МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования «БЕЛОРУССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет информационных технологий
Кафедра программной инженерии
Специальность 6-05-0612-01 Программная инженерия

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ НА ТЕМУ:

«Разработка компилятора RMV-2024»

Выполнил студент Рублевская Маргарита Владимировна
(Ф.И.О.)

Руководитель проекта преп.-ст. Некрасова А.П.

Заведующий кафедрой к.т.н., доц. Смелов В.В.

Консультанты преп.-ст. Некрасова А.П.

Нормоконтролер преп.-ст. Некрасова А.П.

Курсовой проект защищен с оценкой

Минск 2024

Содержание

Введение 5
1. Спецификация языка программирования 6
1.1 Характеристика языка программирования 6
1.2 Определение алфавита языка программирования 6
1.3 Применяемые сепараторы 6
1.4 Применяемые кодировки 6
1.5 Типы данных 6
1.6 Преобразование типов данных 7
1.7 Идентификаторы 8
1.8 Литералы 8
1.9 Объявления данных 9
1.10 Инициализация данных 9
1.11 Инструкции языка 9
1.12 Операции языка 10
1.13 Выражения и их вычисления 10
1.14 Конструкции языка 11
1.15 Область видимости идентификаторов 11
1.16 Семантические проверки 11
1.17 Распределение оперативной памяти на этапе выполнения 12
1.18 Стандартная библиотека и её состав 12
1.19 Ввод и вывод данных 13
1.20 Точка входа 13
1.21 Препроцессор 13
1.22 Соглашения о вызовах 13
1.23 Объектный код 13
1.24 Классификация сообщений транслятора 13
1.25 Контрольный пример 14
2. Структура транслятора 15
2.1 Компоненты транслятора, их назначение и принципы взаимодействия 15
2.2 Перечень входных параметров транслятора 16
2.3 Протоколы, формируемые транслятором 16
3. Разработка лексического анализатора 17

3.1 Структура лексического анализатора 17
3.2 Контроль входных символов 17
3.3 Удаление избыточных символов 18
3.4 Перечень ключевых 18
3.5 Основные структуры данных 20
3.6 Структура и перечень сообщений лексического анализатора 21
3.7 Принцип обработки ошибок 21
3.8 Параметры лексического анализатора и режимы его работы 21
3.9 Алгоритм лексического анализа 21
3.10 Контрольный пример 21
4. Разработка синтаксического анализатора 22
4.1 Структура синтаксического анализатора 22
4.2 Контекстно свободная грамматика, описывающая синтаксис языка 22
4.3 Построение конечного магазинного автомата 25
4.4 Основные структуры данных 26
4.5 Описание алгоритма синтаксического разбора 26
4.6 Структура и перечень сообщений синтаксического анализатора 26
4.7 Параметры синтаксического анализатора и режимы его работы 26
4.8 Принцип обработки ошибок 27
4.9 Контрольный пример 27
5. Разработка семантического анализатора 28
5.1 Структура семантического анализатора 28
5.2 Функции семантического анализатора 28
5.3 Структура и перечень сообщений семантического анализатора 28
5.4 Принцип обработки ошибок 29
5.5 Контрольный пример 29
6. Вычисление выражений 31
6.1 Выражения, допускаемые языком 31
6.2 Польская запись и принцип ее построения 31
6.3 Программная реализация обработки выражений 32
6.4 Контрольный пример 33
7. Генерация кода 34
7.1 Структура генератора кода 34

7.2 Представление типов данных в оперативной памяти 34
7.3 Статическая библиотека 34
7.4 Особенности алгоритма генерации кода 35
7.5 Входные параметры, управляющие генерацией кода 35
7.6 Контрольный пример 35
8. Тестирование транслятора 37
8.1 Общие положения 37
8.2 Результаты тестирования 37
Заключение 41
Список использованных литературных источников 42
Приложение А 43
Приложение Б 45
Приложение В 47
Приложение Г 51
Приложение Д 53
Приложение Е 55
Приложение Ж 56

Введение

Данный курсовой проект представляет из себя создание собственного языка программирования RMV-2024. Этот язык программирования предназначен для выполнения простейших операций и арифметических действий над числами.

Для создания собственного языка программирования требуется разработать собственный компилятор. Компилятор – это программа, задачей которого является перевод программы, написанной на одном из языков программирования в программу на язык ассемблера. В задачи компилятора входит: лексический анализ, семантический анализ и синтаксический анализ.

Исходя из раннее определённой цели курсового проекта, были определены следующие задачи:

– разработка спецификации языка программирования;
– разработка структуры транслятора;
– разработка лексического анализатора;
– разработка синтаксического анализатора;
– преобразование выражений;
– генерация кода на язык ассемблер;
– тестирование транслятора.

Пояснительная записка описывает правила и требования в использовании, принцип работы, реализацию разработанного языка программирования и компилятора.

1. Спецификация языка программирования

1.1 Характеристика языка программирования

Язык программирования RMV-2024 – высокоуровневый, процедурный, компилируемый, не объектно-ориентированный. Имеет нестрогую статическую типизацию.

1.2 Определение алфавита языка программирования

Язык программирования RMV-2024 использует стандартную таблицу символов Windows-1251. Исходный код RMV-2024 может включать в себя символы латинского алфавита, цифры десятичной системы счисления от 0 до 9 и некоторые специальные символы для операций и строковых литералов

1.3 Применяемые сепараторы

Сепараторы необходимы для разделения операций языка. Сепараторы, используемые в языке программирования RMV-2024, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Применяемые сепараторы

Сепаратор	Назначение сепаратора
;	Разделитель инструкций
{…}	Программный блок
(…)	Параметры, приоритетность операций
‘пробел’	Служит для разделения программных конструкций. Допускается везде, кроме идентификаторов и ключевых слов
,	Разделитель параметров в функции
> < >= <= == ^=	Логические операции (операции сравнения: больше, меньше, больше или равно, меньше или равно, равно, не равно,), используемые в условии цикла/условной конструкции, а также в выражениях
+ - * / %	Арифметические операции (сложение, вычитание, умножение, деление, остаток от деления). Используются в выражениях
=	Оператор присваивания

1.4 Применяемые кодировки

Для написания исходного кода программы на языке RMV-2024 используются латинские символы и символы разделители кодировки Windows-1251. Кириллические символы допустимы только в строковых литералах и комментариях.

1.5 Типы данных

В языке RMV-2024 есть три фундаментальных типа данных: целочисленный, логический и строковый. Описание типов данных, предусмотренных в данном языке представлено в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Типы данных языка RMV-2024

Тип данных	Описание
Целочисленный тип данных (number)	Фундаментальный тип данных, представляющий собой целое число, занимающий 2 байта памяти. Автоматическая инициализация происходит с присвоением значения 0. Возможные значения: от -32,768 до 32,767 включительно Возможные операции: + (бинарный) – оператор сложения; - (бинарный) – оператор вычитания; * (бинарный) – оператор умножения; / (бинарный) – оператор целочисленного деления; % (бинарный) – оператор остатка от деления; > (бинарный) – оператор «больше»; < (бинарный) – оператор «меньше»; >= (бинарный) – оператор «больше или равно»; <= (бинарный) – оператор «меньше или равно»; == (бинарный) – оператор «равно»; ^= (бинарный) – оператор «не равно». Может применяться в качестве аргумента в функциях, условия для оператора цикла и условного оператора.
Логический тип данных (bool)	Фундаментальный тип данных, предусмотренный для объявления целых чисел, занимающий 1 байт памяти. Значения: true (истина), false (ложь). Инициализация по умолчанию: false. Поддерживаемые операции: + (бинарный) – оператор сложения; - (бинарный) – оператор вычитания; * (бинарный) – оператор умножения; / (бинарный) – оператор целочисленного деления; % (бинарный) – оператор остатка от деления; = (бинарный) – оператор присваивания.
Строковый тип данных (line)	Фундаментальный тип данных, предусмотренный для работы с символами, каждый из которых занимает 1 байт. Максимальное количество символов – 256. Инициализация по умолчанию: строка нулевой длины “”. Поддерживаемые операции: = (бинарный) – оператор присваивания.

1.6 Преобразование типов данных

В языке программирования RMV-2024 предусмотрены неявные преобразования между логическими (bool) и целочисленными (number) типами. Значение логического типа true преобразуется к 1, значение false – к 0. К логическому значению true преобразуются все значения типа number кроме 0, он преобразуется к false.

Логический тип преобразуется к целочисленному в следующих случаях:

– при присваивании результата логического выражения переменной типа number;
– при присваивании значения логического идентификатора или литерала переменной типа number;
– при вычислении арифметических выражений;
– при передаче логического типа в качестве целочисленного аргумента функции.

Целочисленный тип преобразуется к логическому в следующих случаях:
– при присваивании результата арифметического выражения переменной типа bool;
– при присваивании значения целочисленного идентификатора или литерала переменной типа bool;
– при передаче целочисленного типа в качестве логического аргумента функции;
– при передаче целочисленного идентификатора или литерала в качестве условия для оператора цикла или условного оператора.

Преобразование строкового типа line в какой-либо другой фундаментальный тип не производится.

1.7 Идентификаторы

Идентификаторы в языке RMV-2024 используются для именования функций, процедур, параметров функций и переменных. Идентификаторы, объявленные внутри блока функции или процедуры получают префикс, идентичный имени функции/процедуры для разрешения области видимости. Идентификаторы не должны совпадать с ключевыми словами языка, а также с именами команд ассемблера. Максимальная длина идентификатора не должна превышать 10 символов.

– Примеры правильных идентификаторов: numA, count, factorial, getName, result, i, isNegative.

1.8 Литералы

В языке RMV-2024 существует 3 типа литералов: логического, строкового и целочисленного типов. Краткое описание литералов представлено в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Описание литералов

Тип литерала	Описание литерала
Логические	Распознаются при помощи ключевых слов “true” и “false”, соответственно значения от 0 (false) до 1 (true).
Строковые	Состоит из символов, заключенных в (одинарные кавычки), инициализируются пустой строкой, строковые переменные.
Целочисленные	Последовательность цифр 0…9 с предшествующим знаком минус или без него. Диапазоны значений: от -32768 до 32767.

1.9 Объявления данных

В языке RMV-2024 при объявлении переменной используется ключевое слово def, за которым следует указание типа данных и имени идентификатора. Допускается инициализировать данные при объявлении. Для объявления функции используется ключевое слово function после которого также следует указание типа и имени идентификатора. При объявлении процедуры используется ключевое слово procedure после которого сразу следует имя процедуры без указания типа.

1.10 Инициализация данных

Существует несколько способов инициализации данных в программировании. Первый способ – это инициализация по умолчанию при объявлении переменной. В этом случае переменные типа bool инициализируются значением false, переменные типа number – значением 0, а переменные типа line – пустой строкой.

Второй способ инициализации предполагает присваивание значения при объявлении переменной. Здесь значение может быть представлено в виде литерала, идентификатора или результата вызова функции.

Третий способ инициализации данных позволяет присваивать значения уже существующим переменным. Как и в предыдущем случае, значение может быть литералом, идентификатором или результатом вызова функции.

1.11 Инструкции языка

Инструкции языка RMV-2024 представлена в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Инструкции языка

Инструкция	Форма записи	Пример
Объявление переменной	def <тип данных> <идентификатор>;	def number num;
Объявление переменной с явной инициализацией	def <тип данных> <идентификатор> = <значение>|<выражение>; <значение>::= <литерал>| <идентификатор>|<вызов функции>	def bool b = true; def number num = 3 * 9;

Присваивание	<идентификатор> = <значение>| <выражение>;
	<значение>::= <литерал>| <идентификатор>|<вызов функции>
		num = 23;
		num = result;
		num = factorial[9];

Вызов внешней функции или процедуры	<идентификатор> [<идентификатор>| <литерал>, …];	factorial[a]; factorial[9]; max[6, 11];
Возврат из подпрограммы	give <идентификатор> / <литерал>;	give result; give 6;
Вывод данных	out [<идентификатор> / <литерал>];	out[“Hello”];
Вывод данных с новой строки	outln [<идентификатор> / <литерал>];	outln[result]

Таблица 1.4 (продолжение)

Условный оператор	when [<условие>]
	{ … }
	otherwise
	{ … }
		when [i > 0]
		{
		outln[“Positive”];
		}
		otherwise
		{
		outln[“Negative”];
		}

1.12 Операции языка

Операции сравнения — это операторы, которые используются для сравнения двух значений. Операции сравнения часто используются в условных выражениях и циклах., которые можно использовать в языке RMV-2024, представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Операции языка

Тип операций	Операции	Приоритет
Логические операции	> – больше < – меньше == – равно ^= – не равно >= – больше или равно <= – меньше или равно	-1 -1 -1 -1 -1 -1
Арифметические операции	+ – сложение - – вычитание * – умножение / – деление % –остаток от деления	2 2 3 3 3
Операция запятая	,	1

1.13 Выражения и их вычисления

Выражения в языке RMV-2024 составляются согласно следующим правилам:

– Допускается использование оператора смены приоритета только в арифметических выражениях;

– Использование логических и арифметических операторов в одном выражении не допустимо;

– Использование двух и более идущих подряд операторов (за исключением оператора смены приоритета) запрещено;

– Использование двух и более логических операторов в одном выражении запрещено;

– Вызов функции могут содержать только арифметические выражения или выражения присваивания;

– Вычисление сложных выражений (как минимум с одним оператором) внутри оператора возврата, в аргументах функции или процедуры, внутри условия

цикла или условного оператора (за исключением логических операций) не производится.

1.14 Конструкции языка

Основные программные конструкции языка программирования RMV-2024 представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Основные конструкции языка

Конструкция	Реализация
Главная функция (точка входа)	`program` `{ … }`

Процедура	`procedure <идентификатор> [<тип данных> <идентификатор>, …]`
	`{`
	`…`
	`}`

Функция	`function <тип данных> <идентификатор> [<тип данных> <идентификатор>, …]`
	`{`
	`…`
	`give <выражение>`
	`}`

1.15 Область видимости идентификаторов

В языке RMV-2024 переменные обязаны находится внутри программного блока функций или процедур. Переменные, объявленные в одной функции, недоступны в другой. Внутри разных областей видимости разрешено объявление переменных с одинаковыми именами.

Все переменные и параметры внутри области видимости получают префикс, который отображается в таблице идентификаторов. Объявление глобальных переменных не предусмотрено. Объявление пользовательских областей видимости также не предусмотрено.

1.16 Семантические проверки

В языке программирования RMV-2024 выполняются следующие семантические проверки:

- Наличие функции program – точки входа в программу;
- Единственность точки входа;
- Переопределение идентификаторов;
- Использование идентификаторов без их объявления;
- Проверка соответствия типа функции и возвращаемого параметра;
- Правильность передаваемых в функцию параметров: количество, типы;
- Правильность строковых выражений;

– Превышение размера строковых и целочисленных литералов;
– Деление на ноль в арифметических операциях;
– Проверка на вызов функции в логических выражениях;
– Корректность использования операторов в выражениях.

1.17 Распределение оперативной памяти на этапе выполнения

Транслированный в язык ассемблера исходный код использует две области памяти. В сегмент констант записываются все литералы. В сегмент данных заносятся переменные и параметры функций. Локальная область видимости в исходном коде регулируется префиксами идентификаторов, что и обуславливает их локальность на уровне исходного кода несмотря на то, что в языке ассемблера все переменные имеют глобальную область видимости.

1.18 Стандартная библиотека и её состав

Функции стандартной библиотеки языка RMV-2024 реализованы на языке C++. Содержимое библиотеки и описание функций представлено в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Стандартная библиотека языка RMV-2024

Имя функции	Возвращаемое значение	Принимаемые параметры	Описание
concat	line	line a, line b	Функция производит конкатенацию строк a и b, возвращает строку.
linelen	number	line a	Функция вычисляет длину строки a.
random	number	number min, number max	Функция возвращает случайно сгенерированное число в диапазоне [min, max].
sqrt	number	number a	Функция возвращает результат вычисление квадратного корня из числа a.
OutLine	-	line a	Функция выводит в консоль строку a.
OutNumber	-	number a	Функция выводит в консоль число a.
OutBool	-	bool a	Функция выводит в консоль булево значение a.

Таблица 1.7 (продолжение)

OutLineLn	-	line a	Функция выводит в консоль строку a с переносом на новую строку.
OutNum-berLn	-	number a	Функция выводит в консоль число a с переносом на новую строку.
OutBoolLn	-	bool a	Функция выводит в консоль булево значение a с переносом на новую строку.

1.19 Ввод и вывод данных

Вывод данных осуществляется с помощью функций out и outln. Допускается использование функций с литералами и идентификаторами.

В зависимости от типа параметра определяется функция: OutLine, OutBool, OutNumber, OutLineLn, OutBoolLn, OutNumberLn которые входят в состав стандартной библиотеки и описаны в таблице 1.7.

Функции ввода данных в языке RMV-2024 не предусмотрены.

1.20 Точка входа

В языке RMV-2024 каждая программа должна содержать главную функцию, точку входа, с которой начнется последовательное выполнение программы. Точкой входа является функция с именем program.

1.21 Препроцессор

Препроцессор в языке программирования RMV-2024 не предусмотрен.

1.22 Соглашения о вызовах

Все параметры заноситься в стек вручную как для функций, так и для выполнения инструкций. В функцию параметры передаются, начиная с вершины стека, то есть верхняя вершина стека будет первым параметром и так далее.

1.23 Объектный код

Исходный код на языке RMV-2024 транслируется в язык ассемблера, а затем в объектный код.

1.24 Классификация сообщений транслятора

В случае возникновения ошибки в коде программы на языке RMV-2024 и выявления её транслятором в текущий файл протокола выводится сообщение. Их классификация сообщений приведена в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Классификация сообщений транслятора

Интервал	Описание ошибок
0-110	Системные ошибки, ошибки параметров
200-299	Ошибки лексического анализа
300-399	Ошибки семантического анализа
600-699	Ошибки синтаксического анализа
400 – 499, 700 – 999	Зарезервированные коды ошибок

1.25 Контрольный пример

Контрольный пример демонстрирует главные особенности языка RMV-2024: функции, процедуры, фундаментальные типы, основные инструкции и операции, использование функций статической библиотеки. Исходный код контрольного примера представлен в приложении А.

2. Структура транслятора

2.1 Компоненты транслятора, их назначение и принципы взаимодействия

Транслятор преобразует программу, написанную на языке RMV-2024 в программу на языке ассемблера. Компонентами транслятора являются лексический, синтаксический и семантический анализаторы, а также генератор кода на язык ассемблера. Принцип их взаимодействия представлен на рисунке 2.1.

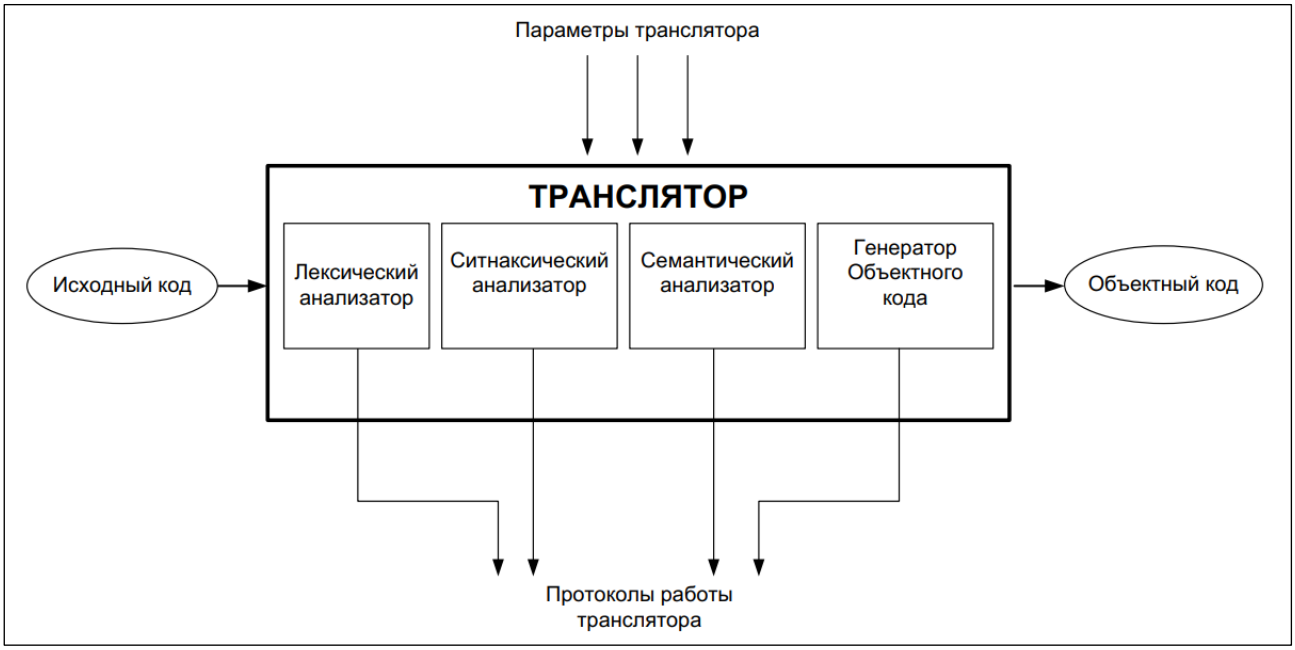


Рисунок 2.1 – Структура транслятора

Лексический анализ – первая фаза трансляции. Назначением лексического анализатора является нахождение ошибок лексики языка, удаление всех лишних пробелов, распознание лексем, формирование таблицы лексем и таблицы идентификаторов. При ошибках распознавания текста выдавать сообщение об ошибке.

Синтаксический анализ – это основная часть транслятора, предназначенная для распознавания синтаксических конструкций и формирования промежуточного кода. Входным параметром для синтаксического анализа является таблица лексем. Синтаксический анализатор распознаёт синтаксические конструкции, выявляет синтаксические ошибки при их наличии и формирует дерево разбора.

Семантический анализ в свою очередь является проверкой исходной программы на семантическую согласованность с определением языка, т.е. проверяет правильность текста исходной программы с точки зрения семантики. На вход семантического анализатора поступаются таблицы лексем и идентификаторов. Анализатор отслеживает ошибки, которые невозможно отследить при помощи регулярной и контекстно-свободной грамматики.

Генератор кода – этап транслятора, выполняющий генерацию ассемблерного кода на основе полученных данных на предыдущих этапах трансляции. Генератор кода принимает на вход таблицы идентификаторов и лексем и транслирует код на языке RMV-2024, прошедший все предыдущие этапы, в код на языке Ассемблера.

2.2 Перечень входных параметров транслятора

В таблице 2.1 представлены входные параметры, которые могут использоваться для управления работой транслятора.

Таблица 2.1 – Входные параметры транслятора

Входной параметр	Описание	Значение по умолчанию
-in:<имя_файла>	Входной файл с расширением .txt, в котором содержится исходный код на RMV-2024	Не предусмотрено
-log:<имя_файла>	Файл для записи полного протокола работы транслятора	<имя_файла>.log
-out:<имя_файла>	Файл для записи результата работы транслятора	<имя_файла>.out.asm
-poliz	Ключ для вывода на консоль промежуточного представления кода после преобразования в польскую инверсную запись	По умолчанию отсутствует
-lt	Ключ для вывода таблицы лексем на консоль	По умолчанию отсутствует
-id	Ключ для вывода таблицы идентификаторов на консоль	По умолчанию отсутствует

2.3 Протоколы, формируемые транслятором

В ходе трансляции формируются протоколы работы лексического, синтаксического и семантического анализаторов. Перечень протоколов, формируемых транслятором языка программирования их описание представлены в таблице 2.2

Таблица 2.2 – Протоколы, формируемые транслятором языка RMV-2024

Формируемый протокол	Описание выходного протокола
Файл журнала, заданный параметром -log:	Файл с протоколом работы транслятора языка программирования RMV-2024 содержит информацию о времени выполнения приложения; входных параметрах в приложение таблицу лексем, таблицу идентификаторов, промежуточное представление кода; трассировку синтаксического анализа; дерево разбора, время выполнения разбора; промежуточное представление кода после приведения его к польской нотации.
Выходной файл, заданный параметром -out:	Результат работы программы – файл, содержащий исходный код на языке ассемблера.

3. Разработка лексического анализатора

3.1 Структура лексического анализатора

Лексический анализатор – это часть компилятора, выполняющая лексический анализ исходного кода. На вход лексического анализатора поступает текст исходной программы. Итогом работы лексического анализатора является список всех найденных в тексте исходной программы лексем. Этот список лексем предстаёт в виде таблицы, называемой таблицей лексем. Структура лексического анализатора представлена на рисунке 3.1.

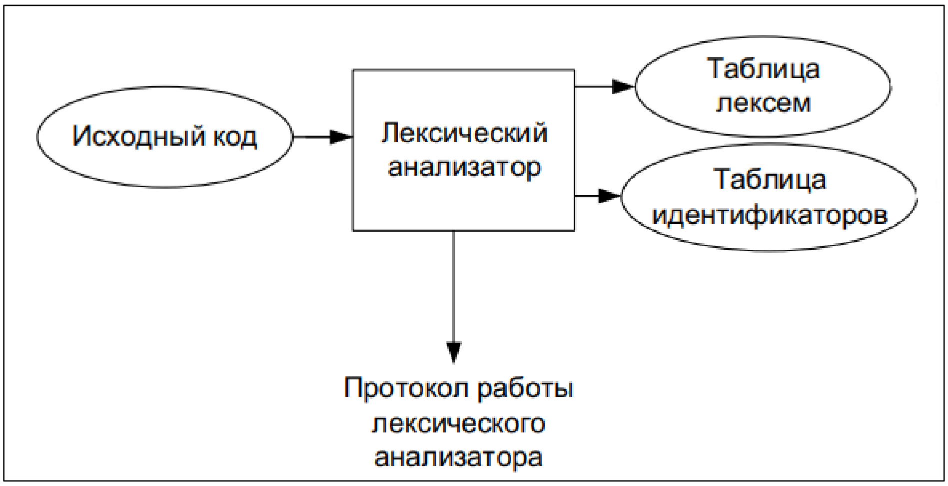


Рисунок 3.1 – Структура лексического анализатора

В последующем таблицы используются на других этапа анализа языка.

3.2 Контроль входных символов

Для удобной работы с исходным кодом, при передаче его в лексический анализатор, все символы разделяются по категориям. Таблица входных символов представлена на рисунке 3.2.

```
#define IN_CODE_TABLE {\
IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::BL, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T,\
IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, \
IN::T, IN::T, IN::L, IN::T, IN::C, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, \
IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, \
IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, \
IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, \
IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, \
IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, \
                                                                                                                 \
IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, \
IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, \
IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::T, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, \
IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, IN::T, IN::F, IN::F, IN::F, IN::F, \
IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, \
IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, \
IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, \
IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, IN::T, \
}
```

Рисунок 3.2 – Таблица контроля входных символов

Категории входных символов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Соответствие символов и их значений в таблице

Символы	Значение в таблице входных символов
T	Разрешенный
F	Запрещенный
BL	Перевод строки
C	Признак начала комментария
L	Строковый литерал

3.3 Удаление избыточных символов

Избыточными символами являются символы табуляции и пробелы. Они удаляются на этапе разбиения исходного кода на лексемы.

Описание алгоритма удаления избыточных символов:

– Посимвольное считывание исходного кода, занесенного в структуру In.

– Встреча пробела или знака табуляции вне пределов строкового литерала или комментария является встречей символа-сепаратора.

– В отличие от других символов-сепараторов табуляции и пробелы игнорируются, т.е. не записываются в таблицу лексем

3.4 Перечень ключевых

Лексический анализатор преобразует исходный текст, заменяя лексические единицы лексемами для создания промежуточного представления исходной программы. Соответствие ключевых слов и лексем приведено в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Соответствие ключевых слов, операций и сепараторов с лексемами

Тип цепочки	Цепочка	Лексема
Ключевые слова	def	d
	number, line, bool	t
	program	p
	function	f
	procedure	s
	give	r
	out	o
	cycle	u
	when	w
	otherwise	!
Иное	Идентификатор	i
	Литерал	l
Функции стандартной библиотеки	concat	+
	linelen	%
	sqrt	q
	outln	b

Таблица 3.2 (продолжение)

Сепараторы	random	z
	;	;
	,	,
	{	{
	}	}
	(	(
	)	)
	[	[
	]	]
Операторы	Арифметические (+, -, *, /, %)	v
	Логические (== != > < >= <=)	g
	Присваивание (=)	=

Каждому выражению соответствует детерминированный конечный автомат, по которому происходит разбор данного выражения. В случае успешного разбора выражения оно записывается в таблицу лексем. Если выражение является идентификатором или литералом, информация также заносится в таблицу идентификаторов.

Структура конечного автомата изображена на рисунке 3.3.

```
struct RELATION                         // ребро : символ -> вершина графов переходов КА
{
    unsigned char symbol;               // символ перехода
    short nnode;                        // номер смежной вершины

    RELATION (
        char c = 0x00,                  // символ перехода
        short ns = NULL                 // новое состояние
    );
};

struct NODE                             // вершина графа переходов
{
    short n_relation;                   // количество инцидентных ребер
    RELATION* relations;                // инцидентные ребра
    NODE();                             // конструктор без параметров
    NODE(short n, RELATION rel, ...);   // количество инцидентных ребер, список ребер
};

struct FST                              // недетерминированный конечный автомат
{
    unsigned char* string;              // цепочка (строка, завершается 0x00)
    short position;                     // текущая позиция в цепочке
    short nstates;                      // количество состояний автомата
    NODE* nodes;                        // граф переходов: [0]-начальное состояние, [ostate 1] конечное
    short* rstates;                     // возможные состояния автомата на данной позиции
    // граф переходов
    FST(unsigned char* s, short ns, NODE n, ...);
};
```

Рисунок 3.3 – Структура конечного автомата

Пример графа перехода конечного автомата изображен на рисунке 3.4.

```
#define GRAPH_NUMBER 7, \
    FST::NODE(1,FST::RELATION('n', 1)),\
    FST::NODE(1,FST::RELATION('u', 2)),\
    FST::NODE(1,FST::RELATION('m', 3)),\
    FST::NODE(1,FST::RELATION('b', 4)),\
    FST::NODE(1,FST::RELATION('e', 5)),\
    FST::NODE(1,FST::RELATION('r', 6)),\
    FST::NODE()
```

Рисунок 3.4 – Граф конечного автомата для ключевого слова number

3.5 Основные структуры данных

Основными структурами данных лексического анализатора являются таблица лексем и таблица идентификаторов. Код на языке C++ со структурой таблицы лексем представлен на рисунке 3.5.

```
struct Entry                    // строка таблицы лексем
{
    unsigned char lexema;       // лексема
    int line;                   // номер строки в исходном тексте
    int idxTI;                  // индекс в таблице идектификаторов или LT_TI_NULLIDX
    int priority;               // приоритет
    OPER operation;
};

struct LexTable                 // экземпляр таблицы лексем
{
    int maxsize;                // емкость таблицы лексем < LT MAXSIZ
    int size;                   // текущий размер таблицы лексем < maxsize
    Entry* table;               // массив строк таблицы лексем
};
```

Рисунок 3.5 – Структура таблицы лексем

Код со структурой таблицы идентификаторов представлен на рисунке 3.6.

```
struct Entry                                        // строка таблицы идентификаторов
{
    int         idxfirstLE;                         // индекс первой строки в таблице лексем
    unsigned char id[ID_PREFIX_MAXSIZE];            // индентификатор
    IDDATATYPE  iddatatype = IDDATATYPE::UNKNOWN;   // тип данных
    IDTYPE      idtype;                             // тип идентификатора
    unsigned char visibility[ID_MAXSIZE];           // область видимости

    struct
    {
        int vint;                                   // значение integer
        struct
        {
            int len;                                // количество символов в string
            unsigned char str[TI_LINE_MAXSIZE - 1]; // символы string
        } vstr;                                     // значение string

        struct
        {
            int count;                              // количество параметров функции
            IDDATATYPE* types;                      // типы параметров функции
        } params;
    } value = { LT_TI_NULLIDX };                    // значение идентификатора
};

struct IdTable                                      // экземпляр таблицы идентификаторов
{
    int maxsize;                                    // емкость таблицы идентификаторов < TI MAXSIZE
    int size;                                       // текущий размер таблицы идентификаторов < maxsize
    Entry* table;                                   // массив строк таблицы идентификаторов
};
```

Рисунок 3.6 – Структура таблицы идентификаторов

3.6 Структура и перечень сообщений лексического анализатора

Перечень сообщений лексического анализатора представлен на рисунке 3.7.

```
ERROR_ENTRY(200, "#LEXICAL - Недопустимый символ в исходном файле (-in)"),
ERROR_ENTRY(201, "#LEXICAL - Превышен размер таблицы лексем"),
ERROR_ENTRY(202, "#LEXICAL - Переполнение таблицы лексем"),
ERROR_ENTRY(203, "#LEXICAL - Превышен размер таблицы идентификаторов"),
ERROR_ENTRY(204, "#LEXICAL - Переполнение таблицы идентификаторов"),
ERROR_ENTRY(205, "#LEXICAL - Лексема не разпознана"),
ERROR_ENTRY(206, "#LEXICAL - Длина идентификатора не должна превышать 10 символов"),
```

Рисунок 3.7 – Сообщения лексического анализатора

3.7 Принцип обработки ошибок

Для обработки ошибок лексический анализатор использует таблицу с сообщениями. Структура сообщений содержит информацию о номере сообщения, номер строки и позицию, где было вызвано сообщение в исходном коде, информацию об ошибке. При возникновении сообщения, лексический анализатор останавливает работу и далее сообщение выводится в файл протокола.

3.8 Параметры лексического анализатора и режимы его работы

Входными параметрами для лексического анализатора является исходный текст программы, написанный на языке RMV-2024, а также файл протокола, в который записываются выходные данные (таблица лексем и таблица идентификаторов).

3.9 Алгоритм лексического анализа

Лексический анализ основывается на работе конечных автоматов, разбирающих регулярные выражения. Алгоритм лексического анализа:

– из входного потока символов программы на исходном языке удаляются лишние пробелы и добавляется сепаратор для вычисления номера строки для каждой лексемы;

– формируется массив из слов языка;

– для каждого слова выполняется функция распознавания лексемы;

– при успешном распознавании информация о выделенной лексеме заносится в таблицу лексем и таблицу идентификаторов, и алгоритм возвращается к первому этапу;

– при неуспешном распознавании выдается сообщение об ошибке;

– формируется протокол работы.

3.10 Контрольный пример

Результат работы лексического анализатора в виде таблиц лексем и идентификаторов, соответствующих контрольному примеру, представлен в приложении Б.

4. Разработка синтаксического анализатора

4.1 Структура синтаксического анализатора

Синтаксический анализатор – это часть компилятора, выполняющая синтаксический анализ, то есть исходный код проверяется на соответствие правилам грамматики. Входной информацией для синтаксического анализа является таблица лексем и таблица идентификаторов, полученные на этапе лексического анализа. Выходной информацией является дерево разбора.

Структура синтаксического анализатора представлена на рисунке 4.1.

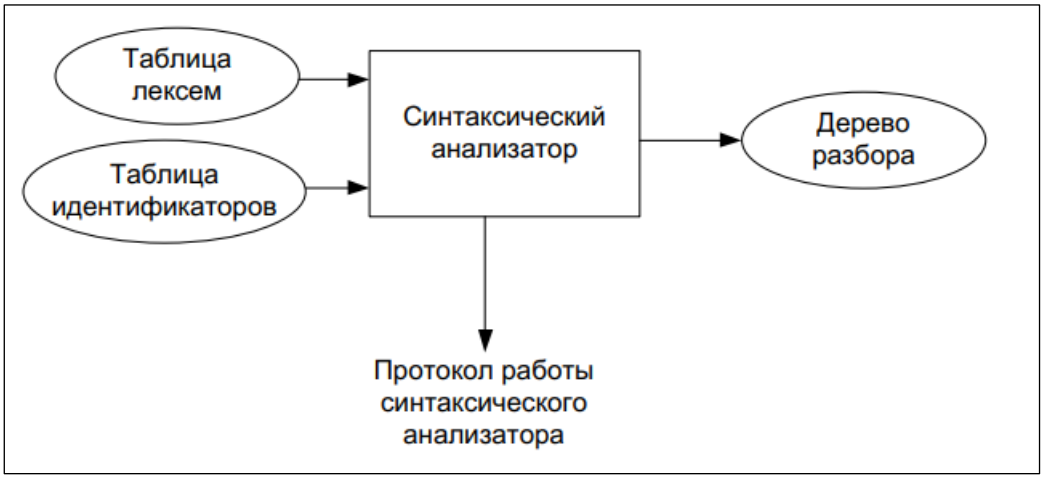


Рисунок 4.1 – Структура синтаксического анализатора

4.2 Контекстно свободная грамматика, описывающая синтаксис языка

В синтаксическом анализаторе транслятора языка RMV-2024 используется контекстно-свободная грамматика $G = \langle T, N, P, S \rangle$, где

T – множество терминальных символов,

N – множество нетерминальных символов,

P – множество правил языка,

S – начальный символ грамматики, являющийся нетерминалом.

Эта грамматика имеет нормальную форму Грейбах, т.к. она не леворекурсивная (не содержит леворекурсивных правил) и правила P имеют вид:

1) $A \to a\alpha$, где $a \in T, \alpha \in (T \cup N) \cup \{\lambda\}$; (или $\alpha \in (T \cup N)^*$, или $\alpha \in V^*$)

2) $S \to \lambda$, где $S \in N$ — начальный символ, при этом если такое правило существует, то нетерминал S не встречается в правой части правил.

Правила языка RMV-2024 реализованные на языке C++ представлены в приложении В.

Перечень правил, составляющих грамматику языка представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Перечень правил, составляющих грамматику языка

Нетерминал	Цепочки правил	Описание
S	ftiFBS siFUS p{N} ftiFB siFU	Проверка правильности структуры программы
F	[P] []	Проверка наличия списка параметров функции
P	ti ti,P	Проверка на ошибку в параметрах функции при ее объявлении
B	{Nr[I];} {r[I];}	Проверка наличия тела функции
I	l i	Проверка на недопустимое выражение (ожидается только литерал или идентификатор)

N	dti;N
	dti;
	dti=R;N
	dti=E;N
	dti=E;
	i=R;N
	i=E;N
	i=E;
	u[R]{X}N
	u[R]{X}
	w[R]{X}N
	w[R]{X}
	w[R]{X}!{X}N
	w[R]{X}!{X}
	%K;N
	%K;
	+K;N
	+K;
	qK;N
	qK;
	zK;N
	zK;
	o[I];N
	o[I];
	b[I];N
	oK;
	bK;
	iK;N
	iK;
		Проверка на неверную конструкцию в теле функции

U	{N}	Проверка на ошибку в теле процедуры

Таблица 4.1 (продолжение)

R	i l igi igl lgi lgl	Проверка на ошибку в условном выражении
K	[W] []	Проверка на ошибку в вызове функции
E	i iM l lM (E) (E)M iK iKM %K %KM +K +KM qK qKM zK zKM	Проверка на ошибку в арифметическом выражении
W	i l i,W l,W	Проверка на ошибку в параметрах вызываемой функции
M	vE vEM	Проверка арифметических действий

X	dti;N
	dti;
	dti=E;N
	dti=E;
	dti=R;N
	dti=R;
	i=R;N
	i=R;
	i=E;N
	i=E;
	%K;N
	%K;
	+K;N
	+K;
	qK;N
		Проверка на неверную конструкцию в теле цикла или условного выражения

Таблица 4.1 (продолжение)

	qK; zK;N zK; o[I];N oK; b[I];N bK; iK;N iK; r[I];N r[I];	

4.3 Построение конечного магазинного автомата

Конечный автомат с магазинной памятью представляет собой семерку $M = \langle Q, V, Z, \delta, q_0, z_0, F \rangle$, описание которой представлено в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Описание компонентов магазинного автомата

Компонента	Определение	Описание
Q	Множество состояний автомата	Состояние автомата представляет из себя структуру, содержащую позицию на входной ленте, номера текущего правила и цепочки и стек автомата.
V	Алфавит входных символов	Алфавит представляет из себя множества терминальных и нетерминальных символов.
Z	Алфавит специальных магазинных символов	Алфавит магазинных символов содержит стартовый символ и маркер дна стека (представляет из себя символ $).
δ	Функция переходов автомата	Функция, которая представляет из себя множество правил грамматики.
q_0	Начальное состояние автомата	Состояние, которое приобретает автомат в начале своей работы. Представляется в виде стартового правила грамматики.
z_0	Начальное состояние магазина автомата	Символ маркера дна стека $.
F	Множество конечных состояний	Конечные состояние заставляют автомат прекратить свою работу. Конечным состоянием является пустой магазин автомата и совпадение позиции на входной ленте автомата с размером ленты.

4.4 Основные структуры данных

Основными структурами данных синтаксического анализатора являются структуры магазинного конечного автомата, выполняющего разбор исходной ленты, и структуры грамматики Грейбах, описывающей синтаксические правила языка RMV-2024. Данные структуры представлены в приложении Г.

4.5 Описание алгоритма синтаксического разбора

Принцип работы автомата, следующий:

1. В магазин записывается стартовый символ;
2. На основе полученных ранее таблиц формируется входная лента;
3. Запускается автомат;
4. Выбирается цепочка, соответствующая нетерминальному символу, записывается в магазин в обратном порядке;
5. Если терминалы в стеке и в ленте совпадают, то данный терминал удаляется из ленты и стека. Иначе возвращаемся в предыдущее сохраненное состояние и выбирается другая цепочка;
6. Если в магазине встретился нетерминал, переход к пункту 4;
7. Если символ достиг дна стека и лента в этот момент пуста, то синтаксический анализ выполнен успешно. Иначе генерируется исключение.

4.6 Структура и перечень сообщений синтаксического анализатора

Перечень сообщений синтаксического анализатора представлен на рисунке 4.2.

```
ERROR_ENTRY(600, "#SYNTAX - Неверная структура программы"),
ERROR_ENTRY(601, "#SYNTAX - Отсутствует список параметров функции при её объявлении"),
ERROR_ENTRY(602, "#SYNTAX - Ошибка в параметрах функции при её объявлении"),
ERROR_ENTRY(603, "#SYNTAX - Возможно отсутствует тело функции"),
ERROR_ENTRY(604, "#SYNTAX - Недопустимое выражение. Ожидаются только литералы и идентификаторы"),
ERROR_ENTRY(605, "#SYNTAX - Возможно отсутствует тело процедуры"),
ERROR_ENTRY(606, "#SYNTAX - Неверная конструкция в теле функции/процедуры"),
ERROR_ENTRY(607, "#SYNTAX - Ошибка в условном выражении"),
ERROR_ENTRY(608, "#SYNTAX - Ошибка в вызове функции"),
ERROR_ENTRY(609, "#SYNTAX - Ошибка при вычислении выражения"),
ERROR_ENTRY(610, "#SYNTAX - Ошибка в списке параметров при вызове функции"),
ERROR_ENTRY(611, "#SYNTAX - Неверная конструкция в теле цикла/условного выражения"),
ERROR_ENTRY(612, "#SYNTAX - Требуется закрывающая фигурная скобка"),
ERROR_ENTRY(613, "#SYNTAX - Требуется открывающая фигурная скобка"),
ERROR_ENTRY(614, "#SYNTAX - Отрицательное число требуется взять в скобки"),
ERROR_ENTRY(615, "#SYNTAX - Вызов функции в логическом выражении недопустим "),
```

Рисунок 4.2 – Сообщения синтаксического анализатора

4.7 Параметры синтаксического анализатора и режимы его работы

Входным параметром синтаксического анализатора является таблица лексем, полученная на этапе лексического анализа, протокол работы, а также правила контекстно-свободной грамматики в нормальной форме Грейбах.

Выходными параметрами являются трассировка прохода таблицы лексем и дерево разбора, которые записываются в файл протокола.

4.8 Принцип обработки ошибок

Обработка ошибок происходит следующим образом:

1. Синтаксический анализатор перебирает все правила и цепочки правила грамматики для нахождения подходящего соответствия с конструкцией, представленной в таблице лексем.

2. Если невозможно подобрать подходящую цепочку, то генерируется соответствующая ошибка.

3. Все ошибки записываются в общую структуру ошибок.

4. В случае нахождения ошибки, после всей процедуры трассировки в протокол будет выведено диагностическое сообщение.

4.9 Контрольный пример

Пример разбора синтаксическим анализатором исходного кода предоставлен в приложении Д в виде фрагмента трассировки и дерева разбора исходного кода.

5. Разработка семантического анализатора

5.1 Структура семантического анализатора

Семантический анализатор принимает на свой вход результаты работ лексического и синтаксического анализаторов и результат работы синтаксического анализатора и последовательно ищет необходимые ошибки. Некоторые проверки осуществляются в процессе лексического анализа. Общая структура семантического анализатора представлена на рисунке 5.1.

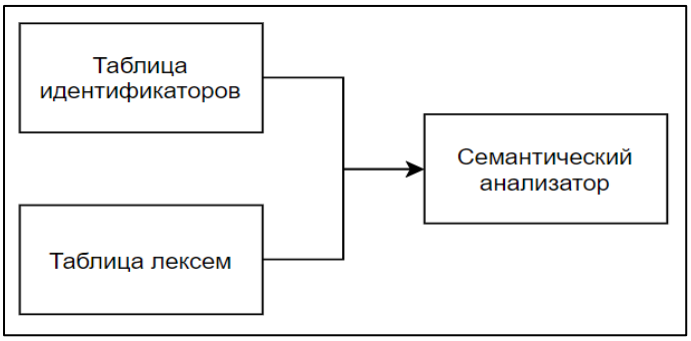


Рисунок 5.1 – Структура семантического анализатора

5.2 Функции семантического анализатора

Семантический анализатор выполняет проверку на основные правила языка (семантики языка), которые описаны в разделе 1.16. За семантический анализ отвечает функция AnalyzeSem. Ее входными параметрами является таблица лексем и таблица идентификаторов.

5.3 Структура и перечень сообщений семантического анализатора

Сообщения семантического анализатора, представлены на рисунке 5.2.

```
ERROR_ENTRY(300, "#SEMANTIC – Не закрыт строковый литерал"),
ERROR_ENTRY(301, "#SEMANTIC – Ожидается тип bool или number"),
ERROR_ENTRY(302, "#SEMANTIC – Отсутствует точка входа program"),
ERROR_ENTRY(303, "#SEMANTIC – Задано более одной точки входа program"),
ERROR_ENTRY(304, "#SEMANTIC – Превышен размер строкового литерала"),
ERROR_ENTRY(305, "#SEMANTIC – Объявление переменной без ключевого слова def недопустимо"),
ERROR_ENTRY(306, "#SEMANTIC – Необъявленный идентификатор"),
ERROR_ENTRY(307, "#SEMANTIC – Недопустимо объявление переменной без указания типа"),
ERROR_ENTRY(308, "#SEMANTIC – Попытка реализовать уже существующую функцию"),
ERROR_ENTRY(309, "#SEMANTIC – Попытка переопределить формальный параметр функции"),
ERROR_ENTRY(310, "#SEMANTIC – Попытка переопределить переменную"),
ERROR_ENTRY(311, "#SEMANTIC – Не указан тип функции"),
ERROR_ENTRY(312, "#SEMANTIC – Процедура не должна иметь тип"),
ERROR_ENTRY(313, "#SEMANTIC – Тип функции и тип возвращаемого значения должны совпадать"),
ERROR_ENTRY(314, "#SEMANTIC – Превышено максимально допустимое (3) количество параметров функции"),
ERROR_ENTRY(315, "#SEMANTIC – Несовпадение типов передаваемых параметров"),
ERROR_ENTRY(316, "#SEMANTIC – Слишком много аргументов в вызове функции"),
ERROR_ENTRY(317, "#SEMANTIC – Слишком мало аргументов в вызове функции"),
ERROR_ENTRY(318, "#SEMANTIC – Использование пустого строкового литерала недопустимо"),
ERROR_ENTRY(319, "#SEMANTIC – Недопустимый целочисленный литерал"),
ERROR_ENTRY(320, "#SEMANTIC – Типы данных в выражении не совпадают"),
ERROR_ENTRY(321, "#SEMANTIC – Арифметические операторы не могут применяться со строковым типом"),
ERROR_ENTRY(322, "#SEMANTIC – Логические операторы могут применяться только с целочисленными типами"),
ERROR_ENTRY(323, "#SEMANTIC – Деление на ноль"),
```

Рис. 5.2 – перечень сообщений семантического анализатора

5.4 Принцип обработки ошибок

Ошибки, возникающие во время трансляции программы, записываются в протокол, определённый входными параметрами. При возникновении ошибок осуществляется их протоколирование с указанием номера и диагностического сообщения, после чего семантический анализ останавливается.

5.5 Контрольный пример

Соответствие примеров некоторых семантических ошибок в исходном коде и диагностических сообщений об ошибках приведено в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Примеры семантических ошибок

Исходный код с ошибкой	Генерируемое сообщение об ошибке

{
def number a = 5;
outln[a];
}
	Ошибка 302: #SEMANTIC - Отсутствует точка входа program
	Строка -1 позиция -1

program
{
def line a = "Test;
outln[a];
}
	Ошибка 300: #SEMANTIC - Не закрыт строковый литерал
	Строка 3 позиция 15

program
{
line a = "Test";
outln[a];
}
	Ошибка 305: #SEMANTIC - Объявление переменной без ключевого слова def недопустимо
	Строка 3 позиция 7

program
{
def line a = 99999999999;
outln[a];
}
	Ошибка 319: #SEMANTIC - Недопустимый целочисленный литерал
	Строка 3 позиция 15

program
{
def a = 67;
outln[a];
}
	Ошибка 307: #SEMANTIC - Недопустимо объявление переменной без указания типа
	Строка 3 позиция 6

program
{
def line a = 67;
outln[a];
}
	Ошибка 320: #SEMANTIC - Типы данных в выражении не совпадают
	Строка 3 позиция -1

function MyFunc [number a, number b] {…}	Ошибка 311: #SEMANTIC - Не указан тип функции Строка 1 позиция -1

Таблица 5.1 (продолжение)

procedure number MyProc [number a] {…}	Ошибка 312: #SEMANTIC - Процедура не должна иметь тип Строка 1 позиция -1

program
{
def line a = "Hello, " + "World!";
}
	Ошибка 321: #SEMANTIC - Арифметические операторы не могут применяться со строковым типом
	Строка 3 позиция -1

function number MyFunc [number a]
{
def line lnA = "Hello";
give[lnA];
}
program
{…}
	Ошибка 313: #SEMANTIC - Тип функции и тип возвращаемого значения должны совпадать
	Строка 4 позиция -1

program
{
def bool b = true < false;
}
	Ошибка 322: #SEMANTIC - Логические операторы могут применяться только с целочисленными типами
	Строка 3 позиция -1

6. Вычисление выражений

6.1 Выражения, допускаемые языком

В языке RMV-2024 допускается вычисление выражений целочисленного типа, также поддерживается вызов функций внутри арифметических выражений. В выражениях могут использоваться арифметические и логические операции. Операции и их приоритет представлен в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Операции и их приоритет

Тип операций	Операции	Приоритет
Логические операции	> – больше	-1
	< – меньше	-1
	== – равно	-1
	^= – не равно	-1
	>= – больше или равно	-1
	<= – меньше или равно	-1
Арифметические операции	+ – сложение	2
	- – вычитание	2
	* – умножение	3
	/ – деление	3
	% –остаток от деления	3

Примеры выражений языка RMV-2024 представлены на рисунке 6.1.

```
def number i = 2;
res = res * a;
i = i + 1;
b = false;
def number resPow = power[7, 3];
def number expr =  (-8) / 2 - 5 % 2;
def number balance = random[10, 100] + 5;
```

Рисунок 6.1 – Примеры выражений

6.2 Польская запись и принцип ее построения

Выражения в языке RMV-2024 преобразовываются к обратной польской записи.

Обратная польская запись — это форма записи математических выражений, в которой операторы расположены после своих операндов. Выражение в обратной польской нотации читается слева направо: операция выполняется над двумя операндами, непосредственно стоящими перед знаком этой операции.

Алгоритм построения:

– исходная строка: выражение;

– результирующая строка: польская запись;

– стек: пустой;

– результирующая строка: польская запись;

– исходная строка просматривается слева направо;

– операнды переносятся в результирующую строку в порядке их следования;

– операция записывается в стек, если стек пуст или в вершине стека лежит отрывающая скобка;

– операция выталкивает все операции с большим или равным приоритетом в результирующую строку;

– запятая не помещается в стек, если в стеке операции, то все выбираются в строку;

– отрывающая скобка помещается в стек;

– закрывающая скобка выталкивает все операции до открывающей скобки, после чего обе скобки уничтожаются;

– закрывающая квадратная скобка выталкивает все до открывающей и генерирует @ – специальный символ, в которого записывается информация о вызываемой функции, а в поле приоритета для данной лексемы записывается число параметров вызываемой функции;

– по концу разбора исходной строки все операции, оставшиеся в стеке, выталкиваются в результирующую строку.

В таблице 6.2 представлен пример преобразования выражения в обратную польскую запись.

Таблица 6.2 – Пример преобразования выражения в обратную польскую запись

Исходная строка	Результирующая строка	Стек
z[l,l]vl	-	-
[l,l]vl	z	-
l,l]vl	z	[
,l]vl	zl	[
l]vl	zl	[
]vl	zll	[
vl	zll@2	-
l	zll@2	v
-	zll@2l	v
-	zll@2lv	-

6.3 Программная реализация обработки выражений

Программная реализация алгоритма преобразования выражений в обратную польскую запись основана на функциях Poliz и StartPoliz. Функция StartPoliz принимает как параметр таблицу лексем и таблицу идентификаторов и содержит цикл, в

ходе которого перебираются все лексемы исходного кода. Если последовательность лексем соответствует началу выражения, вызывается функция Poliz, где и проводится преобразование выражений к польской нотации.

6.4 Контрольный пример

В приложении Е приведено представление промежуточного кода, отображающее результаты преобразования выражений в польский формат.

7. Генерация кода

7.1 Структура генератора кода

Генерация объектного кода — это перевод компилятором внутреннего представления исходной программы в цепочку символов выходного языка. На вход генератора подаются таблицы лексем и идентификаторов, на основе которых генерируется файл с ассемблерным кодом. Структура генератора кода представлена на рисунке 7.1.

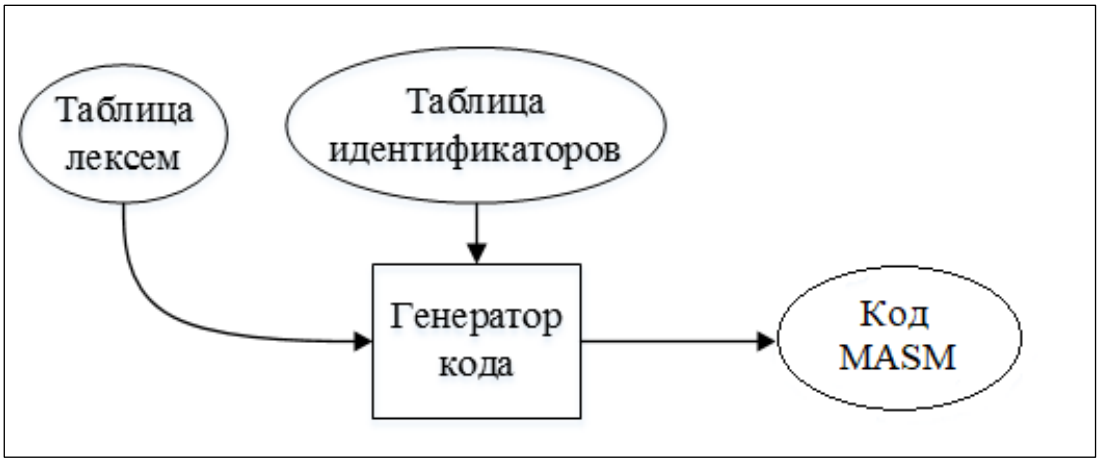


Рисунок 7.1 Структура генератора кода

7.2 Представление типов данных в оперативной памяти

Элементы таблицы идентификаторов расположены сегментах .data и .const языка ассемблера. Соответствия между типами данных идентификаторов на языке RMV-2024 и на языке ассемблера приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Соответствия типов идентификаторов

Тип идентификатора на языке RMV-2024	Тип идентификатора на языке ассемблера	Пояснение
number	sword	Хранит целочисленный тип данных.
bool	sword	Хранит булевый тип данных (в виде целого числа)
line	dword	Хранит указатель на начало строки. Строка должна завешаться нулевым символом.

7.3 Статическая библиотека

В языке RMV-2024 предусмотрена статическая библиотека. Статическая библиотека содержит функции, написанные на языке C++. Подключение библиотеки происходит с помощью includelib на этапе генерации кода. С помощью оператора

EXTRN объявляются функции из библиотеки. Пример подключения библиотеки в исходном коде на языке ассемблера представлен на рисунке 7.2.

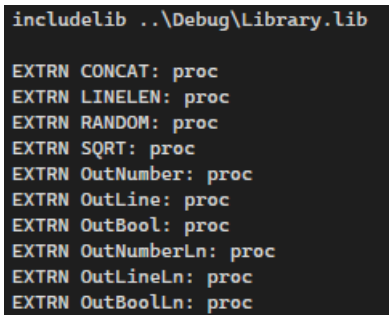


Рисунок 7.2 – Подключение статической библиотеки

7.4 Особенности алгоритма генерации кода

В языке RMV-2024 генерация кода строится на основе таблиц лексем и идентификаторов. В таблице 7.2 представлены прототипы функций, осуществляющих генерацию года, и их описание.

Таблица 7.2 – Прототипы функций, осуществляющих генерацию кода

Прототипы функций	Описание
void Generation(LT::LexTable, IT::IdTable, wchar_t)	Основная функция. Формирует поток выходного файла и вызывает другие генерирующие функции.
void Head(ofstream*);	Функция, генерирующая заголовок ассемблерного файла (подключение библиотек, указание прототипов функций и т.д.).
void ConstSegment(IT::IdTable, ofstream*);	Функция, генерирующая сегмент констант.
void DataSegment (LT::LexTable, IT::IdTable, ofstream*)	Функция, генерирующая сегмент данных.
void CodeSegment (LT::LexTable, IT::IdTable, ofstream*)	Функция, генерирующая сегмент кода.

7.5 Входные параметры, управляющие генерацией кода

На вход генератору кода поступают таблицы лексем и идентификаторов. Результаты работы генератора кода выводятся в файл с расширением .asm.

7.6 Контрольный пример

Результат генерации ассемблерного кода на основе контрольного примера из приложения А приведен в приложении Ж. Результат работы контрольного примера приведён на рисунке 7.3.

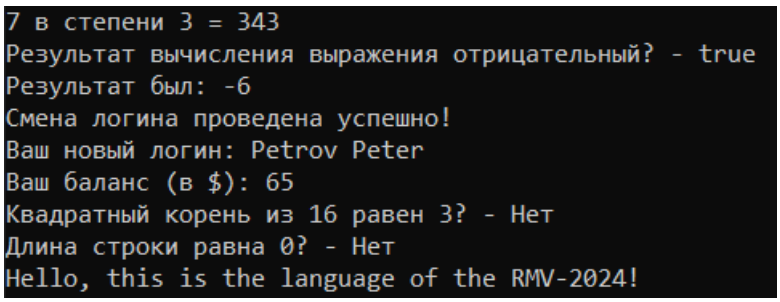


Рисунок 7.3 – Результат работы программы на языке RMV-2024

8. Тестирование транслятора

8.1 Общие положения

В процессе работы транслятора могут возникать ошибки на различных этапах трансляции: при анализе исходного текста программы, лексическом анализе, синтаксическом анализе и семантическом анализе. Транслятор отслеживает возникшие ошибки и записывает их в файл протокола, указывая идентификатор ошибки, сообщение, номер строки и позицию в исходном тексте программы. Обычно, после возникновения ошибки работа транслятора прекращается, так как ошибка на одном этапе может привести к сбоям на следующих этапах (за исключением синтаксического анализа).

8.2 Результаты тестирования

В таблице 8.1 приведены результаты тестов для разных этапов трансляции.

Таблица 8.1 – Результаты тестов

Исходный код	Диагностическое сообщение
Проверка на допустимость символов	

p№rogram
{
}
	Ошибка 200: #LEXICAL - Недопустимый символ в исходном файле (-in)
	Строка 1 позиция 2

Лексический анализ	
function number func! [number a, number b] { …}	Ошибка 205: #LEXICAL - Лексема не распознана Строка 1 позиция 17
function number MyTallBehalfFunction [number a] {…}	Ошибка 206: #LEXICAL - Длина идентификатора не должна превышать 10 символов Строка 1 позиция 17
Синтаксический анализ	
program def number a {…}	Ошибка 600: строка 1, #SYNTAX - Неверная структура программы

function number myFunc
{
give[7];
}
program
{…}
	Ошибка 601: строка 2, #SYNTAX - Отсутствует список параметров функции при её объявлении

function number myFun [] program {…}	Ошибка 603: строка 3, #SYNTAX - Возможно отсутствует тело функции

Таблица 8.1 (продолжение)

function number myFunc []
{
give[1 * 1];
}
program
{…}
	Ошибка 604: строка 3, #SYNTAX - Недопустимое выражение. Ожидаются только литералы и идентификаторы

procedure myProc [] program {…}	Ошибка 605: строка 2, #SYNTAX - Возможно отсутствует тело процедуры

function number myFunc []
{
program
{
def number a = 9;
}
}
	Ошибка 606: строка 3, #SYNTAX - Неверная конструкция в теле функции

program
{
when[1 > 8 > 9]
{
def number a = 1;
}
}
	Ошибка 607: строка 3, #SYNTAX - Ошибка в условном выражении

function number myFunc [number a]
{
a = a + 2;
give[a];
}
 	
program
{
def number num = myFunc;
}
	Ошибка 608: #SYNTAX - Ошибка в вызове функции
	Строка 9 позиция -1

function number myFunc[number a, number b]
{
def number res = a + b;
give[res];
}
program
{
def number res = myFunc[2,,3];
}
	Ошибка 610: строка 8, #SYNTAX - Ошибка в списке параметров при вызове функции

Таблица 8.1 (продолжение)

program
{
def number num = 7 * 12);
}
	Ошибка 609: строка 3, #SYNTAX - Ошибка при вычислении выражения

def number i = 0;
when[i ^= 8]
{
cycle[i < 7]
{
i = i + 1;
}
}
}
	Ошибка 611: строка 6, #SYNTAX - Неверная конструкция в теле цикла/условного выражения

program
 	
def number a = 9;
}
	Ошибка 613: #SYNTAX - Требуется открывающая фигурная скобка

program { def number a;	Ошибка 612: #SYNTAX - Требуется закрывающая фигурная скобка
… def number a = 8 - -9;	Ошибка 614: #SYNTAX - Отрицательное число требуется взять в скобки Строка 3 позиция -1
Семантический анализ	

when["line"]
{
out[true];
}
	Ошибка 301: #SEMANTIC - Ожидается тип bool или number
	Строка 3 позиция -1

def bool a = true;	Ошибка 302: #SEMANTIC - Отсутствует точка входа program

program
{
def line ln = "jdjdkkds ffhjaknks, haghvhj tuht … ADT GB FSHE FCyhh dgftsdtwg ytwytgwgj";
}
	Ошибка 304: #SEMANTIC - Превышен размер строкового литерала

program
{
when[a == 1]
{}
}
	Ошибка 306: #SEMANTIC - Необъявленный идентификатор
	Строка 3 позиция -1

program number def a {…}	Ошибка 307: #SEMANTIC - Недопустимо объявление переменной без указания типа

Таблица 8.1 (продолжение)

function number MyFunc[number a]{…} function number MyFunc[number a, number b]{…}	Ошибка 308: #SEMANTIC - Попытка реализовать уже существующую функцию Строка 5 позиция -1
function number MyFunc[number a, number b] { def number a = 9; }	Ошибка 309: #SEMANTIC - Попытка переопределить формальный параметр функции
def line ln = "hello" + "world";	Ошибка 321: #SEMANTIC - Арифметические операторы не могут применяться со строковым типом

program
{
def bool b = true > false;
}
	Ошибка 322: #SEMANTIC - Логические операторы могут применяться только с целочисленными типами

def number a = 12 / 0;	Ошибка 323: #SEMANTIC - Деление на ноль

Заключение

В процессе выполнения курсовой работы был создан транслятор для языка программирования RMV-2024. Реализованы основные задачи курсового проекта, включая:

– разработку спецификации языка программирования;
– создание структуры транслятора;
– реализацию лексического анализатора;
– создание синтаксического анализатора;
– разработку семантического анализатора;
– реализацию генератора кода на языке ассемблера;
– проведение тестирования транслятора.

Итоговая версия языка RMV-2024 включает:

– три типа данных;
– поддержку операторов вывода;
– возможность вызова функций стандартной библиотеки;
– пять арифметических операторов для вычисления выражений;
– шесть логических операторов для работы с выражениями;
– поддержку функций, процедур, операторов циклов и условий.

Таким образом, в ходе выполнения курсового проекта были приобретены новые знания и навыки в области проектирования систем программирования и разработки программного обеспечения для таких систем.

Список использованных литературных источников

1. Ахо, А. Компиляторы: принципы, технологии и инструменты / А. Ахо, Р. Сети, Дж. Ульман. – М.: Вильямс, 2003. – 768с.

2. Вирт, Н. Построение компиляторов/ Никлаус Вирт. - ДМК-Пресс – Москва, 2016. - 188 с.

3. Герберт, Ш. Справочник программиста по C/C++ / Шилдт Герберт. - 3-е изд. – Москва: Вильямс, 2003. - 429 с.

4. Ирвин К. Р. Язык ассемблера для процессоров Intel / К. Р. Ирвин. – М.: Вильямс, 2005. – 912с.

Приложение А

Контрольный пример

```
$Пользовательские функции
function number power [number a, number b]
{
     def number i = 2;
     def number res = a;

     when[b == 0]
     {
          give[1];
     }

     $Цикл: пока i меньше либо равно n
     cycle [i <= b]
     {
          res = res * a;
          i = i + 1;
     }
     give [res];
}

$Процедура
procedure yourLogin [line login]
{
     outln["Смена логина проведена успешно!"];
     out["Ваш новый логин: "];
     outln[login];
}

program
{
     $Вызов пользовательских функций
     out["7 в степени 3 = "];
     def number resPow = power[7, 3];
     outln[resPow];

     out["Результат вычисления выражения отрицательный? - "];
     def number expr =  (-10) / 2 - 7 % 2;
     def bool resNeg = expr <= 0;
     outln[resNeg];
     out["Результат был: "]; outln[expr];

     $Вызов процедуры
     def line login = "Petrov Peter";
     yourLogin[login];

     $Вызов функций стандартной библиотеки
     out["Ваш баланс (в $): "];
     def number balance = random[10, 100] + 5;
     outln[balance];
```

```
     out["Квадратный корень из 16 равен 3? - "];
     def number resSqrt = sqrt[16];
     when [resSqrt == 3]
     {
          outln["Да"];
     }
     otherwise
     {
          outln["Нет"];
     }

     out["Длина строки равна 0? - "];
     def line lineA = "abcdef";
     def number lengthA = linelen[lineA];
     def bool resA = lengthA ^= 0;
     when [resA]
     {
          outln["Нет"];
     }
     otherwise
     {
          outln["Да"];
     }

     def line resConcat = concat["Hello, ", "this is the language of
the RMV-2024!"];
     outln[resConcat];
}
```

Листинг А.1 – Исходный код контрольного примера

Приложение Б

Результат работы лексического анализа:

ТАБЛИЦА ИДЕНТИФИКАТОРОВ

№	Идентификатор	Тип данных	Тип идентификатора	Индекс в ТЛ	Значение/Параметры
0000	power	number	функция	2	P0:N|P1:N|
0001	power_a	number	параметр	5	-
0002	power_b	number	параметр	8	-
0003	power_i	number	переменная	13	0
0004	lit1	number	литерал	15	2
0005	power_res	number	переменная	19	0
0006	lit2	number	литерал	27	0
0007	lit3	number	литерал	32	1
0008	yourLogin	-	функция	63	P0:L|
0009	yourLogin_login	line	параметр	66	-
0010	lit4	line	литерал	71	[31]"Смена логина проведена успешно!"
0011	lit5	line	литерал	76	[17]"Ваш новый логин: "
0012	lit6	line	литерал	89	[16]"7 в степени 3 = "
0013	program_resPow	number	переменная	94	0
0014	lit7	number	литерал	98	7
0015	lit8	number	литерал	100	3
0016	lit9	line	литерал	110	[48]"Результат вычисления выражения отрицательный? - "
0017	program_expr	number	переменная	115	0
0018	lit10	number	литерал	119	-10
0019	program_resNeg	bool	переменная	130	false
0020	lit11	line	литерал	143	[15]"Результат был: "
0021	program_login	line	переменная	153	[0]""
0022	lit12	line	литерал	155	[12]"Petrov Peter"
0023	lit13	line	литерал	164	[18]"Ваш баланс (в $): "
0024	program_balance	number	переменная	169	0
0025	random	number	функция ст. библ.	171	P0:N|P1:N|
0026	lit14	number	литерал	173	10
0027	lit15	number	литерал	175	100
0028	lit16	number	литерал	178	5
0029	lit17	line	литерал	187	[35]"Квадратный корень из 16 равен 3? - "
0030	program_resSqrt	number	переменная	192	0
0031	sqrt	number	функция ст. библ.	194	P0:N|
0032	lit18	number	литерал	196	16
0033	lit19	line	литерал	208	[2]"Да"
0034	lit20	line	литерал	216	[3]"Нет"
0035	lit21	line	литерал	222	[24]"Длина строки равна 0? - "
0036	program_lineA	line	переменная	227	[0]""
0037	lit22	line	литерал	229	[6]"abcdef"
0038	program_lengthA	number	переменная	233	0
0039	linelen	number	функция ст. библ.	235	P0:L|
0040	program_resA	bool	переменная	242	false
0041	program_resConcat	line	переменная	269	[0]""
0042	concat	line	функция ст. библ.	271	P0:L|P1:L|
0043	lit23	line	литерал	273	[7]"Hello, "
0044	lit24	line	литерал	275	[37]"this is the language of the RMV-2024!"

Всего идентификаторов: 17

Рисунок Б.1 – Таблица идентификаторов

Начало таблицы лексем

ТАБЛИЦА ЛЕКСЕМ

№	Лексема	Строка	Индекс в ТИ
0000	f	3	-
0001	t	3	-
0002	i	3	0
0003	[	3	-
0004	t	3	-
0005	i	3	1
0006	,	3	-
0007	t	3	-
0008	i	3	2
0009	]	3	-
0010	{	4	-
0011	d	5	-
0012	t	5	-
0013	i	5	3
0014	=	5	-
0015	l	5	4
0016	;	5	-
0017	d	6	-
0018	t	6	-
0019	i	6	5
0020	=	6	-
0021	i	6	1
0022	;	6	-

Конец таблицы лексем

```
0226 | i                        | 63                       | 36
0227 | =                        | 63                       | -
0228 | l                        | 63                       | 37
0229 | ;                        | 63                       | -
0230 | d                        | 64                       | -
0231 | t                        | 64                       | -
0232 | i                        | 64                       | 38
0233 | =                        | 64                       | -
0234 | %                        | 64                       | 39
0235 | [                        | 64                       | -
0236 | i                        | 64                       | 36
0237 | ]                        | 64                       | -
0238 | ;                        | 64                       | -
0239 | d                        | 65                       | -
0240 | t                        | 65                       | -
0241 | i                        | 65                       | 40
0242 | =                        | 65                       | -
0243 | i                        | 65                       | 38
0244 | g                        | 65                       | -
0245 | l                        | 65                       | 6
0246 | ;                        | 65                       | -
0247 | w                        | 66                       | -
0248 | [                        | 66                       | -
0249 | i                        | 66                       | 40
0250 | ]                        | 66                       | -
0251 | {                        | 67                       | -
0252 | b                        | 68                       | -
0253 | [                        | 68                       | -
0254 | l                        | 68                       | 34
0255 | ]                        | 68                       | -
0256 | ;                        | 68                       | -
0257 | }                        | 69                       | -
0258 | !                        | 70                       | -
0259 | {                        | 71                       | -
0260 | b                        | 72                       | -
0261 | [                        | 72                       | -
0262 | l                        | 72                       | 33
0263 | ]                        | 72                       | -
0264 | ;                        | 72                       | -
0265 | }                        | 73                       | -
0266 | d                        | 75                       | -
0267 | t                        | 75                       | -
0268 | i                        | 75                       | 41
0269 | =                        | 75                       | -
0270 | +                        | 75                       | 42
0271 | [                        | 75                       | -
0272 | l                        | 75                       | 43
0273 | ,                        | 75                       | -
0274 | l                        | 75                       | 44
0275 | ]                        | 75                       | -
0276 | ;                        | 75                       | -
0277 | b                        | 76                       | -
0278 | [                        | 76                       | -
0279 | i                        | 76                       | 41
0280 | ]                        | 76                       | -
0281 | ;                        | 76                       | -
0282 | }                        | 77                       | -
-------------------------------------------------------------------------------------------------
       Всего лексем: 283
=================================================================================================
```

Рисунок Б.2 – Таблица лексем

Приложение В

Грамматика языка

```
Greibach greibach(
     NS('S'), TS('$'),
     13,
     Rule(
          NS('S'), GRB_ERROR_SERIES + 0,
          5,
          Rule::Chain(6, TS('f'), TS('t'), TS('i'), NS('F'), NS('B'),
NS('S')),
          Rule::Chain(5, TS('s'), TS('i'), NS('F'), NS('U'),
NS('S')),
          Rule::Chain(4, TS('p'), TS('{'), NS('N'), TS('}')),
          Rule::Chain(5, TS('f'), TS('t'), TS('i'), NS('F'),
NS('B')),
          Rule::Chain(4, TS('s'), TS('i'), NS('F'), NS('U'))
     ),
     Rule(
          NS('F'), GRB_ERROR_SERIES + 1,
          2,
          Rule::Chain(2, TS('['), TS(']')),
          Rule::Chain(3, TS('['), NS('P'), TS(']'))
     ),
     Rule(
          NS('P'), GRB_ERROR_SERIES + 2,
          2,
          Rule::Chain(2, TS('t'), TS('i')),
          Rule::Chain(4, TS('t'), TS('i'), TS(','), NS('P'))
     ),
     Rule(
          NS('B'), GRB_ERROR_SERIES + 3,
          2,
          Rule::Chain(8, TS('{'), NS('N'), TS('r'), TS('['), NS('I'),
TS(']'), TS(';'), TS('}')),
          Rule::Chain(7, TS('{'), TS('r'), TS('['), NS('I'), TS(']'),
TS(';'), TS('}'))
     ),
     Rule(
          NS('I'), GRB_ERROR_SERIES + 4,
          2,
          Rule::Chain(1, TS('l')),
          Rule::Chain(1, TS('i'))
     ),
     Rule(
          NS('U'), GRB_ERROR_SERIES + 5,
          1,
          Rule::Chain(3, TS('{'), NS('N'), TS('}'))
     ),
     Rule(
          NS('N'), GRB_ERROR_SERIES + 6,
          33,
```

```
            Rule::Chain(5, TS('d'), TS('t'), TS('i'), TS(';'),
NS('N')),
            Rule::Chain(7, TS('d'), TS('t'), TS('i'), TS('='), NS('R'),
TS(';'), NS('N')),
            Rule::Chain(7, TS('d'), TS('t'), TS('i'), TS('='), NS('E'),
TS(';'), NS('N')),
            Rule::Chain(5, TS('i'), TS('='), NS('R'), TS(';'),
NS('N')),
            Rule::Chain(5, TS('i'), TS('='), NS('E'), TS(';'),
NS('N')),
            Rule::Chain(8, TS('u'), TS('['), NS('R'), TS(']'), TS('{'),
NS('X'), TS('}'), NS('N')),
            Rule::Chain(8, TS('w'), TS('['), NS('R'), TS(']'), TS('{'),
NS('X'), TS('}'), NS('N')),
            Rule::Chain(12, TS('w'), TS('['), NS('R'), TS(']'),
TS('{'), NS('X'), TS('}'), TS('!'), TS('{'), NS('X'), TS('}'),
NS('N')),
            Rule::Chain(6, TS('%'), NS('K'), TS(';'), NS('N')),
            Rule::Chain(6, TS('+'), NS('K'), TS(';'), NS('N')),
            Rule::Chain(6, TS('q'), NS('K'), TS(';'), NS('N')),
            Rule::Chain(6, TS('z'), NS('K'), TS(';'), NS('N')),
            Rule::Chain(6, TS('o'), TS('['), NS('I'), TS(']'), TS(';'),
NS('N')),
            Rule::Chain(6, TS('b'), TS('['), NS('I'), TS(']'), TS(';'),
NS('N')),
            Rule::Chain(4, TS('i'), NS('K'), TS(';'), NS('N')),
            Rule::Chain(5, TS('r'), TS('['), NS('I'), TS(']'),
TS(';')),

            Rule::Chain(4, TS('d'), TS('t'), TS('i'), TS(';')),
            Rule::Chain(6, TS('d'), TS('t'), TS('i'), TS('='), NS('E'),
TS(';')),
            Rule::Chain(6, TS('d'), TS('t'), TS('i'), TS('='), NS('R'),
TS(';')),
            Rule::Chain(4, TS('i'), TS('='), NS('R'), TS(';')),
            Rule::Chain(4, TS('i'), TS('='), NS('E'), TS(';')),
            Rule::Chain(7, TS('u'), TS('['), NS('R'), TS(']'), TS('{'),
NS('X'), TS('}')),
            Rule::Chain(7, TS('w'), TS('['), NS('R'), TS(']'), TS('{'),
NS('X'), TS('}')),
            Rule::Chain(11, TS('w'), TS('['), NS('R'), TS(']'),
TS('{'), NS('X'), TS('}'), TS('!'), TS('{'), NS('X'), TS('}')),
            Rule::Chain(3, TS('+'), NS('K'), TS(';')),
            Rule::Chain(3, TS('%'), NS('K'), TS(';')),
            Rule::Chain(3, TS('q'), NS('K'), TS(';')),
            Rule::Chain(3, TS('z'), NS('K'), TS(';')),
            Rule::Chain(5, TS('o'), TS('['), NS('I'), TS(']'),
TS(';')),
            Rule::Chain(3, TS('o'), NS('K'), TS(';')),
            Rule::Chain(5, TS('b'), TS('['), NS('I'), TS(']'),
TS(';')),
            Rule::Chain(3, TS('b'), NS('K'), TS(';')),
            Rule::Chain(3, TS('i'), NS('K'), TS(';'))
    ),
```

```
    Rule(
        NS('R'), GRB_ERROR_SERIES + 7,
        6,
        Rule::Chain(1, TS('i')),
        Rule::Chain(1, TS('l')),
        Rule::Chain(3, TS('i'), TS('g'), TS('i')),
        Rule::Chain(3, TS('i'), TS('g'), TS('l')),
        Rule::Chain(3, TS('l'), TS('g'), TS('i')),
        Rule::Chain(3, TS('l'), TS('g'), TS('l'))
    ),
    Rule(
        NS('K'), GRB_ERROR_SERIES + 8,
        2,
        Rule::Chain(3, TS('['), NS('W'), TS(']')),
        Rule::Chain(2, TS('['), TS(']'))
    ),
    Rule(
        NS('E'), GRB_ERROR_SERIES + 9,
        16,
        Rule::Chain(1, TS('i')),
        Rule::Chain(1, TS('l')),
        Rule::Chain(3, TS('('), NS('E'), TS(')')),
        Rule::Chain(2, TS('i'), NS('K')),
        Rule::Chain(2, TS('%'), NS('K')),
        Rule::Chain(2, TS('+'), NS('K')),
        Rule::Chain(2, TS('q'), NS('K')),
        Rule::Chain(2, TS('z'), NS('K')),

        Rule::Chain(2, TS('i'), NS('M')),
        Rule::Chain(2, TS('l'), NS('M')),
        Rule::Chain(4, TS('('), NS('E'), TS(')'), NS('M')),
        Rule::Chain(3, TS('i'), NS('K'), NS('M')),
        Rule::Chain(3, TS('%'), NS('K'), NS('M')),
        Rule::Chain(3, TS('+'), NS('K'), NS('M')),
        Rule::Chain(3, TS('q'), NS('K'), NS('M')),
        Rule::Chain(3, TS('z'), NS('K'), NS('M'))

    ),
    Rule(
        NS('W'), GRB_ERROR_SERIES + 10,
        4,
        Rule::Chain(1, TS('i')),
        Rule::Chain(1, TS('l')),
        Rule::Chain(3, TS('i'), TS(','), NS('W')),
        Rule::Chain(3, TS('l'), TS(','), NS('W'))
    ),
    Rule(
        NS('M'), GRB_ERROR_SERIES + 9,
        2,
        Rule::Chain(2, TS('v'), NS('E')),
        Rule::Chain(3, TS('v'), NS('E'), NS('M'))
    ),
    Rule(
        NS('X'), GRB_ERROR_SERIES + 11,
```

```
            26,
            Rule::Chain(5, TS('d'), TS('t'), TS('i'), TS(';'),
NS('N')),
            Rule::Chain(7, TS('d'), TS('t'), TS('i'), TS('='), NS('E'),
TS(';'), NS('N')),
            Rule::Chain(7, TS('d'), TS('t'), TS('i'), TS('='), NS('R'),
TS(';'), NS('N')),
            Rule::Chain(5, TS('i'), TS('='), NS('R'), TS(';'),
NS('N')),
            Rule::Chain(5, TS('i'), TS('='), NS('E'), TS(';'),
NS('N')),
            Rule::Chain(6, TS('%'), NS('K'), TS(';'), NS('N')),
            Rule::Chain(6, TS('+'), NS('K'), TS(';'), NS('N')),
            Rule::Chain(6, TS('q'), NS('K'), TS(';'), NS('N')),
            Rule::Chain(6, TS('z'), NS('K'), TS(';'), NS('N')),
            Rule::Chain(6, TS('o'), TS('['), NS('I'), TS(']'), TS(';'),
NS('N')),
            Rule::Chain(6, TS('b'), TS('['), NS('I'), TS(']'), TS(';'),
NS('N')),
            Rule::Chain(4, TS('i'), NS('K'), TS(';'), NS('N')),
            Rule::Chain(6, TS('r'), TS('['), NS('I'), TS(']'), TS(';'),
NS('N')),

            Rule::Chain(4, TS('d'), TS('t'), TS('i'), TS(';')),
            Rule::Chain(6, TS('d'), TS('t'), TS('i'), TS('='), NS('E'),
TS(';')),
            Rule::Chain(6, TS('d'), TS('t'), TS('i'), TS('='), NS('R'),
TS(';')),
            Rule::Chain(4, TS('i'), TS('='), NS('R'), TS(';')),
            Rule::Chain(4, TS('i'), TS('='), NS('E'), TS(';')),
            Rule::Chain(3, TS('+'), NS('K'), TS(';')),
            Rule::Chain(3, TS('q'), NS('K'), TS(';')),
            Rule::Chain(3, TS('z'), NS('K'), TS(';')),
            Rule::Chain(3, TS('%'), NS('K'), TS(';')),
            Rule::Chain(3, TS('o'), NS('K'), TS(';')),
            Rule::Chain(3, TS('b'), NS('K'), TS(';')),
            Rule::Chain(3, TS('i'), NS('K'), TS(';')),
            Rule::Chain(5, TS('r'), TS('['), NS('I'), TS(']'), TS(';'))
    )
);
```

Листинг В.1 – Правила грамматики языка

Приложение Г

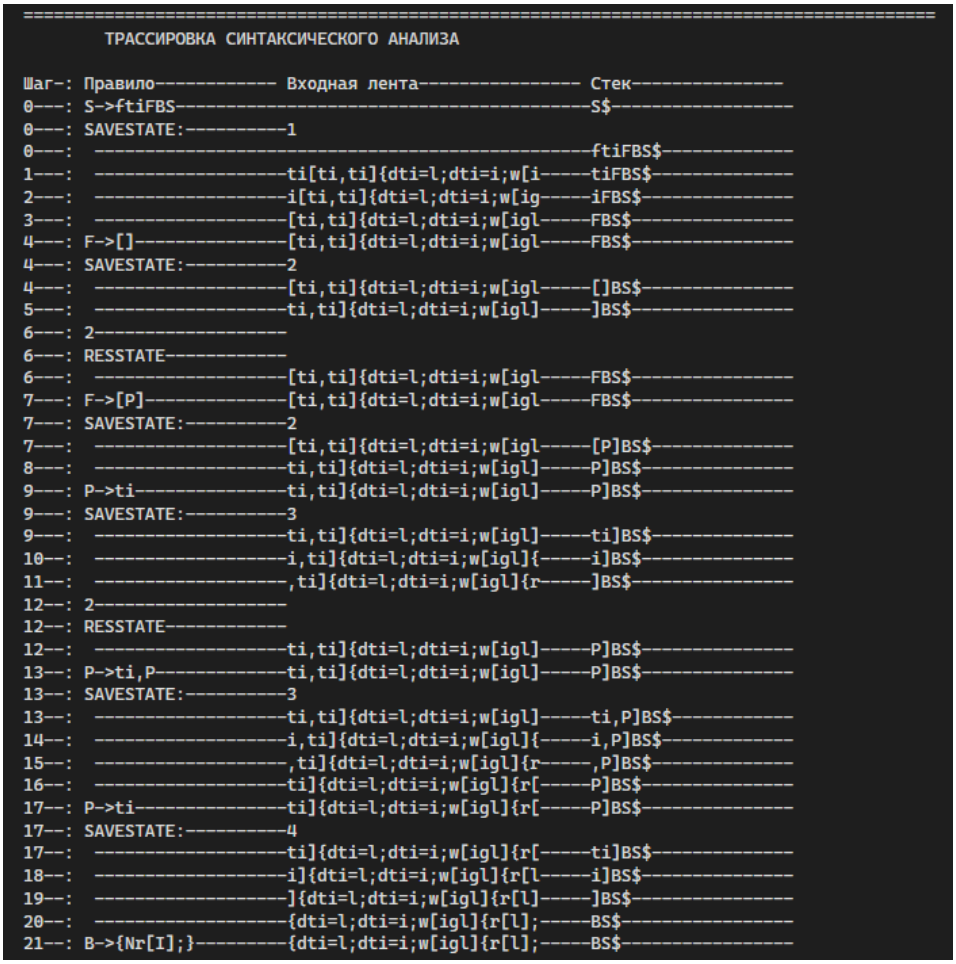
```
struct MfstState
{
	short lenta_position;
	short nrule;
	short nrulechain;
	MFSTSTSTACK st;
	MfstState();
	MfstState(short pposition, MFSTSTSTACK pst, short pnrulechain);

	MfstState(short pposition, MFSTSTSTACK pst, short pnrule, short
pnrulechain);


};

struct Mfst
{
	enum RC_STEP
	{
		NS_OK,
		NS_NORULE,
		NS_NORULECHAIN,
		NS_ERROR,
		TS_OK,
		TS_NOK,
		LENTA_END,
		SURPRISE,
	};
	struct MfstDiagnosis
	{
		short lenta_position;
		RC_STEP rc_step;
		short nrule;
		short nrule_chain;
		MfstDiagnosis();
		MfstDiagnosis(
			short plenta_position,
			RC_STEP prt_step,
			short pnrule,
			short pnrule_chain
		);

	} diagnosis[MFST_DIAGN_NUMBER];

	class my_stack_MfstState :public stack<MfstState>
	{
	public:
		using stack<MfstState>::c;
	};

	GRBALPHABET* lenta;
```

```
	short lenta_position;
	short nrule;
	short nrulechain;
	short lenta_size;
	GRB::Greibach grebach;
	LT::LexTable lex;
	MFSTSTSTACK st;
	my_stack_MfstState storestate;
	Mfst();
	Mfst(LT::LexTable& plex, GRB::Greibach pgrebach);
	char* getCSt(char* buf);
	char* getCLenta(char* buf, short pos, short n = 25);
	char* getDiagnosis(short n, char* buf);
	bool savestate(Log::LOG log);
	bool resetstate(Log::LOG log);
	bool push_chain(GRB::Rule::Chain chain);
	RC_STEP step(Log::LOG log);
	bool start(Log::LOG log);
	bool savediagnosis(RC_STEP pprc_step);
	void printrules(Log::LOG log);

	struct Deducation
	{
		short size;
		short* nrules;
		short* nrulechains;
		Deducation()
		{
			size = 0;
			nrules = 0;
			nrulechains = 0;
		};
	} deducation;

	bool savededucation();
};
```

Листинг Г.1 – Структуры магазинного конечного автомата

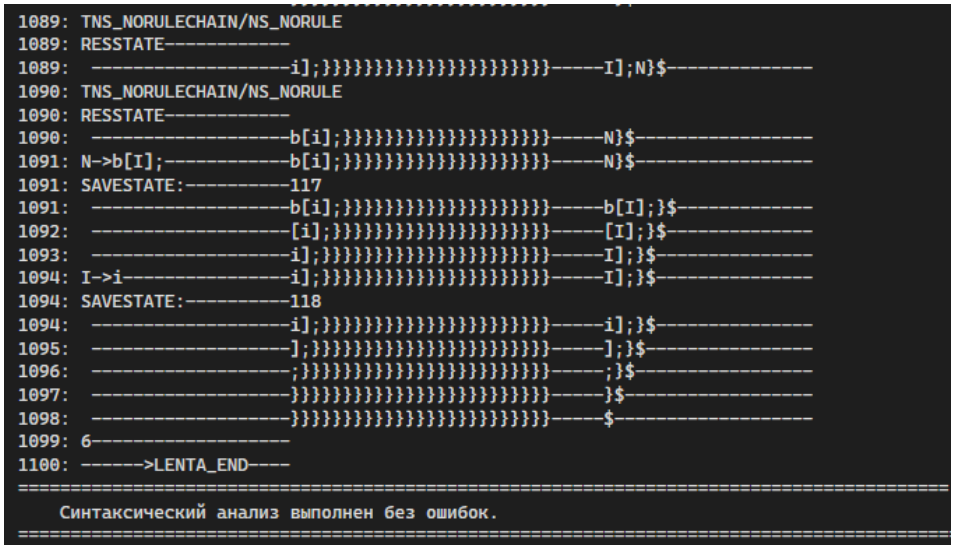
Приложение Д

Начало фрагмента трассировки синтаксического анализа



```
================================================================================
        ТРАССИРОВКА СИНТАКСИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Шаг-: Правило---------- Входная лента---------- Стек----------
0---: S->ftiFBS-------------------------------------S$----------
0---: SAVESTATE:----------1
0---:  ---------------------------------------------ftiFBS$-------
1---:  -------------------ti[ti,ti]{dti=l;dti=i;w[i-----tiFBS$-------
2---:  -------------------i[ti,ti]{dti=l;dti=i;w[ig-----iFBS$-------
3---:  -------------------[ti,ti]{dti=l;dti=i;w[igl-----FBS$-------
4---: F->[]---------------[ti,ti]{dti=l;dti=i;w[igl-----FBS$-------
4---: SAVESTATE:----------2
4---:  -------------------[ti,ti]{dti=l;dti=i;w[igl-----[]BS$-------
5---:  -------------------ti,ti]{dti=l;dti=i;w[igl]-----]BS$-------
6---: 2-------------------
6---: RESSTATE------------
6---:  -------------------[ti,ti]{dti=l;dti=i;w[igl-----FBS$-------
7---: F->[P]--------------[ti,ti]{dti=l;dti=i;w[igl-----FBS$-------
7---: SAVESTATE:----------2
7---:  -------------------[ti,ti]{dti=l;dti=i;w[igl-----[P]BS$-------
8---:  -------------------ti,ti]{dti=l;dti=i;w[igl]-----P]BS$-------
9---: P->ti---------------ti,ti]{dti=l;dti=i;w[igl]-----P]BS$-------
9---: SAVESTATE:----------3
9---:  -------------------ti,ti]{dti=l;dti=i;w[igl]-----ti]BS$-------
10--:  -------------------i,ti]{dti=l;dti=i;w[igl]{-----i]BS$-------
11--:  -------------------,ti]{dti=l;dti=i;w[igl]{r-----]BS$-------
12--: 2-------------------
12--: RESSTATE------------
12--:  -------------------ti,ti]{dti=l;dti=i;w[igl]-----P]BS$-------
13--: P->ti,P-------------ti,ti]{dti=l;dti=i;w[igl]-----P]BS$-------
13--: SAVESTATE:----------3
13--:  -------------------ti,ti]{dti=l;dti=i;w[igl]-----ti,P]BS$------
14--:  -------------------i,ti]{dti=l;dti=i;w[igl]{-----i,P]BS$------
15--:  -------------------,ti]{dti=l;dti=i;w[igl]{r-----,P]BS$-------
16--:  -------------------ti]{dti=l;dti=i;w[igl]{r[-----P]BS$-------
17--: P->ti---------------ti]{dti=l;dti=i;w[igl]{r[-----P]BS$-------
17--: SAVESTATE:----------4
17--:  -------------------ti]{dti=l;dti=i;w[igl]{r[-----ti]BS$-------
18--:  -------------------i]{dti=l;dti=i;w[igl]{r[l-----i]BS$-------
19--:  -------------------]{dti=l;dti=i;w[igl]{r[l]-----]BS$-------
20--:  -------------------{dti=l;dti=i;w[igl]{r[l];-----BS$-------
21--: B->{Nr[I];}---------{dti=l;dti=i;w[igl]{r[l];-----BS$-------
```

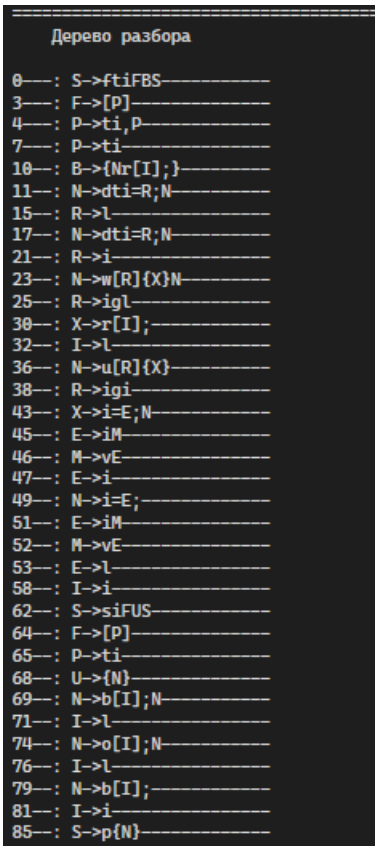
Конец фрагмента трассировки синтаксического анализа



```
1089: TNS_NORULECHAIN/NS_NORULE
1089: RESSTATE------------
1089:  -------------------i];}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}-----I];N}$-------------
1090: TNS_NORULECHAIN/NS_NORULE
1090: RESSTATE------------
1090:  -------------------b[i];}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}-----N}$-----------------
1091: N->b[I];------------b[i];}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}-----N}$-----------------
1091: SAVESTATE:----------117
1091:  -------------------b[i];}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}-----b[I];}$-------------
1092:  -------------------[i];}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}-----[I];}$--------------
1093:  -------------------i];}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}-----I];}$---------------
1094: I->i----------------i];}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}-----I];}$---------------
1094: SAVESTATE:----------118
1094:  -------------------i];}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}-----i];}$---------------
1095:  -------------------];}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}-----];}$----------------
1096:  -------------------;}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}-----;}$-----------------
1097:  -------------------}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}-----}$------------------
1098:  -------------------}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}-----$-------------------
1099: 6-------------------
1100: ------>LENTA_END----
================================================================================
    Синтаксический анализ выполнен без ошибок.
================================================================================
```

Рисунок Д.1 – Трассировка синтаксического анализа

Начало дерева разбора



Конец дерева разбора

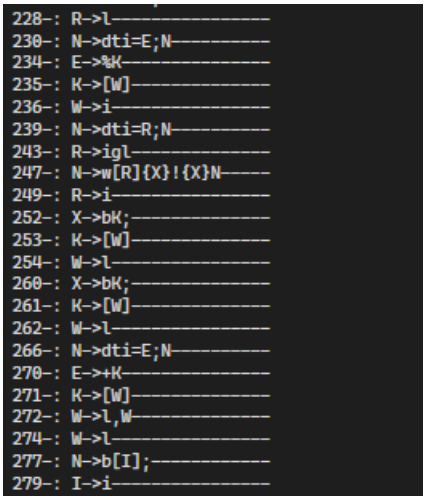


Рисунок Д.2 – Дерево разбора

Приложение Е

```
                                ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОДА
0001    fti(0)[ti(1),ti(2)]
0002    {
0003    dti(3)=l(4);
0004    dti(5)=i(1);
0005    w[i(2)gl(6)]
0006    {
0007    r[l(7)];
0008    }
0009    u[i(3)gi(2)]
0010    {
0011    i(5)=i(5)i(1)v;
0012    i(3)=i(3)l(7)v;
0013    }
0014    r[i(5)];
0015    }
0016    si(8)[ti(9)]
0017    {
0018    b[l(10)];
0019    o[l(11)];
0020    b[i(9)];
0021    }
0022    p
0023    {
0024    o[l(12)];
0025    dti(13)=i(0)l(14)l(15)@2*;
0026    b[i(13)];
0027    o[l(16)];
0028    dti(17)=l(18)l(4)vl(14)l(4)vv**;
0029    dti(19)=i(17)l(6)g;
0030    b[i(19)];
0031    o[l(20)];b[i(17)];
0032    dti(21)=l(22);
0033    i(8)i(21)@1;
0034    o[l(23)];
0035    dti(24)=zl(26)l(27)@2l(28)v*;
0036    b[i(24)];
0037    o[l(29)];
0038    dti(30)=ql(32)@1;
0039    w[i(30)gl(15)]
0040    {
0041    b[l(33)];
0042    }
0043    !
0044    {
0045    b[l(34)];
0046    }
0047    o[l(35)];
0048    dti(36)=l(37);
0049    dti(38)=%i(36)@1;
0050    dti(40)=i(38)l(6)g;
0051    w[i(40)]
0052    {
0053    b[l(34)];
0054    }
0055    !
0056    {
0057    b[l(33)];
0058    }
0059    dti(41)=+l(43)l(44)@2*;
0060    b[i(41)];
0061    }
```

Рисунок Е.1 – Промежуточное представление кода

Приложение Ж

Сгенерированный код ассемблера

```
.586P
.model flat, stdcall
includelib libucrt.lib
includelib kernel32.lib
includelib ..\Debug\Library.lib
ExitProcess PROTO :DWORD

EXTRN CONCAT: proc
EXTRN LINELEN: proc
EXTRN RANDOM: proc
EXTRN SQRT: proc
EXTRN OutNumber: proc
EXTRN OutLine: proc
EXTRN OutBool: proc
EXTRN OutNumberLn: proc
EXTRN OutLineLn: proc
EXTRN OutBoolLn: proc

.stack 4096

.const
     null_division BYTE "Exception: деление на ноль", 0
     lit1 SWORD 2
     lit2 SWORD 0
     lit3 SWORD 1
     lit4 BYTE "Смена логина проведена успешно!", 0
     lit5 BYTE "Ваш новый логин: ", 0
     lit6 BYTE "7 в степени 3 = ", 0
     lit7 SWORD 7
     lit8 SWORD 3
     lit9 BYTE "Результат вычисления выражения отрицательный? - ", 0
     lit10SWORD -10
     lit11BYTE "Результат был: ", 0
     lit12BYTE "Petrov Peter", 0
     lit13BYTE "Ваш баланс (в $): ", 0
     lit14SWORD 10
     lit15SWORD 100
     lit16SWORD 5
     lit17BYTE "Квадратный корень из 16 равен 3? - ", 0
     lit18SWORD 16
     lit19BYTE "Да", 0
     lit20BYTE "Нет", 0
     lit21BYTE "Длина строки равна 0? - ", 0
     lit22BYTE "abcdef", 0
     lit23BYTE "Hello, ", 0
     lit24BYTE "this is the language of the RMV-2024!", 0

.data
     buffer BYTE 256 dup(0)
     power_i   SWORD 0
     power_res SWORD 0
```

```
     program_resPow  SWORD 0
     program_expr    SWORD 0
     program_resNeg  SWORD 0
     program_login   DWORD ?
     program_balance SWORD 0
     program_resSqrt SWORD 0
     program_lineA   DWORD ?
     program_lengthA SWORD 0
     program_resA    SWORD 0
     program_resConcat    DWORD ?

.code

power PROC power_a : SWORD, power_b : SWORD
     push lit1
     pop power_i
     push power_a
     pop power_res
     mov ax, power_b
     cmp ax, lit2
     je m0
     jne m1
m0:
     push 1
     jmp local0
m1:
     mov ax, power_i
     cmp ax, power_b
     jle cycle0
     jmp cyclenext0
cycle0:
     push power_res
     push power_a
     pop ax
     pop bx
     mul bx
     push ax
     pop power_res
     push power_i
     push lit3
     pop ax
     pop bx
     add ax, bx
     push ax
     pop power_i
     mov ax, power_i
     cmp ax, power_b
     jle cycle0
cyclenext0:
     push power_res
     jmp local0
local0:
     pop eax
     ret
power ENDP

yourLogin PROC yourLogin_login : DWORD
```

```
	push offset lit4
	call OutLineLn
	push offset lit5
	call OutLine
	push yourLogin_login
	call OutLineLn
local1:
	pop eax
	ret
	ret
yourLogin ENDP

program PROC
	push offset lit6
	call OutLine
	push lit7
	push lit8
	pop dx
	pop dx
	movsx eax, lit8
	push eax
	movsx eax, lit7
	push eax
	call power
	push ax
	pop program_resPow
	movsx eax, program_resPow
	push eax
	call OutNumberLn
	push offset lit9
	call OutLine
	push lit10
	push lit1
	pop bx
	pop ax
	cmp bx, 0
	je nulldiv
	cwd
	idiv bx
	push ax
	push lit7
	push lit1
	pop bx
	pop ax
	cmp bx, 0
	je nulldiv
	cwd
	idiv bx
	push dx
	pop bx
	pop ax
	sub ax, bx
	push ax
	pop program_expr
	push program_expr
	push lit2
	pop bx
```

```
	pop ax
	cmp ax, bx
	jle l0
	jg l1
l0:
	mov ax, 1
	push ax
	jmp endofexpr0
l1:
	mov ax, 0
	push ax

endofexpr0:
	pop ax
	cmp ax, 0
	je l2
	jne l3
l2:
	mov ax, 0
	push ax
	jmp endofexpr1
l3:
	mov ax, 1
	push ax

endofexpr1:
	pop program_resNeg
	movsx eax, program_resNeg
	push eax
	call OutBoolLn
	push offset lit11
	call OutLine
	movsx eax, program_expr
	push eax
	call OutNumberLn
	push offset lit12
	pop program_login
	push program_login
	call yourLogin
	push offset lit13
	call OutLine
	push lit14
	push lit15
	pop dx
	pop dx
	movsx eax, lit15
	push eax
	movsx eax, lit14
	push eax
	call RANDOM
	push ax
	push lit16
	pop ax
	pop bx
	add ax, bx
	push ax
	pop program_balance
```

```
      movsx eax, program_balance
      push eax
      call OutNumberLn
      push offset lit17
      call OutLine
      push lit18
      pop dx
      movsx eax, lit18
      push eax
      call SQRT
      push ax
      pop program_resSqrt
      mov ax, program_resSqrt
      cmp ax, lit8
      je m2
      jne m3
m2:
      push offset lit19
      call OutLineLn
      jmp e0
m3:
      push offset lit20
      call OutLineLn
e0:
      push offset lit21
      call OutLine
      push offset lit22
      pop program_lineA
      push program_lineA
      pop dx
      push program_lineA
      call LINELEN
      push ax
      pop program_lengthA
      push program_lengthA
      push lit2
      pop bx
      pop ax
      cmp ax, bx
      jne l4
      je l5
l4:
      mov ax, 1
      push ax
      jmp endofexpr2
l5:
      mov ax, 0
      push ax

endofexpr2:
      pop ax
      cmp ax, 0
      je l6
      jne l7
l6:
      mov ax, 0
      push ax
```

```
     jmp endofexpr3
l7:
     mov ax, 1
     push ax

endofexpr3:
     pop program_resA
     mov ax, program_resA
     cmp ax, 0
     jnz m4
     jz m5
m4:
     push offset lit20
     call OutLineLn
     jmp e1
m5:
     push offset lit19
     call OutLineLn
e1:
     push offset lit23
     push offset lit24
     pop dx
     pop dx
     push offset lit24
     push offset lit23
     push offset buffer
     call CONCAT
     push eax
     pop program_resConcat
     push program_resConcat
     call OutLineLn
theend:
     push 0
     call ExitProcess
nulldiv:
     push offset null_division
     call OutLineLn
     push -1
     call ExitProcess
program ENDP
end program
```

Листинг Ж.1 –Код на языке ассемблера