

PascalABC.NET

Последовательности

- Тип `sequence of T`
- Генераторы последовательностей
- Ленивость
- Методы последовательностей
- Последовательности и массивы
- Операторы `yield` и `yield sequence`
- Бесконечные последовательности

Оглавление

- [Слайд 3. Что такое последовательность](#)
- [Слайд 4. Операции с последовательностями](#)
- [Слайд 5. Генератор Range и цикл for. Ленивость](#)
- [Слайд 6. Генераторы ReadSeqInteger и ReadSeqReal](#)
- [Слайд 7. Генераторы SeqGen](#)
- [Слайд 8. «Ленивость» вычислений](#)
- [Слайд 9. Генераторы SeqRandom](#)
- [Слайд 10. Простейшие методы последовательностей](#)
- [Слайд 11. Фильтрация, проекция и сортировка](#)
- [Слайд 12. Последовательности и массивы](#)
- [Слайд 13. Оператор yield](#)
- [Слайд 14. Оператор yield sequence](#)
- [Слайд 15. Бесконечные последовательности](#)
- [Слайд 16. Самое важное](#)

Что такое последовательность

- Последовательность **sequence of T** – это набор элементов, получаемых последовательно один за другим
- Элементы последовательности генерируются с помощью специальных функций – **генераторов последовательностей**. Простейшими генераторами являются функции `Seq` и `Range(a,b)`
- Генератор `Range(a,b,h)` возвращает последовательность целых в диапазоне от `a` до `b` с шагом `h`
- Для перебора элементов последовательности используется цикл **foreach**
- Вывести элементы последовательности можно также с помощью метода `Println`

Цикл foreach и метод Println

```
begin
  var sq: sequence of integer;
  // Seq генерирует последовательность, перечисляя значения
  sq := Seq(1,2,3,4,5);
  // Для перебора элементов последовательности используется
  // цикл foreach
  foreach var x in sq do
    Print(x);
  Println;
  var sql := Seq(1,3,5,7,9);
  // Метод Println выводит элементы через пробел
  sql.Println;
  Seq(2,4,6,8,10).Println
end.
```

```
1 2 3 4 5
1 3 5 7 9
2 4 6 8 10
```

Генерация с помощью Range

```
begin
  // Если a,b - целые, то Range(a,b) генерирует
  // последовательность целых в диапазоне от a до b с шагом 1
  var sq: sequence of integer := Range(1,5);
  foreach var x in sq do
    Print(x);
  Println;
  // Range(a,b,h) генерирует последовательность целых
  // в диапазоне от a до b с шагом h
  var sql := Range(1,9,2); // шаг 2
  sql.Println;
  // Range может генерировать последовательность символов
  // в заданном диапазоне
  Range('a','z').Println;
end.
```

```
1 2 3 4 5
1 3 5 7 9
a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z
```

Операции с последовательностями

- При сложении последовательностей $s1$ и $s2$ образуется последовательность, в которой после элементов последовательности $s1$ идут элементы последовательности $s2$
- При умножении последовательности на число n образуется последовательность, полученная сложением n штук исходных последовательностей
- Для поиска элемента в последовательности используется операция `in`

Сложение, операция `in`

```
begin
  var s := Seq(1,2,3) + Seq(4,5,6);
  s.Print;
  Println(4 in s);
  Println(8 in s);
end.
```

```
1 2 3 4 5 6
True
False
```

Умножение на число

```
begin
  var sq := Seq(1,2,3) * 3;
  sq.Print;
end.
```

```
1 2 3 1 2 3 1 2 3
```

Генератор Range и цикл for

- С помощью генератора Range(1,n) генерируется та же последовательность, что и в цикле for var i:=1 to n do
- Это означает, что Range можно использовать как замену цикла for – либо в комбинации с циклом foreach, либо в комбинации с использованием [методов последовательностей](#)
- Огромное преимущество генератора Range в том, что можно применять методы последовательностей, что позволяет записать решение **одной строкой**

Использование for

```
begin
  var n := 1000000;
  // Вычисление суммы квадратных корней чисел от 1 до n
  // с помощью цикла for.
  // Цикл for генерирует последовательность чисел от 1 до n,
  // которые последовательно записываются в переменную i
  var s := 0.0;
  for var i:=1 to n do
    s += Sqrt(i);
  s.Println;
end.
```

666667166.458842

Использование Range

```
begin
  var n := 1000000;
  var s := 0.0;
  // Вычисление суммы квадратных корней чисел от 1 до n
  // с помощью цикла foreach и генератора Range.
  // Range генерирует последовательность чисел от 1 до n,
  // которые цикл foreach последовательно записывает в i
  foreach var i in Range(1,n) do
    s += Sqrt(i);
  s.Println;
  // Другой способ вычисления суммы – с помощью метода Sum
  // для последовательности. Лямбда-выражение x->Sqrt(x)
  // проектирует все элементы x на Sqrt(x) и затем они
  // суммируются
  Range(1,n).Sum(x->Sqrt(x)).Println
end.
```

666667166.458842

666667166.458842

Генераторы ReadSeqInteger и ReadSeqReal

- С помощью генератора последовательности ReadSeqInteger(n) можно получить последовательность n целых, введённых с клавиатуры
- Аналогично ReadSeqReal(n) – последовательность n вещественных, введённых с клавиатуры
- Использование ReadSeqInteger и ReadSeqReal позволяет отделить получение значений от их обработки

Ввод значений в цикле

```
begin
  var n := 10;
  // Вычисление суммы n вводимых значений
  // Значение вводится и тут же обрабатывается
  // Недостаток – механизмы ввода и обработки перемешиваются
  var s := 0;
  loop n do
    begin
      var x := ReadInteger;
      s += x
    end;
    Print(x);
  end.
```

```
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
55
```

Ввод при помощи ReadSeq

```
begin
  var n := 10;
  // Вначале ReadSeqInteger формирует последовательность
  // вводимых данных. Таким образом, часть, связанная с
  // вводом, отделена от основного алгоритма
  // Тип sq автоматически выводится как sequence of integer
  var sq := ReadSeqInteger(n);
  // Далее идёт алгоритм вычисления суммы
  // Он не содержит операторов, связанных с вводом данных
  var s := 0;
  foreach var x in sq do
    s += x
  Print(x);
end.
```

```
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
55
```

Генераторы SeqGen

- Генераторы SeqGen позволяют задавать последовательности, используя различные алгоритмы:
 - SeqGen(n, i->f(i)) – i-тый элемент определяется формулой f(i), элементы индексируются с 0
 - SeqGen(n, first, x->next(x)) – первый элемент равен first, а каждый следующий определяется по предыдущему x формулой next(x)
 - SeqGen(n, a, b, (a,b)->next(a,b)) – первые два элемента равны a и b, а каждый следующий определяется по двум предыдущим формулой next(a,b)
- Параметр n задаёт количество элементов в последовательности

SeqGen – пример 1

```
begin
  var n := 10;
  // Последовательность квадратов значений начиная с нуля
  var q := SeqGen(n, i->i*i);
  foreach var x in q do
    Print(x);
  Println;
  // Последовательность кубов значений начиная с 1
  var q1 := SeqGen(n, i->i*i*i, 1);
  q1.Println;
end.
```

```
0 1 4 9 16 25 36 49 64 81
1 8 27 64 125 216 343 512 729 1000
```

SeqGen – пример 2

```
begin
  var n := 12;
  // Арифметическая прогрессия
  var q := SeqGen(n, 1, x->x+2);
  q.Println;
  // Геометрическая прогрессия
  var q1 := SeqGen(n, 1, x->x*2);
  q1.Println;
  // Числа Фибоначчи: первые два равны 1,
  // а каждое следующее – сумме двух предыдущих
  var q2 := SeqGen(n, 1, 1, (x, y)->x+y);
  q2.Println;
end.
```

```
1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23
1 2 4 8 16 32 64 128 256 512 1024 2048
1 1 2 3 5 8 13 21 34 55 89 144
```

«Ленивость» вычислений

- Элементы последовательности **не хранятся в памяти одновременно**, а вычисляются и возвращаются функцией-генератором по одному элементу
- Принцип получения элементов по мере необходимости в тот момент, когда они становятся нужны, называется **ленивостью вычислений**

Сохранение последовательности в переменной

```
begin
// В памяти не хранятся элементы последовательности!
var sq := Range(1,100000);
// В этот момент элементы ещё не начали вычисляться!
var sum := 0;
// Элементы последовательности начинают вычисляться по
// одному в момент прохода по ним циклом for.
// В каждый момент в памяти хранится только текущий элемент
foreach var x in sq do
    sum += x;
    sum.Println;
end.
```

705082704

Последовательность как алгоритм

```
begin
var n := 1000000;
// В переменной sq хранится алгоритм получения n членов
// геометрической прогрессии и значение текущего элемента
// Размер памяти, занимаемой переменной sq,
// мал и не зависит от n
var sq := SeqGen(n,1.0,t->t/2);

var sum := 0.0;
// На каждом шаге по предыдущему элементу t вычисляется
// следующий по правилу t := t/2
foreach var x in sq do
    sum += x;
    sum.Println;
end.
```

2

Генераторы SeqRandom

- Генераторы SeqRandomInteger(n) и SeqRandomReal(n) возвращают последовательность n случайных элементов соответствующего типа
- В вызовах SeqRandomInteger(n,a,b) и SeqRandomReal(n,a,b) дополнительные параметры a и b задают диапазон генерации случайных чисел [a,b]
- Из-за [ленивости](#) повторный проход по последовательности, созданной с помощью генераторов SeqRandom, возвращает **новые** значения(!)

Пример 1

```
begin
  var n := 5;
  // Последовательность случайных целых от 1 до 100
  var sq := SeqRandomInteger(n);
  sq.Println;
  // Последовательность случайных целых от 2 до 5
  SeqRandomInteger(n,2,5).Println;
  // Последовательность случайных вещественных от 0 до 10
  SeqRandomReal(n).Println;
  // Последовательность случайных вещественных от 1 до 2
  SeqRandomReal(n,1,2).Println;
end.
```

```
41 75 69 0 48
4 2 2 4 5
9.12771103863032 6.95180140759414 6.96582832232389
4.62824112019885 2.76186555286956
1.49661216768278 1.34373120467352 1.83351196573745
1.52549836715939 1.52268430382138
```

Пример 2

```
begin
  var n := 10;
  // Последовательность случайных целых от 1 до 100
  var sq := SeqRandomInteger(n);
  sq.Println;
  // При повторном использовании - другие случайные значения!
  sq.Println;
  // Чтобы при повторном использовании была та же
  // последовательность, её надо превратить в массив
  var sql := SeqRandomInteger(n,1,10).ToArray;
  sql.Println;
  sql.Println;
end.
```

```
54 70 7 61 93 66 68 74 100 71
15 49 41 19 74 66 10 51 63 17
5 5 9 6 10 5 7 10 7 2
5 5 9 6 10 5 7 10 7 2
```

Простейшие методы последовательностей

- Методы Count, Min, Max, Sum, Average вычисляют соответственно количество, минимальное и максимальное значение, сумму и среднее элементов последовательности
- Метод Count может вызываться с параметром-лямбдой, задающей условие отбора, а методы Min, Max, Sum, Average – с параметром-лямбдой, задающей проекцию
- Метод Take(n) вернёт последовательность из n первых элементов исходной последовательности, метод Skip(n) – последовательность после пропуска первых n элементов, метод TakeLast(n) – последовательность из n последних элементов исходной последовательности, метод SkipLast(n) – последовательность без n последних элементов, методы First и Last возвращают первый и последний элемент последовательности

Count, Min, Max, Sum, Average

```
begin
  var s := Seq(12,5,7,13,1,22,3,4,9,7,7,9);
  s.Println;
  Println('Количество =', s.Count);
  Println('Количество чётных =', s.Count(x->x mod 2=0));
  Println('Минимум =', s.Min);
  Println('Максимум =', s.Max);
  Println('Сумма =', s.Sum);
  Println('Сумма квадратов =', s.Sum(x->x*x));
  Println('Среднее =', s.Average);
end.
```

```
12 5 7 13 1 22 3 4 9 7 7 9
Количество = 12
Количество чётных = 3
Минимум = 1
Максимум = 22
Сумма = 99
Сумма квадратов = 1157
Среднее = 8.25
```

First, Last, Take, Skip

```
begin
  var s := Range(1,9);
  s.Println;
  Println(s.First, s.Last);
  s.Take(3).Println;
  s.Skip(3).Println;
  s.TakeLast(3).Println;
  s.SkipLast(3).Println;
end.
```

```
1 2 3 4 5 6 7 8 9
1 9
1 2 3
4 5 6 7 8 9
7 8 9
1 2 3 4 5 6
```

Фильтрация, проекция и сортировка

Важнейшими методами последовательностей являются:

- `Select(x -> f(x))` – проекция (трансформация) элементов `x` на элементы `f(x)`
- `Where(x -> filter(x))` – фильтрация (отбор) элементов, удовлетворяющих условию `filter`
- `OrderBy(x -> x)` – сортировка по возрастанию, `OrderBy(x -> x.поле)` – сортировка по заданному полю по возрастанию, `OrderByDescending` – сортировка по убыванию

Эти методы преобразуют последовательность в другую последовательность и могут вызываться **по цепочке**: `s.Where(x -> x>3).OrderBy(x -> x).Select(x -> x*x).Println` и т.д.

Select, Where, OrderBy

```
begin
  var s := Seq(1,5,3,8,7,6,4);
  s.Println;
  // Возвести все элементы в квадрат
  s.Select(x -> x*x).Println;
  // Отфильтровать элементы <7 и увеличить их на 10
  s.Where(x -> x<7).Select(x -> x + 10).Println;
  // Отфильтровать элементы >3 и отсортировать по возрастанию
  s.Where(x -> x>3).OrderBy(x -> x).Println;
end.
```

```
1 5 3 8 7 6 4
1 25 9 64 49 36 16
11 15 13 16 14
4 5 6 7 8
```

Последовательность объектов

```
type Pupil = auto class
  Имя: string;
  Возраст: integer;
end;

function Pup(n: string; a: integer) := new Pupil(n,a);

begin
  var s := Seq(Pup('Умнова',16),Pup('Иванов',23),
    Pup('Попова',17),Pup('Козлов',24));
  s.Where(x -> x.Возраст >= 18).Println;
  Println('Сортировка по фамилии:');
  s.OrderBy(x -> x.Имя).Println;
  Println('Сортировка по возрасту по убыванию:');
  s.OrderByDescending (x -> x.Возраст).Println;
end.
```

```
(Иванов,23) (Козлов,24)
Сортировка по фамилии:
(Иванов,23) (Козлов,24) (Попова,17) (Умнова,16)
Сортировка по возрасту по убыванию:
(Козлов,24) (Иванов,23) (Попова,17) (Умнова,16)
```

Последовательности и массивы

- Массив является последовательностью. Это значит, что массив можно присвоить переменной типа «последовательность», а также, что к массивам можно применять все методы, которые имеются у последовательностей
- Метод последовательности, применённый к массиву (например, `Select` или `Where`), возвращает последовательность (не массив!)
- Последовательность не является массивом, для ее явного преобразования к массиву надо использовать метод `ToArray`

Массив как последовательность

```
begin
  var a := Arr(7,5,9,3,6,4,1,10);
  var s: sequence of integer := a; // ОК
  a.Println;
  Println('Минимум =', a.Min);
  Println('Максимум =', a.Max);
  Println('Сумма =', a.Sum);
  Println('Сумма квадратов =', a.Sum(x->x*x));
  Println('Первый чётный =', a.First(x->x mod 2 = 0));
end.
```

```
7 5 9 3 6 4 1 10
Минимум = 1
Максимум = 10
Сумма = 45
Сумма квадратов = 317
Первый чётный = 6
```

Метод ToArray

```
begin
  var a := Arr(7,5,9,3,6,4,1,10);
  // a.Select возвращает последовательность
  // Чтобы присвоить результат массиву, надо преобразовать
  // последовательность в массив методом ToArray
  a := a.Select(x->x*x).ToArray;
  a.Println;
  // Вновь необходимо вызвать метод ToArray
  a := a.Where(x -> x mod 2 = 0).ToArray;
  a.Println;
end.
```

```
49 25 81 9 36 16 1 100
36 16 100
```

Оператор `yield`

- Чтобы написать функцию-генератор последовательности, используется оператор **yield**
- Оператор **yield** можно использовать только в функциях, возвращающих **sequence of T**
- Запрос одного значения у функции-генератора приводит к её выполнению до ближайшего вызова оператора **yield** `x`, после чего работа функции приостанавливается, запоминаются значения всех локальных переменных и функция возвращает значение `x`. Последующие запросы значения приведут к продолжению работы функции с приостановленного места.

Арифметическая прогрессия

```
// Функция-генератор арифметической прогрессии
function Arithm(n,a,d: integer):
  sequence of integer;
begin
  loop n do
  begin
    yield a;
    a += d;
  end;
end;

begin
  Arithm(10,1,3).Println
end.
```

```
1 4 7 10 13 16 19 22 25 28
```

Фильтрация элементов

```
// Функция-генератор, фильтрующая элементы
// последовательности по условию, задаваемому фильтром
function MyWhere<T>(s: sequence of T;
  filter: T->boolean): sequence of T;
begin
  foreach var x in s do
    if filter(x) then
      yield x;
  end;

begin
  var s := Range(1,9);
  MyWhere(s, x->x mod 2 <> 0).Println
end.
```

```
1 3 5 7 9
```

Оператор `yield sequence`

- Оператор **`yield sequence`** позволяет вернуть подпоследовательность в функции-генераторе последовательностей
- Оператор **`yield sequence`** по существу заменяется на цикл **`foreach`** по внутренней последовательности с возвратом всех значений с помощью **`yield`**

Слияние последовательностей

```
// Вначале возвращаются элементы первой
// последовательности, затем второй
function Seq12: sequence of integer;
begin
  yield sequence Seq(1,3,5);
  yield sequence Seq(2,4,6);
end;

begin
  Seq12.Println
end.
```

1 3 5 2 4 6

Инфиксный обход бинарного дерева

```
type Node<T> = auto class
  data: T;
  left,right: Node<T>;
end;

function CNode<T>(x: T; l: Node<T> := nil;
  r: Node<T> := nil): Node<T> := new Node<T>(x,l,r);

function Infix<T>(root: Node<T>): sequence of T;
begin
  if root = nil then exit;
  yield sequence Infix(root.left);
  yield root.data;
  yield sequence Infix(root.right);
end;

begin
  var root := CNode(1,CNode(2,CNode(3),CNode(4)),CNode(5));
  Infix(root).Print;
end.
```

3 2 4 1 5

Бесконечные последовательности

- Последовательность может быть бесконечной. Это возможно в силу [ленивости](#) последовательностей
- К бесконечной последовательности нельзя применять методы, которые проходятся по всей последовательности, во избежание заикливания
- Чаще всего бесконечная последовательность обрезается до конечной применением метода [Take\(n\)](#)
- Имеется ряд стандартных методов, генерирующих бесконечные последовательности: Cycle, Iterate, Step (см. их использование в приводимом ниже примере)

Генераторы бесконечных последовательностей

```
// Генератор бесконечной последовательности значений n
function Inf(n: integer): sequence of integer;
begin
    while True do
        yield n;
    end;
begin
    // В q хранится бесконечная последовательность
    var q := Inf(5);
    foreach var x in q.Take(10) do
        Print(x);
    Println;
    // В q1 хранится конечная последовательность!
    var q1 := q.Take(3);
    q1.Println;
end.
```

```
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
5 5 5
```

Методы с бесконечными последовательностями

```
begin
    // Cycle повторяет последовательность бесконечное число раз
    Seq(1, 2, 3).Cycle.Take(15).Println;
    // a.Step(d) генерирует бесконечную арифметическую
    // прогрессию от a с шагом h
    2.0.Step(0.5).Take(10).Println;
    // a.Iterate(x->f(x)) генерирует бесконечную рекуррентную
    // последовательность с первым элементом, равным a,
    // и рекуррентным соотношением  $x_{n+1} = f(x_n)$ 
    1.0.Iterate(x->x/2).Take(7).Println;
end.
```

```
1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3
2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5
1 0.5 0.25 0.125 0.0625 0.03125 0.015625
```

Самое важное

- Последовательности – важнейший тип данных PascalABC.NET. Они используются даже в простейших программах для начинающих. Последовательности являются обобщением массивов, списков, множеств и описываются типом **sequence of T**
- Цикл **foreach** специально вводился в язык как цикл по последовательности. Поскольку массивы, списки, множества и словари являются последовательностями, по ним также возможен цикл **foreach**
- Последовательность может не хранить свои элементы в памяти, а задаваться алгоритмом получения элементов. При использовании цикла **foreach** в каждый момент времени требуется только одна ячейка – для текущего элемента последовательности
- Последовательности могут быть бесконечными. Чтобы работать с ними, необходимы методы, которые берут часть элементов такой последовательности: например `sq.Take(n)`
- Последовательности возвращаются специальными функциями – **генераторами последовательностей**. В таких функциях используется оператор **yield**, генерирующий текущий элемент. Переменную `Result` в этих функциях использовать запрещено
- Для последовательностей существует огромное количество методов. Все они доступны также и для разновидностей последовательностей: массивов, списков, множеств и словарей
- Каждый метод последовательности представляет собой простейший алгоритм. В качестве параметров таких алгоритмов повсеместно используются лямбды – они позволяют передавать в методы действия (процедуры) и преобразования (функции).
- Методы последовательностей можно **комбинировать** для получения желаемого результата, используя точечную нотацию: `sq.Where(x -> x>3).OrderBy(x -> x).Select(x -> x*x).Println`. Подобная запись понятна, состоит из простых сменных модулей, просто модифицируется для решения родственных задач. Кроме того, алгоритм получения последовательности `sq` **отделён** от алгоритма её обработки