

РЕКУРСИЯ

*Чтобы понять рекурсию, нужно
сначала понять рекурсию.*

Из программистского фольклора

Содержание

2

- Понятие рекурсии
- Примеры рекурсивных алгоритмов
- Реализация механизма рекурсии
- Сравнение рекурсии и итерации
- Рекурсивные алгоритмы с заглядыванием вперед
- Рекурсивные алгоритмы с возвратом

Рекурсия

3

- Рекурсия – определение некоторого понятия через самое себя.



Рекурсия вокруг нас: литература

4

- У попа была собака, он ее любил.
Она съела кусок мяса, он ее убил.
В землю закопал и на камне написал:
 "У попа была собака ...
 "У попа была собака ...
 "У попа была собака ...
- С. Лем
 - СЕПУЛЬКИ — важный элемент цивилизации ардритов (*см.*) с планеты Энтеропия (*см.*). См. СЕПУЛЬКАРИИ.
 - СЕПУЛЬКАРИИ — устройства для сепуления (*см.*).
 - СЕПУЛЕНИЕ — занятие ардритов (*см.*) с планеты Энтеропия (*см.*). См. СЕПУЛЬКИ.
 - СЕПУЛЬКИ очень похожи на МУРКВИ, а своей цветовой гаммой напоминают мягкие ПЧМЫ.

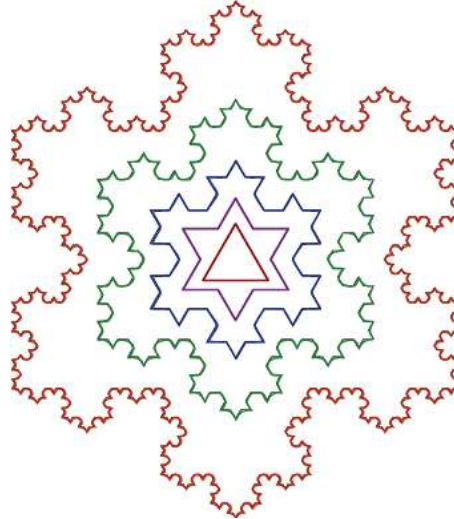
Рекурсия вокруг нас: математика

5

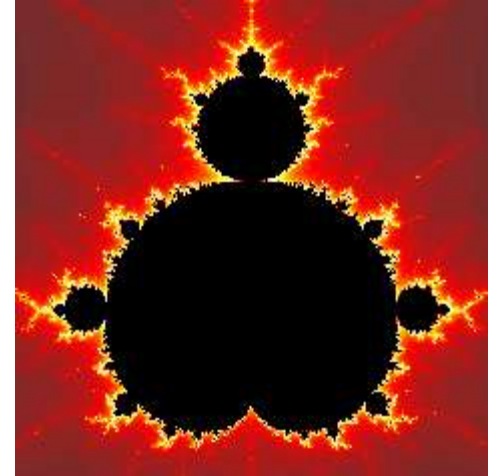
- Принцип математической индукции
- Фракталы (самоподобные множества нецелой размерности)



Треугольники Серпинского



Кривые Коха



Множество Мандельброта

Рекурсия вокруг нас: физика

6

- Взаимное отражение двух расположенных друг напротив друга зеркал (бесконечная рекурсия)
- Эффект положительной обратной связи у электронных схем усиления: сигнал с выхода попадает на вход, усиливается, снова попадает на вход схемы и снова усиливается (бесконечная рекурсия)



Рекурсия вокруг нас: головоломки

7

- В одном из буддийских монастырей монахи уже тысячу лет занимаются перекладыванием колец. Они располагают тремя пирамидами, на которых надеты кольца разных размеров.
- В начальном состоянии 64 кольца были надеты на первую пирамиду и упорядочены по размеру. Монахи должны переложить все кольца с первой пирамиды на вторую, выполняя единственное условие - кольцо нельзя положить на кольцо меньшего размера. При перекладывании можно использовать все три пирамиды.
- Монахи перекладывают одно кольцо за одну секунду. Как только они закончат свою работу, наступит конец света.



Рекурсия вокруг нас: головоломки

8

- Рекурсивный алгоритм решения задачи "Ханойские башни" **передвинуть** нужное количество *дисков* из пирамиды *источник* на пирамиду *задание*, используя *запасную* пирамиду
 - Если количество *дисков* равно одному, тогда **передвинуть** диск из *источника* в *задание*
 - В противном случае:
 - рекурсивно **передвинуть** все *диски*, кроме последнего, из *источника* в *запас*, используя *задание* как *запас*
 - **передвинуть** оставшийся *диск* из *источника* в *задание*
 - **передвинуть** все *диски* из *запаса* в *задание*, используя *источник* как *запас*



Рекурсивные алгоритмы

9

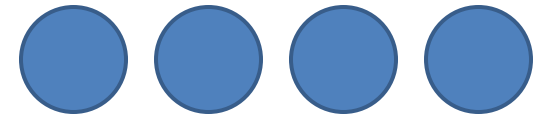
- *Рекурсивный алгоритм* – алгоритм, определяемый через себя.
- *Прямая рекурсия*: один из шагов алгоритма A формулируется как обращение к A .
- *Косвенная (взаимная) рекурсия*: один из шагов алгоритма A формулируется как обращение к алгоритму B , в котором один из шагов формулируется как обращение к алгоритму A .

Рекурсивные данные

10

□ $\langle \text{СПИСОК} \rangle ::= \langle \text{ЭЛЕМЕНТ} \rangle \mid \langle \text{ЭЛЕМЕНТ} \rangle \langle \text{СПИСОК} \rangle$

$\langle \text{ЭЛЕМЕНТ} \rangle ::= \bullet \mid \langle \text{ПУСТО} \rangle$



□ $\langle \text{ДЕРЕВО} \rangle ::=$

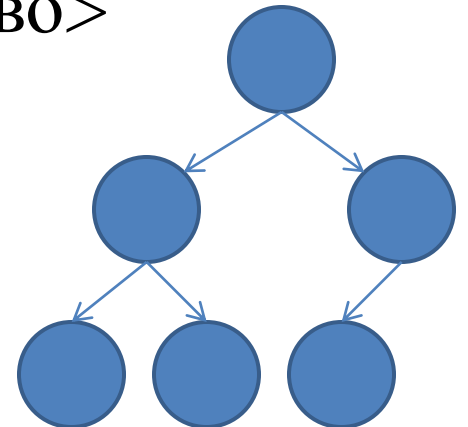
$\begin{array}{c} \langle \text{КОРЕНЬ} \rangle \\ \swarrow \quad \searrow \\ \langle \text{ЛЕВОЕ ПОДДЕРЕВО} \rangle \quad \langle \text{ПРАВОЕ ПОДДЕРЕВО} \rangle \end{array}$

$\mid \langle \text{ПУСТО} \rangle$

$\langle \text{ЛЕВОЕ ПОДДЕРЕВО} \rangle ::= \langle \text{ДЕРЕВО} \rangle$

$\langle \text{ПРАВОЕ ПОДДЕРЕВО} \rangle ::= \langle \text{ДЕРЕВО} \rangle$

$\langle \text{КОРЕНЬ} \rangle ::= \bullet$



Пример: факториал

11

$$f(n) = \begin{cases} 1, & n \leq 1 \\ n * f(n-1), & n > 1 \end{cases}$$

```
function Factorial(n: Integer): Integer;  
begin  
    if (n=0) or (n=1) then  
        Result:=1  
    else  
        Result:=n*Factorial(n-1);  
end;
```

Пример: числа Фибоначчи

12

$$f(n) = \begin{cases} 1, & n \leq 2 \\ f(n-1) + f(n-2), & n > 2 \end{cases}$$

```
function Fib(n: Integer): Integer;
begin
    if (n=1) or (n=2) then
        Result:=1
    else
        Result:=Fib(n-
1)+Fib(n-2);
end;
```

Пример: НОД

13

$$GCD(n, m) = \begin{cases} n, & m = 0 \\ GCD(m, n \bmod m), & m \neq 0 \end{cases}$$

```
function GCD(n, m: Integer): Integer;  
begin  
    if m=0 then  
        Result:=n  
    else  
        Result:=GCD(m, n mod m);  
end;
```

Пример: НОД

14

```
function GCD(n, m: Integer): Integer;  
begin  
  while (n<>0) and (m<>0) do  
    if n>=m then  
      n:=n mod m  
    else  
      m:=m mod n;  
  Result:=n +m;  
end;
```

Пример: биномиальные коэф-ты

15

- Биномиальный коэффициент $C(n, m)$ – число сочетаний из n по m , т.е. число способов сформировать m -элементное множество из множества, в котором n элементов.
- Если $m=n$ или $m=0$, то $C(n, m)=1$.
- Разобьем сочетания $C(n, m)$ на два подмножества по вхождению в них n -й элемент.
 - Тогда в подмножестве, в которое не входит n -й элемент, будет $C(n-1, m)$ сочетаний.
 - В подмножестве, в которое входит n -й элемент, будет $C(n-1, m-1)$ сочетаний: n -й элемент фиксирован, и можно делать выборки из $n-1$ по $m-1$ элементов.
- Таким образом, $C(n, m)=C(n-1, m)+C(n-1, m-1)$

Структура рекурсивного алгоритма

16

```
procedure Recursion(n: TParam; var Res: TOutput);  
begin  
  if n=SimplestValue then  
    Res:=SimplestRes  
  else begin  
    Simplify(n);  
    Recursion(n, Res);  
    Transform(Res);  
  end;  
end;
```

База рекурсии
(условие окончания
рекурсивных вызовов)

Тело рекурсии
(рекурсивные вызовы
подпрограммы)

Структура рекурсивного алгоритма

17

```
function Recursion(n: TParam): TOutput;  
begin  
    if n=SimplestValue then  
        Result:=SimplestRes  
    else  
        Result:=Transform(Recursion(Simplify(n)));  
end;
```

The diagram illustrates the structure of a recursive algorithm. The code is presented in a monospaced font. Two red callout boxes with arrows point to specific parts of the code. The first callout box, located to the right of the 'if' statement, contains the text 'База рекурсии (условие окончания рекурсивных вызовов)'. The second callout box, located to the right of the 'else' block, contains the text 'Тело рекурсии (рекурсивные вызовы подпрограммы)'. Red ovals are drawn around the 'if' statement and the 'else' block to visually group them.

База рекурсии
(условие окончания
рекурсивных вызовов)

Тело рекурсии
(рекурсивные вызовы
подпрограммы)

Пример: умножение

18

$$a * b = \underbrace{a + a + a + \dots + a}_{b_раз} = a + \underbrace{a + a + \dots + a}_{b-1_раз} = a + a * (b - 1)$$

```
function Mult(a, b: Integer): Integer;
begin
  if b=0 then
    Result:=0
  else
    if b<0 then
      Result:=-Mult(a,-b)
    else
      Result:=a+Mult(a,b-1);
end;
```

Пример: возведение в степень

19

$$a^b = \underbrace{a * a * a * \dots * a}_{b_раз} = a * \underbrace{a * a * \dots * a}_{b-1_раз} = a * a^{b-1}$$

```
function Power(a,b: Integer): Real;  
begin
```

```
    if b=0 then
```

```
        Result:=1
```

```
    else
```

```
        if b<0 then
```

```
            Result:=1/Power(a,-b)
```

```
        else
```

```
            Result:=a*Power(a,b-1);
```

```
            { или Result:=Mult(a,Power(a,b-1)); ☺ }
```

```
end;
```

Пример: метод половинного деления

20

- Корень уравнения $f(x)=0$ на отрезке $[a;b]$ с точностью $Eps>0$.
- База рекурсии
 - Пусть $[u;v] \subset [a;b]$. Если $f(u)=0$, то u – корень. Если $f(v)=0$, то v – корень.
 - Если $|v-u|<Eps$, то v – корень.
- Тело рекурсии
 - Найдем середину отрезка $c=(u+v)/2$.
 - Корень находится на том из двух отрезков $[u;c]$ и $[c;v]$, где $f(x)$ имеет на границах разные знаки.

Пример: метод половинного деления

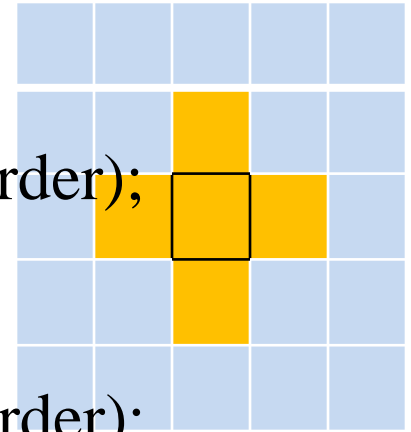
21

```
function FindRoot(u, v, Eps: Real; f: TFunc): Real;
var c: Real;
begin
  if (f(u)=0) or (v-u<=Eps) then
    Result:=u
  else
    if f(v)=0 then
      Result:=v
    else begin
      c:=(u+v)/2;
      if f(u)*f(c)>=0 then
        Result:=FindRoot(c, v, Eps, f)
      else
        Result:=FindRoot(u, c, Eps, f);
    end;
  end;
end;
```

Пример: закраска области

22

```
procedure Fill(x, y: Integer; Color, Border: TColor);
var c: TColor;
begin
    c:=GetPixelColor(x,y);
    if (c<>Border) and (c<>Color) then begin
        PutPixel(x,y,Color);
        if x-1>=MinX then Fill(x-1,y,Color,Border);
        if x+1<=MaxX then
Fill(x+1,y,Color,Border);
        if y-1>=MinY then Fill(x,y-1,Color,Border);
        if y+1<=MaxY then
Fill(x,y+1,Color,Border);
    end;
end;
```



Реализация механизма рекурсии

23

- При вызове подпрограммы ее локальные переменные и фактические параметры помещаются в *сегмент стека*.
- *Стек* – линейный список, в котором чтение и запись данных возможны только с одного конца (дисциплина LIFO – Last In First Out, последним включен, первым извлечен).
- *Прямой ход рекурсии*. Рекурсивный вызов подпрограммы оставляет в сегменте стека данные, помещенные туда на предыдущем вызове подпрограммы, и записывает на вершину стека данные текущего вызова.
- *Обратный ход рекурсии*. При достижении базы рекурсии рекурсивные вызовы прекращаются и начинается серия завершений вызовов с извлечением из стека сохраненных значений и использованием их для продолжения вычислений. Последним завершается первый вызов.

Реализация механизма рекурсии

24

```
function Factorial(n: Integer): Integer;  
begin  
    if (n=0) or (n=1) then Result:=1  
    else  
        Result:=n*Factorial(n-1);  
end;
```

Factorial(5)

5*Factorial(4)

5*4*Factorial(3)

5*4*3*Factorial(2)

5*4*3*2*Factorial(1)

Прямой ход



Реализация механизма рекурсии

25

```
function Factorial(n: Integer): Integer;  
begin  
    if (n=0) or (n=1) then Result:=1  
    else  
        Result:=n*Factorial(n-1);  
end;
```

Factorial(5)

5*Factorial(4)

5*4*Factorial(3)

5*4*3*Factorial(2)

5*4*3*2*Factorial(1)

5*24=120

4*6=24

3*2=6

2*1=2

1

Обратный ход



Пример: обращение строки

26

```
Program ReverseString;  
procedure Reverse;  
var Ch: Char;  
begin  
    Read(Ch);  
    if Ch<>" " then Reverse;  
    Write(Ch);  
end;  
begin  
    Reverse;  
end.
```

Рекурсия и итерация

27

□ *Рекурсия*

- решает задачу методом "от сложного к простому"; алгоритм – описание сложного объекта через более простой (простые) объект того же типа
- запись алгоритма, как правило, компактна, интуитивно понятна, красива
- исполнение алгоритма связано с большими накладными расходами и, как правило, более медленное, чем итеративное

□ *Итерация*

- решает задачу методом "от простого к сложному"; алгоритм – описание процесса построения сложного объекта из более простых объектов
- запись алгоритма не всегда компактна, интуитивно понятна
- исполнение итеративного алгоритма, не связано с большими накладными расходами и, как правило, более быстрое, чем рекурсивное

Пример: факториал

28

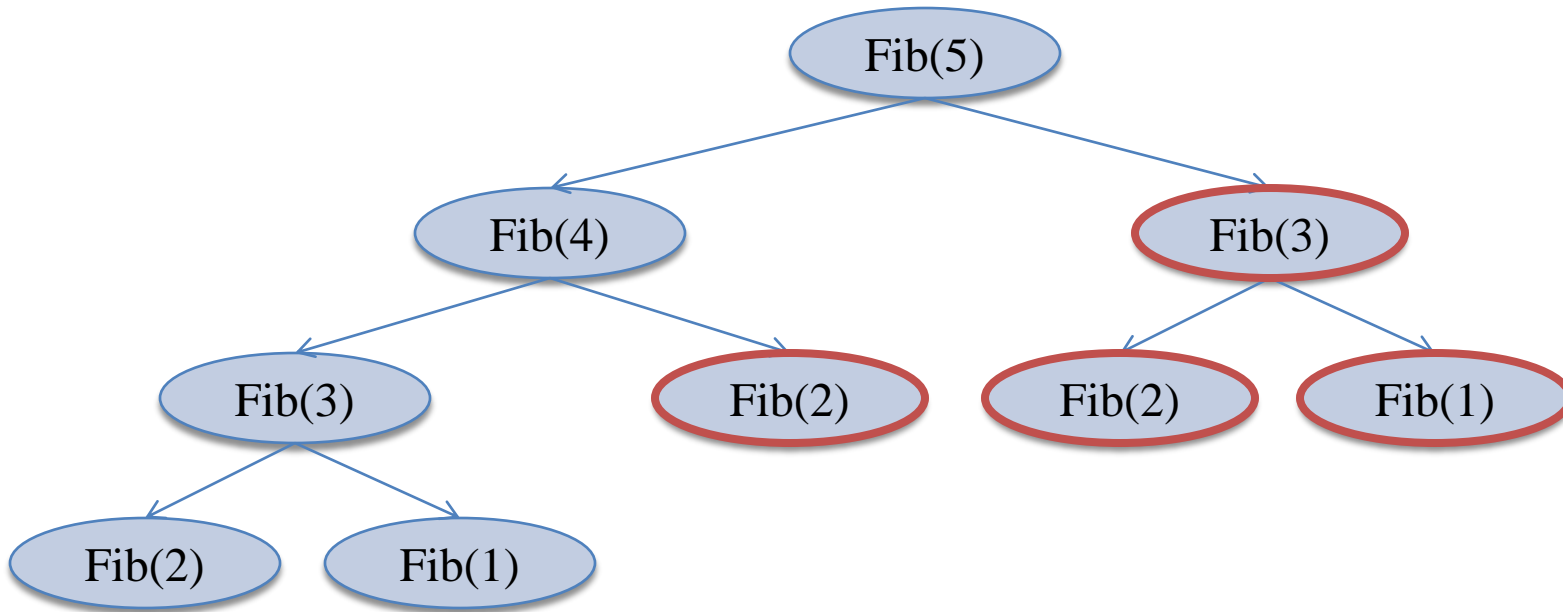
```
function Factorial(n: Integer):  
Integer;  
begin  
    if (n=0) or (n=1) then  
        Result:=1  
    else  
        Result:=n*Factorial(n-1);  
    end;  
end;
```

```
function Factorial(n: Integer):  
Integer;  
var i, Res: Integer;  
begin  
    Res:=1;  
    for i:=2 to n do  
        Res:=i*Res;  
    end;  
    Result:=Res;  
end;
```

Пример: числа Фибоначчи

29

Оператор $\text{Result} := \text{Fib}(n-1) + \text{Fib}(n-2)$ порождает "лишние" рекурсивные вызовы



Пример: числа Фибоначчи

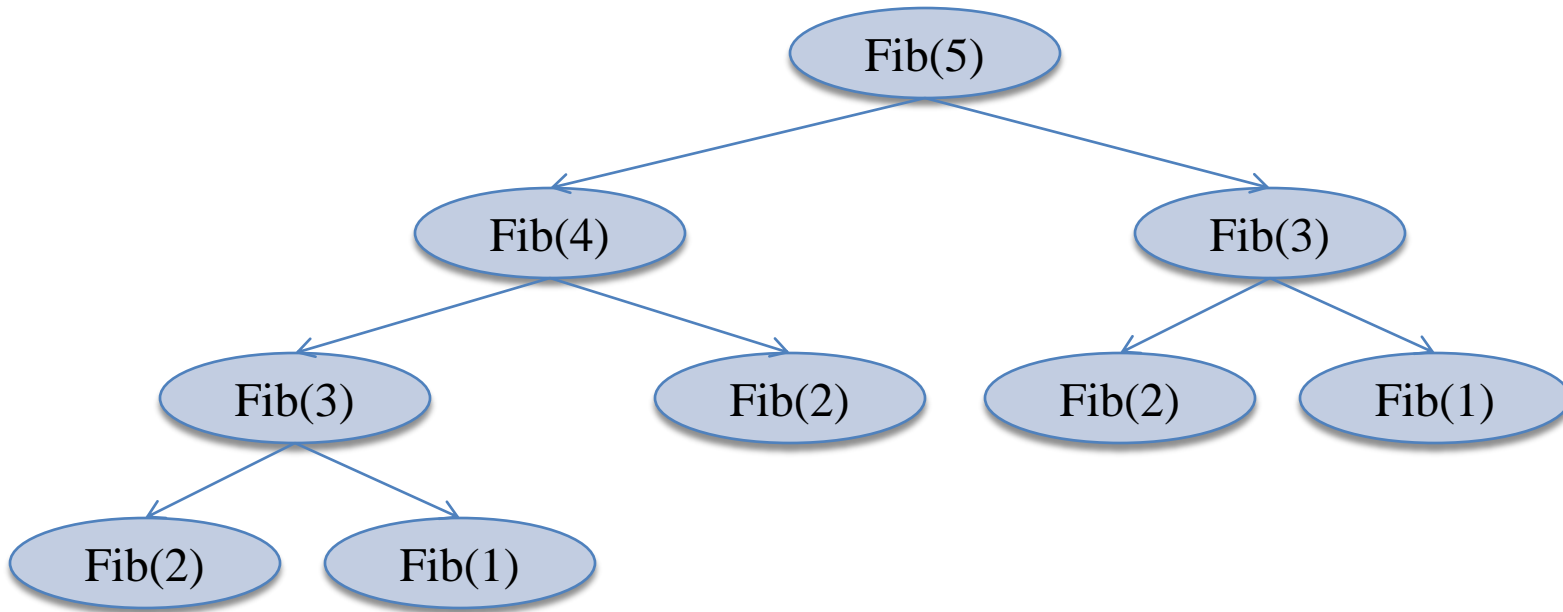
30

Операторы

$F1 := \text{Fib}(n-1); F2 := \text{Fib}(n-2);$

$\text{Result} := F1 + F2;$

также порождают "лишние" рекурсивные вызовы (но в другом порядке)



Пример: числа Фибоначчи

31

```
function Fib(n: Integer): Integer;  
begin  
    if (n=1) or (n=2) then  
        Result:=1  
    else  
        Result:=Fib(n-1)+Fib(n-2);  
    end;  
end;
```

$$Fib(n) = \frac{1}{\sqrt{5}} \left(\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n \right)$$

```
function Fib(n: Integer): Integer;  
var i, n1, n2, Res: Integer;  
begin  
    N1:=1; N2:=1;  
    Result:=1;  
    for i:=3 to n do begin  
        Res:=n1+n2;  
        n2:=n1;  
        n1:=Res;  
    end;  
    Result:=Res;  
end;
```

Пример: НОД

32

```
function GCD(n: Integer): Integer;  
begin  
  if m=0 then  
    Result:=n  
  else  
    Result:=GCD(m, n mod m);  
end;
```

```
function GCD(n: Integer): Integer;  
begin  
  while (n<>0) and (m<>0) do  
    if n>=m then  
      n:=n mod m  
    else  
      m:=m mod n;  
    Result:=n +m;  
end;
```


Пример: биномиальные коэф-ты

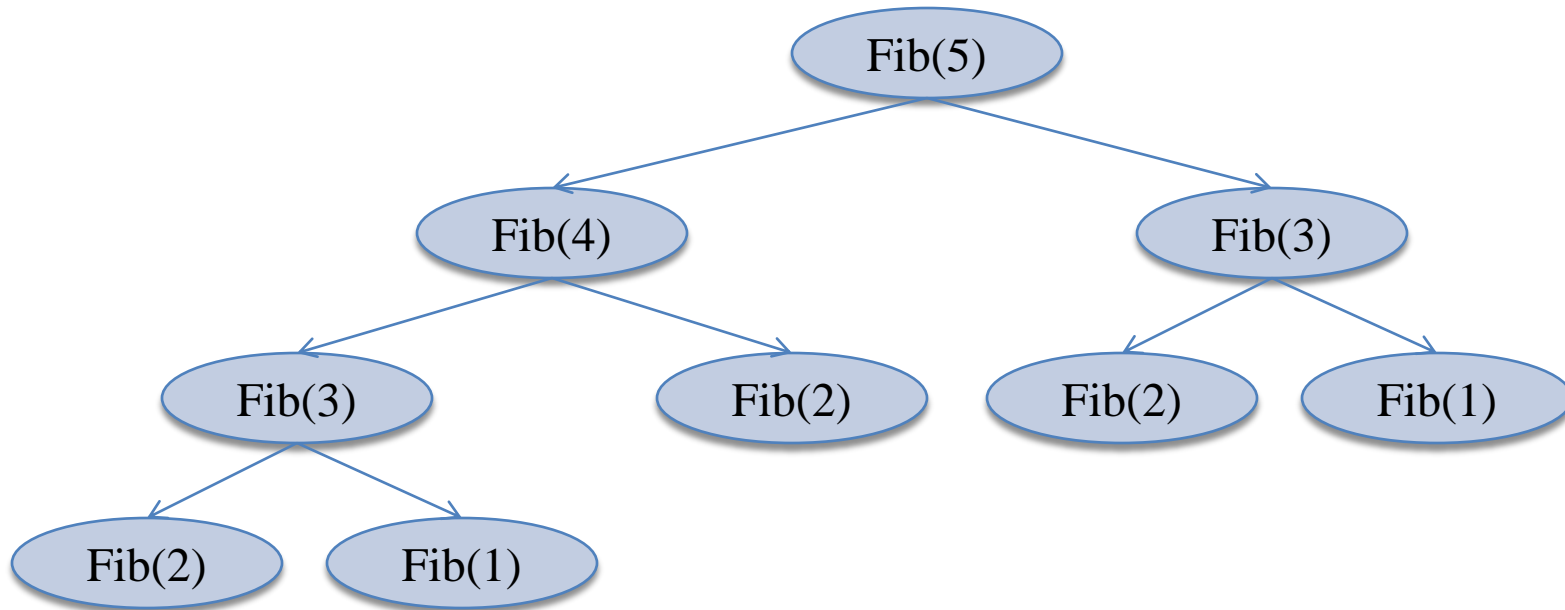
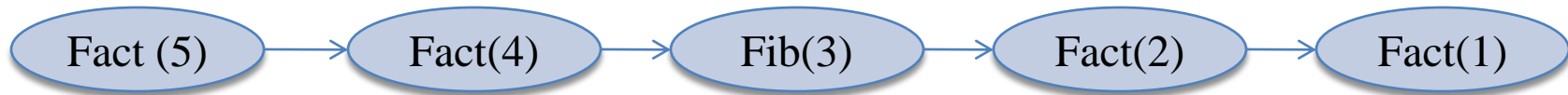
33

```
function C(n, m: Integer): Integer;
begin
  if (m=0) or (m=n) then
    Result:=1
  else
    Result:=C(n-1,m)+
      C(n-1,m-1);
end;
```

```
function C(n, m: Integer): Integer;
var i, k, l, p, q: Integer;
begin
  k:=max(n-m,m);
  l:=min(n-m,m);
  p:=1; q:=1;
  for i:=k+1 to n do p:=p*i;
  for i:=2 to l do q:=q*i;
  Result:=p div q;
end;
```

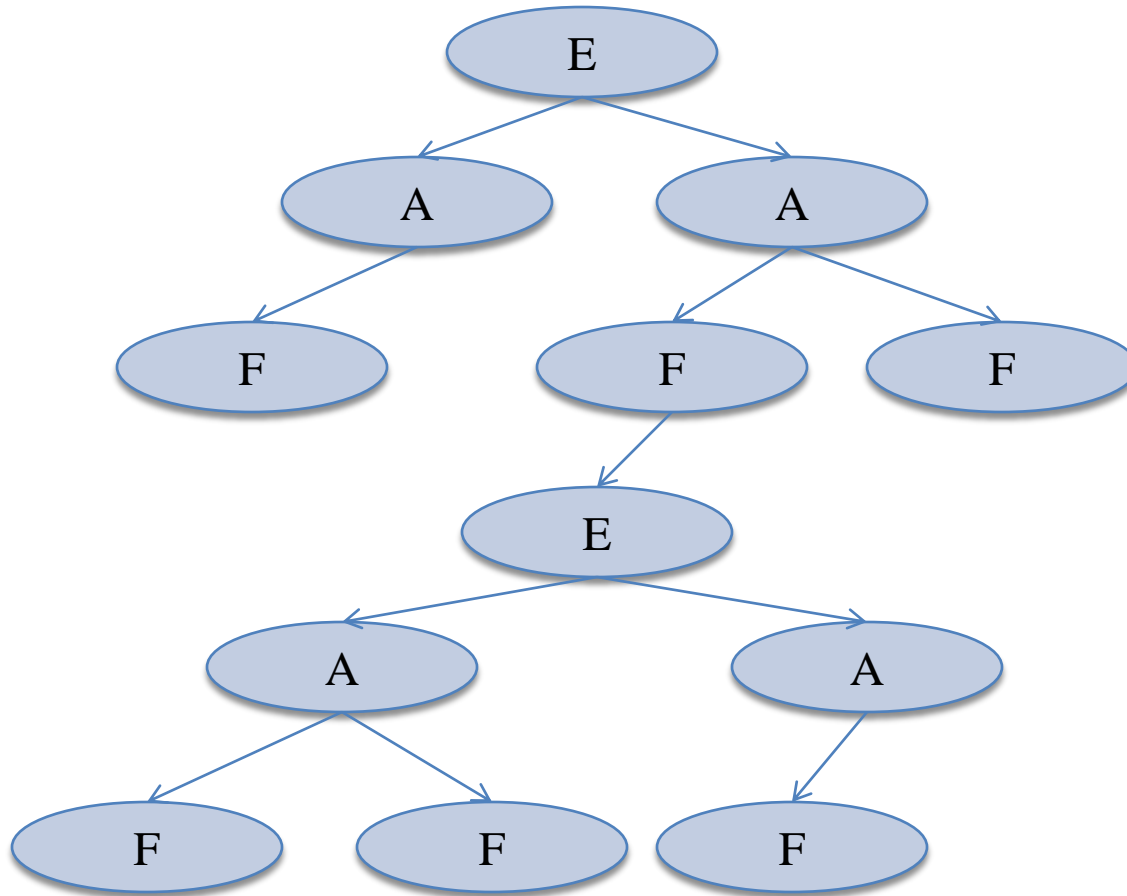
Количество рекурсивных вызовов

34



Количество рекурсивных вызовов

35



Распознавание символьной цепочки

36

- Разработать распознаватель символьной цепочки вида *<выражение>*.
 - *<выражение>* ::= *<слагаемое>*
[*<знак аддитивный>**<слагаемое>*]
 - *<слагаемое>* ::= *<множитель>*
[*<знак мультипликативный>**<множитель>*]
 - *<множитель>* ::= *<переменная>* | *<число>* |
(*<выражение>*)
 - *<знак аддитивный>* ::= + | -
 - *<знак мультипликативный>* ::= * | /
 - *<переменная>* ::= a | b | ... | z
 - *<число>* ::= 0 | 1 | ... | 9
- Примеры цепочек: $a+b+c$, $(c-d)*a+n/z$

Распознаватель цепочки

37



Распознавание цепочки: глобальные данные

38

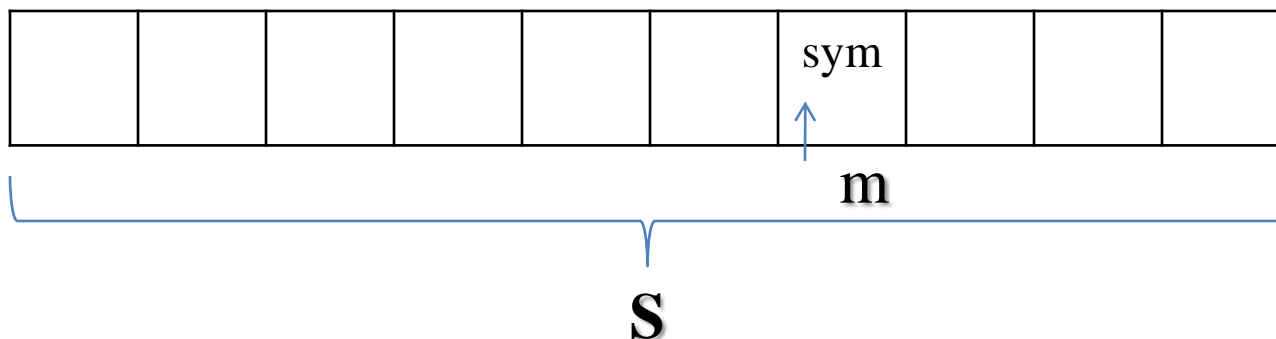
var

S: String; { распознаваемая строка }

Sym: Char; { текущий символ }

m: Integer; { маркер (номер текущего символа) }

IsError: Boolean; { флаг недопустимости
цепочки }



Распознавание цепочки: вспомогательные подпрограммы

39

{ Инициализировать }

```
procedure Init;
```

```
begin
```

```
  ReadLn(S);
```

```
  m:=1;
```

```
  Sym:=S[m];
```

```
  IsError:=TRUE;
```

```
end;
```

{ Передвинуть маркер }

```
procedure Next;
```

```
begin
```

```
  m:=m+1;
```

```
  Sym:=S[m];
```

```
end;
```

Распознавание цепочки:

вспомогательные подпрограммы

40

```
{ Текущий символ – буква? }  
function IsLetter: Boolean;  
begin  
    Result:=Sym in ['a'..'z'];  
end;
```

```
{ Текущий символ – цифра? }  
function IsDigit: Boolean;  
begin  
    Result:=Sym in ['0'..'9'];  
end;
```

```
{ Текущий символ – "("? }  
function IsLeftPar: Boolean;  
begin  
    Result:=Sym='(';  
end;
```

```
{ Текущий символ – ")"? }  
function IsRightPar: Boolean;  
begin  
    Result:=Sym=')';  
end;
```


Распознавание цепочки: вспомогательные подпрограммы

41

```
{ Достигнут конец строки? }  
function EOS: Boolean;  
begin  
    Result:=m>Length(S);  
end;
```

```
{ Возникла ошибка }  
procedure RaiseError;  
begin  
    IsError:=TRUE;  
end;
```

Распознавание цепочки: проверка цепочки

42

```
procedure Recognize; { Проверка цепочки }  
begin  
  if S<>" then  
    Expression; { Проверка выражения }  
  if (not IsError) and (S<>" ) and EOS then  
    WriteLn('Цепочка синтаксически правильна')  
  else  
    WriteLn('Цепочка содержит ошибки');  
end;
```

Распознавание цепочки: проверка выражения

43

```
procedure Expression; { Проверка выражения }
begin
    if IsLetter or IsDigit or IsLeftPar then begin
        Addend; { Проверка слагаемого }
        while IsPlusSign or IsMinesSign do begin
            Next;
            Addend; { Проверка слагаемого }
        end;
    end
    else
        RaiseError;
end;
```

Распознавание цепочки: проверка слагаемого

44

```
procedure Addend; { Проверка слагаемого }
begin
    if IsLetter or IsDigit or IsLeftPar then begin
        Factor; { Проверка множителя }
        while IsMulSign or IsDivSign do begin
            Next;
            Factor; { Проверка множителя }
        end;
    end
    else
        RaiseError;
end;
```

Распознавание цепочки: проверка множителя

45

```
procedure Factor; { Проверка множителя }
begin
  if IsLetter then Next else
    if IsDigit then Number else
      if IsLeftPar then begin
        Next;
        Expression; { Проверка выражения }
        if IsRightPar then Next
      end
    else RaiseError;
end;
```

Распознавание цепочки: тело программы

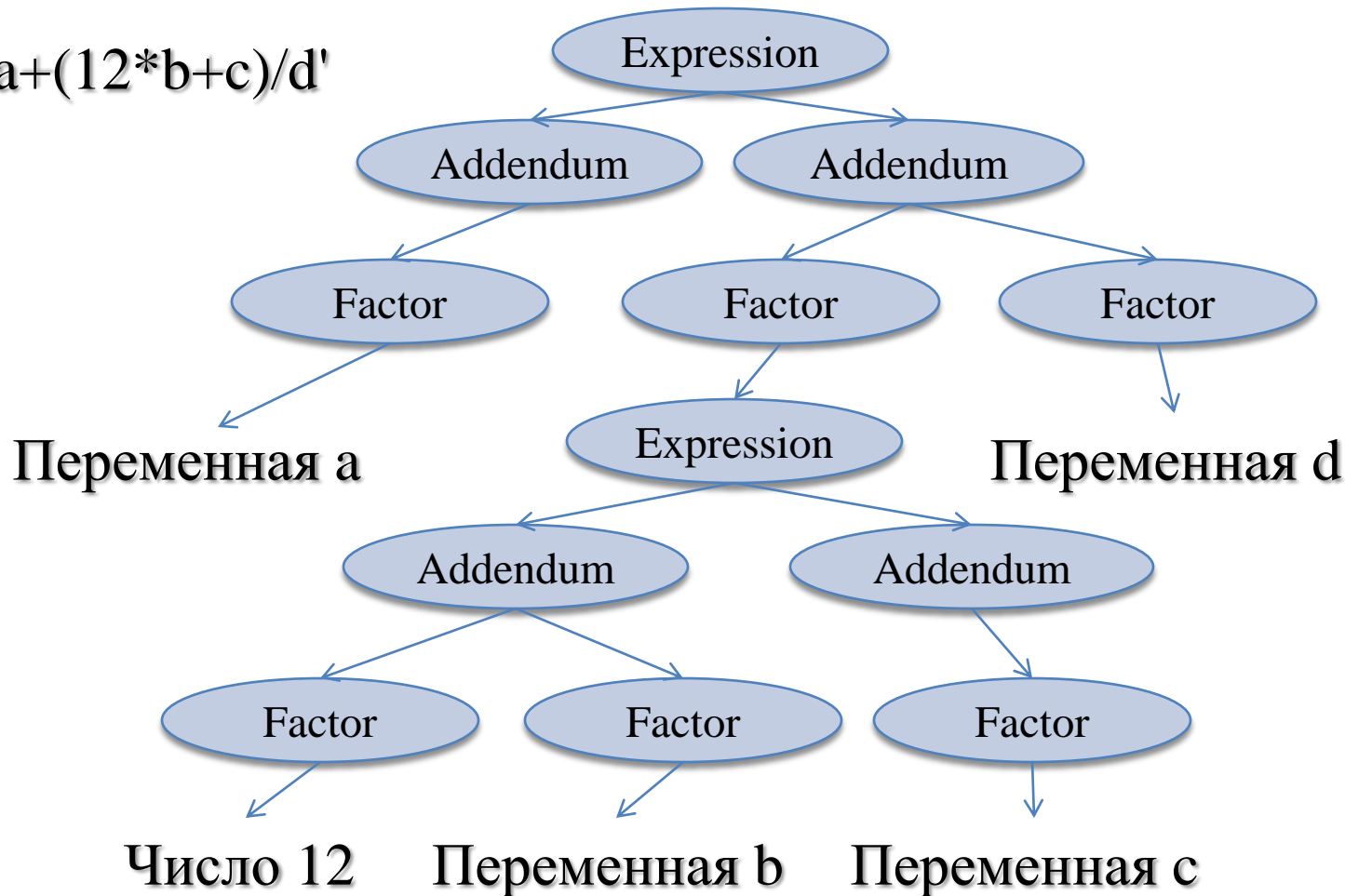
46

```
begin  
  Init;  
  Recognize;  
end;
```

Количество рекурсивных вызовов

47

$S = 'a + (12 * b + c) / d'$



Рекурсивные алгоритмы с возвратом

48

- Поиск с возвратом – метод перебора всех возможных решений для нахождения множества *полных решений*. *Частичное решение* определяет некоторое подмножество полных решений.
- При поиске частичного решения многократно делается попытка расширить *текущее частичное решение*. Если расширение невозможно, то на текущем шаге поиска происходит возврат к предыдущему (более короткому) текущему частичному решению и делается попытка расширить его другим способом.
- Задачи на поиск (перебор) с возвратом:
 - автоматизация процесса доказательства,
 - реализация стратегий в компьютерных играх,
 - поиск расстановок на шахматной доске
 - поиск путей в лабиринте.

Поиск пути в лабиринте

49

- Правила поиска пути от входа к выходу:
 - из текущего квадрата перейти в еще не исследованный соседний квадрат
 - если соседние квадраты уже исследованы и выход не найден, то вернуться на один квадрат назад по пройденному пути

0	0	0	1
0	1	0	0
1	0	1	0
0	1	0	0
0	0	0	1

Поиск пути в лабиринте

50

```
function SearchPath(iEntry, jEntry, iExit, jExit: Integer): Boolean;
var sp: Boolean;
begin
  if (iEntry=iExit) and (jEntry=jExit) then Result:=TRUE
  else begin
    sp:=FALSE;
    if IsDownPossible(iEntry,jEntry) then begin
      sp:=SearchPath(iEntry+1,jEntry);
      if sp then Path[iEntry+jEntry-1]:=DOWN;
    end;
    if not sp and IsRightPossible(iEntry,jEntry) then begin
      sp:=SearchPath(iEntry,jEntry+1);
      if sp then Path[iEntry+jEntry-1]:=RIGHT;
    end;
    Result:=sp;
  end;
end;
```


0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
1	1	0	1	0
0	0	0	1	1
1	0	0	0	0

ВПРАВО
ВНИЗ
ВПРАВО
ВНИЗ
ВНИЗ
ВНИЗ
ВПРАВО
ВПРАВО

Обход конем шахматной доски

51

```
function Knight(move,col,row: Integer): Boolean;
var colNew,rowNew: Integer; K: Boolean;
begin
  repeat
    K:=FALSE;
    GetNextMove(row,col,rowNew,colNew);
    if Board[rowNew,colNew]=0 then begin
      Board[rowNew,colNew]:=move;
      if move=N*N then tempRes:=TRUE else begin
        K:=Knight(move+1,colNew,rowNew);
        if not K then then Board[colNew,rowNew]:=0
      end;
    end
  until K or NoMoreMoves;
  Knight:=K;
end;
```

	1		8	
2				7
3				6
	4		5	

25	18	7	12	3
8	13	4	17	6
21	24	19	2	11
14	9	22	5	16
23	20	15	10	1

Заключение

52

- ❑ Рекурсивный алгоритм – алгоритм, определяемый через себя прямо или косвенно.
- ❑ Для создания корректного рекурсивного алгоритма необходимо определить базу и шаг рекурсии.
- ❑ Реализация механизма рекурсии: сегмент стека, прямой и обратный ход рекурсии
- ❑ Рекурсивные алгоритмы более красивы, чем итерационные, однако их выполнение связано с дополнительными накладными расходами.
- ❑ Одно из применений рекурсии – рекурсивные алгоритмы с заглядыванием вперед и рекурсивный поиск с возвратом.