|  |  |
| --- | --- |
|  | **Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  **высшего образования**  **«Московский государственный технический университет**  **имени Н.Э. Баумана**  **(национальный исследовательский университет)»**  **(МГТУ им. Н.Э. Баумана)** |

ФАКУЛЬТЕТ ИУ «Информатика и системы управления»

КАФЕДРА ИУ-7 «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»

**РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

***К КУРСОВОЙ РАБОТЕ***

***НА ТЕМУ:***

***«Разработка компилятора языка MiniJava»***

Студент **ИУ7-21М** \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ **Коноваленко В.Д.**

Руководитель \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ **Ступников А.А.**

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**

**высшего образования**

**«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана**

**(национальный исследовательский университет)»**

**(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ИУ7

(Индекс)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ И. В. Рудаков

(И.О.Фамилия)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение курсового проекта**

по дисциплине Конструирование компиляторов

Студент группы ИУ7-21М

Коноваленко Владимир Денисович

(Фамилия, имя, отчество)

Тема курсового проекта Разработка компилятора языка miniJava

Направленность КП (учебный, исследовательский, практический, производственный, др.)

учебный

Источник тематики (кафедра, предприятие, НИР) Кафедра

График выполнения проекта: 25% к 4 нед., 50% к 7 нед., 75% к 11 нед., 100% к 14 нед.

***Задание*** Описать грамматику языка miniJava. Разработать компилятор языка miniJava на языке C#, использующий библиотеку ANTLR для синтаксического анализа потока входных данных и построения AST-дерева. В качестве целевой платформы использовать .NET для генерации промежуточного представления на основе составленного синтаксического дерева.

***Оформление курсового проекта:***

Расчетно-пояснительная записка на 20-30 листах формата А4.

Расчетно-пояснительная записка должна содержать постановку задачи, введение, аналитическую, конструкторскую, технологическую части, заключение и список литературы.

Дата выдачи задания «\_\_\_» 2024 г.

**Руководитель курсового проекта**  А.А.Ступников

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

**Студент**  В.Д.Коноваленко

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

[1. Аналитическая часть 6](#_Toc168735028)

[1.1 Принцип работы компиляторов 6](#_Toc168735029)

[1.2 Методы реализации лексического и синтаксического анализаторов 9](#_Toc168735030)

[1.2.1 Генераторы лексических анализаторов 9](#_Toc168735031)

[1.2.2 Генераторы синтаксических анализаторов 11](#_Toc168735032)

[1.3 Платформа .NET 12](#_Toc168735033)

[2. Конструкторская часть 14](#_Toc168735034)

[2.1 IDEF0 14](#_Toc168735035)

[2.2 Язык MiniJava 15](#_Toc168735036)

[2.3 Лексический и синтаксический анализаторы 15](#_Toc168735037)

[2.4 Семантический анализ 16](#_Toc168735038)

[3. Технологическая часть 17](#_Toc168735039)

[3.1 Выбор средств разработки 17](#_Toc168735040)

[3.2 Описание реализованной программы 17](#_Toc168735041)

[3.2.1 Диаграмма компонентов 17](#_Toc168735042)

[3.2.2 Диаграмма классов 18](#_Toc168735043)

[3.2.3 Описание лексического и синтаксического анализаторов 21](#_Toc168735044)

[3.2.4 Описание семантического анализатора и генератора кода 23](#_Toc168735045)

[3.4 Примеры работы программы 26](#_Toc168735046)

[3.4.1 Сортировка пузырьком 27](#_Toc168735047)

[3.4.2 Инвертирование односвязного списка 27](#_Toc168735048)

[3.4.3 Наследование 27](#_Toc168735049)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 28](#_Toc168735050)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 29](#_Toc168735051)

[ПРИЛОЖЕНИЕ А 31](#_Toc168735052)

[ПРИЛОЖЕНИЕ Б 32](#_Toc168735053)

**ВВЕДЕНИЕ**

MiniJava [1] является подмножеством языка программирования Java [2]. Каждая программа MiniJava является программой с семантикой языка программирования Java.

Целью курсового проекта является разработка компилятора для языка программирования MiniJava под платформу .NET.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Провести анализ предметной области.
2. Повести анализ существующих методов реализации лексического и синтаксического анализаторов.
3. Разработать компилятор для языка программирования MiniJava.
4. Подготовить набор тестовых данных для тестирования и демонстрации разработанного приложения.

# 1. Аналитическая часть

## 1.1 Принцип работы компиляторов

Компилятор – это программа, которая считывает текст программы на одном языке, называемом исходным, и транслирует или переводит его в эквивалентный текст на другом языке – целевом (рисунок 1) [3].

Компилятор должен сообщать об ошибках в исходной программе, обнаруженных в ходе трансляции.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 1. Компилятор |

Отображение компилятором исходной программы в семантически эквивалентную ей целевую программу разделается на две части: анализ и синтез [8, 9].

Анализ разбивает исходную программу на составные части и накладывает на них грамматическую структуру. Далее эта структура используется для создания промежуточного представления исходной программы. В случае, если программа составлена некорректно, анализ должен выдать соответствующие информационные сообщения пользователю. Помимо этого, анализ собирает информацию о программе и сохраняет ее в таблице символов, которая передается вместе с промежуточным представлением синтезу [3]. Синтез строит целевую программу на основе полученного с предыдущего шага представления и таблицы символов. Как правило, анализ называют начальной стадией (front-end), а синтез – заключительной (back-end).

Фазы компиляции, представлены на рисунке 2 [3].

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 2. Фазы компиляции |

Далее более подробно рассмотрим, что происходит на каждой из этих фаз.

**Лексический анализ.** Является первой фазой компиляции. Также данная фаза называется сканированием. Лексический анализатор читает поток символов, которые составляют исходную программу, и группирует их в значащие последовательности, называемые лексемами. Для каждой построенной лексемы анализатор строит выходной токен вида:(имя\_токена, значение\_атрибута). [3]

Первый компонент токена представляет собой абстрактный символ, который используется во время синтаксического анализа, а второй компонент указывает на запись в таблице символов, которая соответствует данному токену.

**Синтаксический анализ.** Вторая фаза компиляции – синтаксический анализ или разбор. Анализатор использует первые компоненты токенов, полученных при лексическом анализе, для построения промежуточного древовидного представления, которое описывает грамматическую структуру потока токенов. Обычно для этой цели используется синтаксическое дерево, в котором каждый внутренний узел представляет операцию, а дочерние узлы – аргументы этой операции [3, 4].

**Семантический анализ.** Семантический анализатор использует синтаксическое дерево и информацию из таблицы символов. Данный этап собирает информацию о типах и сохраняет ее в синтаксическом дереве или в таблице символов для последующего использования в процессе генерации промежуточного кода [3].

Важной частью данной фазы является проверка типов. В процессе этой проверке компилятор проверяет, имеет ли каждый оператор операнды соответствующего типа [4].

**Генерация промежуточного кода.** В процессе трансляции исходной программы в целевой код компилятор может создавать одно или несколько промежуточных представлений различного вида. Синтаксические деревья являются видом промежуточного представления, они обычно используются в процессе синтаксического и семантического анализа [3].

После синтаксического и семантического анализа исходной программы многие компиляторы генерируют явное низкоуровневое или машинное промежуточное представление исходной программы, которое можно рассматривать как программу абстрактной вычислительной машины. Данное промежуточное представление должно легко генерироваться и транслироваться в целевой машинный язык.

**Оптимизация кода.** Данная фаза предназначения для улучшения промежуточного кода с целью получения более качественного целевого кода. Обычно под «более качественным» подразумевается более производительный код, но иногда встречаются и другие критерии [3].

**Генерация кода.** Генератор кода получает на вход промежуточное представление исходной программы и отображает его в целевой язык. Если целевой язык представляет собой машинный код, то для каждой переменной, которая используется в программе, должны быть выбраны соответствующие регистры или ячейки памяти. Далее промежуточные команды транслируются в последовательности машинных команд, выполняющих те же действия.

## 1.2 Методы реализации лексического и синтаксического анализаторов

Реализовывать лексический и синтаксический анализаторы можно вручную, с использованием стандартных алгоритмов анализа. Однако, гораздо легче и быстрее использовать готовые инструменты для их генерации. За счёт их использования, у разработчика нет необходимости реализовывать анализаторы самостоятельно. На вход такие инструменты принимают файл, описывающий грамматику языка, затем на основе этой грамматики они создают лексический или синтаксический анализатор на одном из языков программирования.

Далее будут рассмотрены наиболее популярные инструменты для генерации лексического и синтаксического анализаторов.

### 1.2.1 Генераторы лексических анализаторов

**Lex** — программа для генерации лексических анализаторов, обычно используемая совместно с генератором синтаксических анализаторов yacc, является стандартным генератором лексических анализаторов в операционных системах Unix, а также включён в стандарт POSIX. Lex читает входной поток, описывающий лексический анализатор, и даёт на выходе исходный код на языке программирования Cи [5].

Структура файла Lex разделена на три раздела, разделенные строками, содержащими только два знака процента, следующим образом:

Блок определений

%%

Блок правил

%%

Блок кода на Си

В блоке определений задаются макросы и заголовочные файлы. Здесь также допустимо писать любой код на Си — он будет скопирован в результирующий файл.

Блок правил — наиболее важная часть; она описывает шаблоны и ассоциирует их с вызовами. Шаблоны представляют собой регулярные выражения. Когда анализатор видит текст, подходящий под шаблон, он выполняет указанный код.

Блок кода содержит операторы и функции на Си, которые копируются в генерируемый файл. Предполагается, что эти операторы содержат код, вызываемый правилами из предыдущего блока. Для сложных анализаторов бывает более удобно поместить этот код в отдельный файл, подключающийся на стадии компиляции.

**Flex** (Fast Lexical Analyzer) — генератор лексических анализаторов. Заменяет Lex в системах на базе пакетов GNU и имеет аналогичную функциональность. При этом Flex не является частью проекта GNU. На входе программа получает текст в свободном формате и правила выделения лексем, а на выходе даёт код анализатора, в виде функции на языке Си [6].

Структура входного файла для данного инструмента аналогична структуре файла у Lex.

**ANTLR** (от англ. ANother Tool for Language Recognition — «ещё одно средство распознавания языков») — генератор нисходящих анализаторов для формальных языков. ANTLR преобразует контекстно-свободную грамматику в виде РБНФ в программу на C++, Java, C#, JavaScript, Go, Swift, Python. Используется для разработки компиляторов, интерпретаторов и трансляторов [7]. Ключевыми преимуществами данного инструмента является поддержка множества языков программирования, а также то, что он сочетает в себе генератор как лексических, так и синтаксических анализаторов.

### 1.2.2 Генераторы синтаксических анализаторов

**GNU Bison** — программа, предназначенная для автоматического создания синтаксических анализаторов по данному описанию грамматики. Программа bison относится к свободному ПО, разработана в рамках проекта GNU и портирована под все традиционные операционные системы. Программа bison во многом совместима с подобной программой yacc. Обычно используется в комплексе с лексическим анализатором flex [8].

**yacc** — компьютерная программа, служащая стандартным генератором синтаксических анализаторов (парсеров) в Unix-системах. Название является акронимом «Yet Another Compiler» («ещё один компилятор компиляторов»). Yacc генерирует парсер на основе аналитической грамматики, описанной в нотации BNF (форма Бэкуса-Наура) или контекстно-свободной грамматики. На выходе yacc выдаётся код парсера на языке программирования Си.

**ANTLR** был описан ранее, и также предоставляет функционал генерации синтаксических анализаторов на различных языках программирования.

Таким образом, в связи с использованием языка C# для написания программы-компилятора в рамках данной курсовой работы, наиболее подходящим вариантом генератора лексического и синтаксического анализатора является ANTLR.

## 1.3 Платформа .NET

.NET — это бесплатная платформа разработчика с открытым кодом для создания множества приложений. Платформа .NET разработана для обеспечения производительности, безопасности и надежности. Она обеспечивает автоматическое управление памятью с помощью сборщика мусора (GC). Это типобезопасный и безопасный для памяти, из-за использования GC и строгих компиляторов языка. Он включает в себя большой набор библиотек, имеющих широкие функциональные возможности и оптимизированный для производительности в нескольких операционных системах и архитектурах микросхем.

Платформа .NET состоит из общеязыковой среды выполнения (среды CLR) и библиотеки классов .NET. Основой платформы .NET является среда CLR. Среду выполнения можно считать агентом, который управляет кодом во время выполнения и предоставляет основные службы, такие как управление памятью, управление потоками и удаленное взаимодействие. При этом средой накладываются условия строгой типизации и другие виды проверки точности кода, обеспечивающие безопасность и надежность. Фактически основной задачей среды выполнения является управление кодом. Код, который обращается к среде выполнения, называют управляемым кодом, а код, который не обращается к среде выполнения, называют неуправляемым кодом [9].

Среда CLR управляет памятью, выполнением потоков, выполнением кода, проверкой безопасности кода, компиляцией и другими системными службами. Эти средства являются внутренними для управляемого кода, который выполняется в среде CLR.

Среда выполнения также обеспечивает надежность кода, реализуя инфраструктуру строгой типизации и проверки кода, которую называют системой общих типов (CTS). Система общих типов обеспечивает самоописание всего управляемого кода. Различные языковые компиляторы корпорации Microsoft и независимых изготовителей создают управляемый код, удовлетворяющий системе общих типов. Это означает, что управляемый код может принимать другие управляемые типы и экземпляры, при этом обеспечивая правильность типов и строгую типизацию.

Кроме того, управляемая среда выполнения исключает многие часто возникающие проблемы с программным обеспечением. Например, среда выполнения автоматически управляет размещением объектов и ссылками на объекты, освобождая их, когда они больше не используются. Автоматическое управление памятью исключает две наиболее часто возникающие ошибки приложений: утечки памяти и недействительные ссылки на память.

Среда выполнения разработана для повышения производительности. Хотя общеязыковая среда выполнения предоставляет многие стандартные службы времени выполнения, управляемый код никогда не интерпретируется. Средство компиляции по требованию (JIT) позволяет выполнять весь управляемый код на машинном языке компьютера, где он запускается. Между тем диспетчер памяти устраняет возможность фрагментации памяти и увеличивает объем адресуемой памяти для дополнительного повышения производительности [10].

# 2. Конструкторская часть

## 2.1 IDEF0

Высокоуровневая модель разрабатываемого компилятора в нотации IDEF0 представлена на рисунке 3.

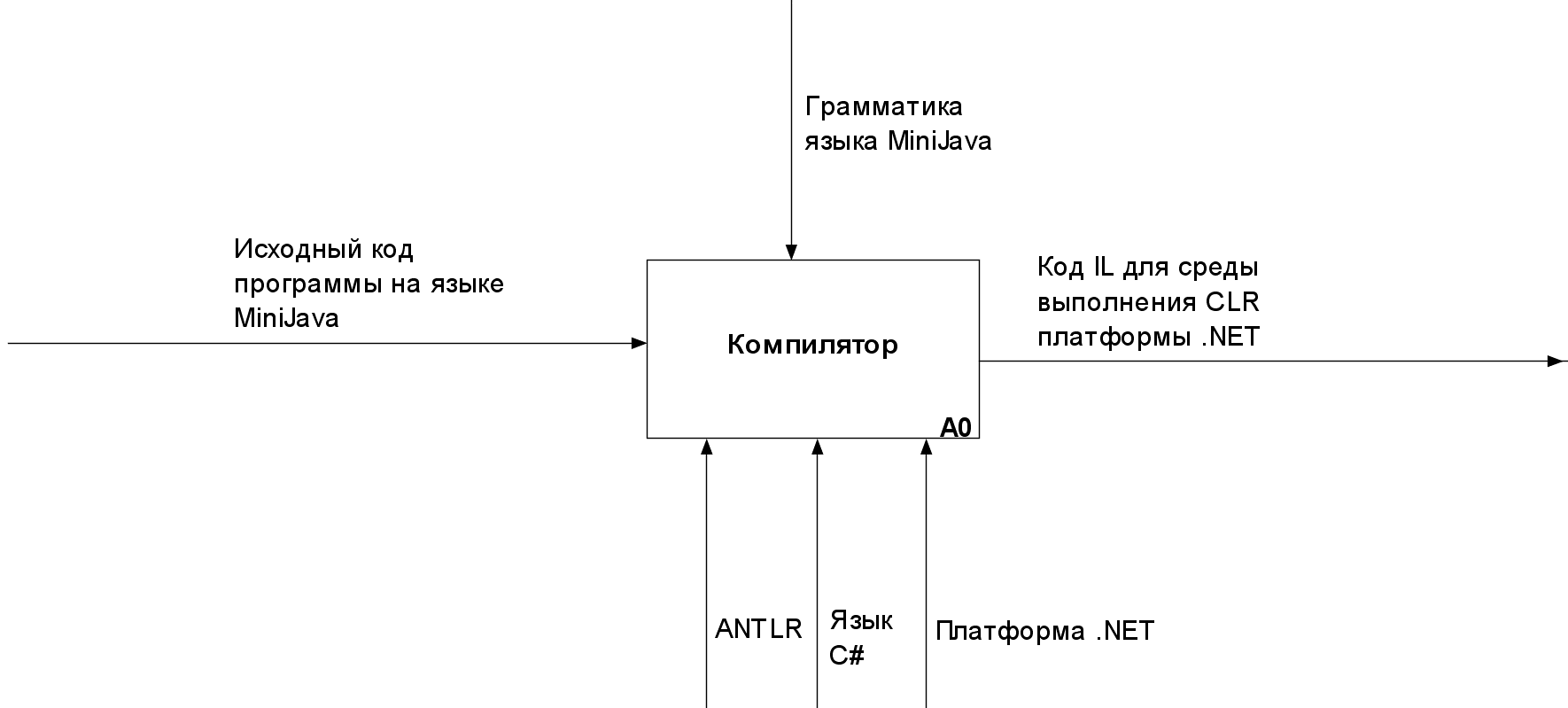


Рисунок 3. Высокоуровневая модель разрабатываемого компилятора в нотации IDEF0.

Разрабатываемый компилятор можно разделить на 3 компонента, обеспечивающие преобразование исходного кода в код IL для среды выполнения CLR. Детализированная модель разрабатываемого компилятора в нотации IDEF0 представлена на рисунке 4.

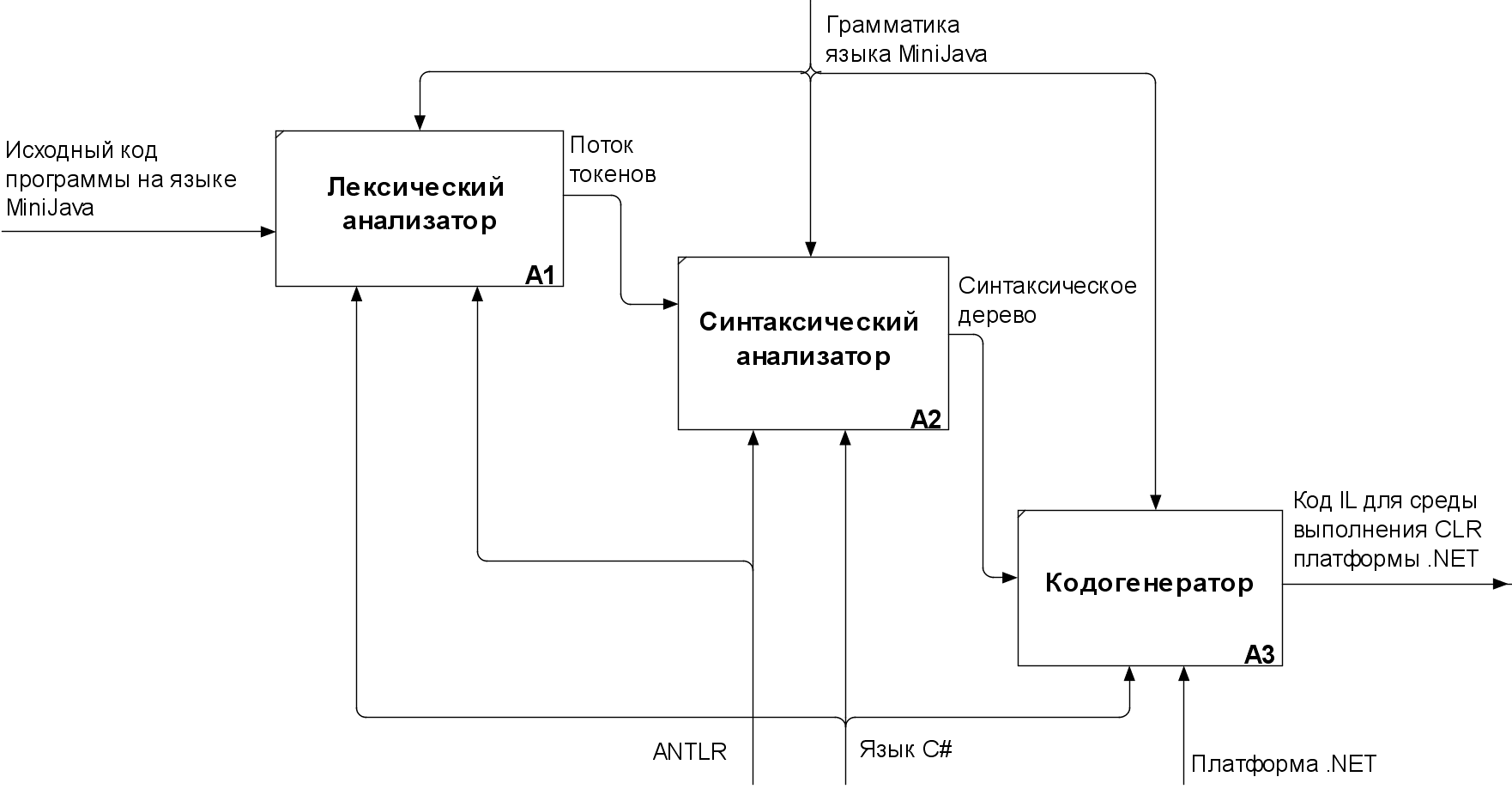


Рисунок 4. Детализированная модель разрабатываемого компилятора в нотации IDEF0.

## 2.2 Язык MiniJava

MiniJava является подмножеством языка программирования Java. Каждая программа MiniJava является программой с семантикой языка программирования Java.

В языке существуют следующие типы данных: integer, boolean и массив integer. Поддерживаются классы и механизм их наследования (однако, отсутствуют виртуальные методы). Также язык предоставляет функцию вывода в консоль, цикл while и условия if-else.

Грамматика MiniJava приведена в приложении А. Для удобства написания тестовых программ в грамматику были добавлены два правила:

1. Statement ::= Expression ";"
2. Expression ::= "System.randomInt(" Expression ")"

## 2.3 Лексический и синтаксический анализаторы

Код лексического и синтаксического анализатора генерируется при помощи программы ANTLR4. На вход она получает файл с описанием грамматики языка MiniJava, а в результате своей работы создаёт файлы, содержащие класс лексера и парсера на языке программирования C#. Также генерируется базовые классы для обхода синтаксического дерева, получаемого в результате работы парсера.

Для работы сгенерированных файлов их достаточно добавить в проект, после чего подать на вход лексеру исходный код программы, а полученный от него поток токенов передать на вход парсеру. В результате получится синтаксическое дерево, используемое для дальнейшего синтаксического анализа и кодогенерации.

## 2.4 Семантический анализ

ANTLR предоставляет два варианта базовых классов для обхода синтаксического дерева: Listener и Visitor.

Listener позволяет произвести обход дерева в глубину, без возможности переопределения способа обхода. Таким образом, обходится каждый узел дерева и вызываются обработчики при входе и выходе из этих узлов.

Visitor позволяет более гибко настраивать обход дерева – допускается переопределение порядка обхода узлов, либо не посещение какого-либо узла вообще. Данный подход более предпочтителен в рамках данной работы, так как не всегда для алгоритмов кодогенерации достаточного простого обхода дерева в глубину, без модификаций.

# 3. Технологическая часть

## 3.1 Выбор средств разработки

Для разработки компилятора был выбран язык программирования C#. C# является строго типизированным, объектно – ориентированным языком, призванным обеспечивать оптимальное сочетание удобства, простоты и производительности.

Основными преимуществами этого языка программирования являются:

1) Строгая и утиная типизация.

2) Наличие большого числа существующих библиотек и пакетов для платформы .NET, которые обеспечивают различные дополнительные возможности разработки.

3) Вариативность использования.

4) Лёгкость написания тестов.

5) Удобная собственная среда разработки.

6) Автоматический менеджмент памяти и сборка мусора.

7) Наличие встроенного обработчика событий.

8) Широкий функционал и возможности языка.

9) Отсутствие заголовочных файлов. Весь код распределен по пакетам и сборкам, что облегчает ситуацию при наличии перекрестных ссылок.

## 3.2 Описание реализованной программы

### 3.2.1 Диаграмма компонентов

На рисунке 5 представлена диаграмма компонентов реализованной программы компилятора. Далее будет описан каждый из разработанных компонентов.

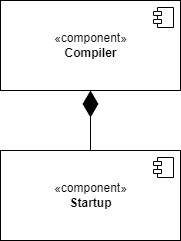


Рисунок 5. Диаграмма компонентов

Всего в приложении два компонента:

* Startup. Это запускаемый проект, представляющий из себя консольное приложение. Данный компонент является точкой входа в программу и позволяет пользователю выбрать файл с кодом на языке MiniJava для компиляции. Кроме того, он содержит все тестовые кейсы для проверки работы компилятора, и предоставляет функционал запуска тестирования.
* Compiler. В данном проекте содержится непосредственно код, необходимый для компиляции программ на исходном языке, и сохранении его на диск. В этом компоненте находится как вручную написанный код, так и сгенерированный при помощи инструмента ANTLR. Для генерации непосредственно IL кода в данном проекте используется сторонняя библиотека RunSharp.

### 3.2.2 Диаграмма классов

На рисунке 6 представлена диаграмма классов компонента Compiler, далее каждый из классов будет рассмотрен подробнее.

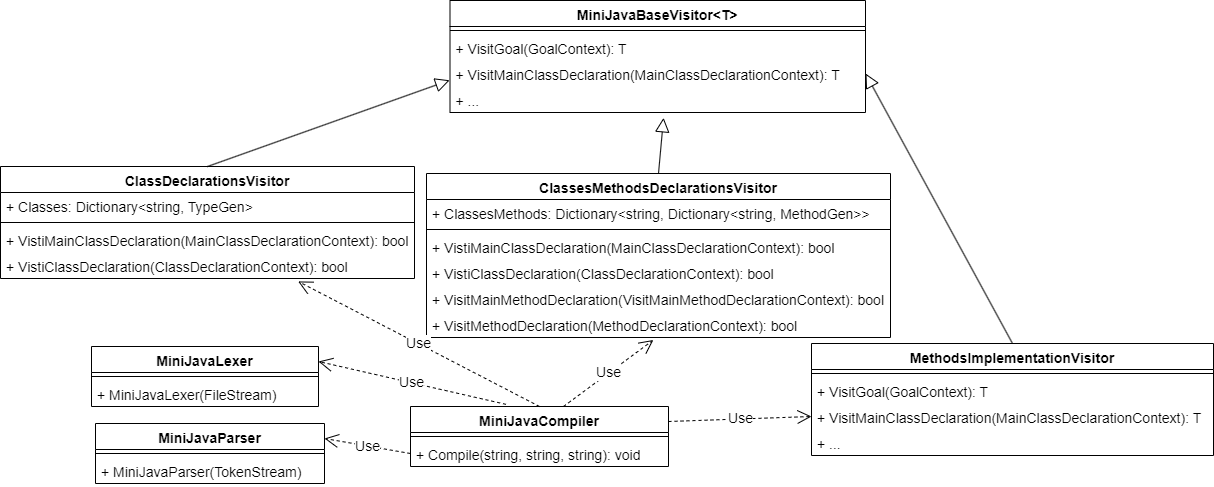


Рисунок 6. Диаграмма классов проекта Compiler

Основным классом в этом проекте является MiniJavaCompiler, он непосредственно предоставляет функционал компиляции исходного кода в промежуточный IL код. Для этого у него существует метод Compile, принимающий в качестве аргументов путь до файла с исходным кодом на языке MiniJava, название будущей сборки (Assembly) и путь, куда необходимо сохранить скомпилированную сборку.

Сборки (Assembly) представляют собой базовые элементы развертывания, управления версиями, повторного использования, назначения областей активации и прав доступа для приложений на основе платформы .NET. Сборка представляет собой коллекцию типов и ресурсов, собранных для совместной работы и образующих логическую функциональную единицу. Сборки создаются в виде исполняемого файла (EXE) или файла библиотеки динамической компоновки (DLL) и являются стандартными блоками приложений .NET. Cборки предоставляют сведения для среды CLR, которые нужны для распознавания реализаций типов. Для среды выполнения тип не существует вне контекста сборки.

Сборка определяет следующие сведения [16]:

* Код, выполняемый средой CLR. Rаждая сборка может иметь только одну точку входа.
* Граница безопасности. Сборка представляет собой единицу, для которой запрашиваются и предоставляются разрешения.
* Граница типа. Каждый идентификатор типа включает имя сборки, в которой располагается данный тип. Тип с именем MyType, загруженный в области действия одной сборки, не совпадает с типом MyType, загруженным в области действия другой сборки.
* Граница области действия ссылок. Манифест сборки содержит метаданные, используемые для разрешения типов и для выполнения связанных с ресурсами запросов. Манифест указывает типы и ресурсы, предоставляемые за пределами сборки, а также перечисляет другие сборки, от которых она зависит.
* Граница версий. Сборка является наименьшей единицей с поддержкой версий в среде CLR. Версия для всех типов и ресурсов в одной сборке назначается как единому целому. В манифесте сборки описываются зависимости определенных версий от других сборок.
* Единица развертывания. При запуске приложения могут присутствовать лишь сборки, первоначально вызываемые приложением. Другие сборки, например, содержащие ресурсы локализации или вспомогательные классы, могут извлекаться по требованию. Это позволяет приложениям сохранять простую структуру и малый размер при первоначальном скачивании.

В рамках своей работы метод Compile выполняет следующие действия:

1. Считывает файл с исходным кодом на языке MiniJava.
2. Инстанциирует лексический анализатор на основе считанного файла.
3. Инстанциирует синтаксический анализатор на основе лексического анализатора из пункта 2.
4. Инстанциирует генератор сборки.
5. Последовательно вызывает методы обхода синтаксического дерева, полученного от синтаксического анализатора, у трёх визитёров, каждый из которых создаёт определённую часть сборки в генераторе из пункта 4.
6. Сохраняет сборку, полученную при помощи генератора, на диск, по указанному пути.

В следующих параграфах каждый из описанных этапов будет рассмотрен подробнее.

### 3.2.3 Описание лексического и синтаксического анализаторов

Как было описано ранее, в качестве генератора для лексического и синтаксического анализаторов был выбран инструмент ANTLR 4. В качестве входных данных о грамматике он использует файл в собственном формате и расширением .g4. Для непосредственной генерации кода лексического и синтаксического анализатора необходимо было установить данный инструмент на компьютер, после чего запустить с флагами, указывающими путь до файла грамматики, исходной директории, а также целевом языке программирования.

В результате работы программы ANTLR4 на основе грамматики генерируются файлы:

* MiniJava.tokens и MiniJavaLexer.tokens. Данные файлы содержат список имен токенов и их числовых присвоений, сгенерированных ANTLR4.
* MiniJava.interp и MiniJavaLexer.interp. Данные файлы содержащее данные, которые позволяют запускать встроенный интерпретатор вместо сгенерированного парсера. В основном это используется для IDE, которые позволяют отлаживать. Файл содержит точно ту же информацию, что и сгенерированный файл синтаксического анализатора/лексера.
* MiniJavaLexer.cs – файл с реализаций лексического анализатора.
* MiniJavaParser.cs – файл с реализацией синтаксического анализатора.
* MiniJavaVisitor.cs – файл с интерфейсом класса для обхода синтаксического дерева.
* MiniJavaBaseVisitor.cs – файл с реализацией базового класса для обхода синтаксического дерева.

Кроме того, для использования данных классов в проект необходимо добавить зависимость от NuGet пакета Antlr.Runtime.Standart. Данная библиотека содержит типы, которые используются в сгенерированных файлах, например, AntlrFileStream – класс, предоставляющий возможность считывания файла с жёсткого диска, или CommonTokenStream – класс, представляющий из себя поток токенов, генерируемых лексическим анализатором.

Таким образом, для лексического анализа используется класс MiniJavaLexer, входным параметром для которого является считанный при помощи AntlFileStream файл с исходным кодом программы. На выходе данный класс предоставляет поток токенов, содержащихся в считанном файле, в виде CommonTokenStream.

Для синтаксического анализа используется класс MiniJavaParser, входным параметром для которого является полученный на предыдущем этапе поток токенов. Выходным параметром данного класса является синтакисческое дерево, каждый из узлов которого описан в виде класса-контекста. Данный класс является наследником типа ParserRuleContext из библиотеки Antlr.Runtime.Standart и генерируется вместе с парсером на основе исходной грамматики. Для каждого правила создаётся свой класс контекста, именуемый в виде <название\_правила>Context. Например, FieldDeclarationContext – для правила, отвечающего за описание полей внутри класса, MethodDeclarationContext – для правила, отвечающего за описание сигнатуры метода класса. Также каждый класс контекста содержит описание дочерних элементов, если они присутствуют в правилах. При помощи этого и реализуется обход синтаксического дерева на следующих этапах.

### 3.2.4 Описание семантического анализатора и генератора кода

Для генерации итоговой сборки и кода в ней была выбрана библиотека RunSharp [12]. Это генератор IL во время выполнения программы, основанный на Reflection.Emit, который позволяет генерировать IL аналогично написанию обычного кода C#. Это дополнительный уровень над стандартным API .NET Reflection.Emit, позволяющий очень быстро и эффективно генерировать/компилировать динамический код во время выполнения.

Reflection.Emit – стандартная библиотеки платформы .NET, содержащая классы, которые позволяют компилятору или сторонним инструментам создавать метаданные и промежуточный язык (IL) [17]. Reflection.Emit позволяет создавать собственные сборки и предоставляет ряд классов Builder, которые можно скомпилировать во время выполнения и, следовательно, использовать возможности CLR C#. Библиотека также предоставляет один ILGenerator, который можно использовать для создания генерации кода в виде промежуточного языка - MSIL. После генерации необходимых типов и промежуточного кода для них, данная библиотека так же позволяет сформировать сборку (Assembly) и сохранить её на диск.

Данная библиотека используется во многих популярных пакетах, в которых существует необходимость работы с динамическим контекстом данных:

* Regex: (регулярные выражения) используют Reflection.Emit. Он должен разобрать выражение, чтобы перевести его в исполняемый код. Regex использует Reflection. Emit для создания быстрой реализации заданного регулярного выражения.
* XmlSerializer: использует изрядное количество рефлексии для того, чтобы выяснить, какие данные находятся в заданном объекте, а также выполнить над ним необходимые операции по сериализации. Этот пакет генерирует специальный класс сериализатора во время исполнения и сохранит его в проекте для последующего использования.
* Automapper: используют Reflection. Emit для генерации соответствия между отображением экземпляров одного типа в другой.

Однако, несмотря на все преимущества данной библиотеки, у неё имеется ряд серьёзных недостатков:

* Использование кода низкого уровня (OpCodes), которые сложно понимать и использовать рядовому программисту.
* Высокая сложность отладки. Из-за сочетания использования сложного, низкоуровневого кода и динамически генерируемых типов процесс отладки сильно усложняется.

Проблему с использованием OpCodes и решает библиотека RunSharp, так как она предоставляет интерфейс-обёртку над методами Reflection.Emit, который достаточно легко читается и понимается.

Данная библиотека представляет несколько основных классов для работы с динамически генерируемыми типами:

* AssemblyGen. Этот класс представляет из себя генератор C# сборок (Assembly), он хранит информацию о будущей сборке – её название, пространство имён, список атрибутов, модулей, типов, а также различные фабрики для генерации выражений.
* TypeGen. Данный класс представляет из себя генератор типов в будущей сборке. При помощи него создаются новые типы, описываются их поля, свойства, конструкторы и методы. Также этот класс хранит информацию о реализуемых интерфейсах и наследовании будущего типа.
* MethodGen. Этот класс является генератором методов в создаваемой сборке. При помощи него описываются сигнатуры создаваемых методов: название, возвращаемый тип, параметры и их типы, модификаторы доступа. Также данный класс содержит генератор для тела метода.
* CodeGen. Этот класс является генератором для тел методов. При помощи него создаётся реализация каждого метода в сборке. Он предоставляет функционал для генерации кода получения и изменения значений полей и свойств класса, получения аргументов метода, создания локальных переменных и присваивания им значений, вызова методов, а также выполнения выражений.
* Operand. Это вспомогательный класс, используемый для составления выражений. Операндом может быть как примитив, так и более сложное выражение. Важно отметить, что данный класс не отвечает непосредственно за генерацию кода выражений, он лишь хранит всю необходимую для этого информацию.

Для семантического анализа и кодогенерации было реализовано три класса, каждый из которых является наследником MiniJavaBaseVisitor:

1. ClassDeclarationsVisitor. Данный класс на вход принимает генератор сборки – AssemblyGen. В ходе работы он обходит узлы описания главного и других классов (MainClassDeclaration и ClassDeclaration), для каждого из которых он создаёт генератор типа TypeGen, привязанный к генератору сборки, и помещает его в словарь классов, где ключами являются их названия в виде строк, а значениями созданные генераторы типов. На этом этапе создаются только определения классов, без описания функций и полей внутри них. Если же функции и поля описывать сразу, то можно столкнуться с ошибкой, что класс не определен, хотя он просто описан в программе позже.
2. ClassesMethodsDeclarationsVisitor. Даный класс на вход получает сформированный словарь с классами и их генераторами типов. Затем он обходит узлы описания сигнатур методов (MainMethodDeclaration и MethodDeclaration), для каждого метода создаёт генератор метода MethodGen, привязанный к соответствующему генератору типа TypeGen, а также помещает созданный в словарь, описывающий список методов каждого из классов. Важно отметить, что на данном этапе рассматриваются именно сигнатуры методов, а не их реализации.
3. CodeGenerationVisitor. Данный класс на основе словаря классов, словаря методов каждого класса и обхода всех узлов синтаксического дерева создаёт генератор кода CodeGen, привязанный к генератору метода MethodGen соответствующего метода, после чего описывает содержимое этого метода для генерации

Таким образом, после обхода синтаксического дерева тремя визитёрами, используемый ими генератор сборки AssemblyGen содержит информацию о всех классах сборки, их полях и методах. Далее у этого класса вызывается метод Save, который генерирует непосредственно промежуточный IL код и сохраняет его на диск в виде .exe файла.

## 3.4 Примеры работы программы

Для тестирования работы компилятора были написаны программы на языке MiniJava, реализующие некоторые структуры данных и алгоритмы работы с ними.

Листинги для сгенерированного промежуточного кода получены при помощи инструмента dotPeek [18]. Данное программное обеспечение позволяет декомпилировать сборку в виде .exe файла и просмотреть его содержимое в разных форматах: IL Code, Low-Level C#, High-Level C#. Для демонстрации был выбран формат High-Level C#, так как он является наиболее лёгким для чтения и понимания.

### 3.4.1 Сортировка пузырьком

На листинге 1 в приложении Б представлен исходный код программы на языке MiniJava, которая заполняет массив чисел случайными числами, после чего сортирует их методом пузырька. На листинге 2 в приложении Б представлен сгенерированный промежуточный код для данной программы.

### 3.4.2 Инвертирование односвязного списка

На листинге 3 в приложении Б представлен исходный код программы на языке MiniJava, который создаёт односвязный список, заполняет его значениями, а затем инвертирует. На листинге 4 в приложении Б представлен сгенерированный промежуточный код для данной программы.

### 3.4.3 Наследование

На листинге 5 в приложении Б представлен исходный код программы на языке MiniJava для демонстрации наследования классов. На листинге 6 в приложении Б представлен сгенерированный промежуточный код для данной программы.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках данной курсовой работы был рассмотрен принцип работы компиляторов, а также инструменты для генерации лексических и синтаксических анализаторов.

Был разработан компилятор языка MiniJava на языке C#, использующий библиотеку ANTLR для синтаксического анализа потока входных данных и построения AST-дерева. Для генерации промежуточного представления на основе составленного синтаксического дерева в качестве целевой платформы использовалась .NET.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Compiler project. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cs.unc.edu/~plaisted/comp455/Mini-Java%20Grammar.pdf> (дата обращения: 03.06.2024).
2. Java (programming language). [Электронный ресурс]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Java_(programming_language)> (дата обращения: 03.06.2024).
3. АХО А.В, ЛАМ М.С., СЕТИ Р., УЛЬМАН Дж.Д. Компиляторы: принципы, технологии и инструменты. – М.: Вильямс, 2008.
4. АХО А., УЛЬМАН Дж. Теория синтаксического анализа, перевода и компиляции: В 2-х томах. Т.1.: Синтаксичечкий анализ. - М.: Мир, 1978.
5. Википедия: Lex [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Lex> (дата обращения: 03.06.2024)
6. Википедия: Flex [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Flex_(%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80_%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%85_%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2)> (дата обращения: 03.06.2024)
7. Википедия: ANTLR [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ANTLR> (дата обращения: 03.06.2024)
8. Википедия: GNU Bison [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/GNU_Bison> (дата обращения: 03.06.2024)
9. Microsoft: Введение в .NET [Электронный ресурс]. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/core/introduction> (дата обращения: 03.06.2024)
10. Microsoft: Общие сведения о платформе .NET [Электронный ресурс]. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/framework/get-started/overview> (дата обращения: 03.06.2024)
11. MiniJava Language Reference Manual [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html> (дата обращения 03.06.2024).
12. GitHub: AqlaSolutions/runsharp [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/AqlaSolutions/runsharp> (дата обращения: 03.06.2024)
13. Хабр: Компилятор языка программирования MiniJava [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/191766/> (дата обращения: 03.06.2024)
14. Хабр: Разрабатываем компилятор для учебного языка Cool на языке C# под .NET (Часть 1) [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/136528/> (дата обращения: 03.06.2024)
15. Хабр: Разрабатываем компилятор для учебного языка Cool на языке C# под .NET (Часть 2 + Бонусы) [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/136714/> (дата обращения: 03.06.2024)
16. Microsoft: Assemblies in .NET [Электронный ресурс]. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/standard/assembly/> (дата обращения: 08.06.2024)
17. Microsoft: System.Reflection.Emit Namespace [Электронный ресурс]. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/api/system.reflection.emit?view=net-8.0> (дата обращения: 03.06.2024).
18. dotPeek [Электронный ресурс]. URL: <https://www.jetbrains.com/ru-ru/decompiler/> (дата обращения: 08.06.2024).

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Program | ::= | [MainClass](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod2) ( [ClassDeclaration](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod3) )\* <EOF> |
| MainClass | ::= | "class" [Identifier](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod4) "{" "public" "static" "void" "main" "(" "String" "[" "]" [Identifier](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod4) ")" "{" [Statement](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod5) "}" "}" |
| ClassDeclaration | ::= | "class" [Identifier](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod4) ( "extends" [Identifier](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod4) )? "{" ( [VarDeclaration](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod6) )\* ( [MethodDeclaration](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod7) )\* "}" |
| VarDeclaration | ::= | [Type](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod8) [Identifier](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod4) ";" |
| MethodDeclaration | ::= | "public" [Type](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod8) [Identifier](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod4) "(" ( [Type](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod8) [Identifier](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod4) ( "," [Type](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod8) [Identifier](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod4) )\* )? ")" "{" ( [VarDeclaration](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod6) )\* ( [Statement](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod5) )\* "return" [Expression](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod9) ";" "}" |
| Type | ::= | "int" "[" "]" |
|  | | | "boolean" |
|  | | | "int" |
|  | | | [Identifier](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod4) |
| Statement | ::= | "{" ( [Statement](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod5) )\* "}" |
|  | | | "if" "(" [Expression](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod9) ")" [Statement](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod5) "else" [Statement](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod5) |
|  | | | "while" "(" [Expression](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod9) ")" [Statement](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod5) |
|  | | | "System.out.println" "(" [Expression](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod9) ")" ";" |
|  | | | [Identifier](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod4) "=" [Expression](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod9) ";" |
|  | | | [Identifier](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod4) "[" [Expression](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod9) "]" "=" [Expression](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod9) ";" |
| Expression | ::= | [Expression](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html#prod9) ( "&&" | "<" | "+" | "-" | "\*" ) [Expression](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod9) |
|  | | | [Expression](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod9) "[" [Expression](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod9) "]" |
|  | | | [Expression](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod9) "." "length" |
|  | | | [Expression](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod9) "." [Identifier](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod4) "(" ( [Expression](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod9) ( "," [Expression](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod9) )\* )? ")" |
|  | | | <INTEGER\_LITERAL> |
|  | | | "true" |
|  | | | "false" |
|  | | | [Identifier](http://www.cs.tufts.edu/~sguyer/classes/comp181-2006/minijava.html" \l "prod4) |
|  | | | "this" |
|  | | | "new" "int" "[" Expression "]" |
|  | | | "new" Identifier "(" ")" |
|  | | | "!" Expression |
|  | | | "(" Expression ")" |
| Identifier | ::= | <IDENTIFIER> |

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

class Program

{

    public static void main(String[] a)

    {

        new BubbleSort().Start(10);

    }

}

class BubbleSort

{

    public int Start(int size)

    {

        int[] array;

        array = this.InitArray(size);

        this.PrintArray(array);

        this.SortArray(array);

        System.out.println(false);

        this.PrintArray(array);

        return 0;

    }

    public int[] InitArray(int size)

    {

        int i;

        int[] array;

        array = new int[size];

        i = 0;

        while (i < size)

        {

            array[i] = System.randomInt(20);

            i = i + 1;

        }

        return array;

    }

    public int PrintArray(int[] array)

    {

        int i;

        i = 0;

        while(i < array.length)

        {

            System.out.println(array[i]);

            i = i + 1;

        }

        return 0;

    }

    public int SortArray(int[] array)

    {

        int i;

        int j;

        int tmp;

        i = 0;

        while (i < array.length - 1)

        {

            j = i + 1;

            while (j < array.length)

            {

                if (array[j] < array[i])

                {

                    tmp = array[j];

                    array[j] = array[i];

                    array[i] = tmp;

                }

                else {}

                j = j + 1;

            }

            i = i + 1;

        }

        return 0;

    }

}

Листинг 1. Исходный код программы для сортировки методом пузырька.

using System;

public class Program

{

  public static void Main(string[] a) => new BubbleSort().Start(10);

  public Program() => this.$$ctor();

  void $$ctor()

  {

  }

}

public class BubbleSort

{

  protected Random random;

  public BubbleSort() => this.$$ctor();

  public int Start(int size)

  {

    int[] array = this.InitArray(size);

    this.PrintArray(array);

    this.SortArray(array);

    Console.WriteLine(false);

    this.PrintArray(array);

    return 0;

  }

  public int[] InitArray(int size)

  {

    int[] numArray = new int[size];

    for (int index = 0; index < size; ++index)

      numArray[index] = this.random.Next(20);

    return numArray;

  }

  public int PrintArray(int[] array)

  {

    for (int index = 0; index < array.Length; ++index)

      Console.WriteLine(array[index]);

    return 0;

  }

  public int SortArray(int[] array)

  {

    for (int index1 = 0; index1 < array.Length - 1; ++index1)

    {

      for (int index2 = index1 + 1; index2 < array.Length; ++index2)

      {

        if (array[index2] < array[index1])

        {

          int num = array[index2];

          array[index2] = array[index1];

          array[index1] = num;

        }

      }

    }

    return 0;

  }

  void $$ctor() => this.random = new Random();

}

Листинг 2. Сгенерированный промежуточный код для программы сортировки метода пузырьком (в формате High-Level C#).

class Program

{

    public static void main(String[] args)

    {

        new ReverseLinkedList().Start(10);

    }

}

class LinkedListNode

{

    int \_data;

    LinkedListNode \_next;

    boolean \_hasNext;

    public int Init(int data)

    {

        \_data = data;

        \_hasNext = false;

        return 0;

    }

    public int GetData()

    {

        return \_data;

    }

    public LinkedListNode GetNext()

    {

        return \_next;

    }

    public boolean HasNext()

    {

        return \_hasNext;

    }

    public int SetNext(LinkedListNode node)

    {

        \_next = node;

        \_hasNext = true;

        return 0;

    }

    public int RemoveNext()

    {

        \_hasNext = false;

        return 0;

    }

}

class LinkedList

{

    LinkedListNode \_root;

    public int Init(int size)

    {

        int i;

        LinkedListNode current;

        LinkedListNode next;

        \_root = new LinkedListNode();

        \_root.Init(System.randomInt(20));

        i = 1;

        current = \_root;

        while (i < size)

        {

            next = new LinkedListNode();

            next.Init(System.randomInt(20));

            current.SetNext(next);

            current = next;

            i = i + 1;

        }

        return 0;

    }

    public int Print()

    {

        LinkedListNode current;

        current = \_root;

        while (current.HasNext())

        {

            System.out.println(current.GetData());

            current = current.GetNext();

        }

        System.out.println(current.GetData());

        return 0;

    }

    public int Reverse()

    {

        LinkedListNode current;

        LinkedListNode prev;

        boolean hasPrev;

        LinkedListNode next;

        current = \_root;

        prev = new LinkedListNode();

        hasPrev = false;

        while (current.HasNext())

        {

            next = current.GetNext();

            if (hasPrev)

                current.SetNext(prev);

            else

                current.RemoveNext();

            prev = current;

            hasPrev = true;

            current = next;

        }

        current.SetNext(prev);

        \_root = current;

        return 0;

    }

}

class ReverseLinkedList

{

    public int Start(int size)

    {

        LinkedList list;

        list = new LinkedList();

        list.Init(size);

        list.Print();

        list.Reverse();

        System.out.println(false);

        list.Print();

        return 0;

    }

}

Листинг 3. Исходный код программы для инвертирования односвязного списка.

using System;

public class Program

{

  public static void Main(string[] args) => new ReverseLinkedList().Start(10);

  public Program() => this.$$ctor();

  void $$ctor()

  {

  }

}

public class LinkedListNode

{

  protected int \_data;

  protected LinkedListNode \_next;

  protected bool \_hasNext;

  public int Init(int data)

  {

    this.\_data = data;

    this.\_hasNext = false;

    return 0;

  }

  public int GetData() => this.\_data;

  public LinkedListNode GetNext() => this.\_next;

  public bool HasNext() => this.\_hasNext;

  public int SetNext(LinkedListNode node)

  {

    this.\_next = node;

    this.\_hasNext = true;

    return 0;

  }

  public int RemoveNext()

  {

    this.\_hasNext = false;

    return 0;

  }

  public LinkedListNode() => this.$$ctor();

  void $$ctor()

  {

  }

}

public class LinkedList

{

  protected LinkedListNode \_root;

  protected Random random;

  public int Init(int size)

  {

    this.\_root = new LinkedListNode();

    this.\_root.Init(this.random.Next(20));

    int num = 1;

    LinkedListNode linkedListNode = this.\_root;

    for (; num < size; ++num)

    {

      LinkedListNode node = new LinkedListNode();

      node.Init(this.random.Next(20));

      linkedListNode.SetNext(node);

      linkedListNode = node;

    }

    return 0;

  }

  public int Print()

  {

    LinkedListNode linkedListNode;

    for (linkedListNode = this.\_root; linkedListNode.HasNext(); linkedListNode = linkedListNode.GetNext())

      Console.WriteLine(linkedListNode.GetData());

    Console.WriteLine(linkedListNode.GetData());

    return 0;

  }

  public int Reverse()

  {

    LinkedListNode linkedListNode = this.\_root;

    LinkedListNode node = new LinkedListNode();

    bool flag = false;

    LinkedListNode next;

    for (; linkedListNode.HasNext(); linkedListNode = next)

    {

      next = linkedListNode.GetNext();

      if (flag)

        linkedListNode.SetNext(node);

      else

        linkedListNode.RemoveNext();

      node = linkedListNode;

      flag = true;

    }

    linkedListNode.SetNext(node);

    this.\_root = linkedListNode;

    return 0;

  }

  void $$ctor() => this.random = new Random();

  public LinkedList() => this.$$ctor();

}

public class ReverseLinkedList

{

  public ReverseLinkedList() => this.$$ctor();

  public int Start(int size)

  {

    LinkedList linkedList = new LinkedList();

    linkedList.Init(size);

    linkedList.Print();

    linkedList.Reverse();

    Console.WriteLine(false);

    linkedList.Print();

    return 0;

  }

  void $$ctor()

  {

  }

}

Листинг 4. Сгенерированный промежуточный код для программы инвертирования односвязного списка (в формате High-Level C#).

class Program

{

    public static void main(String[] args)

    {

        new Inheritance().Start();

    }

}

class A

{

    int value;

    public int SetValue(int number)

    {

        value = number;

        return 0;

    }

    public int DoNothing()

    {

        return 55;

    }

    public int DoSomething(int number)

    {

        return number \* number;

    }

}

class B extends A

{

    public int DoSomething(int number)

    {

        return number \* value;

    }

}

class Inheritance

{

    public int Start()

    {

        A a;

        B b;

        A ab;

        a = new A();

        b = new B();

        ab = b;

        b.SetValue(3);

        System.out.println(a.DoSomething(5));

        System.out.println(b.DoSomething(5));

        System.out.println(ab.DoSomething(5));

        System.out.println(a.DoNothing());

        System.out.println(b.DoNothing());

        System.out.println(ab.DoNothing());

        return 0;

    }

}

Листинг 5. Исходный код программы для демонстрации наследования классов.

using System;

public class Program

{

  public static void Main(string[] args) => new Inheritance().Start();

  public Program() => this.$$ctor();

  void $$ctor()

  {

  }

}

public class A

{

  protected int value;

  public int SetValue(int number)

  {

    this.value = number;

    return 0;

  }

  public int DoNothing() => 55;

  public int DoSomething(int number) => number \* number;

  public A() => this.$$ctor();

  void $$ctor()

  {

  }

}

public class B : A

{

  public new int DoSomething(int number) => number \* this.value;

  public B() => this.$$ctor();

  new void $$ctor()

  {

  }

}

public class Inheritance

{

  public Inheritance() => this.$$ctor();

  public int Start()

  {

    A a1 = new A();

    B b = new B();

    A a2 = (A) b;

    b.SetValue(3);

    Console.WriteLine(a1.DoSomething(5));

    Console.WriteLine(b.DoSomething(5));

    Console.WriteLine(a2.DoSomething(5));

    Console.WriteLine(a1.DoNothing());

    Console.WriteLine(b.DoNothing());

    Console.WriteLine(a2.DoNothing());

    return 0;

  }

  void $$ctor()

  {

  }

}

Листинг 6. Сгенерированный промежуточный код для программы демонстрации наследования (в формате High-Level C#).