

Оглавление

1	Введение	1
1.1	Статический анализ кода	1
1.2	Неизменяемость в контексте объектно-ориентированного языка	2
1.3	Обзор существующих решений	3
1.3.1	C++	3
1.3.2	Java	6
1.3.3	C#	10
1.3.4	Javari	12
1.3.5	Immutability Generic Java	17
1.3.6	D	20
1.3.7	Uniqueness and Reference Immutability for Safe Parallelism	22
1.4	Постановка задачи	23
2	Основная часть	24
2.1	Подход к технической реализации	24
2.2	Система аннотаций	25
2.2.1	Ссылочная неизменяемость	26
2.2.2	Аннотации на методах	27
2.2.3	Перегрузка методов	29
2.2.4	Объектная неизменяемость	30
2.2.5	Исключение полей из абстрактного состояния объекта	31

2.2.6	Вложенные классы	32
2.2.7	Неизменяемые классы	32
2.2.8	Создание циклов неизменяемых объектов	32
2.3	Алгоритм вывода аннотаций	37
2.3.1	Вычисление полей, не входящих в абстрактное состояние объекта	38
2.3.2	Анализ методов на чистоту	38
2.3.3	Вычисление модификаторов изменяемости	40
2.3.4	Вычисление неизменяемых классов	42
2.4	Сравнение с существующими подходами	43
3	Заключение	44
3.1	Результаты работы	44
	Литература	44

1. Введение

1.1 Статический анализ кода

С течением времени сложность программных систем возрастает. Как следствие, их тестирование занимает все больше времени. При многопоточном программировании особенно часто проявляются ошибки, сложные для обнаружения, воспроизведения и анализа. Вся логика работы программы уже не может быть легко понята и осмыслена одним программистом. В связи с дороговизной ручного тестирования и большой сложностью программных систем активно развиваются различные виды автоматической проверки программ. Их можно условно разделить на два вида:

- автоматическая проверка корректности программы во время ее работы или работы ее отдельных частей
- проверка программы на корректность без ее запуска

К первой группе можно отнести всевозможные виды тестирования.

Определение 1.1.1. *Статический анализ кода – это анализ программного обеспечения, производимый без реального выполнения исследуемых программ.*

Статический анализ позволяет еще до запуска программы выявить многие виды ошибок, большинство из которых сложно искать и воспроизводить непосредственно во время работы приложения. В связи с этим

активно развиваются различные инструменты, позволяющие статически доказывать отсутствие в программах ошибок тех или иных видов.

1.2 Неизменяемость в контексте объектно-ориентированного языка

В различных контекстах понятие неизменяемости может пониматься по-разному. В данной работе рассмотрено несколько видов неизменяемости:

Определение 1.2.1. *Неизменяемый класс – класс, все экземпляры которого являются неизменяемыми.*

Определение 1.2.2. *Неизменяемая ссылка – ссылка, которая не может быть использована для изменения объекта, на который она указывает (при этом объект может быть изменен через другую ссылку).*

Если какая-либо система статического анализа позволяет выражать данное свойство объекта, будем говорить, что в данной системе есть поддержка *ссылочной неизменяемости*.

Определение 1.2.3. *Неизменяемый объект – объект, о котором известно, что не существует ни одной ссылки, через которую его можно изменить.*

Если какая-либо система статического анализа позволяет выражать данное свойство объекта, будем говорить, что в данной системе есть поддержка *объектной неизменяемости*.

Определение 1.2.4. *Глубокая (транзитивная) неизменяемость характеризует следующее свойство: если объект неизменяем, то неизменяемы также и все объекты, доступные из него по ссылкам.*

1.3 Обзор существующих решений

Рассмотрим, как проблема контроля изменяемости решается в различных объектно-ориентированных языках программирования.

1.3.1 C++

В языке C++ для выражения неизменяемости используется ключевое слово `const`. В общем случае можно сказать, что если какое-то значение неизменяемо, то в ту часть памяти компьютера, где оно хранится, не может быть произведена запись. В случае с нессылочными типами данных, если какая-либо переменная объявлена как `const`, то ее значение не может быть изменено после инициализации. Это означает, что в C++ есть объектная неизменяемость.

Листинг 1.1: Константная переменная

```
1 struct S
2 {
3     int val;
4 };
5
6
7 const S const_s;
8 const_s.val = 42;          // Error: const_s was declared as const
9 int i = const_s.val;      // OK: field val is accessed for
    reading,
10                               // not for writing
11
12 const S non_const_s;
13 non_const_s.val = 42;     // OK: non_const_s was not declared as
    const
```

Для указателей и ссылок значение модификатора `const` более сложное. Константным может быть сам указатель, значение, на которое он

указывает или оба. Если какая-либо переменная объявлена как константный указатель, то ее значение не может быть изменено после инициализации. Если переменная объявлена как указатель на константный объект, то ее значение может быть изменено, но ее нельзя использовать для изменения объекта, на который она указывает. Таким образом, в C++ есть ссылочная неизменяемость. Нужно заметить, что не существует никакого способа сказать, что некий указатель указывает на неизменяемый объект. Все то же самое касается ссылок.

Листинг 1.2: Константный указатель

```
1 struct S
2 {
3     int val;
4 };
5
6 void Foo( S * ptr,
7           S const * ptrToConst,
8           S * const constPtr,
9           S const * const constPtrToConst )
10 {
11     ptr->val = 0;    // OK: modifies the "pointee" data
12     ptr = NULL;    // OK: modifies the pointer
13
14     ptrToConst->val = 0; // Error: cannot modify the
15                          "pointee" data
16     ptrToConst = NULL; // OK: modifies the pointer
17
18     constPtr->val = 0; // OK: modifies the "pointee" data
19     constPtr = NULL; // Error: cannot modify the pointer
20
21     constPtrToConst->val = 0; // Error: cannot modify the
22                               "pointee" data
23     constPtrToConst = NULL; // Error: cannot modify the
24                               pointer
```

Методы, которые не изменяют значение объекта, на котором вызываются, могут быть помечены ключевым словом `const`. Тот факт, что метод действительно не изменяет объект, на котором вызывается, проверяется статически. Методы, помеченные как `const` могут быть вызваны как на константных, так и на неконстантных объектах. Методы, непомеченные как `const`, могут быть вызваны только на неконстантных объектах.

В данном подходе есть несколько недостатков. Первый из них связан с хранением в объекте указателей на другие объекты. Если некий объект является константным, то указатели, хранящиеся в нем в качестве полей, будут константными, но при этом они могут быть использованы для изменения объекта, на который ссылаются. Рассмотрим пример:

Листинг 1.3: Пример изменения значения по указателю в константном методе

```

1 struct S
2 {
3     int val;
4     int *ptr;
5 };
6
7 void Foo(const S & s)
8 {
9     int i = 42;
10    s.val = i; // Error: s is const, so val is a const int
11    s.ptr = &i; // Error: s is const, so val is a const int
12    *s.ptr = i; // OK: the data pointed to by ptr is always
13                mutable

```

Несмотря на то, что `s` передается в метод `Foo()` как константный (что также делает константными всех его членов), объект, доступный через `s.ptr` можно изменять. Таким образом, в C++ нет поддержки глубокой

неизменяемости.

Также в C++ невозможно вернуть ссылку, чья изменяемость зависит от изменяемости `this`. Поэтому, например, во всех коллекциях STL содержатся по две перегруженные версии `iterator` и `operator[]`, которые, фактически, делают одно и то же, отличаясь только константностью и, как следствие, константностью возвращаемого значения.

1.3.2 C#

В C# ключевое слово `readonly`, примененное к полям имеет следующий смысл: присвоение значения полю, которое было объявлено с модификатором `readonly` может произойти либо по месту его объявления, либо в конструкторе, если это нестатическое поле (для статического поля - в статическом конструкторе).

Листинг 1.4: Ключевое слово `readonly` в C#

```
1 using System;
2 public class ReadOnlyTest
3 {
4     class MyClass
5     {
6         public int x;
7         public readonly int y = 25; // Initialize a readonly
            field
8         public readonly int z;
9
10        public MyClass() {
11            z = 24; // Initialize a readonly instance field
12        }
13
14        public MyClass(int p1, int p2, int p3) {
15            x = p1;
16            y = p2; // OK: readonly field can be reassigned in
                constructor
```



```

17         z = p3;
18     }
19 }
20
21 public static void Main() {
22     MyClass p2 = new MyClass();
23     p2.x = 55;    // OK: field x is not readonly
24     p2.y = 33;    // Error: field y can't be reassigned, as
                   // it is readonly
25 }
26 }

```

В C# также есть ключевое слово `const`, которое обозначает, что значение переменной может быть присвоено только в момент ее объявления. То есть, поля объекта, объявленные как `readonly`, могут иметь различные значения в зависимости от того, какой конструктор и с какими параметрами был вызван. Поле, объявленное как `const` всегда будет иметь одно и то же значение.

Листинг 1.5: Ключевое слово `const` в C#

```

1 using System;
2 public class ReadOnlyTest
3 {
4     class MyClass
5     {
6         public int x;
7         public const int y = 25; // Initialize a const field
8
9         public MyClass() {
10             z = 24;    // Initialize a readonly instance field
11         }
12
13         public MyClass(int p1, int p2) {
14             x = p1;

```

```

15         y = p2;    // Error: const field can not be
                   reassigned in constructor
16     }
17 }
18
19 public static void Main() {
20     MyClass p2 = new MyClass();
21     p2.x = 55;    // OK: field x is not readonly
22     p2.y = 33;    // Error: field y can't be reassigned, as
                   it is const
23
24 }
25 }

```

1.3.3 Java

В языке Java есть ключевое слово `final`, обозначающее, что значение соответствующего поля или переменной не может быть переприсвоено. Если все поля некоторого объекта объявлены как `final`, то можно говорить о том, что данный объект неизменяем. Действительно, после завершения конструктора в `final` поле всегда может находиться один и тот же объект, но сам этот объект может быть изменен. Таким образом, в Java нет поддержки глубокой неизменяемости.

Листинг 1.6: Ключевое слово `final`

```

1 public class MyClass {
2     public final int[] values;
3
4     public MyClass() {
5         values = new int[10];
6     }
7 }
8
9 MyClass mc = new MyClass();

```

```

10 mc.values = new int[100]; // Error: field values was declared
    final
11 mc.values[2] = 4; // OK: values is declared final, but we can
    still
12                                // change object, referenced by this field.

```

Показательным является следующий пример: пусть есть некий класс, который содержит в себе ссылку на список объектов. Разработчик интерфейса этого класса хочет разрешить клиенту получать хранимый список, но не хочет, чтобы клиент мог модифицировать данный список. На Java код такого класса будет скорее всего выглядеть следующим образом:

Листинг 1.7: Неизменяемый список

```

1 public class ListContainer {
2     private final List<String> values = new
        ArrayList<String>();
3
4     public List<String> getValues() {
5         return Collections.unmodifiableList(values);
6     }
7 }

```

В данном случае, `Collections.unmodifiableList(values)` вернет обертку над исходным списком, у которой все изменяющие список методы переопределены так, что они бросают `UnsupportedOperationException`. Основным недостатком данного подхода является то, что ошибка будет обнаружена только во время выполнения программы. Ее локализация и исправление потребуют гораздо больше усилий, чем если бы данная ошибка была выявлена на этапе компиляции.

Листинг 1.8: Использование неизменяемого списка

```

1 ListContainer container = new ListContainer();
2 List<String> containerValues = container.getValues();
3 int size = containerValues.size(); // OK: getting size is
    permitted for immutable list

```

```

4 containerValues.add("Hello!");          // Error: this code will
    be successfully compiled, but
5                                          // will cause
                                          UnsupportedOperationException
                                          on runtime

```

Таким образом, в стандартной библиотеке Java неизменяемые коллекции реализованы просто как обертки над стандартными интерфейсами, у которых переопределены изменяющие объект методы. Так как при вызове `Collections.unmodifiableList()` копирования элементов не происходит, то все изменения, сделанные в исходной коллекции, будут "видны" в `containerValues`. Таким образом, результат работы метода `ListContainer.getValues()` является в некотором смысле неизменяемой ссылкой – через эту ссылку нельзя менять объект, но существуют другие ссылки на данный объект, через которые его можно менять.

Можно ли каким-либо образом избежать возможной ошибки времени исполнения, при этом не позволяя пользователю добавлять элементы в список `values`, хранящийся в `ListContainer`? Можно переписать класс `ListContainer` следующим образом:

Листинг 1.9: Неизменяемый список

```

1 public class ListContainer {
2     private final List<String> values = new
        ArrayList<String>();
3
4     public List<String> getValues() {
5         return new ArrayList<String>(values);
6     }
7 }

```

В этом случае, будет создана независимая копия списка `values`, которая и будет возвращена пользователю. Любые изменения, производимые с этой копией, не затронут исходный список.

Альтернативный подход можно наблюдать на примере библиотеки `gs-collections` ¹. В ней есть две отдельные иерархии коллекций – для изменяемых коллекций и для неизменяемых. Таким образом, попытка вызвать изменяющий коллекцию метод на неизменяемой коллекции приведет к ошибке компиляции.

Листинг 1.10: Неизменяемый список

```
1 public class ListContainer{
2     private final MutableList<String> values = new
        FastList<String>();
3
4     public ImmutableList<String> getValues() {
5         return values.toImmutable();
6     }
7
8 }
```

С одной стороны, этот подход позволяет избежать ошибок, связанных с неправомерным изменением объектов во время выполнения программы, но с другой его реализация требует написания гораздо большего количества кода. В таком подходе есть еще одна проблема: структура интерфейсов и их реализации полностью определяются создателем библиотеки и ее пользователь имеет гораздо меньше свободы в ее использовании.

Часто в документации к Java-коду можно встретить информацию о том, что фактически объект, возвращаемый каким-либо методом является неизменяемым. Или, например, в документации к интерфейсу `Map` сказано, что "необходима большая осторожность при использовании изменяемых объектов в качестве ключей". Наличие подобной информации в документации показывает, что выразительных средств языка не хватает для выражения утверждений об изменяемости объектов и что, если бы подобные средства существовали, они могли бы быть востребованы.

¹<https://github.com/goldmansachs/gs-collections>

1.3.4 Javari

Javari – это расширение языка Java, которое добавляет в Java ссылочную неизменяемость, комбинируя статические и динамические проверки неизменяемости. Авторы вводят следующее определение:

Определение 1.3.1. *Абстрактное состояние объекта – это состояние самого объекта и все достижимые из него по ссылкам состояния.*

Javari предоставляет гарантии относительно всего транзитивно достижимого состояния объекта – то есть, состояния самого объекта и состояний всех объектов, доступных из него по нестатическим ссылкам. При этом некоторые части класса могут быть исключены из его абстрактного состояния.

Javari добавляет к Java пять дополнительных ключевых слов `assignable`, `readonly`, `mutable` и `romaby`. Рассмотрим их использование на примерах.

Пусть, например, переменная `rodate` имеет тип `readonly Date`. Тогда `rodate` не может быть использована только для тех операций, которые не меняют объект, на который ссылается `rodate`:

Листинг 1.11: Неизменяемая ссылка

```
1  readonly Date rodate = ...; // readonly reference to a Date
   object
2  rodate.getMonth();        // OK
3  rodate.setYear(2005);     // Error
4
5  /*mutable*/ Date date = new Date(); // mutable Date
6  rodate.getMonth();        // OK
7  rodate.setYear(2005);     // Error
```

Пусть в Java существует некий ссылочный типа `T`. Тогда `readonly T` в Javari является супертипом `T`. Изменяемая ссылка может быть использована везде, где ожидается неизменяемая ссылка. Это связано с тем, что неизменяемая ссылка только лишь запрещает менять объект, на который

она ссылается, при этом ничего относительно этого объекта не гарантируя.

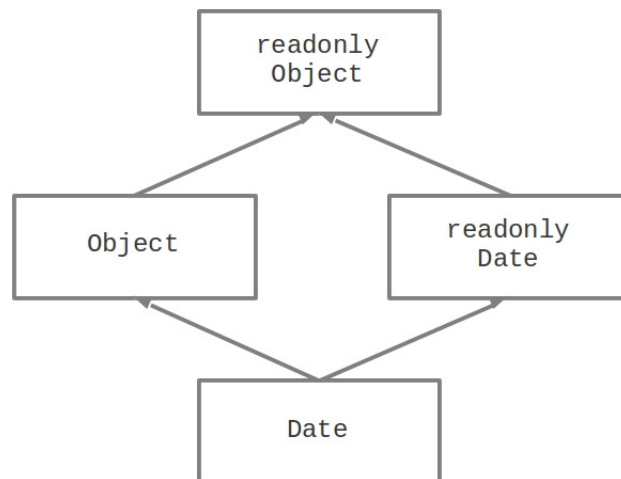


Рис. 1.1: Фрагмент иерархии классов в Javari

На данном рисунке представлена иерархия типов в Javari. Система типов гарантирует, что изменяющие объект методы не могут быть вызваны на неизменяемых ссылках.

Ключевое слово `readonly` может быть использовано при декларации любой переменной, поля, параметра или возвращаемого значения метода. Его также можно применять к неявному параметру `this`:

Листинг 1.12: `readonly` метод

```
1 public char charAt(int index) readonly { ... }
```

В контексте этого метода `this` будет неизменяемым.

Модификаторы изменяемости, введенные в Javari не меняют поведения программы во время исполнения. Такой подход обеспечивает обратную совместимость файлов, сгенерированных Javari, с файлами, сгенерированными обычным `javac`. Одним из последствий такого подхода является то, что два перегруженных метода не могут отличаться только изменяемостью их параметров. Например, такие два метода не могут перегружать друг друга:

Листинг 1.13: Перегрузка методов

```

1 void foo(/*mutable*/ Date d) { ... }
2 void foo(readonly Date d) { ... }

```

Это аналогично тому, что в Java два перегруженных метода не могут отличаться только типовыми параметрами.

Java[®]i также позволяет исключать некоторые поля из абстрактного состояния объекта. По умолчанию все поля являются частью абстрактного состояния объекта и, соответственно, не могут быть изменены через неизменяемую ссылку. Если поле объявлено как `assignable`, то его значение всегда может быть переприсвоено (даже через `read-only` ссылку). Ключевое слово `mutable` означает, что поле может быть изменено даже через неизменяемую ссылку. Это может быть полезно для кэширования данных или, например, для реализации логирования, как в следующем примере:

Листинг 1.14: `assignable` и `mutable` поля

```

1 class Foo {
2     assignable int hc;
3     final mutable List<String> log = new ArrayList<String>;
4
5     int hashCode() readonly {
6         log.add("hashCode invoked");
7         if (hc == 0) {
8             hc = ... ;
9         }
10        return hc;
11    }
12 }

```

Java[®]i также позволяет добавлять модификаторы изменяемости к типовым параметрам:

Листинг 1.15: Модификаторы изменяемости в типовых параметрах

```

1 /*mutable*/ List</*mutable*/ Date> ld1; // add/remove and
    mutate elements

```



```

2  /*mutable*/ List<readonly Date> ld2; // add/remove
3  readonly List</*mutable*/ Date> ld3; // mutate elements
4  readonly List<readonly Date> ld4; // (neither)

```

Можно представить себе ситуацию, когда программисту захочется управлять изменяемостью типового параметра: например, написать `mutable X`, где `X` – типовой параметр:

Листинг 1.16: Модификаторы изменяемости и типовые параметры

```

1  class Container<X> {
2      void foo() {
3          mutable X x = ...;
4      }
5  }

```

Java[®]i запрещает такие типы потому что это не сочетается с подходом к типовым параметрам, принятым в Java, и это может привести к превращении неизменяемой ссылки в изменяемую. Но в Java[®]i, как и в Java, автор класса с типовым параметром может наложить на этот параметр границы. В примере ниже параметр `X` может быть `readonly Date`, `mutable Date` или каким-либо из их наследников, в то время как `Y` может быть только `mutable Date` или его наследником.

Листинг 1.17: Объявление класса с типовыми параметрами

```

1  class Foo<X extends readonly Date, Y extends mutable Date> {
    ... }

```

Также Java[®]i позволяет абстрагироваться от изменяемости типового параметра. Это можно сделать с помощью конструкции `? readonly C`, где `C` – какой-то тип. Так, `List<? readonly Date>` является суперклассом для `List<readonly Date>` и `List<mutable Date>`.

Наконец, рассмотрим назначение ключевого слова `readonly`. Пусть есть класс `DateCell`, который хранит в себе значение типа `Date`. Необходимо определить метод `getValue`, который будет возвращать это значение. Ка-

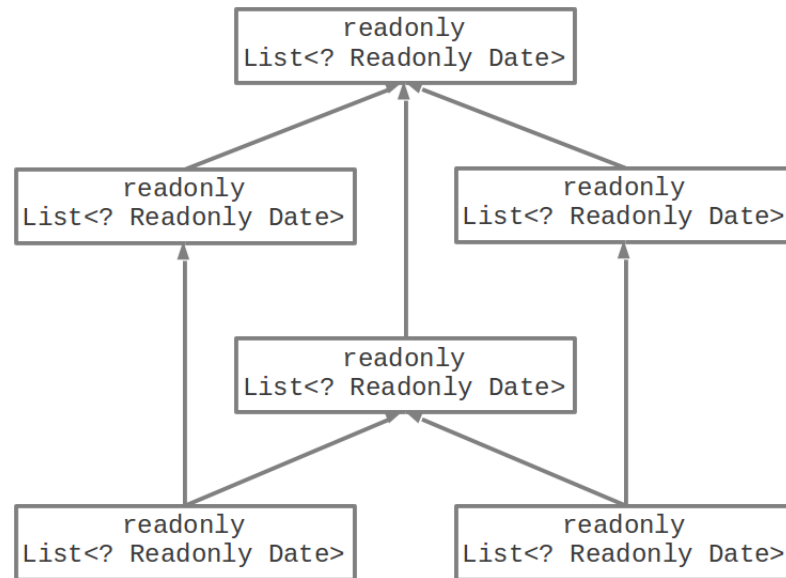


Рис. 1.2: Фрагмент иерархии классов в Javari

кого модификатор изменяемости должен стоять на возвращаемом значении? Если метод `getValue` вызывается на изменяемом объекте, то и его результат должен быть изменяемым. Если же он вызван на неизменяемом объекте, и результат его выполнения должен быть неизменяемым. Для решения этой проблемы в Javari было введено еще одно ключевое слово - `readonly`. Так будет выглядеть класс `DateCell` с использованием этого ключевого слова:

Листинг 1.18: Ключевое слово `readonly`

```

1 class DateCell { Date value; readonly Date getValue() readonly
    { return value; }
2 }

```

В данной ситуации для системы типов существует два метода `getValue`: в первом все ключевые слова `readonly` будут заменены на `readonly`, а во втором просто опущены.

Javari предоставляет инструмент под названием `Javarifier`, позволяющий добавить модификаторы изменяемости к уже существующему коду. На входе он принимает класс-файлы. В начале работы алгоритма некоторые поля помечаются как `assignable` или `mutable` (например, на основании

того, что они меняются в методе hashCode). Данный алгоритм генерирует и решает систему утверждений для анализируемой программы. Используются два типа утверждений:

- *неконтролируемое утверждение* о том, что некая ссылка является неизменяемой: "x is mutable"
- *контролируемое утверждение* о том, что некая ссылка является изменяемой, если другая ссылка является изменяемой: "if y is mutable then x is mutable"

После составления системы утверждений алгоритм решает ее.

Минусом данного подхода является то, что в общем случае количество уравнений в данной системе $O(n^2)$, где n - количество ссылок в анализируемом коде.

1.3.5 Immutability Generic Java

Immutability Generic Java (IGJ) – это расширение языка Java, которое позволяет выражать утверждения о неизменяемости объектов без внесения изменений в синтаксис Java, для этого IGJ использует типовые параметры и аннотации. В IGJ каждый класс имеет дополнительный типовой параметр, который может быть Immutable, Mutable или ReadOnly. IGJ поддерживает как объектную так и ссылочную неизменяемость. IGJ также разрешает ковариантные изменения типовых параметров в безопасной форме, например, неизменяемый список целых чисел является потомком неизменяемого списка чисел.

Рассмотрим применение данного расширения на примере:

Листинг 1.19: Ключевое слово readonly

```
1 class Edge<I extends ReadOnly> {  
2     private long id;  
3 }
```

```

4      @AssignsField Edge(long id) {
5          this.setId(id);
6      }
7
8      @AssignsField synchronized void setId(long id) {
9          this.id = id;
10     }
11
12     @ReadOnly synchronized long getId() {
13         return id;
14     }
15
16     @Immutable long getIdImmutable() {
17         return id;
18     }
19
20     @ReadOnly Edge<I> copy() {
21         return new Edge<I>(id);
22     }
23
24     static void print(Edge<ReadOnly> e) {...}
25 }
26
27 class Graph<I extends ReadOnly> {
28     List<I, Edge<I>> edges;
29
30     @AssignsField Graph(List<I, Edge<I>> edges) {
31         this.edges = edges;
32     }
33
34     @Mutable void addEdge(Edge<Mutable> e) {
35         this.edges.add(e);
36     }
37
38     static <X extends ReadOnly> Edge<X>

```

```

39         findEdge(Graph<X> g, long id) {...}
40     }

```

В примере 1.18 представлены два IGJ класса: `Edge` и `Graph`. В строках 1 и 27 определен параметр неизменяемости `I`. Если в декларации класса отсутствует директива `extends`, считается, что класс наследует `Object<I>`. Присваивание `this.id = id` разрешено, так как метод `setId` помечен как `Mutable`. Метод `print`, например, принимает любой объект типа `Edge`, вне зависимости от его изменяемости. Одним из плюсов IGJ является то, что тот факт, что поля некоего объекта имеют тот же параметр изменяемости, что и сам объект, легко выражается при помощи типовых параметров, как, например это сделано в строке 28. Например, в C++ поля, не обозначенные как `const` или `mutable` имеют модификатор неизменяемости такой же, как и у объекта, их содержащего, но при этом отсутствует возможность указать, что какая-либо локальная переменная, параметр метода или возвращаемое значение имеют такую же неизменяемость, как и объект, на котором данный метод вызван, IGJ же предоставляет такую возможность.

Аннотация `@AssignsField` решает проблему с изменяемостью `this` в конструкторе. В конструкторе неизменяемого объекта нельзя считать `this` `Mutable`, так как в этом случае такая изменяемая ссылка могла бы "утечь". Из метода, проаннотированного как `AssignsField` ссылка на `this` может "утечь" только как `ReadOnly` ссылка.

Подход, описанный в данной работе, несомненно, позволяет выражать различные утверждения о неизменяемости объектов. Но у него есть несколько минусов:

- Получающийся код часто выглядит достаточно громоздко.
- Фаза конструирования объекта заканчивается тогда, когда заканчивает работу его конструктор. Это не позволяет достаточно лег-

ко создавать неизменяемые циклические структуры данных. Существующее расширение *OIGJ ссфлка на работу* решает проблему с конструированием объектов, но делает это путем введения понятия владения объектом и, как следствие, добавлением еще одного типового параметра к каждому типу.

- Для того, чтобы эффективно использовать уже существующий код из классов, написанных с использованием IGJ необходимо вручную добавить в него дополнительные типовые параметры, отвечающие за изменяемость объектов

1.3.6 D

Подход, похожий на тот, что был описан в IGJ используется в объектно-ориентированном языке D ². В D концепции объектной и ссылочной неизменяемости поддерживаются на уровне языка.

Во второй версии этого языка существует два ключевых слова для выражения неизменяемости: `const` и `immutable`. Ключевое слово `immutable` означает, что не существует ссылки, через которую данные могут быть изменены. `const` обозначает, что по данной ссылке данные менять нельзя, но может существовать ссылка, через которую данные могут быть изменены.

Листинг 1.20: `const` vs `immutable`

```
1 int[] foo = new int[5];      // foo is mutable.
2 const int[] bar = foo;      // bar is a const view of mutable
   data.
3 immutable int[] baz = foo;  // Error: all views of immutable
   data must be immutable.
4
5 immutable int[] nums = new immutable(int)[5]; // No mutable
   reference to nums may be created.
```

²<http://dlang.org/>

```

6  const int[] constNums = nums;                // Immutable
    is implicitly convertible to const.
7  int[] mutableNums = nums;                    // Error:
    Cannot create a mutable view of immutable data.

```

В отличие от `const` в C++, `const` и `immutable` в D обеспечивают полноценную глубокую неизменяемость, то есть, любые данные, доступные через `const` или `immutable` объект, также константны или неизменяемы, соответственно.

Листинг 1.21: `const` vs `immutable`

```

1  class Foo {
2      Foo next;
3      int num;
4  }
5
6  immutable Foo foo = new immutable(Foo);
7  foo.next.num = 5; // Error: foo.next is of type
    immutable(Foo).
8                          // foo.next.num is of type immutable(int).

```

1.3.7 Uniqueness and Reference Immutability for Safe Parallelism

В работе *Uniqueness and Reference Immutability for Safe Parallelism* представлено расширение для языка C#. Основной задачей этого расширения является ограничение изменений областей памяти при параллельном программировании. Это достигается комбинацией модификаторов изменяемости и уникальности. Система типов поддерживает полиморфизм относительно этих модификаторов, а также простое создание циклов неизменяемых объектов.

В рамках данной работы у каждой ссылки может быть один из следующих модификаторов:

- `writable` – "обычная" ссылка, позволяющая изменять объект, на который она ссылается
- `readable` – неизменяемая ссылка, которая не позволяет изменять объект, на который она ссылается
- `immutable` – ссылка на неизменяемый объект
- `isolated` – уникальная ссылка на кластер объектов (то есть, все пути в этот подграф объектов извне будут идти через эту ссылку)

Введение такого понятия, как `isolated` ссылка, позволяет решить проблему с созданием неизменяемых циклических структур данных, так как если некая ссылка является единственной ссылкой на некий подграф объектов, то изменяемость этого подграфа может быть одновременно безопасно изменена, так как не существует других ссылок на данный подграф.

В предложенном в данной работе языке отсутствуют глобальные изменяемые переменные и поля, исключаемые из состояния объекта, что позволяет, например, говорить о том, что через `readable` ссылку не может быть достигнута никакая `writable` ссылка. Подобные ограничения полезны при анализе многопоточного поведения программы, но для статического контроля за изменяемостью они представляются слишком сильными. Например, введение подобных ограничений для Java означало бы отказ от `non-final` статических полей, а так же от хранения в статических полях объектов, чье состояние может быть изменено. Также в данной работе никак не рассмотрен вопрос о том, каким образом при наличии всех этих ограничений могут быть использованы уже существующий код.

1.4 Постановка задачи

Целью данной работы была разработка системы, позволяющей контролировать изменяемость объектов на этапе компиляции для языка Java.

К данной системе были предъявлены следующие требования:

- Должна быть поддержана как объектная, так и ссылочная неизменяемость.
- Необходима возможность исключать некоторые поля из абстрактного состояния объекта.
- Данная система должна давать возможность создавать неизменяемые циклические структуры объектов.
- Необходимо иметь возможность использовать уже существующий код.

В рамках данной работы решались следующие задачи:

- Разработка системы аннотаций, позволяющей выражать неизменяемость объектов.
- Разработка алгоритма вывода аннотаций для существующего кода.

2. Основная часть

2.1 Подход к технической реализации

Предположим, нужно добавить какую-то новую функциональность в язык. Есть два принципиально разных способа это сделать:

- использовать существующие средства языка
- изменять синтаксис языка (например, добавить новые ключевые слова)

У обоих этих подходов есть как положительные, так и отрицательные стороны. Изменение синтаксиса языка приводит к изменению грамматики языка, из чего следует невозможность использования многих существующих инструментов для разработки с использованием этого языка, таких как компиляторы, среды разработки, различные анализаторы кода. Но с другой стороны этот подход позволяет добавлять в язык развитую систему выразительных средств. Использование же существующих средств языка ограничивает свободу введения новых концепций, но этот подход обычно гораздо проще в реализации.

В случае Java есть несколько способов добавить поддержку неизменяемости объектов в язык. В работе IGJ это сделано с помощью добавления дополнительного типового параметра ко всем классам. Но это выглядит очень громоздко и трудно читаемо. Более того, информация о типовых параметрах отсутствует в скомпилированных файлах, то есть информация

об изменяемости также будет доступна только в исходном коде. Другой вариант – использование аннотаций.

Аннотация в Java – это вид синтаксических метаданных, которые могут быть добавлены в исходный код. Они могут быть доступны на этапе компиляции, встроены в класс-файлы, а также могут использоваться JVM во время исполнения программы. В Java 7 аннотации можно применять к пакетам, классам, методам, переменным и параметрам.

Как справедливо отмечают некоторые авторы, аннотации в том виде, в котором они реализованы в Java 7, не достаточно мощны для того, чтобы добавить поддержку контроля за изменяемостью объектов, так как в нынешней реализации нельзя аннотировать типы. Но уже в Java 8 такая поддержка появится, поэтому в данной работе именно аннотации используются для выражения неизменяемости объектов.

2.2 Система аннотаций

В данной работе каждая ссылка имеет модификатор изменяемости, который определяет, может ли быть изменено ее абстрактное состояние. Этот модификатор определяется на уровне исходного кода, анализируется на этапе компиляции и может иметь одно из четырех значений: *Mutable*, *Immutable*, *ReadOnly* или *Isolated*. На изображении ниже представлена иерархия параметров неизменяемости.

Выражение $A \preceq B$ будем трактовать как "A является наследником B". В данном случае, например, $Mutable \preceq ReadOnly$. Также будем считать, что если $A \preceq B$, где A и B - модификаторы изменяемости, то $@A \preceq @BC$, где C - некий тип.

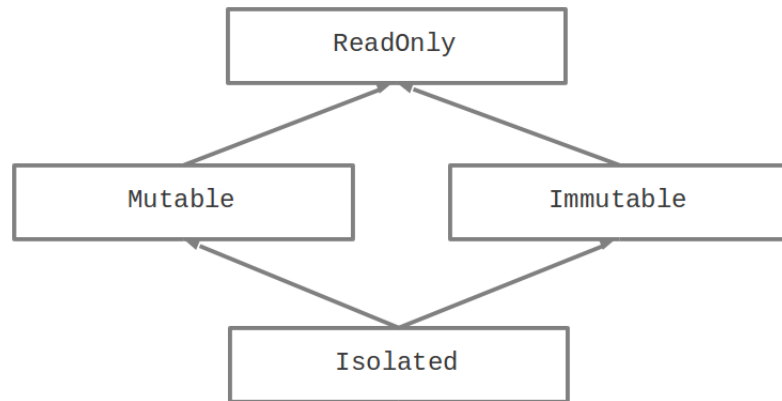


Рис. 2.1: Иерархия модификаторов неизменяемости

2.2.1 Ссылочная неизменяемость

Для поддержки ссылочной неизменяемости достаточно двух модификаторов: `Mutable` и `ReadOnly`. Состояние объекта не может быть изменено через `ReadOnly` ссылку. Попытка присвоить поле через `ReadOnly` ссылку или вызвать на ней меняющий объект метод приведет к ошибке компиляции:

Листинг 2.1: `Mutable` и `RadOnly` ссылки

```

1 @ReadOnly Person roPerson = ...;
2 String address = roPerson.address; // OK: reading field is
   always permitted
3 roPreson.address = "new address"; // Error: field can't be
   assigned through ReadOnly refererence
4
5 @Mutable Person mPreson = ...;
6 mPerson.address = "new address"; // OK: mPerson is mutable,
   so field can be assigned
  
```

Пусть $I(x)$ - это функция, которая принимает класс, тип или ссылку и возвращает ее модификатор изменяемости. Тогда формально вышеизложенное правило может быть написано следующим образом:

Правило 2.2.1. *$o.someField = \dots$ разрешено тогда и только тогда, когда $I(o) = Mutable$*

Изменяемая ссылка может быть передана везде, где ожидается неизменяемая ссылка. Таким образом, @Mutable Person является наследником @ReadOnly Person.

2.2.2 Аннотации на методах

Изменяемость `this` зависит от контекста, а именно от метода, в котором появляется `this`. По умолчанию все методы изменяют объект, на котором вызываются. В таких методах `this` будет иметь модификатор `Mutable`. Те методы, которые не изменяют объект, на котором они вызываются, должны быть помечены аннотацией `@Const` (по аналогии с C++), `this` в этих методах будет иметь модификатор `@ReadOnly`.

На `ReadOnly` ссылках нельзя вызывать методы, которые меняют объект, на котором вызываются. Формально это правило может быть описано так:

Правило 2.2.2. *$o.m(\dots)$ разрешено, если $I(o) \preceq I(m)$, где $I(m)$ – модификатор изменяемости `this` в этом методе.*

Требуется, что $I(o) \preceq I(m)$ а не $I(o) = I(m)$ для того, чтобы через изменяемую ссылку можно было вызывать методы, не меняющие объект.

Рассмотрим на примере применение этих правил.

Листинг 2.2: Аннотации на методах

```
1 class Person {
2     String name;
3     @AsClass Date dateOfBirth;
4
5     public Person(String name, Date dateOfBirth) {
6         this.name = name;
7         this.dateOfBirth = dateOfBirth;
8     }
9
10    public void setName(String name) {
```

```

11         this.name = name;
12     }
13
14     @Const
15     public String getName() {
16         return name;
17     }
18
19     @AsClass
20     @Const
21     public Date getDateOfBirth() {
22         return dateOfBirth;
23     }
24
25     @Const
26     public boolean wasBornInYear(int year) {
27         return dateOfBirth.getYear() == year;
28     }
29
30     public void setYearOfBirth(int year) {
31         dateOfBirth.setYear(year);
32     }
33
34     public static void print(@ReadOnly Person person) {
35         ...
36     }
37 }

```

Присваивание `this.name = name` в 11 строке разрешено, так как $I(this) = I(setName) = Mutable$, а согласно правилу 2.2.1 через `Mutable` ссылку можно присваивать значение поля. Это присваивание было бы не разрешено, если бы оно было перемещено на 16 строчку, так как `this` является `ReadOnly` ссылкой в контексте метода `getName`. Вызов метода `setYear` на 31 строке разрешен согласно правилу 2.2.2, так как $I(dateOfBirth) =$

$I(this) \preceq I(setyearOf\textit{Birth})$. Этот вызов метода не был бы разрешен на 27 строчке, так как в контексте метода `wasBornInYear` $I(this) = \textit{ReadOnly}$. Статический метод `print` на 34 строчке принимает объект класса `Person` с любым модификатором изменяемости.

Поле `dateOfBirth` проаннотировано `AsClass`. Это значит, что его модификатор изменяемости зависит от того, какой модификатор у `this`. Соответственно и результатом работы метода `getDateOfBirth` будет либо `Mutable` ссылка (если сам он был вызван на объекте, доступном по `Mutable` ссылке), либо `ReadOnly` ссылка в противном случае:

Листинг 2.3: Использование аннотации `AsClass`

```

1 @ReadOnly Person roPerson = ...;
2 int year = roPerson.getDateOfBirth().getYear(); // OK:
   I(getYear) = ReadOnly
3 roPerson.getDateOfBirth().setYear(2000); // OK:
   I(roPerson.getDateOfBirth()) = I(roPerson) = ReadOnly
4
5 @Mutable Person mPerson = ...;
6 mPerson.getDateOfBirth().setYear(2000); // OK:
   I(mPerson.getDateOfBirth()) = I(mPerson) = Mutable
7 }
```

Аннотация `AsClass` может встречаться на полях метода, локальных переменных, возвращаемых значениях нестатических методов и параметрах методов.

2.2.3 Перегрузка методов

При перегрузке методов, метод класса-потомка должен оставить прежним или усилить модификатор неизменяемости, который имеет `this` в данном методе.

Правило 2.2.3. Если метод m' перегружает метод m , то $I(m) \preceq I(m')$

Например, метод класс-потомок может добавить аннотацию `Const` к перегружаемому методу, если ее не было в классе-предке, но не наоборот.

2.2.4 Объектная неизменяемость

Хотя `ReadOnly` ссылки запрещают менять объект, на который ссылаются, никто не гарантирует, что этот объект не будет изменен при помощи какой-либо другой ссылки. Это хорошо иллюстрирует следующий пример:

Листинг 2.4: Изменение объекта хранимого по `ReadOnly` ссылке

```
1 @Mutable Person person = ...;
2 person.setYearOfBirth(2000);
3 @ReadOnly Person roPerson = person; // OK: @ReadOnly Person
   is supertype for @Mutable person
4 System.out.println(roPerson.getYearOfBirth()); // 2000 will
   be printed
5 person.setYearOfBirth(2013);
6 System.out.println(roPerson.getYearOfBirth()); // 2013 will
   be printed
7 }
```

При этом часто возникает ситуация, когда хочется не только гарантировать, что по данной ссылке нельзя менять объект, но и то, что данный объект вообще нельзя менять. Такие гарантии могут быть полезны, например, при многопоточном программировании – если про объект известно, что он неизменяемый, то к нему можно безопасно обращаться из нескольких потоков без дополнительной синхронизации. Разработанная в данной работе система может давать такую гарантию: `Mutable` ссылка указывает на изменяемый объект, а `Immutable` ссылка - на неизменяемый.

Листинг 2.5: `Mutable` и `Immutable` ссылки

```
1 @Mutable Person person = ...;
2 @Immutable Person iPerson = person; // Error: @Immutable
   Person is not supertype for @Mutable Person
```



```
3 @ReadOnly Person roPerson = iPerson; // OK: @ReadOnly Person
   is supertype for @Immutable Person
4 }
```

Из данного примера видна разница между `ReadOnly` и `Immutable` ссылками: если `ReadOnly` ссылка может указывать как на изменяемый, так и на неизменяемый объект, то `Immutable` ссылка всегда указывает только на неизменяемый объект.

2.2.5 Исключение полей из абстрактного состояния объекта

Одной из целей данной работы были разработка системы типов, которая бы давала гарантии относительно абстрактного состояния объектов, а не о конкретной его реализации. Транзитивные гарантии неизменяемости для всех полей объекта в некоторых случаях могут быть слишком сильны. Например, поля, используемые для кэширования не являются частью абстрактного состояния. Таким образом, необходим механизм, позволяющий исключать некоторые поля из абстрактного состояния объекта. В данной работе для этого используется аннотация `@Transient`, которое обозначает, что данное поле не является частью абстрактного состояния.

Многие авторы разделяют два способа исключения поля из абстрактного состояния:

- Значение поля может быть переприсвоено даже через неизменяемую ссылку, но само значение в этом случае не может быть изменено
- Значение поля не может быть переприсвоено, но при этом исходное значение может быть изменено даже через `ReadOnly` ссылку

Этот подход кажется несколько избыточным: такая тонкая настройка изменяемости нужна крайне редко и при этом приводит к некоторым про-

блемам в системе типов, которые приходится решать введением новых правил, которые часто выглядят синтетически.

2.2.6 Вложенные классы

Статические вложенные классы подчиняются всем тем же правилам, что и обычные классы. Нестатические вложенные классы имеют дополнительную ссылку на `this`. Изменяемость `this` зависит от того, в каком методе он вызван. Метод нестатического вложенного класса может быть объявлен как `Const` только если он не меняет обе ссылки `this` (свою и внешнего класса).

2.2.7 Неизменяемые классы

Существуют классы, все представители которых являются неизменяемыми объектами. Таковыми являются, например, `java.lang.String` и большинство потомков `java.lang.Number`. Обычно тот факт, что все представители некоего класса являются неизменяемыми, отражается в документации. В данной работе для этого разрешено использовать аннотацию `Immutable`. Все методы класса, объявленного как `Immutable` будут обрабатываться так, как будто они аннотированы как `Const`.

2.2.8 Создание циклов неизменяемых объектов

Большинство неизменяемых объектов, тем ни менее, модифицируются во время фазы их конструирования. Часто эта фаза локализуема непосредственно в конструкторе объекта – например, в конструктор неизменяемого списка может быть набор объектов, которыми этот список нужно заполнить, и после отработки конструктора объект уже можно по праву считать неизменяемым. Несмотря на то, что для большинства объектов фаза их создания заканчивается после отработки конструктора, бывают

случай, когда такой подход неприменим. Одним из наиболее ярких примеров этого могут служить неизменяемые циклические структуры данных. Рассмотрим следующий пример:

Листинг 2.6: CircularListNode.java

```
1 class CircularListNode {
2     @AsClass CircularListNode prev;
3     @AsClass CircularListNode next;
4
5     @Immutable
6     public static CircularListNode createTwoNodeList() {
7         // ???
8     }
9 }
```

Необходимо реализовать метод `createTwoNodeList`, который вернет неизменяемый циклический список из двух элементов. Это сделать не получится, так как "соединить" элемента списка друг с другом придется уже после создания. Можно, конечно, возвращать не `Immutable` ссылку, а `ReadOnly`:

Листинг 2.7: CircularListNode.java

```
1 class CircularListNode {
2     @AsClass CircularListNode prev;
3     @AsClass CircularListNode next;
4
5     @ReadOnly
6     public static CircularListNode createTwoNodeList() {
7         @Mutable CircularListNode n1 = new CircularListNode();
8         @Mutable CircularListNode n2 = new CircularListNode();
9
10        n1.next = n2;
11        n1.prev = n2;
12        n2.next = n1;
13        n2.prev = n1;
14    }
```

```
14
15         return n1;
16     }
17 }
```

Не трудно видеть, что этом случае созданный список фактически будет неизменяемым, так как после завершения этапа создания, на него не останется ни одной Mutable ссылки. Но этот момент необходимо было бы дополнительно отражать в документации, также результат работы этого метода не мог бы быть использован для передачи в метод, который требует именно Immutable ссылку.

Ключевым моментов в объяснении того, почему именно результатом работы метода `createTwoNodeList` будет неизменяемый объект было следующее утверждение: *после завершения этапа создания, на него не останется ни одной Mutable ссылки*. На самом деле, важно еще и то, что Mutable ссылок не осталось и на другие транзитивно-достижимые из данного объекта объекты. И так как в данном случае это утверждение верно, то объект фактически является неизменяемым. Таким образом, можно прийти к определению изолированной ссылки:

Определение 2.2.1. *Изолированная ссылка (Isolated) – это ссылка на изолированный граф объектов. Объекты внутри изолированного графа могут ссылаться друг на друга, но существует только одна внешняя не-ReadOnly ссылка на такой граф. Все пути к не-неизменяемым объектам, доступным через isolated ссылку идут через эту ссылку кроме путей, идущих по ReadOnly ссылкам.*

рисуночек

Введение такого понятия, как изолированная ссылка может быть одновременно конвертирована в Mutable или Immutable ссылку, так как на граф объектов, достижимых через нее, есть только ReadOnly ссылки, которые не гарантируют ничего относительно этого графа.

Преобразование Isolated ссылки в Mutable ссылку происходит тривиальным образом:

Листинг 2.8: Преобразование Isolated ссылки в Mutable

```
1 @Isolated Person p = ...;
2 p.setName("Bob");
```

Здесь в строке 2 происходит неявное преобразование модификатора изменяемости p в Mutable.

Isolated ссылка может быть также одновременно сконвертирована в Immutable ссылку.

Листинг 2.9: Преобразование Isolated ссылки в immutable

```
1 @Isolated Person p = ...;
2 @Immutable imp = p;
3 p.setName("Alice"); // Error
```

Не смотря на то, что p была изначально объявлена как Isolated, после присвоения в imp она была приведена к Immutable и объект, на который она ссылается, не может быть изменен.

Важный момент заключается в том, что преобразование Isolated ссылки в Mutable не является необратимым. Например, следующий пример не содержит ошибок компиляции:

Листинг 2.10: Преобразование Isolated ссылки в Mutable и обратно

```
1 @Isolated
2 public IntBox increment(isolated IntBox b) {
3     b.value++;
4     return b;
5 }
```

В данном случае преобразование ссылки обратно в Isolated возможно, так как фактически ссылка b осталась изолированной. В работе *добавить ссылку* было сформулировано следующее правило, которое обуславливает, может ли Mutable ссылка быть превращена обратно в Isolated после

выполнения некой операции:

Правило 2.2.4. *Если входной контекст выражения не содержит Mutable ссылок, а выходной контекст выражения содержит одну Mutable ссылку, то эта ссылка может быть превращена обратно в Isolated.*

Действительно, в случае, когда язык запрещает иметь глобальные изменяемые значения, а также исключать поля из абстрактного состояния объекта, это правило работает. Если после проведения какой-либо операции появилась одна Mutable ссылка, а перед началом операции ни одной Mutable ссылки не существовало, то эта ссылка либо является ссылкой на объект, на который других ссылок не существует, либо на объект, который был только что создан.

Но запрет на существование глобальных изменяемых переменных кажется слишком сильным ограничением, так как в существующем коде уже имеется большое количество подобных примеров. При этом очевидно, что существуют методы, которые никаким образом не взаимодействуют с глобальными изменяемыми переменными и полями, которые исключены из абстрактного состояния объекта. Будем называть такие методы чистыми и аннотировать их как @Pure. Тогда вышеприведенное правило применимо в контексте Pure метода. Остальные типовые правила для Isolated ссылок будут аналогичны тем, что приведены в *ссылочка*

Рассмотрим, каким образом введение Isolated ссылок может решить проблему с созданием циклов неизменяемых объектов:

Листинг 2.11: CircularListNode.java

```
1 class CircularListNode {
2     @AsClass CircularListNode prev;
3     @AsClass CircularListNode next;
4
5     @Mutable
6     @Pure
```

```

7     private static CircularListNode doCreateTwoNodeList() {
8         @Mutable CircularListNode n1 = new CircularListNode();
9         @Mutable CircularListNode n2 = new CircularListNode();
10
11         n1.next = n2;
12         n1.prev = n2;
13         n2.next = n1;
14         n2.prev = n1;
15
16         return n1;
17     }
18
19     @Immutable
20     public CircularListNode createTwoNodeList() {
21         @Isolated CircularListNode result =
22             doCreateTwoListNode();
23         return result;
24     }

```

2.3 Алгоритм вывода аннотаций

При разработке реальных приложений обычно используется большое количество библиотечного кода. Проаннотировать весь этот код вручную аннотациями неизменяемости не представляется возможным. Чтобы разработанную в данной работе систему аннотаций можно было использовать в реальных приложениях, нужно обеспечить возможность работать с непроаннотированным кодом. Самое простое решение – это объявить, что все методы меняют объекты, на которых вызываются. Но тогда практически все объекты во вновь написанном коде (уже с использованием модификаторов неизменяемости) окажутся Mutable.

Таким образом необходимо разработать способ проаннотировать су-

ществующий в автоматическом режиме. Далее представлено описание алгоритма, который теоретически позволяет с той или иной точностью вывести соответствующие аннотации по байткоду.

Пусть необходимо проаннотировать байт-код некой библиотеки. При этом, возможно, аннотации на некоторых методах или их параметрах уже известны (например, в документации явно написано, что все экземпляры некого класса являются неизменяемыми). Считается, что эти наперед данный аннотации проставлены правильно. Далее рассмотрены этапы аннотирования кода этой библиотеки.

2.3.1 Вычисление полей, не входящих в абстрактное состояние объекта

На первом этапе анализа все поля, объявленные как `transient` помечаются аннотацией `@Transient`. Все остальные поля помечаются как `@AsClass`.

2.3.2 Анализ методов на чистоту

На этом этапе необходимо проставить аннотации `@Pure` на тех методах, которые не взаимодействуют с глобальными `Mutable` переменными и полями, помеченными как `@Transient`. Результатом работы алгоритма будет множество методов, которые можно пометить как `@Pure`.

Пусть M – множество всех аннотируемых методов, определим функцию $results : M \rightarrow Pure, NotPure, Unknown$, которая для каждого метода возвращает то, что в на данном этапе известно о его чистоте:

- `Pure` – известно, что метод можно проаннотировать как `@Pure`
- `NotPure` – известно, что метод нельзя проаннотировать как `@Pure`
- `Unknown` – еще не известно, можно или нельзя проаннотировать метод как `@Pure`

Определим также функцию $count : M, results \rightarrow int$ такую, что она возвращает количество методов m , для которых $results(m) = Unknown$. Тогда в упрощенном виде псевдокод алгоритма будет выглядеть следующим образом:

Листинг 2.12: Анализ чистоты методов

```

1 analyze(M, results)
2     prevUnknown = count(M, results);
3     while True
4         for m in M
5             if results[m] == Unknown
6                 results[m] = analyzeMethod(results, x)
7         c = count(M, results)
8         if c == prevUnknown
9             return M.filter(\m.(results(m) == Pure))
10        else
11            prevUnknown = c

```

То есть, методы анализируются до тех пор, пока за очередную итерацию не станет известно ничего нового. По теореме о неподвижной точке данный алгоритм завершит свою работу, так как функция $count$ не возрастает (если однажды было вычислено значение функции $results$ для некоторого метода m , отличное от $Unknown$, то оно уже больше никогда не будет изменено) и ограничена (количество методов не может быть меньше нуля).

Очевидно, что практически любая библиотека использует методы, не входящие в ее состав (например, методы из стандартной библиотеки). Пусть $MExt$ – множество всех таких методов. Тогда определим функцию $ext : MExt \rightarrow Pure, NotPure$, которая возвращает $Pure$, если известно, что на методе стоит аннотация $@Pure$, а иначе возвращает $NotPure$.

Теперь рассмотрим, как должен быть устроен код функции $analyzeMethod$. При анализе метода на чистоту по очереди анализируются все инструк-

ции байт-кода этого метода.

- Если встречается инструкция PUTSTATIC и при этом не известно, что поле, в которое происходит запись, имеет модификатор изменяемости ReadOnly, то возвращается NotPure
- Если встречается инструкция GETSTATIC и при этом не известно, что поле, значение которого считывается, имеет модификатор изменяемости Mutable, то возвращается NotPure
- Если встречается инструкция PUTFIELD и при этом поле, в которое происходит запись, проаннотировано как @Transient, то возвращается NotPure
- Если встречается инструкция GETFIELD и при этом поле, значение которого читается, является @Transient и @Mutable, то возвращается NotPure
- Если встречается инструкция вызова метода m , то вычисляется значение функции $result = m \in M?results(m) : ext(m)$. Если $result \neq \text{Pure}$, то возвращается $result$
- Во всех остальных случаях возвращаем Pure

2.3.3 Вычисление модификаторов изменяемости

Для каждого метода нужно вычислить следующие модификаторы неизменяемости:

- Аннотации на параметрах метода
- Аннотация на возвращаемом значении
- Для нестатических методов необходимо вычислить, какой модификатор имеет `this` в контексте этого метода

Во всех трех случаях будем вычислять не непосредственно модификаторы неизменяемости, а те границы, в которых они могут лежать. При вычислении этих модификаторов используется тот же самый подход, что и при вычислении чистоты методов:

Листинг 2.13: Анализ модификаторов изменяемости для методов

```
1 analyze(M, results)
2     rprevResults = results
3     while True
4         for m in M
5             results = analyzeMthod(M, results)
6         if results == prevResults
7             return results
8         else
9             revResults = results
```

Во время работы метода границы, вычисленные для каждой из ссылок на момент данной итерации могут либо сузиться, либо не измениться. Таким образом, гарантируется, что метод закончит свою работу.

Методы, в которых `ReadOnly` будет попадать в границы, вычисленные для `this`, пометим как `@Const`. Для параметров методов выберем наиболее общий модификатор. Немного сложнее обстоит дело с вычислением модификатора на возвращаемом значении. Рассмотрим следующий метод:

Листинг 2.14: Вывод модификатора неизменяемости для возвращаемого методом значения

```
1 public Person getPerson() {
2     if (...) {
3         Peson tResult = createImmutablePerson();
4         return tResult;
5     } else {
6         Person fResult = createMutablePerson();
7         return fResult;
8     }
```

Будем считать, что известно, что метод `createImmutablePerson()` возвращает `Immutable` ссылку, а метод `createMutablePerson()` – `Mutable`. Тогда $Immutable \preceq I(Result) \preceq ReadOnly$ и $Mutable \preceq I(tResult) \preceq ReadOnly$. Будем действовать следующим образом: сначала для каждого из возможных возвращаемых значений вычислим наиболее конкретный модификатор неизменяемости. Для `tResult` это будет `Immutable`, а для `fResult` – `Mutable`. После этого для полученных значений модификатора посчитаем максимально конкретный общий тип. В данном случае это будет `ReadOnly`. Таким образом, возвращаемое значение метода `getPerson()` нужно пометить модификатором `ReadOnly`.

Рассмотрим подробнее то, как именно будут вычисляться границы для ссылок в рамках одного метода. Строится граф потока данных. Когда происходит анализ одной ветви графа потока данных, поочередно анализируются все инструкции байт-кода. Некоторые из инструкций налагают дополнительные ограничения на ссылки, которые в данный момент находятся на стэке. В случае, когда в графе потока данных присутствуют циклы, по этим циклам необходимо ходить до достижения неподвижной точки. В случае, если в графе существует точка, в которой сходятся несколько его ветвей, то необходимо слить данные, полученные на этих путях путем пересечения границ неизменяемости, вычисленных для каждой из этих ссылок на различных путях.

2.3.4 Вычисление неизменяемых классов

Если в процессе анализа оказалось, что какой-либо класс не имеет методов, не помеченных `@Const`, то данный класс можно автоматически пометить как `@Immutable`. При автоматическом аннотировании кода имеет смысл пометить как `@Immutable` только `final` классы, так как потомки

класса могут добавить в интерфейс свои неконстантные методы, и, если бы класс был при этом помечен как `@Immutable`, добавление неконстантных методов в классах-потомках привело бы к ошибке компиляции.

2.4 Сравнение с существующими подходами

Несмотря на то, что существует множество работ, в той или иной степени предлагающих систему контроля за изменяемостью объектов для Java и других объектно-ориентированных языков, данная работа имеет несколько принципиальных особенностей.

- Во многих работах рассмотрела либо только объектная, либо только ссылочная неизменяемость. В данной работе сочетаются обе эти концепции.
- В отличие от *тыц* и *тыц*, решена проблема с созданием неизменяемых циклических структур. В отличие от *тыц* это удалось сделать без введения таких сложных концепций как владение объектами и без заметного утяжеления языка – если для всех классов, которые пишет конкретный программист фаза конструирования заканчивается в конструкторе, то потребовавшиеся изменения вообще не коснутся этих классов. Решение же, предложенное в работе *тыц*, было расширено на язык, содержащий изменяемые глобальные (статические) переменные и поля, исключенные из абстрактного состояния объекта.
- В данной работе также предложен алгоритм аннотирования существующего кода, отсутствующий, например, в работах *тыц* и *тыц*, что позволяет проаннотировать существующий библиотечный код.

3. Заключение

3.1 Результаты работы

В данной работе удалось разработать систему, позволяющую контролировать изменяемость объектов на этапе компиляции. Данная система удовлетворяет всем необходимым требованиям к системе:

- Поддерживается как объектная, так и ссылочная неизменяемость.
- Поддерживается глубокая неизменяемость с возможностью исключать некоторые поля из абстрактного состояния объекта.
- Данная система полностью статическая и, как следствие, байт-код полученный в результате ее использования, может исполняться на обычной Java-машине.
- Существует возможность "продлить" фазу конструирования неизменяемого объекта за пределы конструктора.
- Разработан алгоритм, позволяющий проаннотировать существующий код с целью его дальнейшего использования уже из нового кода, создаваемого с использованием модификаторов неизменяемости.

Литература

1. Кирилл Колышкин, Павел Емельянов, CRIU: больше, чем живая миграция для Linux контейнеров, Yet another Conference, 2012 год.
2. Jonathan Corbet, KS2010: Checkpoint/restart, lwn.net, 2 ноября 2010 год.