с приведенным определением дерево не может быть пустым,

Если узел u является **родителем (parent)** узла v , то v является **дочерним (child)** узлом u .

Узлы, дочерние для одного родителя, называются **сестрами/братьями (siblings)**.

Узлы, имеющие один и более дочерних элементов, называются **составными (internal)**, а не имеющие их — **простыми (external)** или **листьями (leaves)**.

Предок (ancestor) узла - родительский узел, либо предок родителя этого узла.

v является **потомком** узла u , если u является предком v .

Ответвление (subtree) от дерева, корнем которого является узел u , это

АТД «Дерево» - терминология (2)

Дерево является **упорядоченным (ordered)**, если дочерние элементы каждого из узлов упорядочены, то есть каждый из элементов можно определить как первый, второй, третий и т.д. Обычно изображаются слева направо.

Бинарным деревом (binary tree) называется упорядоченное дерево, в котором каждый из узлов имеет максимум два дочерних элемента.

Бинарное дерево считается **правильным (proper)**, если каждый узел не содержит ни одного или содержит два дочерних элемента.

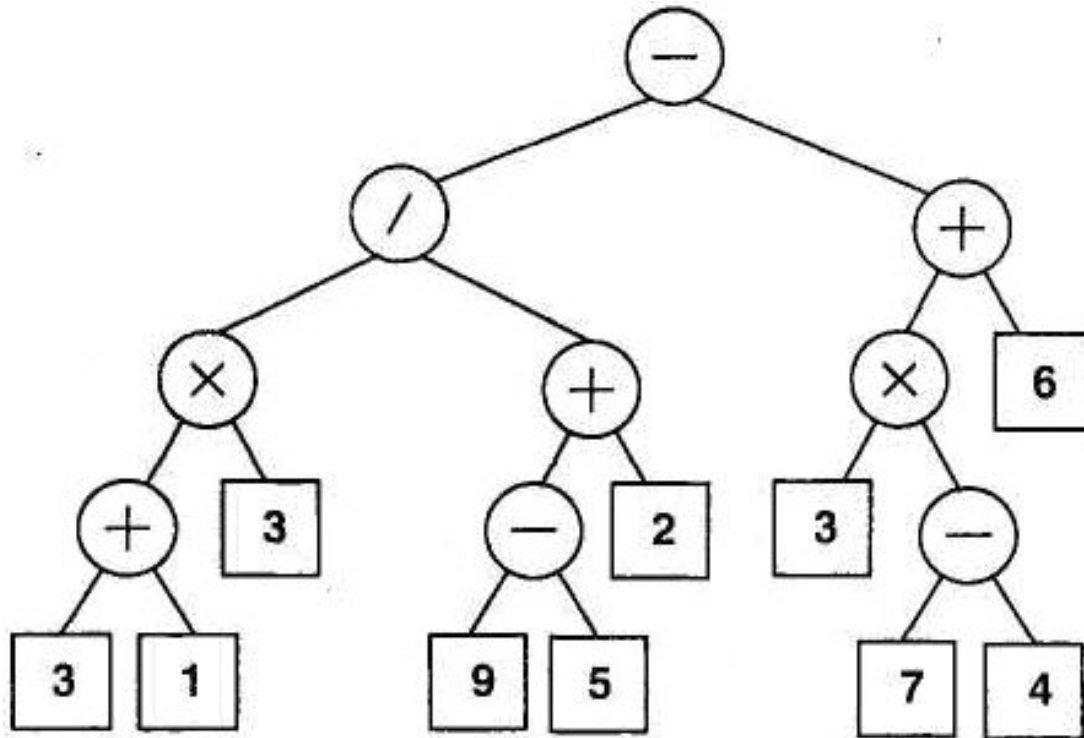
Дочерние элементы в таких узлах называют **«правый»** и **«левый» (left child и right child)**. Ответвление, берущее начало из левого или правого элемента составного узла v , будет называться соответственно **левым** или **правым ответвлением (left subtree и right subtree)** узла v .

Пример бинарного дерева – дерево решений



Пример бинарного дерева, представляющего арифметическое выражение

$$(((3 + 1) \times 3) / (9 - 5) + 2) - ((3 \times (7 - 4)) + 6)$$



АТД «Дерево»

В АТД «дерево» «узлы» будут представлены
ПОЗИЦИЯМИ

Для «Дерева» определены следующие группы
методов:

- ***методы доступа (accessor method)***
- ***методы запроса (query methods)***
- ***общие методы (generic method)***
- ***методы обновления (update methods)***

АТД «Дерево» - методы доступа

Root(): возвращает корень дерева.

Input: нет; ***Output:*** позиция.

Parent(v): возвращает родителя узла v ; ошибка, если v является корнем.

Input: позиция; ***Output:*** позиция.

Children(v): возвращает итератор дочерних элементов узла v .

Input: позиция; ***Output:*** итератор объектов позиций. Если дерево T упорядочено, то итератор Children(v) обеспечивает доступ к дочерним элементам узла v в определенном порядке. Для простого узла v Children(v) – пустой итератор.

АТД «Дерево» - методы доступа

- $\text{IsInternal}(v)$: проверяет, является ли v составным.
Input: позиция; ***Output:*** логическое значение.
- $\text{IsExternal}(v)$: проверяет, является ли v простым.
Input: позиция; ***Output:*** логическое значение.
- $\text{IsRoot}(v)$: проверяет, является ли v корнем.
Input: позиция; ***Output:*** логическое значение.

АТД «Дерево» - общие методы

- `Size()`: возвращает количество узлов в дереве.
Input: нет; ***Output:*** целое число.
- `Elements()`: возвращает итератор всех элементов, хранимых в узлах дерева.
Input: нет; ***Output:*** итератор объектов.
- `Positions()`: возвращает итератор всех узлов дерева.
Input: нет; ***Output:*** итератор позиций.

АТД «Дерево» - методы обновления

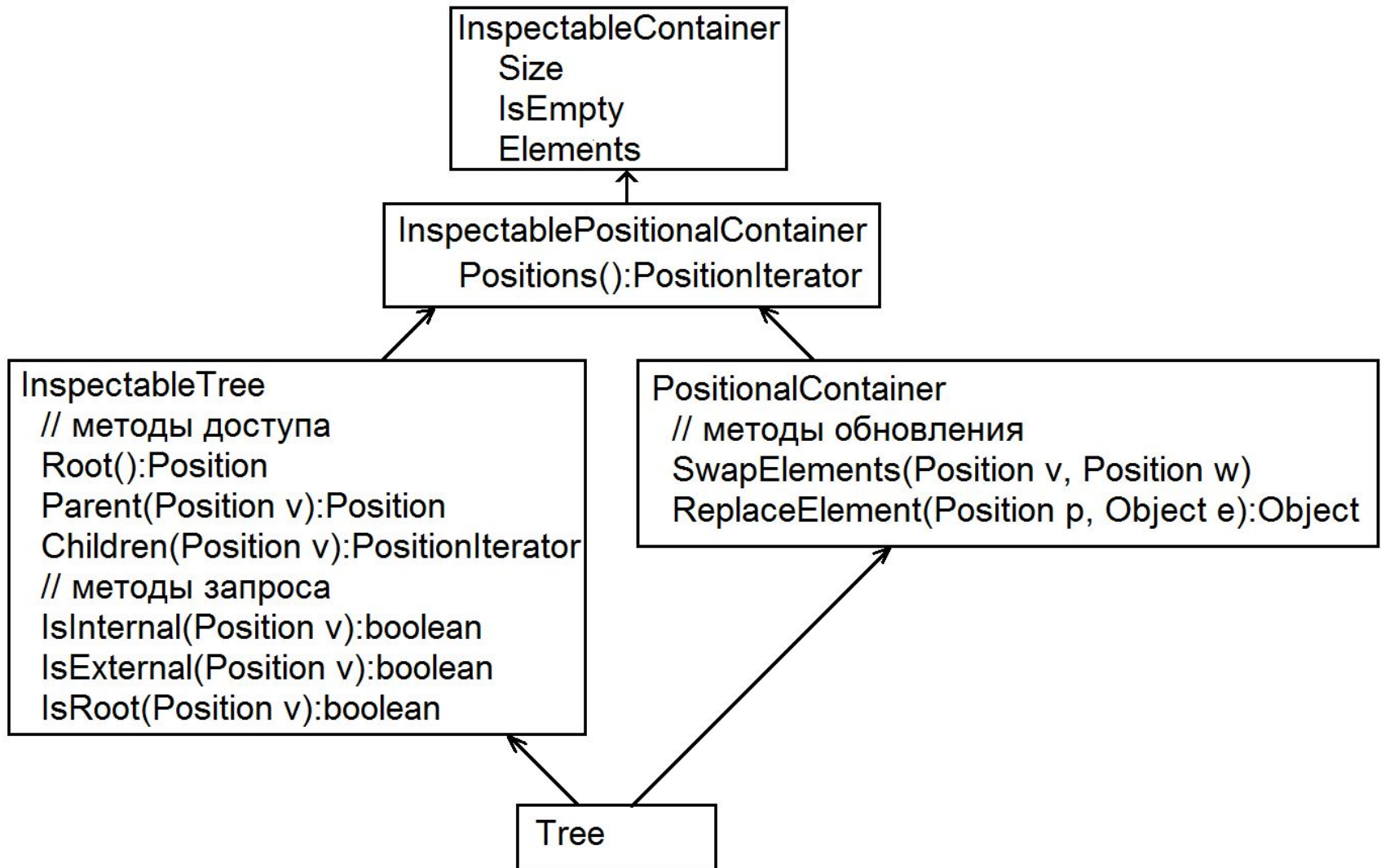
- $\text{SwapElements}(v, w)$: меняет местами элементы, хранимые в узлах v и w .

Input: две позиции; ***Output:*** отсутствует.

- $\text{ReplaceElement}(v, e)$: замещает на e и возвращает элемент, хранившийся в узле v .

Input: позиция и ее объект; ***Output:*** объект

Структура интерфейсов для АТД «Дерево»



Основные алгоритмы над деревьями

Предварительные допущения:

- Методы доступа `Root()` и `Parent()` выполняются за $O(1)$ времени.
- Метод доступа `Children(v)` требует $O(c_v)$ времени, где c_v — количество дочерних элементов v .
- Методы запросов `IsInternal(v)`, `IsExternal(v)` и `IsRoot(v)` также выполняются за $O(1)$ времени.
- Общие методы `SwapElements(v)` и `ReplaceElement(v,e)` требуют $O(1)$ времени.
- Общие методы `Elements()` и `Positions()`, возвращающие итераторы, выполняются за $O(n)$ времени, где n — количество узлов в дереве.
- Для итераторов, возвращаемых методами `Elements()`, `Positions()` и `Children(v)`, методы `HasNext()`, `NextObject()` или `NextPosition()` выполняются за $O(1)$ времени каждый.

Основные алгоритмы над деревьями – глубина узла

Глубина узла v - количество предков v , исключая сам v .

Рекурсивное определение:

- если v — корень, то его глубина равна 0;
- иначе глубина v равна 1+глубина родителя v .

```
public static int depth(InspectableTree T,  
                        Position v)  
{  
    if (T.IsRoot(v)) return 0;  
    else return 1 + depth(T, T.Parent(v));  
}
```

Время выполнения $\text{depth}(T, v)$ равно $O(1 + d_v)$, где d_v - глубина узла v дерева T . В худшем случае - $O(n)$.

Основные алгоритмы над деревьями - высота

Высота узла v дерева T :

- если v является простым узлом, то высота v равна 0;
- Иначе высота v равна 1 + максимальная высота дочернего элемента узла v .

Высота дерева T равна высоте корня T .

Утверждение. Высота дерева T равна максимальной глубине простого узла дерева T .

Основные алгоритмы над деревьями – высота 1

```
public static int height1(InspectableTree T)
{ int h = 0;
  PositionIterator positer = T.Positions();
  while (positer.HasNext())
  { Position v = positer.NextPosition();
    if (T.isExternal(v)) h = Math.Max(h, depth(T, v));
  }
  return h;
}
```

Основные алгоритмы над деревьями – высота 2

```
public static int height2(InspectableTree T, Position v)
{ if (T.IsExternal(v)) return 0;
  else
  { int h = 0;
    PositionIterator children = T.Children(v);
    while (children.HasNext())
      h = Math.Max(h, height2(T, children.NextPosition()));
    return 1 + h;
  }
}
```

Время выполнения `height2` для корня дерева T равно $O(n)$, где n — количество узлов T .

Проход дерева

Проход (traversal) – систематическая процедура, в ходе которой каждый узел дерева обрабатывается ровно 1 раз.

В первую очередь рассмотрим:

- прямой проход;
- обратный проход.

Прямой проход (preorder)

Алгоритм preorder(T,v):

выполнить "обращение" к узлу v

for для каждого узла w, дочернего к v **do**

выполнить preorder(T,w)

```
public static String preorderPrint(InspectableTree T, Position v)
{ String s=v.GetElement().ToString();
  PositionIterator children = T.Children(v);
  while (children.HasNext())
    s += "" + preorderPrint(T, children.NextPosition());
  return s;
}
```

Вычислительная сложность – $O(n)$

Обратный обход (postorder)

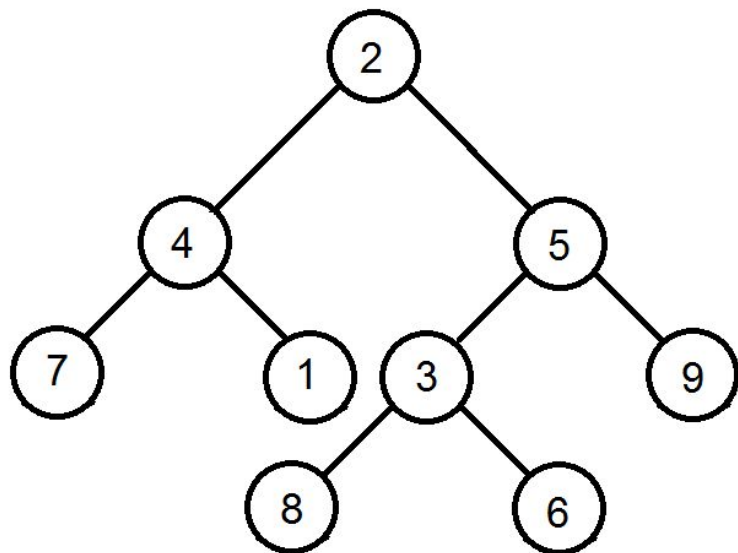
Алгоритм `postorder(r,v)`:

for для каждого узла `w`, дочернего к `v` **do**
 выполнить `postorder(T,w)`
 выполнить «обращение» к узлу `v`

```
public static String postorderPrint(InspectableTree T, Position v)
{   String s = "";
    PositionIterator children = T.Children(v);
    while (children.HasNext())
        s += postorderPrint(T, children.NextPosition()) + ""; s +=
        v.Element();
    return s;
}
```

Вычислительная сложность – $O(n)$

Прямой и обратный проходы



Прямой: 2 4 7 1 5 3 8 6 9

Обратный: 7 1 4 8 6 3 9 5 2

Когда требуется прямой или обратный проход?

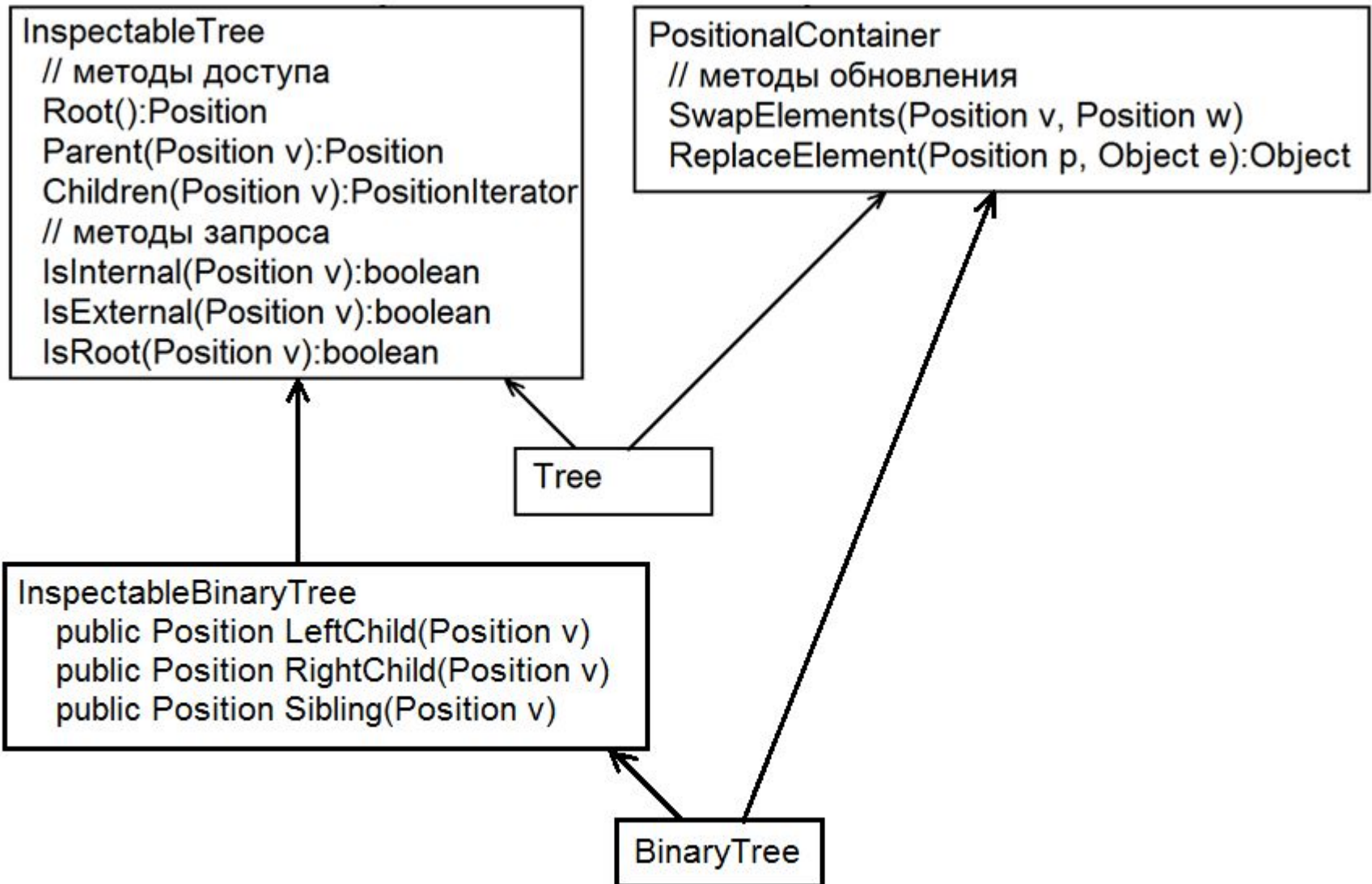
Бинарное дерево

Правильное бинарное дерево - упорядоченное дерево, в котором каждый составной узел имеет два дочерних элемента.

Три дополнительных метода доступа:

- **LeftChild(v)**: возвращает левый дочерний элемент узла v ; ошибка возникает, если v — простой узел.
Input: позиция, **Output**: позиция.
- **RightChild(v)**: возвращает правый дочерний элемент узла v ; ошибка возникает, если v — простой узел.
Input: позиция, **Output**: позиция.
- **Sibling(v)**: возвращает соседний узел (брата) узла v ; ошибка возникает, если v - корень.
Input: позиция, **Output**: позиция.

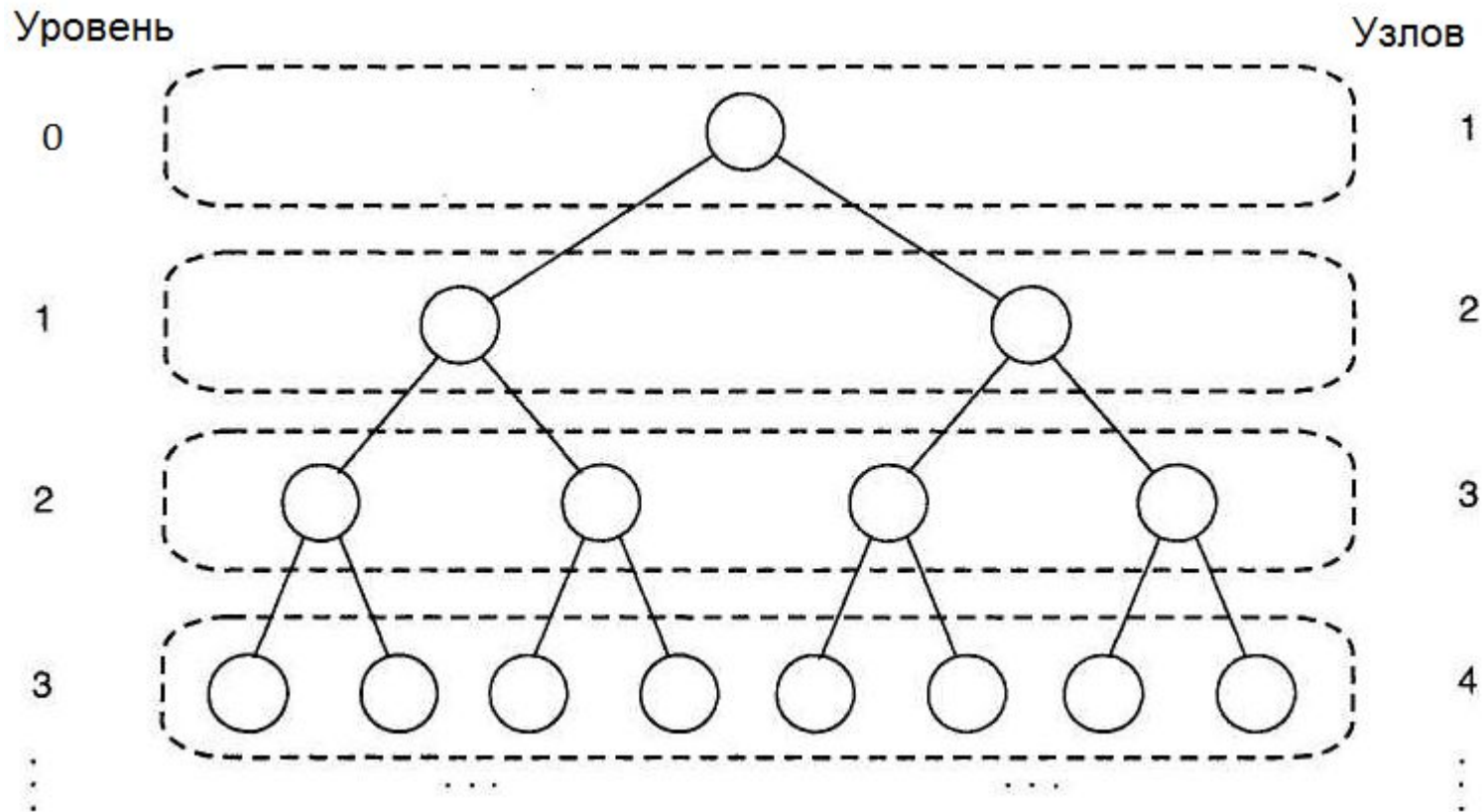
Структура интерфейсов для АТД «Бинарное дерево»



Свойства бинарного дерева

Уровень d дерева T - все узлы дерева T , расположенные на одной глубине d .

Уровень d бинарного дерева содержит максимум 2^d



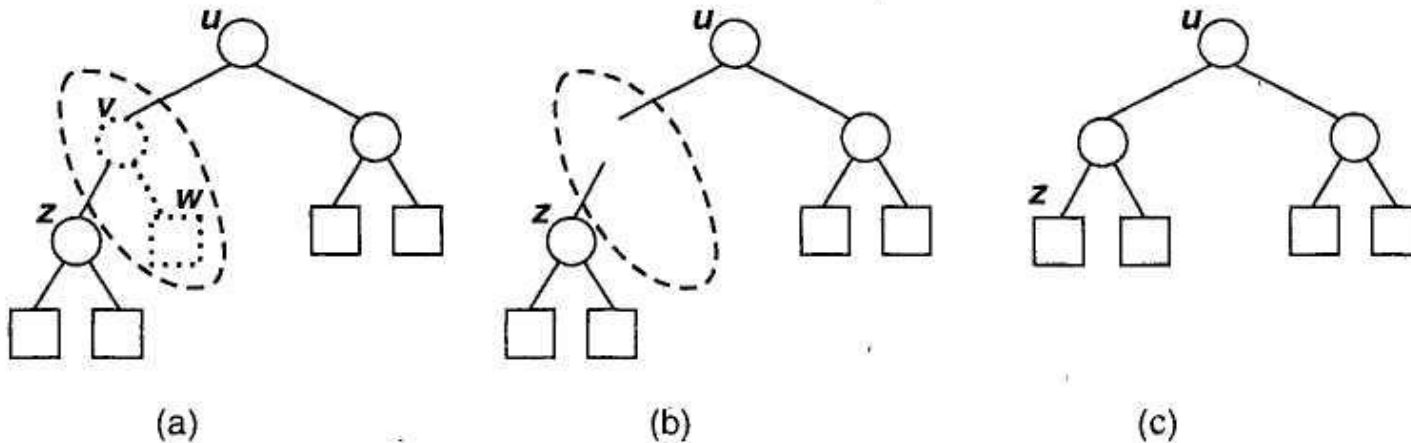
Свойства бинарного дерева

Утверждение 6.3. Допустим, T является бинарным (правильным) деревом с количеством узлов n и высотой h . Тогда T имеет следующие свойства:

- 1) количество простых узлов дерева T - $[h+1, 2^h]$
- 2) количество составных узлов дерева T - $[h, 2^h-1]$
- 3) общее количество n узлов дерева T - $[2^h - 1, 2^{h+1} - 1]$
- 4) высота дерева T - $[\log(n+1)-1, (n-1)/2]$

Свойства бинарного дерева

Утверждение 6.4. В бинарном (правильном) дереве T количество простых узлов на единицу больше количества составных узлов.



Операция `RemoveAboveExternal(w)`, удаляющая простой узел и его родителя и иллюстрирующая обоснование утверждения 6.4

Прямой проход бинарного дерева

Алгоритм binaryPreorder(T, v):

выполнить обращение к узлу v

if v составной узел **then**

{рекурсивное прохождение левой ветви}

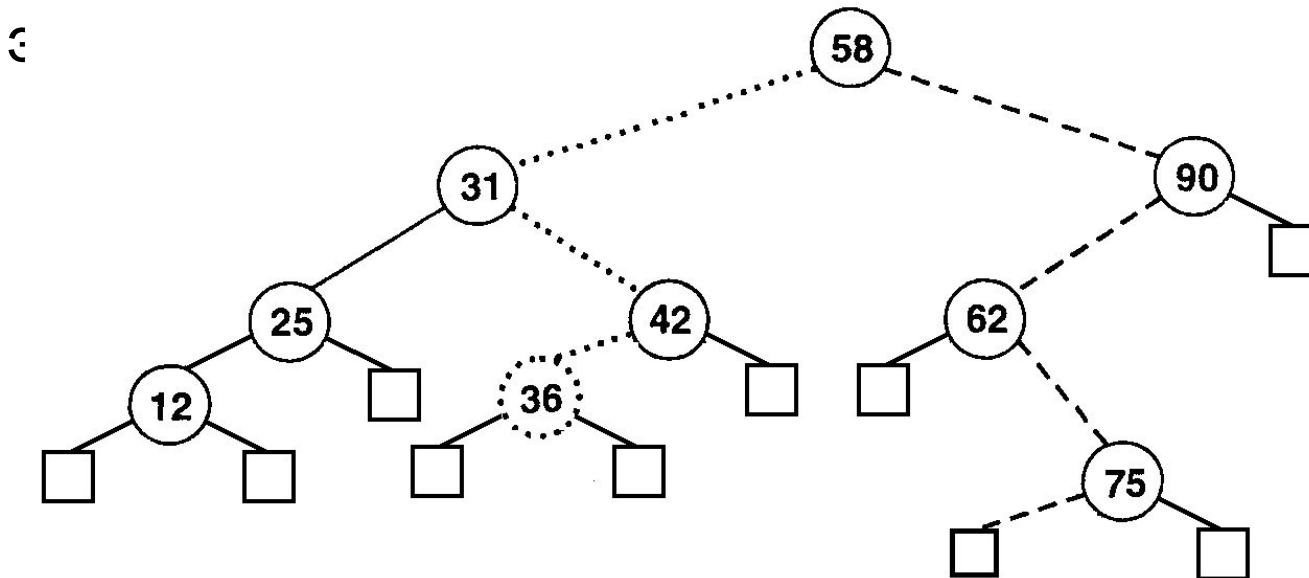
binaryPreorder(T, T.LeftChild(v))

{рекурсивное прохождение правой ветви}

binaryPreorder(T, T.RightChild(v))

Поисковые бинарные деревья

Бинарное поисковое дерево - дерево, в котором каждый составной узел v содержит элемент e , так что элементы, хранимые в левой ветви v , меньше или равны e , а элементы, хранимые в правой ветви v , больше или равны e . Простые узлы не содержат



Время поиска в бинарном поисковом дереве [$O(\log n)$, $O(n)$]

Обратный проход бинарного дерева

Алгоритм binaryPostorder(T, v):

if v составной узел **then**

{рекурсивное прохождение левой ветви}

`binaryPostorder(T, T.LeftChild(v))`

{рекурсивное прохождение правой ветви}

`binaryPostorder(T, T.RightChild(v))`

выполнить обращение к узлу v

Алгоритм evaluateExpression(T, v):

if v составной узел, хранящий оператор o , **then**

$x \leftarrow \text{evaluateExpression}(T, T.LeftChild(v))$

$y \leftarrow \text{evaluateExpression}(T, T.RightChild(v))$

return $x \ o \ y$

else

return значение, хранимое в v

Симметричный проход бинарного дерева

Алгоритм Inorder(T, v):

if v составной узел **then**

{рекурсивное прохождение левой ветви}

`inorder(T, T.LeftChild(v))`

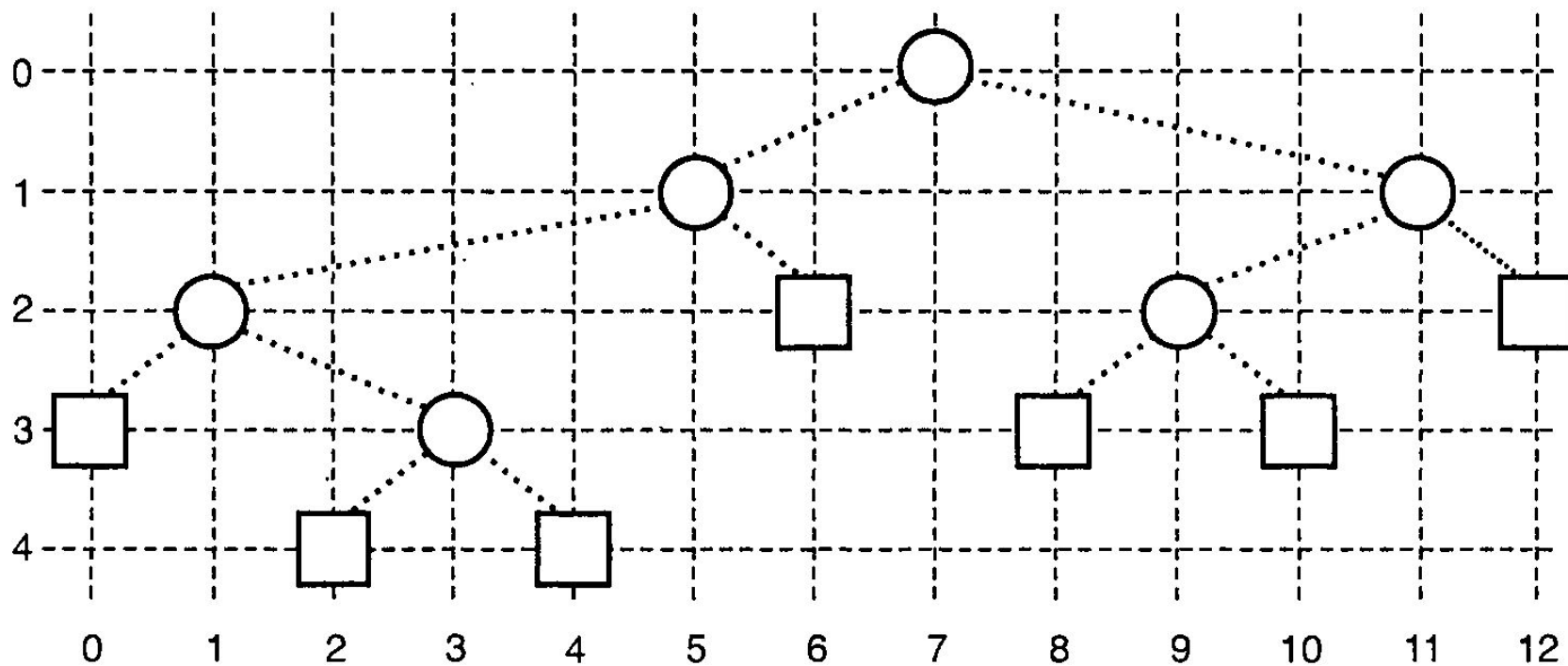
выполнить обращение к узлу v

if v составной узел **then**

{рекурсивное прохождение правой ветви}

`inorder(T, T.RightChild(v))`

Вычисление схемы бинарного дерева



- $x(v)$ равно количеству узлов, пройденных до обращения к v при симметричном проходе дерева T ;
- $y(v)$ равно глубине узла v в дереве T .

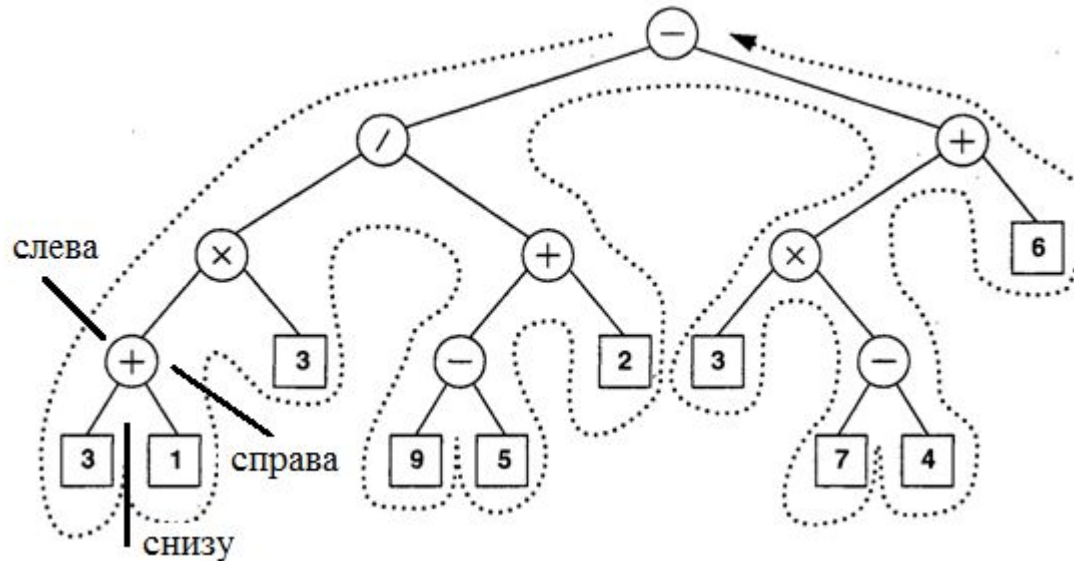
Унифицированная среда прохода дерева

Алгоритмы прохода дерева унифицируются в виде единого обобщенного подхода при отсутствии требования об одноразовом обращении к узлу.

Полученный в результате метод прохода будет называться «*проходом по Эйлеру*» (*Euler tour traversal*)

- Каждый узел v дерева T при эйлеровом проходе будет встречаться трижды:
- «слева» (до прохода вдоль левой ветви v);
- «снизу» (когда окажемся между двумя ветвями v);
- «справа» (при проходе вдоль правой ветви v).
- Если узел v простой (пустой), то эти обращения выполняются одновременно.

Унифицированная среда прохода дерева



Алгоритм $\text{eulerTour}(T, v)$:

выполнить обращение к узлу v слева

if v составной узел **then**

рекурсивно обойти левую ветвь узла v с помощью
 $\text{eulerTour}(T, T.\text{LeftChild}(v))$

выполнять обращение к v снизу

if v составной узел **then**

рекурсивно обойти правую ветвь узла v с помощью
 $\text{eulerTour}(T, T.\text{RightChild}(v))$

выполнять обращение к v справа