

НАЗВАНИЕ УЧРЕЖДЕНИЯ, В КОТОРОМ ВЫПОЛНЯЛАСЬ
ДАННАЯ ДИССЕРТАЦИОННАЯ РАБОТА

На правах рукописи

УДК **xxx.xxx**

Григорьев Семён Вячеславович

**Синтаксический анализ динамически формируемых
строковых выражений**

Специальность 05.13.11 —
«Математическое и программное обеспечение вычислительных машин,
комплексов и компьютерных сетей»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук, доцент
Кознов Дмитрий Владимирович

Санкт-Петербург — 2015

Содержание

Введение	4
1 Обзор	13
1.1 Языки и грамматики	13
1.2 Конечные автоматы и преобразователи	18
1.3 О применимости статического анализа строковых выражений	21
1.4 Подходы к анализу встроенных языков	23
1.5 Обзор инструментов для работы со встроенными языками	25
1.6 Алгоритмы и структуры данных для обобщённого синтаксического анализа	30
1.6.1 Алгоритм обобщённого LR анализа	30
1.6.2 Структурированный в виде графа стек	32
1.6.3 Сжатое представление леса разбора	32
1.6.4 Алгоритм RNGLR	33
1.7 Используемые инструменты	38
1.7.1 YaccConstructor	38
1.7.2 ReSharper SDK	40
1.8 Выводы	42
2 Алгоритм синтаксического анализа регулярной аппроксимации	44
2.1 Постановка задачи	44
2.2 Описание алгоритма	47
2.3 Построение компактного представления леса разбора	52
3 Доказательство корректности алгоритма	56
4 Инструментальный пакет	59
4.1 Архитектура	59

4.1.1	Архитектура SDK	61
4.1.2	Архитектура расширения для ReSharper	64
4.2	Особенности реализации	69
5	Методика использования	71
5.1	Области применения	71
5.2	Способы применения	72
6	Экспериментальное исследование и апробация YC.SEL.SDK и YC.SEL.SDK.ReSharper	77
6.1	Экспериментальная оценка алгоритма	77
6.2	Апробация в промышленном проекте по реинжинирингу	80
6.3	Разработка расширений для поддержки встроенных языков	84
7	Сравнение и соотнесение	88
	Заключение	91
	Литература	93
	Список рисунков	99
	Список таблиц	101

Введение

Актуальность работы

Статический анализ исходного кода — получение знаний о программе без её исполнения — является неотъемлемой частью многих процессов, связанных с разработкой программного обеспечения. Он может использоваться, например, в средах разработки для упрощения работы с кодом — подсветка синтаксиса, навигация по коду, контекстные подсказки; для обнаружения проблем на ранних стадиях (до запуска программы) — статический поиск ошибок. Кроме того, статический анализ необходим при решении задач трансформации исходного кода и реинжиниринге [?]. Однако многие языки программирования позволяют использовать конструкции, которые существенно затрудняют статический анализ кода, использующий их.

Например, взаимодействие приложений, например, с базами данных, часто реализуется с помощью встроенных языков: приложение, созданное на одном языке, генерирует код на другом языке и передаёт этот код на выполнение в соответствующее окружение. Примерами могут служить динамические SQL-запросы к базам данных в Java-коде или формирование HTML-страниц в PHP-приложениях, динамический SQL (Dynamic SQL [1]), фреймворк JSP [2], PHP MySQL interface [3]. Генерируемый код собирается из строк таким образом, чтобы в момент выполнения результирующая строка представляла собой корректное выражение на соответствующем языке. Примеры использования встроенных языков представлены в листингах ???. Такой подход весьма гибок, так как позволяет использовать для формирования выражений различные строковые операции (replace, substring и т.д.) и получать части кода из различных источников (например, учитывать текстовый ввод пользователя, что часто используется для задания фильтров при конструировании SQL-запросов). Кроме того, использование динамически формируемых строковых выражений избавлено от допол-

нительных накладных расходов, присущих таким технологиям, как ORM, что позволяет достичь высокой производительности.

```

1 CREATE PROCEDURE [dbo].[MyProc] @TABLERes VarChar(30)
2 AS
3     EXECUTE ('INSERT INTO ' + @TABLERes + ' (sText1)' +
4         ' SELECT ''Additional condition: '' + sName' +
5         ' from #tt where sAction = ''1000000''')
6 GO

```

Listing 1: Код с использованием динамического SQL

```

1 import javax.script.*;
2 public class InvokeScriptFunction {
3     public static void main(String[] args) throws Exception {
4         ScriptEngineManager manager = new ScriptEngineManager();
5         ScriptEngine engine = manager.getEngineByName("JavaScript");
6         // JavaScript code in a String
7         String script =
8             "function hello(name) { print('Hello, ' + name); }";
9         // evaluate script
10        engine.eval(script);
11        // javax.script.Invocable is an optional interface.
12        // Check whether your script engine implements or not!
13        // Note that the JavaScript engine implements Invocable interface
14        Invocable inv = (Invocable) engine;
15        // invoke the global function named "hello"
16        inv.invokeFunction("hello", "Scripting!!" );
17    }
18 }

```

Listing 2: Вызов JavaScript из Java

Динамически формируемые выражения часто конструируются посредством конкатенации в циклах, ветках условных операторов или рекурсивных процедурах, что приводит к получению множества различных значений для каждого выражения в момент выполнения. При этом фрагменты кода на встроенных языках воспринимаются компилятором исходного языка как простые строки, не подлежащие дополнительному анализу. Невозможность статической проверки корректности формируемого выражения приводит к высокой вероятности возникновения ошибок во время выполнения программы. В худшем случае такая ошибка не приведёт к прекращению работы приложения, что указало бы на

```

1 <?php
2     // Embedded SQL
3     $query = 'SELECT * FROM ' . $my_table;
4     $result = mysql_query($query);
5
6     // HTML markup generation
7     echo "<table>\n";
8     while ($line = mysql_fetch_array($result, MYSQL_ASSOC)) {
9         echo "\t<tr>\n";
10        foreach ($line as $col_value) {
11            echo "\t\t<td>$col_value</td>\n";
12        }
13        echo "\t</tr>\n";
14    }
15    echo "</table>\n";
16 ?>

```

Listing 3: Использование нескольких встроенных в PHP языков (MySQL, HTML)

проблемы, однако целостность данных при этом может оказаться нарушена. Более того, использование динамически формируемых выражений затрудняет как разработку информационных систем, так и реинжиниринг уже созданных. Для реинжинирига важно иметь возможность изучать систему и модифицировать её, сохраняя функциональность. Однако, например, при наличии в коде приложения встроенного SQL нельзя, не проанализировав все динамически формируемые выражения, точно ответить на вопрос о том, с какими элементами базы данных не взаимодействует система, и удалить их. При переносе такой системы на другую СУБД необходимо гарантировать, что для всех динамически формируемых выражений значение в момент выполнения будет корректным кодом на языке новой СУБД. С другой стороны, распространённой практикой при написании кода является использование интегрированных сред разработки, производящих подсветку синтаксиса и автодополнение, сигнализирующих о синтаксических ошибках, предоставляющих возможность проводить рефакторинг кода. Такая функциональность значительно упрощают процесс разработки и отладки приложений и полезна не только для основного языка, но и для встроенных языков. Для решения таких задач необходимы инструменты, проводящие анализ множества выражений, которые могут быть получены на этапе исполнения из строковых выражений исходного языка.

Проблема анализа встроенных языков активно исследуется. Большинство работ используют анализ регулярного множества (регулярной аппроксимации), приближающего множество значений динамически формируемого выражения. Как правило, рассматривается вопрос корректности генерируемых выражений или ищутся фрагменты кода, уязвимые для SQL-инъекций. Сильная специализация таких решений не позволяет применять их для других задач. В исследованиях Кюн-Гу Дох (Kyung-Goo Doh) предлагается комбинация анализа потока данных и синтаксического анализа на основе LR-алгоритма и поднимается вопрос о семантическом анализе встроенных языков. Предлагается использовать классический для LR-анализа механизм атрибутивных грамматик, однако опускается вопрос ресурсоёмкости данного подхода при сложных видах анализа. В работах А. Бреслава рассматривается подход, основанный на построении регулярной аппроксимации множества возможных значений и последующем анализе с использованием обобщённого LR-алгоритма, что кроме расширения класса поддерживаемых языков даёт дополнительные преимущества при переиспользовании структур данных, характерных для обобщённого анализа. Однако эффективное хранение результатов разбора и оптимизация управления стеком разбора не рассмотрены. Существует также ряд инструментов для работы с динамически формируемыми выражениями: Alvor и IntelliLang, предоставляющие поддержку встроенных языков в интегрированных средах разработки, JSA и PHPSA, позволяющие искать ошибки в выражениях на встроенных языках, SQLWays [4], поддерживающий трансформацию выражений на встроенных языках, SAFELI — инструмент статического анализа, предназначенный для определения возможности SQL-инъекций в Web-приложениях и некоторые другие. Однако эти инструменты либо не поддерживают часто встречающиеся на практике сложные способы формирования выражений, либо имеют существенные ограничения по функциональности: не поддерживают сложные способы формирования строковых выражений, решают только одну узкую задачу (проверка корректности, поиск уязвимых конструкций) и т.д.

В рамках исследовательского проекта YaccConstructor [5], посвящённого проведению экспериментов в области синтаксического анализа, ведётся работа над платформой для создания инструментов, предназначенных для статического анализа кода на встроенных языках. В данной статье описаны разрабатываемая

инфраструктура поддержки встроенных языков и её компоненты: генераторы абстрактных лексических и синтаксических анализаторов. Также уделено внимание поддержке многих языков и приведен пример использования платформы для создания плагина к ReSharper ¹ (плагин к Microsoft Visual Studio ², расширяющий стандартные средства IDE), позволяющего анализировать динамически формируемые выражения.

Цель и задачи работы

Целью данной работы является создание подхода к статическому анализу динамически формируемых строковых выражений, уменьшающего затраты для создания конечных инструментов, обеспечивающих обработку строковых выражений на различных этапах: в средах разработки (подсветка синтаксиса, статический поиск ошибок); оценка качества кода; трансформация кода, содержащего большое количество динамически формируемых строковых выражений.

Методы исследования

В работе используется алгоритм обобщённого восходящего синтаксического анализа RNGLR, созданный Элизабет Скотт (Elizabeth Scott) и Адриан Джонстон (Adrian Johnstone) из университета Royal Holloway (Великобритания). Для компактного хранения леса вывода использовалась структура Shared Packed Parse Forest (SPPF), которую предложил Ян Рекерс (Jan Rekers, University of Amsterdam).

Доказательство завершаемости и корректности предложенного алгоритма проводилось с применением теории формальных языков, теории графов и теории сложности алгоритмов. Приближение множества значений динамически формируемого выражения строилось в виде регулярного множества, описываемого с помощью конечного автомата.

Апробация созданного подхода проводилась в рамках промышленного проекта компании ЗАО “Ланит-Терком” (Россия) по переносу хранимого кода, содержащего большое количество динамического SQL, с MS SQL Server на Oracle Server. Предложенный в работе алгоритм апробирован в рамках инфраструктуры проекта ReSharper компании ООО “ИнтеллиДжей Лабс” (Россия).

Научная новизна работы

¹Сайт проекта ReSharper: <http://www.jetbrains.com/resharper>

²Сайт проекта Microsoft Visual Studio: <http://www.visualstudio.com>

На текущий момент существует несколько подходов к анализу динамически формируемых строковых выражений. Некоторые из них, такие как JSA, предназначены только для проверки корректности выражений, основанной на решении задачи о включении одного языка в другой. Выполнение более сложных видов анализа, трансформаций или построения леса разбора не предполагается. В работах А. Бреслава и Кюн-Гу Дох (Kyung-Goo Doh) рассматривается применение механизмов синтаксического анализа для работы с динамически формируемыми выражениями, однако не решается вопрос эффективного представления результатов разбора. Предложенный в диссертации алгоритм предназначен для синтаксического анализа динамически формируемых выражений и построения компактной структуры данных, содержащей для всех корректных значений выражения их деревья вывода. Это позволяет как проверять корректность анализируемых выражений, так и проводить более сложные виды анализов, используя деревья вывода, хранящиеся в построенной структуре данных.

Большинство существовавших готовых инструментов для анализа динамически формируемых строковых выражений (JSA, PHPSA, Alvor и т.д.), как правило, предназначены для решения конкретных задач в рамках конкретных языков. Решение новых задач или поддержка других языков с помощью этих инструментов затруднено ввиду ограничений, накладываемых архитектурой и возможностями используемого алгоритма анализа. В рамках работы предложена архитектура, учитывающая возможности предложенного алгоритма и позволяющая упростить создание новых инструментов для анализа динамически формируемых выражений.

Практическая значимость работы

На основе полученных в работе научных результатов был разработан инструментарий (SDK), предназначенный для создания средств статического анализа динамически формируемых выражений. В данный инструментарий входят следующие компоненты: генератор лексических анализаторов, генератор синтаксических анализаторов, библиотеки времени выполнения, реализующие соответствующие алгоритмы анализа, набор интерфейсов и вспомогательных функций для реализации конечного инструмента.

Набор генераторов позволяет по описанию лексики и синтаксиса языка строить синтаксический и лексический анализатор, обрабатывающий аппроксима-

цию множества значений динамически формируемого выражения на соответствующем языке, представленную в виде произвольного конечного автомата. Устранение эпсилон-переходов, необходимое для корректной работы синтаксического анализа, происходит на этапе лексического анализа.

Данный инструментарий позволяет автоматизировать создание лексических и синтаксических анализаторов при разработке программных средств, использующих регулярную аппроксимацию для приближения множества значений динамически формируемых выражений. Инструментарий может использоваться для решения задач реинжиниринга — изучения и инвентаризации систем, поиска ошибок в исходном коде, автоматизации трансформации выражений на встроенных языках. Также данный инструментарий может использоваться при реализации поддержки встроенных языков в интегрированных средах разработки.

Разработанная методика обработки динамического SQL основана на использовании инструментария в качестве генератора для создания лексического и синтаксического анализатора для динамически формируемых выражений по соответствующим спецификациям. В случае динамического SQL могут быть переиспользованы ранее разработанные спецификации. Построение регулярной аппроксимации выделяется в отдельный шаг и производится с помощью анализов, реализованных для обработки основного кода. После завершения синтаксического разбора, анализ леса проводится в основном с помощью тех же методов, что и анализ основного кода, что достигается за счёт идентичности структур деревьев. Данная методика может быть переиспользована для работы с произвольными встроенными текстовыми языками.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработан алгоритм синтаксического анализа динамически формируемых выражений, позволяющий обрабатывать произвольную регулярную аппроксимацию множества значений выражения в точке выполнения, реализующий эффективное управление стеком и гарантирующий конечность представления леса вывода.
2. Доказана завершаемость и корректность предложенного алгоритма при анализе регулярной аппроксимации, представимой в виде конечного автомата без ε -переходов.

3. Создана архитектура инструментария для разработки программных средств статического анализа динамически формируемых строковых выражений.
4. Создана методика обработки динамически формируемых строковых выражений в проектах по реинжинирингу информационных систем.

Степень достоверности и апробация работы

С использованием разработанного инструментария было реализовано расширение к инструменту ReSharper (компания ООО “ИнтеллиДжей Лабс”, Россия), предоставляющее поддержку встроенного T-SQL в проектах на языке программирования C# в среде разработки Microsoft Visual Studio. Была реализована следующая функциональность: статическая проверка корректности выражений и подсветка ошибок, подсветка синтаксиса и подсветка парных элементов. Исходный код разработанного инструментария и расширения доступен в репозитории по адресу <https://github.com/YaccConstructor/YaccConstructor>.

Так же была проведена апробация результатов работы на промышленном проекте по переносу хранимого SQL-кода с MS-SQL Server 2005 на Oracle 11gR2 (ЗАО “Ланит-Терком”). Исходная система состояла из 850 хранимых процедур и содержала более 3000 динамических запросов на 2,7 млн. строк хранимого кода. Более половины динамических запросов были сложными и формировались с использованием от 7 до 212 операторов. При этом среднее количество операторов для формирования запроса — 40. Реализованный механизм позволил корректно автоматически обработать примерно 45% запросов и существенно упростил ручную доработку системы.

Основные результаты работы были доложены на ряде научно практических конференциях: SECR-2012, SECR-2013, SECR-2014, TMPA-2014, Parsing@SLE-2013, Рабочий семинар “Наукоемкое программное обеспечение” при конференции PSI-2014. Доклад на SECR-2014 награждён премией Бертрана Мейера за лучшую исследовательскую работу в области программной инженерии. Разработка инструментальных средств на основе предложенного алгоритма была поддержана Фондом содействия развитию малых форм предприятий в технической сфере (программа УМНИК). Результаты диссертации изложены в 6 научных ра-

ботах из которых 3 [1–3] опубликованы в журналах из списка ВАК. Работы [1, 2, 4–6] написаны в соавторстве.

В работе [5] С. Григорьеву принадлежит реализация ядра платформы YaccConstructor. В работах [?] и [6] Григорьеву С. принадлежит постановка задачи, формулирование требований к разрабатываемым инструментальным средствам. В работе [7] автору принадлежит идея, описание и реализация анализа встроенных языков на основе RNGLR алгоритма. В работе [8] Григорьеву С. принадлежит реализация инструментальных средств, проведение замеров, работа над текстом.

Структура работы

Диссертация состоит из шести глав и построена следующим образом. В первой главе проводится обзор области исследования. Рассматриваются подходы к анализу динамически формируемых строковых выражений и соответствующих инструментов. Кроме того описывается алгоритм обобщённого восходящего синтаксического анализа RNGLR, положенный в основу алгоритма, предложенного в данной работе. Также описываются проекты YaccConstructor и ReSharper SDK, использующиеся в качестве основы разработанного инструментального пакета. Во второй главе формализуется основная задача исследования и излагается алгоритм, её решающий, — алгоритм синтаксического анализа регулярного множества на основе RNGLR, строящий конечную структуру данных, содержащую деревья вывода для всех цепочек анализируемого множества. Приводятся доказательства завершаемости и корректности представленного алгоритма, поясняются шаги работы алгоритма на примерах. В третьей главе описывается инструментальный пакет SAYC, разработанный в ходе данной работы на основе алгоритма, описанного во второй главе. SAYC предназначен для разработки инструментов анализа динамически формируемых выражений. Описывается архитектура компонентов и особенности их реализации. Также описывается плагин к ReSharper, предоставляющий поддержку встроенных языков, реализованный на основе и с использованием SAYC. В четвёртой главе описывается методика применения SAYC. В пятой главе приводятся результаты экспериментального исследования SAYC. Шестая глава содержит результаты сравнения и соотнесения реализованного алгоритма с основными существующими аналогами.

Глава 1

Обзор

В данной главе будут введены основные термины и определения, рассмотрены основные подходы к анализу встроенных языков, инструменты для их обработки. Также будет рассмотрен алгоритм обобщённого восходящего синтаксического анализа RNGLR, лежащий в основе разработанного алгоритма. Кроме того, будут описаны компоненты, использовавшиеся при разработке инструментального пакета.

1.1 Языки и грамматики

В данном разделе будет приведён ряд обозначений, понятий и определений из теории формальных языков, которые будут использоваться в работе.

Определение 1. *Алфавит Σ — это конечное множество символов.*

Определение 2. *Цепочкой символов в алфавите Σ называется любая конечная последовательность символов этого алфавита. Цепочка, которая не содержит ни одного символа, называется пустой цепочкой. Для её обозначения будем использовать греческую букву ε (не входит в алфавит Σ , а только помогает обозначить пустую последовательность символов).*

Определение 3. *Язык L над алфавитом Σ — это подмножество множества всех цепочек в этом алфавите.*

Определение 4. *Грамматика G — это четвёрка $\langle T, N, P, S \rangle$, где*

- T — алфавит терминальных символов или терминалов;
- N — алфавит нетерминальных символов или нетерминалов, $T \cap N = \emptyset$;
- P — конечное подмножество множества $(T \cup N)^+ \times (T \cup N)^*$. Элемент $(a, b) \in P$ называется правилом вывода и записывается в виде $a \rightarrow b$, где a называется левой частью правила, b — правой частью, и левая часть любого правила из P обязана содержать хотя бы один нетерминал;
- S — стартовый символ грамматики, $S \in N$.

Определение 5. Вывод цепочки ω в грамматике $G = \langle T, N, P, S \rangle$.

Цепочка $b \in (T \cup N)^*$ непосредственно выводима из цепочки $a \in (T \cup N)^+$ в грамматике G (обозначается \rightarrow_G), если $a = x_1 \cdot y \cdot x_2, b = x_1 \cdot z \cdot x_2$, где $x_1, x_2, y \in (T \cup N)^*, z \in (T \cup N)^+$ и правило вывода $y \rightarrow z$ содержится в P . Индекс G в обозначении \rightarrow_G обычно опускают, если G понятна из контекста.

Цепочка $b \in (T \cup N)^*$ выводима из цепочки $a \in (T \cup N)^+$ в грамматике G (обозначается $a \Rightarrow_G b$), если существуют цепочки $z_0, z_1, \dots, z_n (n \geq 0)$, такие, что $a = z_0 \rightarrow z_1 \rightarrow \dots \rightarrow z_n = b$. Последовательность z_0, z_1, \dots, z_n называется выводом длины n .

Определение 6. Языком, порождаемым грамматикой

$G = \langle T, N, P, S \rangle$, называется множество $L(G) = \{\omega \in T^* | S \Rightarrow \omega\}$.

Определение 7. Левосторонний вывод цепочки ω в грамматике $G = \langle T, N, P, S \rangle$ — вывод в котором на каждом шаге вывода заменяется самое левое из всех вхождений нетерминальных символов (то есть каждый шаг вывода имеет вид $uA\theta \Rightarrow u\beta\theta$, где $(A \rightarrow \beta) \in P, u \in \Sigma^*$ и $\theta \in (N \cup \Sigma)^*$).

Определение 8. Правосторонний вывод цепочки ω в грамматике $G = \langle T, N, P, S \rangle$ определяется аналогично левостороннему: заменяется самое правое вхождение нетерминала.

Определение 9. Грамматика G называется неоднозначной (ambiguous), если существует слово $\omega \in L(G)$, которое имеет два или более левосторонних вывода. В противном случае контекстно-свободная грамматика называется однозначной (unambiguous).

Определение 10. Язык L_1 называется *существенно неоднозначным*, если не существует такой грамматики G , что G однозначна и $L_1 = L(G)$.

Определение 11. *Деревом вывода* цепочки $\omega \in T^*$ в грамматике $G = \langle T, N, P, S \rangle$ называется упорядоченное дерево со следующими свойствами.

- Корень помечен S .
- Если его внутренний узел помечен $A \in N$ и $X_1, \dots, X_k \in T \cup N$ — перечисленные слева направо пометки всех сыновей этого узла, то $A \rightarrow X_1 \dots X_k \in P$.
- Если его внутренний узел помечен $A \in N$ и ε — пометка единственного сына этого внутреннего узла, то $A \rightarrow \varepsilon \in P$.
- $\omega = a_1 \dots a_m$, где $a_1, \dots, a_m \in T \cup \{\varepsilon\}$ перечисленные слева направо пометки всех листьев этого дерева.

Определение 12. *Динамически формируемые строковые выражения* — строковые выражения в программе на некотором языке программирования, значения которых в момент использования зависят от процесса выполнения этой программы. Язык, на котором написана программа, будем называть **внешним языком**. В случае, когда известно, что значение строкового выражения должно являться кодом на некотором языке, говорят о **встроенных языках** (также называемых встроенными строковыми языками или *string-embedded languages* [9]). Например, для листинга 4 внешним языком является C#. Про переменную `sexes`, основываясь на строках 3–7, можно сделать предположение, что она должна содержать выражение на SQL. Таким образом, в данном примере присутствует SQL, встроенный в C#, и динамически формируемый SQL-запрос. Отметим, что выражение на строке 9 является статическим, а строковое выражение на строке 10 является динамически формируемым, но не является кодом на некотором языке программирования. Обработка таких выражений в общем случае называется анализ строк (*string analysis* [10]).

Одним из распространённых способов классификации грамматик является иерархия грамматик по Хомскому [11]. Так как для различных классов грамматик в данной иерархии разрешимость задач различна и применяемые алгоритмы анализа также различаются, то рассмотрим её более детально.

```

1 public void Example(string tbl, bool cond)
2 {
3     string sExec =
4         "SELECT sOrderDescription, cderitInfo, @sMagicKey FROM ts." + tbl
5         + (cond ? "WHERE fld = 1 " : "WHERE fld = 2 ");
6
7     db.Execute(sExec);
8
9     Console.WriteLine("Log:");
10    Console.WriteLine("\T2A\CYRV \T2A\cyrery \T2A\cyrb \T2A\cyro \T2A\cyr
11 }

```

Listing 4: Пример кода метода на языке программирования C#, содержащего динамически формируемые строковые выражения

– Тип 0

Любая грамматика является грамматикой типа 0. На вид правил грамматик этого типа не накладывается никаких дополнительных ограничений. Класс языков типа 0 совпадает с классом рекурсивно перечислимых языков.

– Тип 1

Грамматика $G = \langle T, N, P, S \rangle$ называется неукорачивающей, если правая часть каждого правила из P не короче левой части: для любого правила $\alpha \rightarrow \beta \in P$ выполняется неравенство $|\alpha| \leq |\beta|$. В виде исключения в неукорачивающей грамматике допускается наличие правила $S \rightarrow \varepsilon$, при условии, что S не встречается в правых частях правил.

Грамматикой типа 1 будем называть неукорачивающую грамматику.

Тип 1 также можно определить с помощью контекстно-зависимых грамматик. Грамматика $G = \langle T, N, P, S \rangle$ называется контекстно-зависимой (КЗ), если каждое правило из P имеет вид $\alpha \rightarrow \beta$, где $\alpha = \omega_1 A \omega_2$, $\beta = \omega_1 \gamma \omega_2$, $A \in N$, $\gamma \in (T \cup N)^+$, $\omega_1, \omega_2 \in (T \cup N)^*$. В виде исключения в КЗ-грамматике допускается наличие правила с пустой правой частью $S \rightarrow \varepsilon$, при условии, что S (начальный символ) не встречается в правых частях правил.

Цепочку ω_1 называют левым контекстом, цепочку ω_2 называют правым контекстом. Язык, порождаемый контекстно-зависимой грамматикой, называется контекстно-зависимым языком.

– Тип 2

Грамматика $G = \langle T, N, P, S \rangle$ называется контекстно-свободной (КС), если каждое правило из P имеет вид $A \rightarrow \beta$, $A \in N$, $\beta \in (T \cup N)^*$.

Заметим, что в КС-грамматиках допускаются правила с пустыми правыми частями. Язык, порождаемый контекстно-свободной грамматикой, называется контекстно-свободным языком.

Грамматикой типа 2 будем называть контекстно-свободную грамматику.

– Тип 3

Грамматика $G = \langle T, N, P, S \rangle$ называется праволинейной, если каждое правило из P имеет вид $A \rightarrow wB$ либо $A \rightarrow w$, где $A, B \in N$, $w \in T^*$.

Грамматика $G = \langle T, N, P, S \rangle$ называется леволинейной, если каждое правило из P имеет вид $A \rightarrow Bw$ либо $A \rightarrow w$, где $A, B \in N$, $w \in T^*$.

При фиксированном языке L два следующих утверждения эквивалентны:

- существует праволинейная грамматика G_1 , такая что $L = L(G_1)$;
- существует леволинейная грамматика G_2 , такая что $L = L(G_2)$.

Из данного утверждения следует, что праволинейные и леволинейные грамматики определяют один и тот же класс языков, который будем называть классом регулярных языков. Право- и леволинейные грамматики будем называть регулярными грамматиками. Регулярная грамматика является грамматикой **типа 3**.

Существуют различные способы описания языков. Если язык конечен, то его можно описать простым перечислением входящих в него цепочек. Однако формальный язык может быть бесконечным и в таком случае требуются механизмы, позволяющие конечным образом представлять бесконечное множество цепочек. Можно выделить два основных подхода для такого представления: механизм распознавания, когда описывается процедура, проверяющая принадлежность цепочки описываемому языку, и механизм порождения (генерации), когда задаётся механизм, способный построить все цепочки описываемого языка. Основным способом реализации механизма порождения — использование грамматик, которые как раз и описывают правила построения цепочек некоторого языка. Вместе с

этим, можно явным образом описать процедуру-генератор цепочек языка, что также будет являться описанием языка. Например, программа на любом языке программирования, генерирующая некоторый текст является описанием языка. В данной работе будут рассматриваться такие программы.

1.2 Конечные автоматы и преобразователи

Одним из способов задания регулярных языков является описание конечного автомата, который может быть использован и как генератор, и как распознаватель.

Определение 13. *Конечный автомат* (Finite State Automata, [12]) — это пятёрка $M = \langle Q, \Sigma, \Delta, I, F \rangle$, со следующими элементами.

- Σ — конечный алфавит.
- Q — конечное множество состояний.
- I — множество начальных состояний. $I \subseteq Q$.
- F — множество заключительных или допускающих состояний. $F \subseteq Q$.
- $\Delta \subseteq Q \times \Sigma^* \times Q$. Если $\langle p, x, q \rangle \in \Delta$, то $\langle p, x, q \rangle$ называется переходом (transition) из p в q , а слово x — меткой (label) этого перехода. В общем случае автомат является недетерминированным (НКА), то есть позволяющим несколько переходов с одинаковым начальным состоянием и одинаковой меткой.

Определение 14. Конечный автомат $\langle Q, \Sigma, \Delta, I, F \rangle$ называется детерминированным (deterministic) (ДКА), если

- множество I содержит ровно один элемент;
- для каждого перехода $\langle p, x, q \rangle \in \Delta$ выполняется равенство $|x| = 1$;
- для любого символа $a \in \Sigma$ и для любого состояния $p \in Q$ существует не более одного состояния $q \in Q$ со свойством $\langle p, a, q \rangle \in \Delta$.

Определение 15. *Конечный автомат с ε -переходами — конечный автомат, в котором есть возможность совершать переходы по ε .*

Определение 16. *ε -НКА A — это НКА $A = \langle \Sigma, Q, s, T, \delta \rangle$, где все компоненты имеют тот же смысл, что и для НКА, за исключением $\delta : Q \times (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \rightarrow 2^Q$.*

Определение 17. *Язык, распознаваемый конечным автоматом M , — это язык $L(M)$, состоящий из всех допускаемых данным автоматом слов. Также говорят, что автомат M описывает или задаёт некоторый язык $L(M)$.*

Класс регулярных языков эквивалентен классу конечных автоматов в том смысле, что для любого регулярного языка L_1 можно построить детерминированный конечный автомат M , такой $L(M) = L_1$. При этом множество языков, допускаемых автоматами с ε -переходами, совпадает с множеством языков, допускаемых детерминированными конечными автоматами. Также будет удобно отождествлять регулярный язык и регулярное множество.

Конечные автоматы можно изображать в виде диаграммами переходов (transition diagram). На диаграмме каждому состоянию соответствует вершина графа, а переходу — дуга. Дуга из p в q , помеченная словом x , означает, что $\langle p, x, q \rangle$ является переходом данного конечного автомата. Вершины, соответствующие начальным и конечным состояниям, отмечаются отдельно: конечные состояния изображаются как двойной круг, начальные отмечаются отдельной входной дугой, не имеющей стартовой вершины. Также в данной работе будет использоваться следующая цветовая нотация: конечные вершины обозначены красным цветом, начальные — зелёным. Таким образом, автомат представим в виде графа и в данной работе к конечным автоматам будет применяться терминология из теории графов.

Определение 18. *Конечный преобразователь*

(Finite State Transducer, [13]) — это конечный автомат, который может возвращать конечное число символов для каждого входного символа. Конечный преобразователь может быть задан следующей шестёркой элементов: $\langle Q, \Sigma, \Delta, q_0, F, E \rangle$, где

– Q — множество состояний,

- Σ — входной алфавит,
- Δ — выходной алфавит,
- $q_0 \in Q$ — начальное состояние,
- $F \subseteq Q$ — набор конечных состояний,
- $E \subseteq Q \times (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \times (\Delta \cup \{\varepsilon\}) \times Q$ — набор переходов.

Конечные преобразователи находят широкое применение в области обработки естественного языка (Natural Language Processing, [14]), также они используются и при проведении лексического анализа, который является переводом входной цепочки из одного языка в другой: из языка над алфавитом символов в язык над алфавитом терминалов. Большинство генераторов лексических анализаторов строят по описанию лексики языка соответствующий конечный преобразователь.

Важной операцией над конечными преобразователями является операция композиции. **Композиция** конечных преобразователей — это два последовательно взаимодействующих конечных преобразователя, работающих таким образом: выход первого конечного преобразователя подаётся на вход второму конечному преобразователю, что позволяет описывать цепочки трансформаций. Ниже дано формальное определение операции композиции над конечными преобразователями, допускающие наличие ε -переходов.

Определение 19. *Композицией двух конечных преобразователей*

$T_1 = \langle Q_1, \Sigma_1, \Delta_1, q_{0_1}, F_1, E_1 \rangle$ и $T_2 = \langle Q_2, \Sigma_2, \Delta_2, q_{0_2}, F_2, E_2 \rangle$ является конечный преобразователь $T = \langle Q_1 \times Q_2, \Sigma_1, \Delta_2, \langle q_{0_1}, q_{0_2} \rangle, F_1 \times F_2, E \cup E_\varepsilon \cup E_{i,\varepsilon} \cup E_{o,\varepsilon} \rangle$, где

- $E = \{ \langle \langle p, q \rangle, a, b, \langle p', q' \rangle \rangle \mid \exists c \in \Delta_1 \cap \Sigma_2 : \langle p, a, c, p' \rangle \in E_1 \wedge \langle q, c, b, q' \rangle \in E_2 \}$
- $E_\varepsilon = \{ \langle \langle p, q \rangle, a, b, \langle p', q' \rangle \rangle \mid \langle p, a, \varepsilon, p' \rangle \in E_1 \wedge \langle q, \varepsilon, b, q' \rangle \in E_2 \}$
- $E_{i,\varepsilon} = \{ \langle \langle p, q \rangle, \varepsilon, a, \langle p, q' \rangle \rangle \mid \langle q, \varepsilon, a, q' \rangle \in E_2 \wedge p \in Q_1 \}$
- $E_{o,\varepsilon} = \{ \langle \langle p, q \rangle, a, \varepsilon, \langle p', q \rangle \rangle \mid \langle p, a, \varepsilon, p' \rangle \in E_1 \wedge q \in Q_2 \}.$

В рамках данной работы конечные преобразователи и их композиция будут использоваться для лексического анализа динамически формируемых строковых выражений.

1.3 О применимости статического анализа строковых выражений

Статический анализ динамически формируемых выражений полезен на различных этапах работы с кодом при решении различных задач [15]. Давайте рассмотрим пример и поясним, какие задачи необходимо решать при работе с ним и каким образом анализ строковых выражений помогает решать данные задачи. Мы рассмотрим пример встроенного SQL, однако все рассмотренные задачи актуальны и для других языков.

Одной из задач, решаемых в рамках различных мероприятий является оценка качества кода и его сложности с использованием различных формальных метрик [16]. При построении таких метрик важно учитывать, что использование динамически формируемых выражений, сложность их конструирования, количество и содержание возможных значений и многие другие характеристики сказываются на качестве и сложности самого кода. По этой причине необходимо иметь возможность оценивать сложность динамически формируемых выражений с различных точек зрения [17, 18]. С одной стороны, необходимо оценивать сложность формирования выражения. Так в примере кода 5 для формирования запроса используется цикл (строки 9–13), что может приводить к потенциально бесконечному множеству различных значений выражения и усложнять процесс сопровождения. С другой стороны, важна сложность возможных значений выражения. В примере кода 5 в динамически формируемом запросе используется конструкция соединения таблиц (JOIN, строка 17). Если количество соединений велико и условия в них сложны, то это может стать причиной проблем с производительностью и может служить признаком неудачного дизайна схемы данных [18].

Другой ряд задач связан с сопровождением и модификацией систем, разработанных с активным использованием динамически формируемых выражений: из-

```

1 public void NewReport(int prodId = 0, int status = 0, int nType = 0)
2 {
3     int nProdIdL = prodId;
4
5     string sMagicKey = "[" + prodId.ToString() + "]";
6
7     string tbl = status == 0 ? "InOrders " : "OutOrders ";
8
9     while (nProdIdL > 0)
10    {
11        sMagicKey = "[" + sMagicKey + "]";
12        nProdIdL = nProdIdL - 1;
13    }
14
15    string sExec =
16        "SELECT sOrderDescription, cderitInfo, " + sMagicKey + " FROM ts."
17        + tbl +
18        "as t1 JOIN tCreData cd (NOLOCK) ON cd.ncredataid = t1.ncredataid
19
20    string sWhere = nType == 0
21        ? "WHERE nOrderType = 0 AND nStatus > 2 "
22        : "WHERE nStatus > 0 ";
23
24    sExec = "INSERT INTO reports (description, creditInfo, id) VALUES "
25        + sExec + sWhere;
26
27    db.Execute(sExec);
28 }

```

Listing 5: Пример кода метода на языке программирования C#, формирующего и выполняющего динамический SQL-запрос

влечение знаний о системе [19], автоматизированный реинжиниринг программного обеспечения [20]. Например, при активном использовании встроенного SQL может возникать задача анализа или восстановления схемы данных [15]. Для кода из листинга 5, проанализировав структурное представление динамически формируемого SQL-кода, можно сделать вывод, что данный метод обращается к таблицам InOrders, OutOrders и tCreData на чтение, а к таблице reports на запись. Без анализа строковых выражений эти знания не могут быть получены, а они могут быть полезны, например, при модификации схемы данных.

Так как встроенные языки всё ещё используются на практике, то важна их поддержка в интегрированных средах разработки, что может быть полезно не только при непосредственной разработке, но и при автоматизированном и руч-

ном изучении кода, совмещённом с решением перечисленных выше задач. Дополнительная поддержка встроенных языков в средах разработки может включать подсветку синтаксиса и парных элементов, навигацию по коду с учётом динамически формируемого, диагностику и подсветку ошибок, что упрощает работу с кодом. Например, в листинге 5 пропущен пробел между блоком WHERE (переменная `sWhere`, строки 20–22) и началом конструкции SELECT (переменная `sExec`, строки 15–18). То есть при выполнении данного метода будет формироваться некорректный запрос, но об этом станет известно только в момент выполнения метода. Однако ошибки такого рода можно обнаруживать без запуска программы и сообщать об этом разработчику.

1.4 Подходы к анализу встроенных языков

Анализ динамически формируемых выражений актуален как в задачах обеспечения безопасности программного обеспечения (поиск мест в коде, уязвимых для SQL-инъекций [21]), так и для разработки, сопровождения и модернизации систем, разработанных с применением встроенных языков. Для решения подобных задач существует ряд различных подходов, основные из которых рассмотрены ниже. Инструменты, реализующие данные подходы, будут подробно описаны в следующем разделе.

Проверка включения языков. В рамках данного подхода в результате анализа внешнего кода строится язык L_1 , являющийся приближением языка L , генерируемого программой. После чего проверяется включение L_1 в язык $L_2(G)$, описанный эталонной грамматикой G . Основным недостатком данного подхода — невозможность получить какую-либо информацию, кроме знания о вхождении или не вхождении одного языка в другой. Как следствие, проведение более сложных видов статического анализа или трансформации невозможно. Можно выделить несколько вариантов данного подхода, различающихся классом языка L_1 .

- Регулярная аппроксимация: L_1 является регулярным языком. Однако язык L не обязан быть регулярным, так как программа-генератор может быть реализована на тьюринг-полном языке, что может приводить к существенной потере точности при построении приближения. Достоинством такого

подхода является разрешимость задачи проверки включения L_1 в L_2 для регулярного L_1 и L_2 , являющегося однозначным контекстно-свободным языком [22]. Инструмент, реализующий данный подход, — Java String Analyzer [23], являющийся анализатором строковых выражений в коде на Java.

- Контекстно-свободное приближение: L_1 является контекстно-свободным языком. Достоинством такого приближения является то, что оно более точное, однако проверка включения для двух контекстно-свободных языков является неразрешимой в общем случае задачей [22]. По этой причине в результате и при использовании такого приближения будет получено неточное решение. Данный подход реализован в инструменте PHPSA [24], предназначенном для проверки корректности динамически формируемых программами на PHP выражений.

Синтаксический анализ. Данный подход основан на применении техник синтаксического анализа для работы с динамически формируемыми выражениями. Благодаря этому, кроме проверки корректности выражений, становится возможным решение более сложных задач, требующих знаний о структуре вывода или работы с деревом разбора, таких как семантический анализ или трансформации. Ниже перечислены существующие на текущий момент варианты данного подхода.

- Абстрактный LR-анализ. В исследованиях группы во главе с Kyung-Goo Doh предлагается комбинация анализа потока данных и синтаксического анализа на основе LALR(k) алгоритма, позволяющая строить множество LR-стеков для всех значений строкового выражения [25–27]. Так как задача проверки включения для двух КС языков неразрешима, то решение приближённое. В работе [27] обоснована возможность семантического анализа на основе классического для LR-анализа механизма: атрибутивных грамматик [28] и выполнения семантического действия при выполнении свёртки. Однако не до конца исследована эффективность данного подхода при работе с семантическими действиями, требующими больших ресурсов при вычислении.

- Синтаксический анализ регулярного множества. Для языка L строится регулярная аппроксимация. Далее над построенной аппроксимацией решаются задачи лексического и синтаксического анализа. Данный подход рассмотрен в работах [9, 29] и реализован в инструменте Alvor. Данный инструмент является плагином к среде разработки Eclipse, предоставляющим поддержку встроенного SQL в Java: статический поиск ошибок, тестирование запросов в базе данных. Достоинством такого подхода является разделение обработки на независимые шаги: построение аппроксимации, лексический анализ, синтаксический анализ [29]. Это позволяет более гибко переиспользовать существующие реализации тех или иных шагов и упрощает создание нового инструмента на базе имеющихся. Использование атрибутивных грамматик — классического для LR-анализа способа задания семантики — и построение леса разбора в рамках данного подхода также не обсуждается.

1.5 Обзор инструментов для работы со встроенными языками

Задачи анализа динамически формируемых строковых выражений возникают в различных контекстах и применительно к различным языкам, что приводит к появлению достаточно разнообразных инструментов, основные представители которых будут рассмотрены далее.

Среди языков, код на которых динамически формируется в виде строк, одним из наиболее распространённых является SQL с его многочисленными диалектами. При этом часто используется динамический SQL — генерация выражений на SQL в рамках кода на SQL, часто в хранимых процедурах. Одна из актуальных задач, при решении которой необходимо обрабатывать динамический SQL, — это миграция баз данных, и для её решения которой существует ряд промышленных инструментов. В силу особенностей решаемой задачи нас интересуют инструменты для трансляции хранимого кода баз данных. Самыми известными в данной области являются такие инструменты, как PL-SQL Developer [30], SwisSQL [31], SQL Ways [4]. Эти инструменты применяются для трансляции

хранимого SQL-кода, однако только SQL Ways обладает возможностью трансформации строковых SQL-запросов в ряде простых случаев. Динамически формируемые запросы со сложной логикой построения не поддерживаются современными промышленными инструментами.

Далее рассмотрим инструменты, которые изначально ориентированы на решение различных задач для динамически формируемых выражений. Многие из них ориентированы на предоставление поддержки встроенных языков в интегрированных средах разработки. Как правило, эти инструменты реализуют один из двух основных подходов. Первый подход заключается в проверке включения языков. Данный подход отвечает на вопрос, включается ли язык, порождаемый анализируемой программой, в язык, описанный пользователем, например, с помощью грамматики или простым перечислением строковых выражений, которых он ожидает получить в результате выполнения программы. Данный подход плохо переиспользуем для решения других задач. Вторым подходом является проведение лексического анализа и синтаксического разбора компактного представления множества динамически формируемых выражений. Подробное описание инструментов для анализа динамически формируемых выражений представлено ниже.

Java String Analyzer (JSA, [23,32]) — инструмент для анализа формирования строк и строковых операций в программах на Java. Основан на проверке включения регулярной аппроксимации встроенного языка в контекстно-свободное описание эталонного. Для каждого строкового выражения строится конечный автомат, представляющий приближенное значение всех значений этого выражения, которые могут быть получены во время выполнения программы. Для того чтобы получить этот конечный автомат, необходимо из графа потока данных анализируемой программы построить контекстно-свободную грамматику, которая получается в результате замены каждой строковой переменной нетерминалом, а каждой строковой операции — правилом продукции. После чего полученная грамматика аппроксимируется регулярным языком. В качестве результата работы данный инструмент также возвращает строки, которые не входят в описанный пользователем язык, но могут сформироваться во время исполнения программы.

PHP String Analyzer (PHPSA, [24,33]) — инструмент для статического анализа строк в программах на PHP. Расширяет подход предыдущего инструмента

JSA. Использует контекстно-свободную аппроксимацию, что достигается благодаря отсутствию этапа преобразования контекстно-свободной грамматики в регулярный язык, что повышает точность проводимого анализа. Для обработки строковых операций используется конечный преобразователь, который позволяет оставаться в рамках контекстно-свободной грамматики. Дальнейший анализ строковых выражений полностью взят из инструмента JSA.

Alvor [9, 29, 34] — плагин к среде разработки Eclipse¹, предназначенный для статической проверки корректности SQL-выражений, встроенных в Java². Для компактного представления множества динамически формируемого строкового выражения используется понятие абстрактной строки, которая фактически является регулярным выражением над используемыми в строке символами. В инструменте Alvor отдельным этапом выделен лексический анализ. Поскольку абстрактную строку можно преобразовать в конечный автомат, то лексический анализ заключается в преобразовании этого конечного автомата в конечный автомат над терминалами при использовании конечного преобразователя, полученного генератором лексических анализаторов JFlex [35]. Несмотря на то, что абстрактная строка позволяет конструировать строковые выражения при участии циклов, плагин сообщает о том, что не может поддержать такие языковые конструкции (см.рис. 1.1). Также инструмент Alvor не поддерживает обработку строковых операций, за исключением конкатенации (см. рис. 1.2).

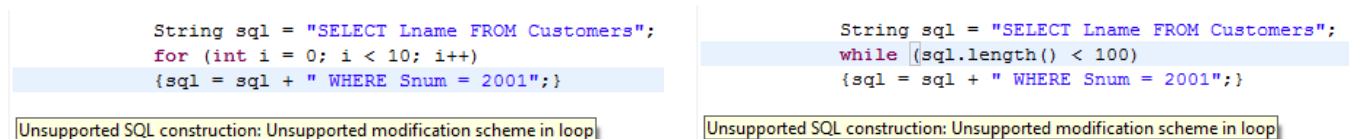


Рисунок 1.1: Формирование строкового выражения с помощью цикла **for** и **while** в среде разработки Eclipse с установленным плагином Alvor

IntelliLang [36] — плагин к средам разработки PhpStorm [37] и IntelliJ IDEA³, предоставляющий поддержку встроенных строковых языков, таких как HTML, SQL, XML, JavaScript в указанных средах разработки. Плагин обеспечивает подсветку синтаксиса, автодополнение, статический поиск ошибок. Для среды раз-

¹Сайт среды разработки Eclipse (посещён 23.06.2015): <http://www.eclipse.org/ide/>

²Во время написания данного текста велась работа над поддержкой встроенных языков в PHP.

³IntelliJ IDEA — среда разработки для JVM-языков. Сайт (посещён 23.06.2015):<https://www.jetbrains.com/idea/>

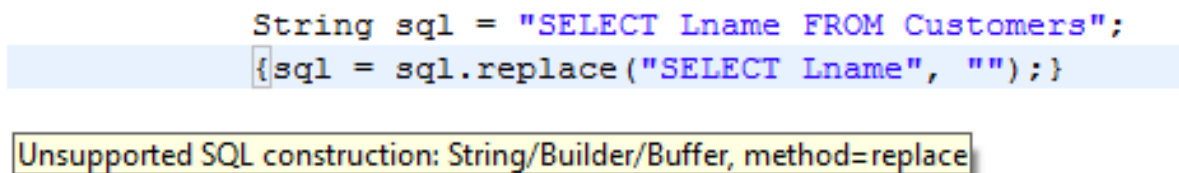


Рисунок 1.2: Формирование строкового выражения с помощью строковой операции **replace** в среде разработки Eclipse с установленным плагином Alvor

работки IntelliJ IDEA расширение IntelliLang также предоставляет отдельный текстовый редактор для работы со встроенным языком. Для использования данного плагина требуется ручная разметка переменных, содержащих выражения на том или ином встроенном языке, что продемонстрировано на рисунке 1.3.

```

7 public String getHTML() {
8     String body = "<body>" + "Hello!" + "</body>";
9     String html = "<html>" + body + "</html>";
10    return html;
11 }
```

Рисунок 1.3: IntelliJ IDEA с установленным расширением IntelliLang: переменная **html** отмечена, как содержащая встроенный язык, а **body** не отмечена

PHPStorm [37] — интегрированная среда разработки для PHP, которая осуществляет подсветку и автодополнение встроенного кода на HTML, CSS, JavaScript, SQL. Однако такая поддержка осуществляется только в случаях, когда строка получена без использования каких-либо строковых операций. Также PHPStorm для каждого встроенного языка предоставляет отдельный текстовый редактор.

Varis [38] — плагин для Eclipse, представленный в 2015 году, предоставляющий поддержку кода на HTML, CSS и JavaScript, встроенного в PHP. В плагине реализованы функции подсветки встроенного кода, автодополнения, перехода к объявлению (jump to declaration), построения графа вызовов (call graph) для встроенного JavaScript. Рисунок 1.4 демонстрирует функции подсветки и автодополнения.



Рисунок 1.4: Пример функциональности Varis: автодополнение и подсветка синтаксиса во встроенном HTML в среде разработки Eclipse

Абстрактный синтаксический анализ. Kyung-Goo Doh, Hyunha Kim, David A. Schmidt в серии работ [25–27] описали алгоритм статического анализа динамически формируемых строковых выражений на примере статической проверки корректности динамически генерируемого HTML в PHP-программах. Хотя для данного примера отсутствует этап проведения лексического анализа, в общем случае можно использовать композицию лексического анализа и синтаксического разбора. Для этого достаточно хранить состояние конечного преобразователя, который используется для лексического анализа, внутри состояния синтаксического разбора. Данный алгоритм также предусматривает обработку строковой операции `string-replacement` с использованием конечного преобразователя, который по аналогии с лексическим конечным преобразователем хранит своё состояние внутри состояния синтаксического разбора. На вход абстрактный синтаксический анализатор принимает data-flow уравнения, полученные при анализе исходного кода, и LALR(1)-таблицу. Далее производится решение полученных на вход уравнений в домене LR-стеков. Проблема возможного бесконечного роста стеков, возникающая в общем случае, разрешается с помощью абстрактной

интерпретации (abstract interpretation [39]). В работе [27] данный подход был расширен вычислением семантики с помощью атрибутивных грамматик, что позволило анализировать более широкий, чем LALR(1), класс грамматик. В качестве результата алгоритм возвращает набор абстрактных синтаксических деревьев. На текущий момент реализацию данного алгоритма в открытом доступе найти не удалось, хотя в работах авторов приводятся результаты апробации. Таким образом, на данный момент не существует доступного инструмента, основанного на данном алгоритме.

1.6 Алгоритмы и структуры данных для обобщённого синтаксического анализа

Анализ динамически формируемых выражений подразумевает работу со множеством значений. При синтаксическом анализе множества появится множество стеков и множество деревьев разбора. Среди существующих алгоритмов есть класс алгоритмов обобщённого синтаксического анализа, в рамках которого разработаны эффективные методы работы с множеством стеков и деревьев разбора. По этой причине рассмотрим некоторые алгоритмы обобщённого синтаксического анализа и применяемые в них структуры данных более подробно.

1.6.1 Алгоритм обобщённого LR анализа

Один из подходов к синтаксическому анализу — это табличный LR анализ, при котором строится правосторонний вывод и дерево вывода строится снизу вверх. Механизм анализа основан на применении автомата с магазинной памятью, управляющие таблицы для которого строятся на основе грамматики обрабатываемого языка [40]. Идея состоит в том, что символы входной цепочки переносятся в стек до тех пор, пока на вершине стека не накопится цепочка, совпадающая с правой частью какого-либо из правил (операция “перенос” или shift). Далее все символы этой цепочки извлекаются из стека, и на их место помещается нетерминал, соответствующий этому правилу (операция “свёртка” или reduce). Входная цепочка допускается автоматом, если после переноса в ав-

томат последнего символа входной цепочки и выполнении необходимого числа свёрток в стеке окажется только стартовый нетерминал грамматики.

Как уже было сказано ранее, при выполнении табличного синтаксического анализа для данной грамматики строятся таблицы: таблица действий и таблица переходов. Таблица переходов — это вспомогательная таблица, используемая при одном из действий и в ячейке может содержать либо состояние анализатора, либо символ ошибки.

Таблица действий определяет дальнейшее действие в текущем состоянии и с текущим символом на входе. Каждая ячейка данной таблицы может содержать одно из следующих значений.

- **accept (“успех”)** — разбор входной цепочки завершился успешно.
- **shift (“перенос”)** — на вершину стека переносится состояние, которое соответствует входному символу, читается следующий символ.
- **reduce (“свёртка”)** — в стеке набрались состояния, которые можно заменить одним, исходя из правил грамматики. Значение нового состояния берётся из таблицы переходов.
- **error (“ошибка”)** — анализатор обнаружил ошибку во входной цепочке.

При работе с неоднозначными грамматиками могут возникнуть ситуации, когда в одну ячейку таблицы необходимо записать несколько действий. Это означает, что в процессе обработки некоторой цепочки при цепочки анализатор не сможет однозначно решить, какое действие совершить в текущем состоянии. Таким образом возникают конфликты shift/reduce, когда можно либо прочитать очередной символ, либо произвести свёртку, и reduce/reduce, когда можно произвести свёртку по нескольким правилам грамматики.

Для решения данной проблемы Масару Томитой был предложен алгоритм Generalized LR (GLR) [41], изначально предназначенный для анализа естественных языков. GLR-алгоритм был предназначен для работы с неоднозначными контекстно-свободными грамматиками, а значит умел обрабатывать shift/reduce и reduce/reduce конфликты. Используемые в данном алгоритме управляющие таблицы схожи с управляющими таблицами LR-алгоритма, но отличаются тем, что ячейки могут содержать несколько действий. Основная идея GLR-алгоритма

состоит в проведении всех возможных действий во время синтаксического анализа. При этом для эффективного представления множества стеков и деревьев вывода используются специальные структуры данных, основанные на графах.

1.6.2 Структурированный в виде графа стек

Структурированный в виде графа стек (Graph Structured Stack или GSS) [41] является ориентированным графом, чьи вершины соответствуют элементам отдельных стеков, а ребра связывают последовательные элементы. Вершина может иметь несколько входящих рёбер, что соответствует слиянию нескольких стеков или несколько исходящих, что соответствует конфликту — ситуации в которой дальнейший разбор может осуществляться несколькими способами. Объединение стеков происходит в процессе анализа, когда на вершинах различных веток, соответствующих одинаковой позиции во входном потоке, оказывается одинаковое состояние анализатора. За счёт такой организации GSS обеспечивается переиспользование общих участков отдельных стеков. Пример организации GSS приведён на рисунке 1.5: наивное решение копировать стеки при возникновении конфликтов приводит к дублированию информации, чего можно избежать при использовании GSS.

1.6.3 Сжатое представление леса разбора

Для переиспользования общих поддеревьев вывода Ян Рекерс предложил компактное представление леса разбора (Shared Packed Parse Forest, SPPF) [42], которое позволяет компактно представлять множество деревьев вывода. Важным свойством SPPF является то, что из него можно извлечь только те и только те деревья, которые могли быть получены в результате построения вывода конкретного входа в заданной грамматике. Для обеспечения этого свойства в SPPF, кроме терминальных и нетерминальных узлов, добавляются дополнительные узлы различных типов. Конкретный набор типов дополнительных узлов может отличаться в зависимости от алгоритма анализа.

Пример SPPF для грамматики G_1 , представленной на листинге 6, и входа ABC приведён на рисунке 1.6. Представлены два различных дерева вывода (1.6a и 1.6b) и результат их объединения в SPPF 1.6c. Узлы с именами вида “n <name>”

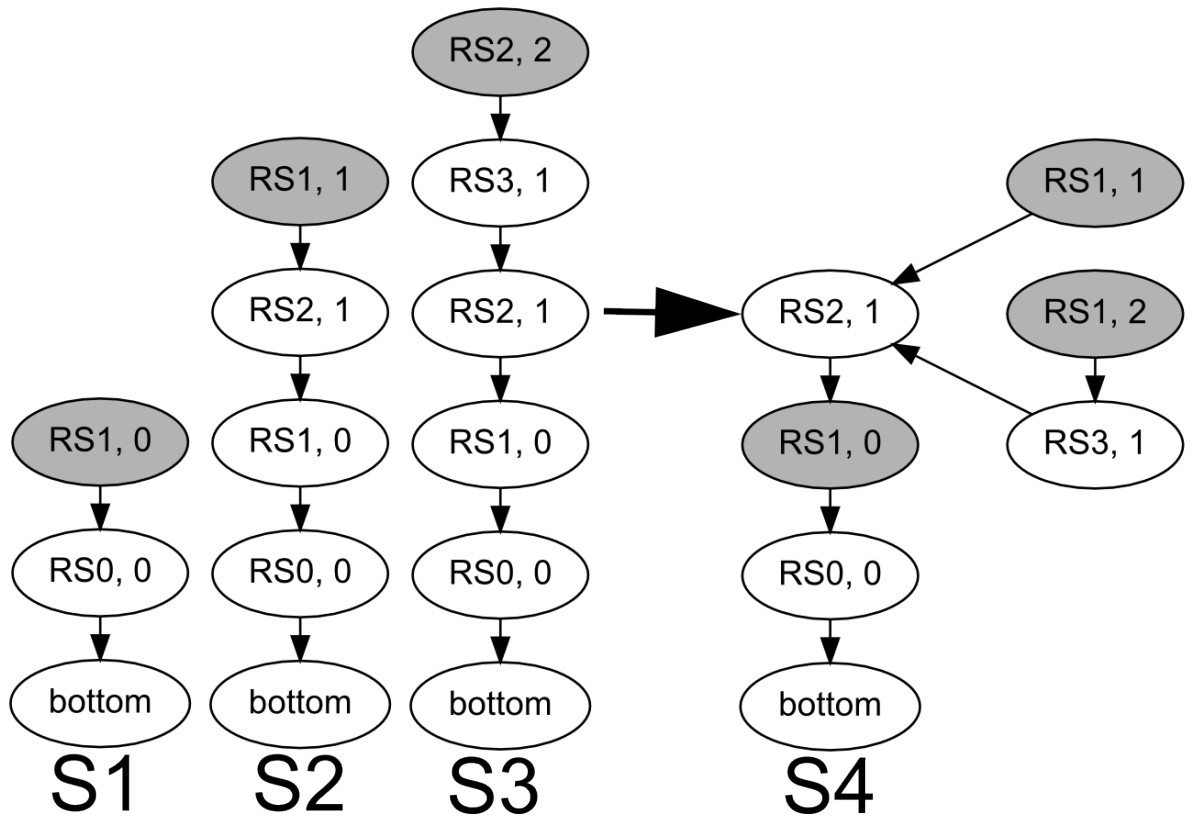


Рисунок 1.5: Пример GSS

```

1 s ::= m
2 s ::= p
3 p ::= A n
4 m ::= A l
5 l ::= n
6 n ::= B C

```

Listing 6: Грамматика G_1

— это нетерминальные узлы, “e <name>” — терминальные, “prod <num>” — дополнительные узлы, показывающие, согласно какой продукции из грамматики производился вывод нетерминала, являющегося предком данного узла.

1.6.4 Алгоритм RNGLR

RNGLR-алгоритм (Right-Nullled Generalized LR) [43] является модификацией предложенного Масару Томитой алгоритма, который не был способен обрабатывать все контекстно-свободные грамматики. Чтобы устранить данный недостаток, Элизабет Скотт и Адриан Джонстоун предложили RNGLR-алгоритм, ко-

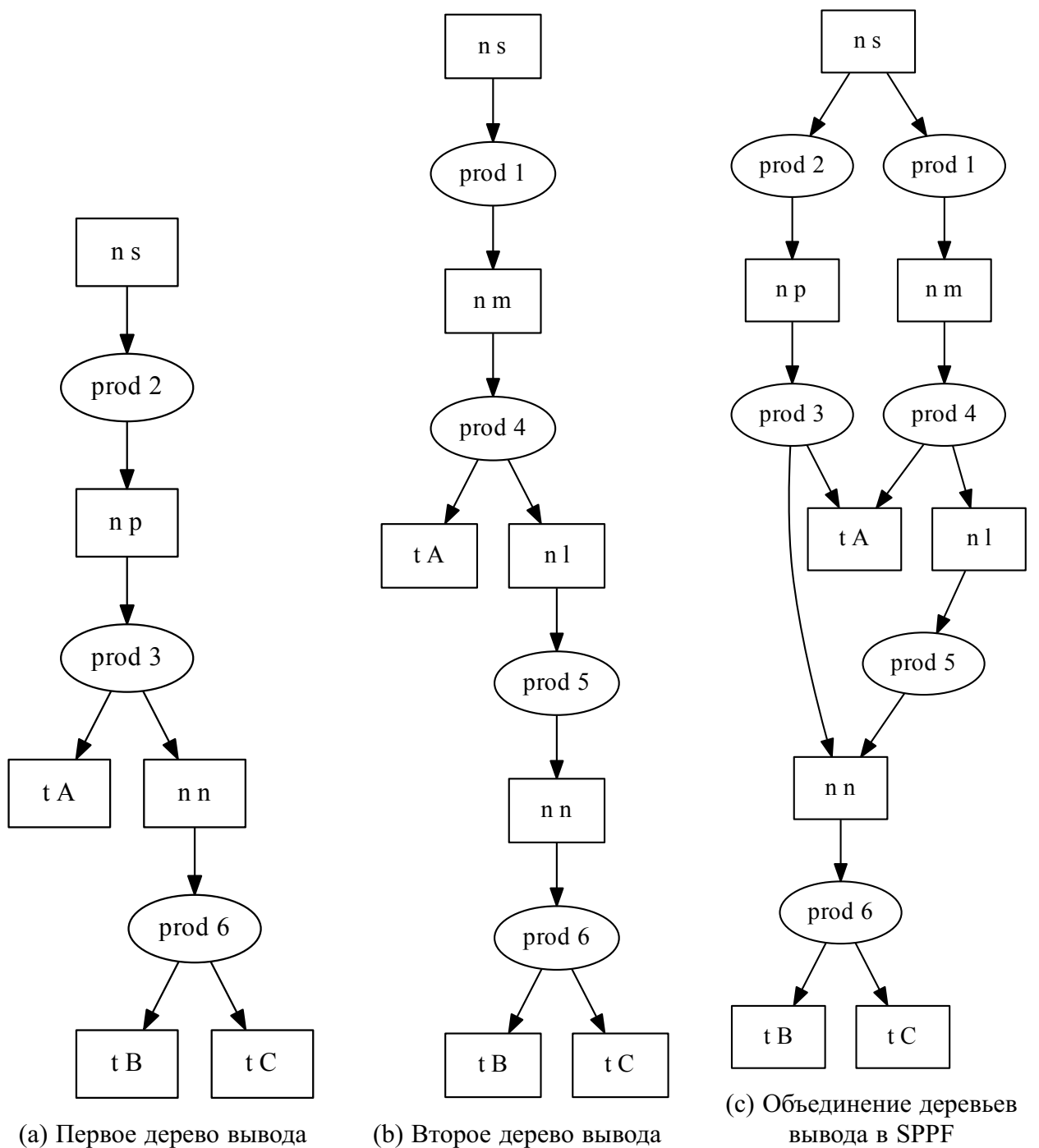


Рисунок 1.6: Пример SPPF для грамматики G_1 и входа **ABC**

торый расширяет GLR-алгоритм специальным способом обработки обнуляемых справа правил (right-nullable rules, имеющих вид $A \rightarrow \alpha\beta$, где β выводит пустую строку ϵ), позволяя обрабатывать произвольные контекстно-свободные грамматики. Алгоритм синтаксического анализа динамически формируемых выражений, представленный в данной работе, основан на RNGLR-алгоритме, по этой причине его подробное описание в виде псевдокода приведено ниже.

Algorithm 1 RNGLR-алгоритм

```

1: function PARSE(grammar, input)
2:    $\mathcal{R} \leftarrow \emptyset$            ▷ Очередь троек: вершина GSS, нетерминал, длина свёртки
3:    $\mathcal{Q} \leftarrow \emptyset$        ▷ Коллекция пар: вершина GSS, состояние синтаксического
    анализатора
4:   if input =  $\epsilon$  then
5:     if grammar accepts empty input then report success
6:     else report failure
7:   else
8:     ADDVERTEX(0, 0, startState)
9:     for all i in 0..input.Length - 1 do
10:      REDUCE(i)
11:      PUSH(i)
12:      if i = input.Length - 1 and there is a vertex in the last level of GSS
        which state is accepting then
13:        report success
14:        else report failure
15:  function REDUCE(i)
16:    while  $\mathcal{R}$  is not empty do
17:       $(v, N, l) \leftarrow \mathcal{R}.Dequeue()$ 
18:      find the set  $\mathcal{X}$  of vertices reachable from v along the path of length (l - 1)
19:      or length 0 if l = 0
20:      for all  $v_h = (level_h, state_h)$  in  $\mathcal{X}$  do
21:         $state_t \leftarrow$  calculate new state by  $state_h$  and nonterminal N
22:        ADDEDGE(i,  $v_h$ , v.level,  $state_{tail}$ , (l = 0))
23:  function PUSH(i)
24:     $\mathcal{Q}' \leftarrow$  copy  $\mathcal{Q}$ 
25:    while  $\mathcal{Q}'$  is not empty do
26:       $(v, state) \leftarrow \mathcal{Q}.Dequeue()$ 
27:      ADDEDGE(i, v, v.level + 1, state, false)

```

Для эффективного представления множества стеков во время синтаксического анализа в алгоритме RNGLR, как и в классическом GLR, используется структурированный в виде графа стек (GSS). Вершина GSS — это пара (s, l) , где *s* — состояние синтаксического анализатора, а *l* — уровень (позиция во входном потоке).

RNGLR-алгоритм последовательно считывает символы входного потока слева направо, по одному за раз, и строит GSS по “слоям”: сначала осуществляются все возможные свёртки для данного символа, после чего сдвигается следующий

Algorithm 2 Построение GSS

```

1: function ADDVERTEX( $i, level, state$ )
2:   if GSS does not contain vertex  $v = (level, state)$  then
3:     add new vertex  $v = (level, state)$  to GSS
4:     calculate the set of shifts by  $v$  and the  $input[i + 1]$  and add them to  $\mathcal{Q}$ 
5:     calculate the set of zero-reductions by  $v$  and the  $input[i + 1]$  and
6:     add them to  $\mathcal{R}$ 
7:   return  $v$ 
8: function ADDEDGE( $i, v_h, level_t, state_t, isZeroReduction$ )
9:    $v_t \leftarrow$  ADDVERTEX( $i, level_t, state_t$ )
10:  if GSS does not contain edge from  $v_t$  to  $v_h$  then
11:    add new edge from  $v_t$  to  $v_h$  to GSS
12:    if not  $isZeroReduction$  then
13:      calculate the set of reductions by  $v$  and the  $input[i + 1]$  and
14:      add them to  $\mathcal{R}$ 

```

символ со входа. Свёртка или сдвиг модифицируют GSS следующим образом. Предположим, что необходимо добавить ребро (v_t, v_h) в GSS. По построению, конечная вершина добавляемой дуги к такому моменту уже обязательно находится в GSS. Если начальная вершина также содержится в GSS, то в граф добавляется новое ребро (если оно ранее не было добавлено), иначе создаются и добавляются в граф и начальная вершина, и ребро. Каждый раз, когда создаётся новая вершина $v = (s, l)$, алгоритм вычисляет новое состояние синтаксического анализатора s' по s и следующему символу входного потока. Пара (v, s') , называемая *push*, добавляется в глобальную коллекцию \mathcal{Q} . Также при добавлении новой вершины в GSS вычисляется множество ϵ -свёрток, после чего элементы этого множества добавляются в глобальную очередь \mathcal{R} . Свёртки длины $l > 0$ вычисляются и добавляются в \mathcal{R} каждый раз, когда создаётся новое (не- ϵ) ребро. Подробное описание работы со структурированным в виде графа стеком GSS содержится в алгоритме 2.

В силу неоднозначности грамматики входная строка может иметь несколько деревьев вывода, как правило, содержащих множество идентичных поддеревьев. Для того чтобы компактно хранить множество деревьев вывода, используется SPPF, являющееся ориентированным графом и в данном случае обладающее следующей структурой.

1. *Корень* (то есть, вершина, не имеющая входящих дуг) соответствует стартовому нетерминалу грамматики.
2. Терминальные вершины, не имеющие исходящих дуг, соответствуют либо терминалам грамматики, либо деревьям вывода пустой строки ε .
3. *Нетерминальные* вершины являются корнем дерева вывода некоторого нетерминала грамматики; только вершины-продукции могут быть непосредственно достижимы из таких вершин.
4. *Вершины-продукции*, представляющие правую часть правила грамматики для соответствующего нетерминала. Вершины, непосредственно достижимые из них, упорядочены и могут являться либо терминальными, либо нетерминальными вершинами. Количество таких вершин лежит в промежутке $[l - k \dots l]$, где l — это длина правой части продукции, а k — количество финальных символов, выводящих ε . При этом правые обнуляемые символы игнорируются для уменьшения потребления памяти.

SPPF создаётся параллельно с построением GSS. С каждым ребром GSS ассоциирован либо терминальный, либо нетерминальный узел. Когда добавление ребра в GSS происходит во время операции *push*, новая терминальная вершина создаётся и ассоциируется с ребром. Нетерминальные вершины ассоциируются с рёбрами, добавленными во время операции *reduce*. Если ребро уже есть в GSS, к ассоциированной с ним нетерминальной вершине добавляется новая вершина-продукция. Подграфы, ассоциированные с рёбрами пути, вдоль которого осуществлялась свёртка, добавляются как дети к вершине-продукции. После того, как входной поток прочитан до конца, производится поиск всех вершин, имеющих принимающее состояние анализатора, после чего подграфы, ассоциированные с исходящими из таких вершин рёбрами, объединяются в один граф. Из полученного графа удаляются все недостижимые из корня вершины, в результате чего остаются только корректные деревья разбора для входной строки.

Алгоритм 1 представляет более детальное описание алгоритма.

1.7 Используемые инструменты

1.7.1 YaccConstructor

Одной из задач данной работы является создание инструментария, упрощающего создание целевых инструментов статического анализа строковых выражений, которые включают такие этапы, как лексический и синтаксический анализы. При создании лексических и синтаксических анализаторов широко распространённой практикой является использование генераторов, которые по описанию языка строят соответствующий анализатор. Данный подход должен быть реализован и для создания инструментов анализа встроенных языков. Работа с описаниями языков программирования — грамматикой и лексической спецификацией — в рамках решаемой задачи аналогична работе с ними в стандартных генераторах. По этой причине необходимо было выбрать готовую платформу для работы с грамматиками и создания синтаксических и лексических анализаторов.

В качестве такой платформы был выбран исследовательский проект лаборатории языковых инструментов JetBrains YaccConstructor(YC) [5, 44], который является модульной платформой с открытым исходным кодом для исследований в области лексического и синтаксического анализа и разработки соответствующих инструментов. YC реализован на платформе Microsoft .NET⁴, основным языком разработки — F# [45]

Архитектура YC, представленная на рисунке 1.7, позволяет собирать требуемый инструмент из существующих модулей: можно выбрать фронтенд, соответствующий используемому языку спецификации грамматики, задать необходимые преобразования грамматики, указать необходимый генератор. Генераторы (backend) представляют различные инструменты, которые преобразуют внутреннее представление грамматики в нечто, полезное для конечного пользователя. Например, это могут быть генераторы синтаксических анализаторов, основанные на различных алгоритмах или принтеры, генерирующие текст грамматики в определённом формате или на определённом языке. YC является расширяе-

⁴Microsoft .NET — платформа для разработки программных продуктов компании Microsoft. Общие сведения о платформе (посещено 23.06.2015): [https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/zw4w595w\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/zw4w595w(v=vs.110).aspx)



Рисунок 1.7: Архитектура платформы YaccConstructor

мой платформой: модуль любого типа может быть реализован, в том числе с переиспользованием уже существующих, и подключён к платформе.

В рамках УС разработан выразительный язык спецификации грамматик YARD, поддерживающий атрибутные грамматики, грамматики в EBNF и многое другое. Например, в листинге 7 представлена грамматика языка арифметических выражений Calc на языке YARD.

```

1  [<Start>]
2  expr: factor [MULT expr]
3  powExpr: NUM | LBR expr RBR
4  factor: powExpr [POW factor]

```

Listing 7: Пример грамматики языка арифметических выражений на языке YARD

Выразительность синтаксиса языка описания грамматики удобна для разработчика, однако генераторы, как правило, не умеют работать с грамматиками в таком виде. Часто требуется, чтобы в правой части правила не было регулярных выражений, а стояла просто цепочка из терминалов и нетерминалов. Для решения этой проблемы в УС реализован ряд преобразований грамматик. В результа-

те их применения к грамматике, представленной в листинге 7, можно получить грамматику, представленную в листинге 8.

```

1  [<Start>]
2  expr: factor
3  expr: factor MULT expr
4  powExpr: NUM
5  powExpr: LBR expr RBR
6  factor: powExpr
7  factor: powExpr POW factor
8  startRule: expr

```

Listing 8: Пример преобразованной грамматики языка арифметических выражений

Также в рамках платформы YC в качестве одного из модулей ранее был реализован генератор синтаксических анализаторов на основе RNGLR-алгоритма. Это позволяет переиспользовать общие функции и структуры данных при разработке анализатора для встроенных языков. Таким образом, алгоритм анализа встроенных языков и соответствующий генератор может быть реализован в рамках платформы YC в качестве одного из модулей. При этом можно использовать готовый язык описания грамматики и преобразования, а также переиспользовать необходимые элементы генератора анализаторов на основе RNGLR-алгоритма. Таким образом, YC был выбран в качестве основы для реализации благодаря удобной архитектуре и большому количеству готовых решений.

1.7.2 ReSharper SDK

Для демонстрации разработанного в рамках данной работы инструмента необходимо создать на его основе конечное решение. Для этого необходимо окружение, способное обрабатывать внешний язык, так как такие операции над внешним языком, как построение дерева разбора, базовый анализ, такой как построение графа потока управления или графа потока данных, лежат за пределами рассматриваемой в данной работе задачи, и их выполнение должно осуществляться сторонними инструментами. При этом такие инструменты должны предоставлять необходимую для решения основной задачи функциональность. Кроме того, необходимо иметь удобный способ взаимодействия с пользователем: необходимо получать код для анализа и отображать результаты в виде, удобном для

пользователя. Один из самых распространённых способов работы с программным кодом — это работа в интегрированной среде разработки.

Так как реализация работы велась на платформе Microsoft .NET, то соответствующее окружение для обработки внешнего языка и организации взаимодействия с пользователем на данной платформе должно работать на данной платформе. Одной из самых известных сред разработки для платформы .NET, позволяющей создавать расширения на .NET языках, является Microsoft Visual Studio IDE⁵. Она и была выбрана в качестве цели для интеграции инструмента статического анализа строковых выражений. Однако у данной среды разработки достаточно сложный механизм создания расширений, что вызвано его универсальностью. При решении нашей задачи универсальность не требовалась, поэтому можно было бы использовать менее универсальный и более простой механизм.

Такой механизм предоставляется ReSharper SDK [46]. ReSharper [47] — расширение для Microsoft Visual Studio, предоставляющее пользователю широкий набор дополнительных анализов кода. Для разработчиков предоставляется свободно распространяемая SDK, реализующая анализы таких языков, как C#, VB.NET и др. Большая часть функциональности ReSharper выделена в свободно распространяемую SDK, что даёт возможность сторонним разработчикам создавать собственные расширения к ReSharper, переиспользуя его функциональность. В контексте данной работы это позволяет упростить создание плагинов для поддержки различных встроенных языков. Кроме того, позволяет ReSharper SDK предоставляет более удобную обёртку над многими интерфейсами Microsoft Visual Studio, что упрощает взаимодействие с ней и полезно, например, при предоставлении результатов анализа пользователю.

Кроме того, ReSharper является многоязыковым инструментом, то есть поддерживает большой набор различных языков и спроектирован так, чтобы максимально упростить поддержку новых языков. Это позволяет создавать инструменты, обрабатывающие не только различные встроенные языки, но и различные внешние.

⁵Сайт среды разработки Microsoft Visual Studio IDE (посещён 23.06.2015): <https://www.visualstudio.com/>

Среди функциональности, предоставляемой ReSharper SDK можно выделить необходимую для реализации поддержки встроенных языков в Microsoft Visual Studio.

- Дерево разбора внешнего языка (C#, JavaScript и другие, поддерживаемые ReSharper), узлы которого содержат координаты в исходном коде, что позволяет точно связывать текстовое и структурное представление кода.
- Анализ потока данных и анализ потока управления для поддерживаемых языков. На основе существующих анализов можно строить более сложные, необходимые, например, для построения регулярной аппроксимации.
- Вывод сообщений об ошибках и графическое выделение некорректных мест в текстовом редакторе.
- Взаимодействие с редактором кода, позволяющее настраивать подсветку синтаксиса, получать позицию курсора и управлять ею, что нужно для динамической подсветки парных элементов.

Таким образом ReSharper SDK и Microsoft Visual Studio IDE выбраны в качестве основы для примера разработки целевого инструмента на основе разработанного решения.

1.8 Выводы

На основе проведённого обзора можно сделать следующие выводы, обосновывающие необходимость проведения исследований в области статического анализа динамически формируемых строковых выражений.

- Проблема анализа строковых выражений актуальна в нескольких областях: поддержка встроенных языков в интегрированных средах разработки, оценка качества кода, содержащего динамически формируемые строковые выражения, реинжиниринг программного обеспечения.
- Для решения ряда важных задач необходимо структурное представление кода, однако на текущий момент не представлено законченного решения,

позволяющего строить деревья вывода для динамически формируемых выражений.

- Большинство реализаций поддерживают конкретный внешний и конкретный встроенный язык и как правило решают одну достаточно узкую задачу. При этом, зачастую, плохо расширяемы, как в смысле поддержки других языков, так и в смысле решения новых задач. Полноценные средства разработки инструментов статического анализа динамически формируемых выражений, упрощающие создание решений для новых языков, отсутствуют.

Кроме того, обзор позволяет выявить предпочтительные направления исследований, используемые методы, технологии, подходы.

- В качестве приближения множества возможных значений будет использоваться регулярная аппроксимация, так как при работе с ней ряд важных задач является разрешимым в общем случае, что не верно для контекстно-свободной. Более того, работа с регулярной аппроксимацией упрощает решение такой задачи, как лексический анализ встроенных языков.
- Лексический и синтаксический анализы должны быть разделены. Это оправдано как с теоретической, так и с практической точек зрения, так как лексический анализ не приносит потери точности и упрощается переиспользование спецификаций языков и самих анализаторов.
- В качестве основы алгоритма синтаксического анализа можно выбрать обобщённый синтаксический анализ, так как в рамках него реализовано эффективное управление множеством стеков и деревьев разбора, что важно при работе с динамически формируемыми выражениями.

Глава 2

Алгоритм синтаксического анализа регулярной аппроксимации

В данной главе будет формально описана решаемая задача синтаксического анализа динамически формируемых выражений, изложен алгоритм её решения. Также будут сформулированы и доказаны утверждения о корректности изложенного алгоритма.

2.1 Постановка задачи

Анализируемая программа \mathcal{P} является генератором выражений и таким образом задаёт некоторый язык L_1 . Предположим, что \mathcal{P} взаимодействует с базой данных с помощью динамически формируемых выражений. В этом случае мы говорим, что \mathcal{P} использует динамический SQL, подразумевая, что программой генерируются выражения на языке SQL. Однако это не совсем корректно, так как программа может, например, содержать ошибку и некоторые из построенных ей выражений не будут корректными SQL-выражениями. Таким образом, в этом случае $L_1 \neq \text{SQL}$.

С другой стороны, может быть задан эталонный язык L_2 — язык, которому должны принадлежать все выражения генерируемые программой \mathcal{P} . Как пра-

вило L_2 описывается с помощью контекстно-свободной грамматики. Например, это может быть грамматика конкретного диалекта SQL, взятая из документации.

В результате мы имеем описание двух языков и задача проверки корректности выражений, генерируемых \mathcal{P} , может быть сформулирована как проверка вложенности языка L_1 в язык L_2 . Однако в рамках данной работы нас интересует не просто вложенность языков, а построение деревьев вывода. Как уже говорилось, язык L_2 может быть задан с помощью грамматики. Пусть задана грамматика G , такая, что $L_2 = L(G)$, тогда задача синтаксического анализа динамически формируемых выражений может быть поставлена следующим образом: для всех цепочек $\omega \in L_1$, выводимых в грамматике G , построить соответствующие деревья вывода.

Отметим, что решение изложенных выше вопросов в общем виде возможно не всегда. Трудности могут быть связаны прежде всего с классами рассматриваемых языков. Эталонный язык L_2 , скорее всего, является некоторым языком программирования и принадлежит к классу контекстно-свободных языков (хотя могут быть и исключения). Генерируемый язык L_1 , вообще говоря, не обязан быть даже контекстно-зависимым. Так как программа-генератор реализована на тьюринг-полном языке, то L_1 в общем случае может быть рекурсивно-перечислимым. Из практических соображений хочется думать, что L_1 всё же является подмножеством некоторого языка программирования и может быть достаточно хорошо приближен некоторым контекстно-свободным языком. Однако проверка включения двух контекстно-свободных языков не разрешима в общем случае ???. При этом точно разрешима в общем случае проверка включения регулярного языка в однозначный контекстно-свободный ??. В однозначные КС языки попадают такие практически значимые классы, как LR(k) и LL(k), что позволяет использовать в качестве L_2 практически значимые языки. Для L_1 же необходимо строить регулярное приближение L_R .

Чтобы обеспечить надёжность анализа строковых выражений, необходимо, чтобы приближение было сверху. Нам нужна аппроксимация сверху, то есть должно выполняться включение $L_1 \subseteq L_R$. Это необходимо для того, чтобы не потерять информацию об анализируемом языке. Например, при работе со встроенным SQL безопаснее считать таблицу используемой, чем удалить её как неиспользуемую, если она на самом деле использовалась. При этом необходимо

следить за точностью такой аппроксимации, чтобы избежать слишком большого количества ошибок. В работе ?? показано, как можно строить достаточно точную регулярную аппроксимацию сверху с учётом строковых операций и циклов.

Таким образом, далее мы будем предполагать, что язык L_2 является однозначным контекстно-свободным и задан некоторой грамматикой G , а для языка L_1 строится регулярный язык L_R такой, что $L_1 \subseteq L_R$ и мы работаем далее с L_R . При этом основной нашей задачей является построение деревьев разбора для всех цепочек из L_R , корректных относительно грамматики G . Однако L_R может быть бесконечным языком и, следовательно, содержать бесконечное множество корректных цепочек. По этой причине явное построение всех деревьев разбора не представляется возможным. Решением, возможно, будет являться структура, которая при конечном объёме будет хранить бесконечное количество деревьев. При этом деревья должны однозначно извлекаться из этой структуры. То есть из построенной структуры можно получить только те и только те деревья, которые соответствуют разбору какой-либо корректной цепочки из L_R языка в эталонной грамматике G .

Регулярный язык L_R может быть представлен в виде конечного автомата. Заметим, что непосредственно построенная аппроксимация будет являться конечным автоматом $M_1 = (Q_1, \Sigma_1, \delta_1, q_{0_1}, q_{f_1})$ над алфавитом символов, что не очень удобно для проведения синтаксического анализа, так как грамматика $G = \langle T, N, P, S \rangle$ задана, скорее всего, над алфавитом токенов, не равным алфавиту символов. То есть $\Sigma_1 \neq T$. Чтобы устранить эту проблему можно воспользоваться конечным преобразователем (FST), который предназначен для трансформации языков. Таким образом, можно получить конечный автомат $M_2 = (Q_2, \Sigma_2, \delta_2, q_{0_2}, q_{f_2})$ такой, что $\Sigma_2 \subseteq T$. Такой переход является лексическим анализом регулярной аппроксимации или встроенного языка.

Заметим так же, что без потери общности можно считать, что M_2 является детерминированным конечным автоматом без ε -переходов, так как любой конечный автомат можно преобразовать к эквивалентному детерминированному без ε -переходов.

Таким образом, решаемая в данной работе задача синтаксического анализа динамически формируемых выражений будет формулироваться следующим образом. *Для данной однозначной контекстно-свободной грамматики*

$G = \langle T, N, P, S \rangle$ и детерминированного конечного автомата без ε -переходов $M_2 = (Q, \Sigma, \delta, q_0, q_f)$ такого, что $\Sigma \subseteq T$, необходимо построить конечную структуру данных F , содержащую деревья вывода в G всех цепочек $\omega \in L(M)$, корректных относительно грамматики G , и не содержащую других деревьев. Иными словами, надо построить алгоритм \mathbb{P} такой, что

$$(\forall \omega \in L(M))(\omega \in L(G) \Rightarrow (\exists t \in \mathbb{P}(L(M), G))AST(t, \omega, G))$$

$$\wedge (\forall t \in \mathbb{P}(L(M), G))(\exists \omega \in L(M))AST(t, \omega, G)$$

, где $AST(t, \omega, G)$ — это предикат, который истинен, если t является деревом вывода ω в грамматике G .

Так как \mathbb{P} игнорирует ошибки, то будем называть его алгоритмом *ослабленного* синтаксического анализа регулярной аппроксимации динамически формируемого выражения.

2.2 Описание алгоритма

Алгоритм принимает на вход эталонную однозначную контекстно-свободную грамматику $G = \langle T, N, P, S \rangle$ над алфавитом терминальных символов T и детерминированный конечный автомат $(Q, \Sigma, \delta, q_0, q_f)$, имеющий одно стартовое состояние q_0 , одно конечное состояние q_f , без ε -переходов, где $\Sigma \subseteq T$ — алфавит входных символов, Q — множество состояний, δ — отношение перехода. По описанию грамматики генерируются управляющие RNGLR-таблицы и некоторая вспомогательная информация (называемая *parserSource* в псевдокоде).

Алгоритм производит обход графа входного автомата и последовательно строит GSS способом, аналогичным используемому в RNGLR-алгоритме. Однако так как мы имеем дело с графом вместо линейного потока, понятие следующего символа трансформируется во *множество терминальных символов*, лежащих на всех исходящих рёбрах данной вершины, что несколько изменяет операции *shift* и *reduce* (смотри строку 5 в алгоритме 4 и строки 9 и 21 в алгоритме 5). Для того чтобы управлять порядком обработки вершин входного графа, мы используем глобальную очередь \mathcal{Q} . Каждый раз, когда добавляется новая вершина GSS, сначала необходимо произвести все свёртки длины 0, после

Algorithm 3 Алгоритм ослабленного синтаксического анализа регулярной аппроксимации динамически формируемого выражения

```

1: function PARSE(grammar, automaton)
2:   inputGraph  $\leftarrow$  construct inner graph representation of automaton
3:   parserSource  $\leftarrow$  generate RNGLR parse tables for grammar
4:   if inputGraph contains no edges then
5:     if parserSource accepts empty input then report success
6:     else report failure
7:   else
8:     ADDVERTEX(inputGraph.startVertex, startState)
9:     Q.Enqueue(inputGraph.startVertex)
10:    while Q is not empty do
11:      v  $\leftarrow$  Q.Dequeue()
12:      MAKEREDUCTIONS(v)
13:      PUSH(v)
14:      APPLYPASSINGREDUCTIONS(v)
15:      if  $\exists v_f : v_f.level = q_f$  and vf.state is accepting then report success
16:      else report failure

```

чего выполнить сдвиг следующих токенов со входа. Таким образом необходимо добавить соответствующую вершину графа в очередь на обработку. Добавление нового ребра GSS может порождать новые свёртки, таким образом в очередь на обработку необходимо добавить вершину входного графа, которой соответствует начальная вершина добавленного ребра. Детальное описание процесса построения GSS приведено в алгоритме 3. Свёртки производятся вдоль путей в GSS, и если было добавлено ребро, начальная вершина которого ранее присутствовала в GSS, необходимо заново вычислить проходящие через эту вершину свертки (смотри функцию `applyPassingReductions` в алгоритме 4).

Algorithm 4 Обработка вершины внутреннего графа

```

1: function PUSH(innerGraphV)
2:    $\mathcal{U} \leftarrow \text{copy } innerGraphV.unprocessed$ 
3:   clear innerGraphV.unprocessed
4:   for all  $v_h$  in  $\mathcal{U}$  do
5:     for all  $e$  in outgoing edges of innerGraphV do
6:        $push \leftarrow \text{calculate next state by } v_h.state \text{ and the token on } e$ 
7:       ADDEDGE( $v_h, e.Head, push, false$ )
8:       add  $v_h$  in innerGraphV.processed
9: function MAKEREDUCTIONS(innerGraphV)
10:  while innerGraphV.reductions is not empty do
11:     $(startV, N, l) \leftarrow innerGraphV.reductions.Dequeue()$ 
12:    find the set of vertices  $\mathcal{X}$  reachable from startV
13:    along the path of length  $(l - 1)$ , or 0 if  $l = 0$ ;
14:    add  $(startV, N, l - i)$  in v.passingReductions,
15:    where  $v$  is an  $i$ -th vertex of the path
16:    for all  $v_h$  in  $\mathcal{X}$  do
17:       $state_t \leftarrow \text{calculate new state by } v_h.state \text{ and nonterminal } N$ 
18:      ADDEDGE( $v_h, startV, state_t, (l = 0)$ )
19: function APPLYPASSINGREDUCTIONS(innerGraphV)
20:  for all  $(v, edge)$  in innerGraphV.passingReductionsToHandle do
21:    for all  $(startV, N, l) \leftarrow v.passingReductions.Dequeue()$  do
22:      find the set of vertices  $\mathcal{X}$ ,
23:      reachable from edge along the path of length  $(l - 1)$ 
24:      for all  $v_h$  in  $\mathcal{X}$  do
25:         $state_t \leftarrow \text{calculate new state by } v_h.state \text{ and nonterminal } N$ 
26:        ADDEDGE( $v_h, startV, state_t, false$ )

```

Так же как и RNGLR, мы ассоциируем вершины GSS с позициями входного графа, однако в нашем случае уровень вершины — это состояние входного автомата. Мы строим внутреннюю структуру данных (в дальнейшем изложении называемую *внутренним графом*) посредством копирования графа входного автомата и связывания с его вершинами следующих коллекций.

- *processed*: вершины GSS, для которых ранее были вычислены все операции push. Это множество агрегирует все вершины GSS, ассоциированные с вершиной внутреннего графа.
- *unprocessed*: вершины GSS, операции push для которых ещё только предстоит выполнить. Это множество аналогично множеству \mathcal{Q} алгоритма RNGLR.
- *reductions*: очередь, аналогичная очереди \mathcal{R} RNGLR-алгоритма: все операции reduce, которые ещё только предстоит выполнить.
- *passingReductionsToHandle*: пары из вершины GSS и ребра GSS, вдоль которых необходимо осуществлять проходящие свёртки.

Algorithm 5 Построение GSS

```

1: function ADDVERTEX(innerGraphV, state)
2:    $v \leftarrow$  find a vertex with  $state = state$  in
3:      $innerGraphV.processed \cup innerGraphV.unprocessed$ 
4:   if  $v$  is not null then ▷ Вершина была найдена в GSS
5:     return ( $v$ , false)
6:   else
7:      $v \leftarrow$  create new vertex for innerGraphV with  $state$  state
8:     add  $v$  in innerGraphV.unprocessed
9:     for all  $e$  in outgoing edges of innerGraphV do
10:       calculate the set of zero-reductions by  $v$ 
11:       and the token on  $e$  and add them in innerGraphV.reductions
12:     return ( $v$ , true)
13: function ADDEDGE( $v_h$ , innerGraphV,  $state_t$ , isZeroReduction)
14:   ( $v_t$ , isNew)  $\leftarrow$  ADDVERTEX(innerGraphV,  $state_t$ )
15:   if GSS does not contain edge from  $v_t$  to  $v_h$  then
16:      $edge \leftarrow$  create new edge from  $v_t$  to  $v_h$ 
17:      $\mathcal{Q}.Enqueue(innerGraphV)$ 
18:     if not isNew and  $v_t.passingReductions.Count > 0$  then
19:       add ( $v_t$ ,  $edge$ ) in innerGraphV.passingReductionsToHandle
20:     if not isZeroReduction then
21:       for all  $e$  in outgoing edges of innerGraphV do
22:         calculate the set of reductions by  $v$ 
23:         and the token on  $e$  and add them in innerGraphV.reductions

```

Помимо состояния анализатора *state* и уровня *level* (который совпадает с состоянием входного автомата), в вершине GSS хранится коллекция *проходящих свёрток*. Проходящая свёртка — это тройка $(startV, N, l)$, соответствующая свёртке, чей путь содержит данную вершину GSS. Аналогичная тройка используется в RNGLR-алгоритме для описания свёртки, но в данном случае l обозначает длину оставшейся части пути. Проходящие свёртки сохраняются в каждой вершине пути (кроме первой и последней) во время поиска путей в функции *makeReductions* (см. алгоритм 4).

2.3 Построение компактного представления леса разбора

В качестве компактного представления леса разбора всех корректных выражений из множества значений динамически формируемого выражения используется граф SPPF. Построение компактного представления осуществляется одновременно с синтаксическим разбором во время построения графа стеков GSS, так же как и в алгоритме RNGLR.

С каждым ребром GSS ассоциируется список лесов разбора фрагмента выражения. В графе GSS нет кратных рёбер, поэтому если во время работы функции *addEdge* в нем было найдено добавляемое ребро, то с ним ассоциируется новый лес разбора, при этом в очередь на обработку не добавляется никаких вершин входного графа.

При добавлении в GSS ребра, соответствующего считанной со входа лексеме, создаётся (и ассоциируется с ним) граф из одной терминальной вершины. Так как входной автомат является детерминированным, с ребром GSS ассоциируется не более одного такого графа.

При обработке свёртки алгоритм осуществляет поиск всех путей в графе GSS заданной длины, после чего происходит добавление в GSS новых ребер, соответствующих данной свёртке. С каждым таким ребром ассоциируется лес, имеющий в качестве корня (вершины, у которой нет входных рёбер) вершину, соответствующую нетерминалу, к которому осуществлялась свёртка. Ребра каждого из найденных путей, перечисленные в обратном порядке, образуют правую часть некоторого правила грамматики, по которому осуществляется свёртка. Для каждого пути создаётся вершина, помеченная номером такого правила, и добавляется в лес как непосредственно достижимая из корня. Каждое ребро пути ассоциировано со списком лесов вывода символа из правой части правила. Непосредственно достижимыми вершинами вершины-правила становятся ссылки на такие списки, за счёт чего осуществляется переиспользование фрагментов леса.

В алгоритме RNGLR наличие нескольких путей, вдоль которых осуществляется свёртка к нетерминалу, означает существование более чем одного варианта вывода нетерминала. В нашем случае данная ситуация соответствует различ-

ным фрагментам нескольких выражений из входного регулярного множества, которые сворачиваются к одному нетерминалу.

В конце работы алгоритма осуществляется поиск ребер GSS, для каждого из которых верно, что конечная вершина имеет уровень, равный финальному состоянию входного автомата, и принимающее состояние (accepting state). Результирующее представление леса разбора получается путём удаления недостижимых вершин из графа, созданного объединением лесов разбора, ассоциированных с найденными рёбрами GSS.

Рассмотрим фрагмент кода, представленный в листинге 9, который динамически формирует выражение `expr` в строке 4.

```

1  string expr = "" ;
2  for(int i = 0; i < len; i++)
3  {
4      expr = "()" + expr;
5  }

```

Listing 9: Пример кода на языке программирования C#, динамически формирующего скобочную последовательность

Множество значений выражения **expr** аппроксимируется регулярным выражением $(LBR\ RBR)^*$, где LBR соответствует открывающейся скобке, а RBR — закрывающейся. Граф конечного автомата, задающего такую аппроксимацию, изображён на рисунке 2.1.

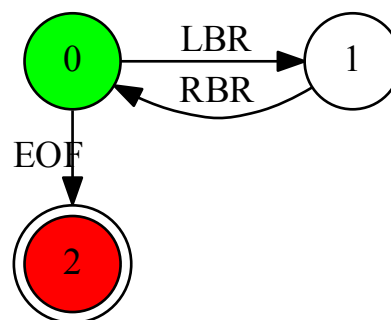


Рисунок 2.1: Конечный автомат, задающий регулярную аппроксимацию выражения **expr**

В результате работы предложенного алгоритма будет получено конечное представление леса разбора SPPF, изображённое на рисунке 2.2.

Из построенного SPPF можно извлечь бесконечное количество деревьев, каждое из которых является деревом вывода некоторой цепочки из регулярной

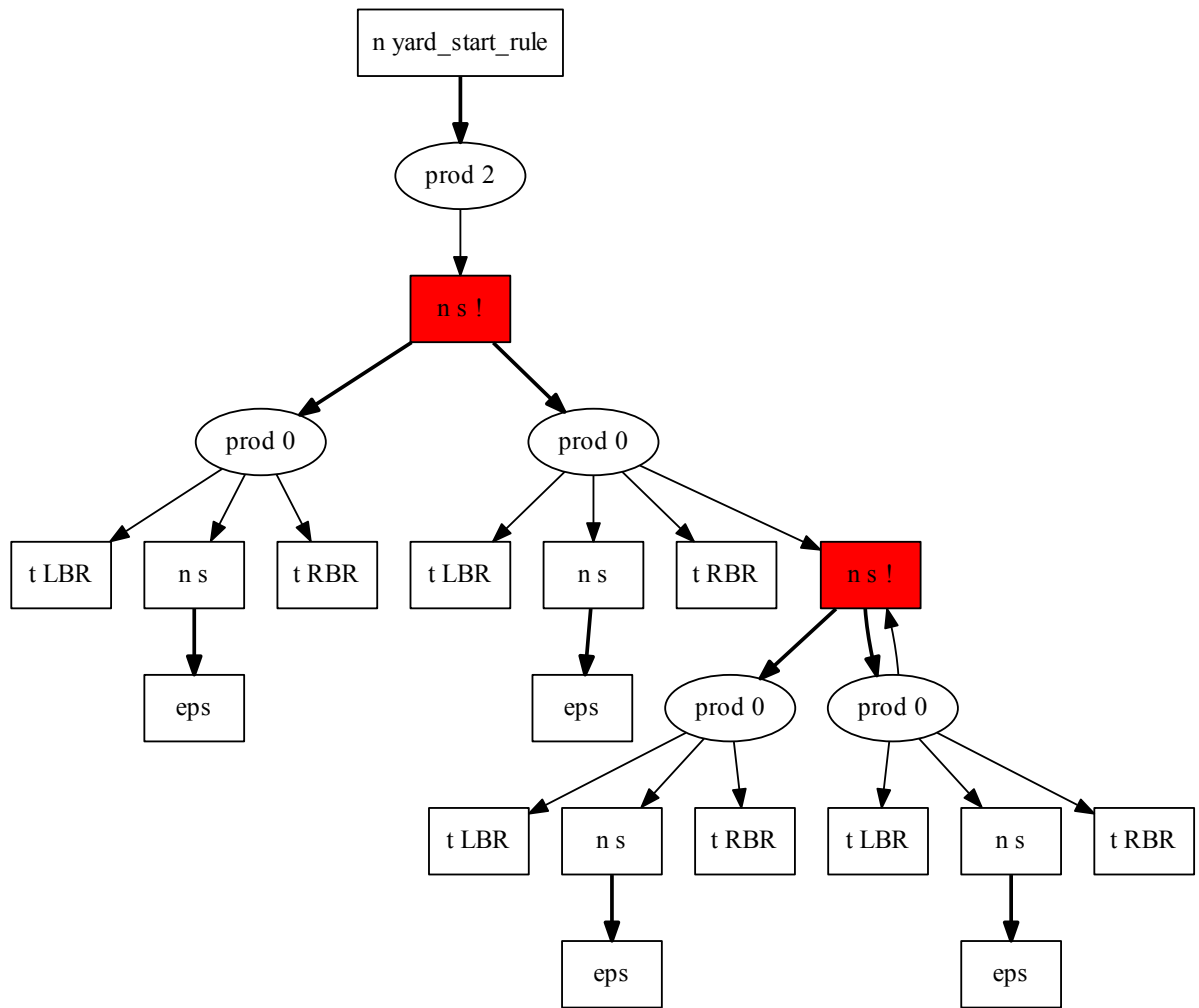


Рисунок 2.2: Конечное представление леса разбора для выражения **expr**

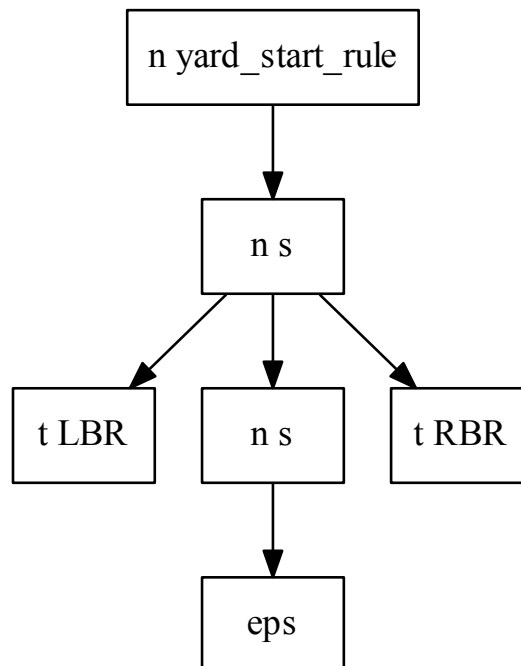


Рисунок 2.3: Дерево вывода для выражения $expr = "()"$

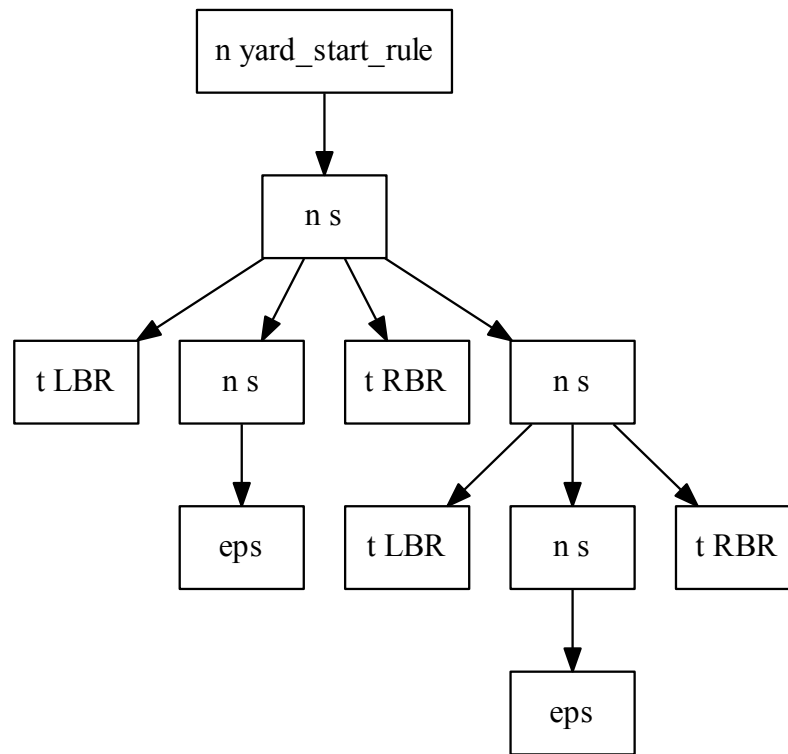


Рисунок 2.4: Дерево вывода для выражения $expr = "()"$

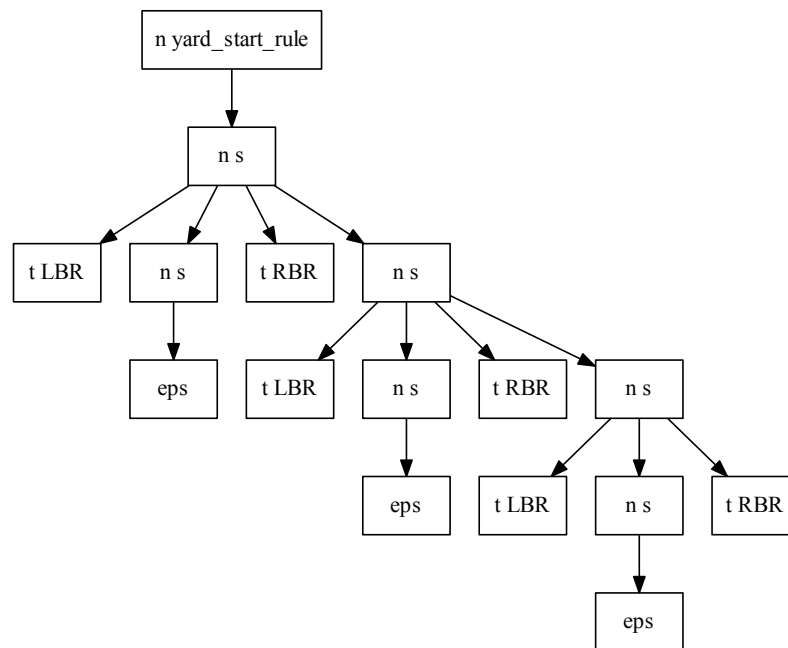


Рисунок 2.5: Дерево вывода для выражения $expr = "()()()"$

аппроксимации. На серии рисунков ?? представлены извлечённые деревья разбора для различных значений выражения **expr**.

Глава 3

Доказательство корректности алгоритма

ТЕОРЕМА 1. *Алгоритм завершает работу для любых входных данных.*

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. С каждой вершиной внутреннего представления графа входного конечного автомата ассоциировано не более N вершин графа GSS, где N — количество состояний синтаксического анализатора. Таким образом, количество вершин в графе GSS ограничено сверху числом $N \times n$, где n — количество вершин графа входного автомата. Так как в GSS нет кратных ребер, количество его ребер — $O((N \times n)^2)$. На каждой итерации основного цикла алгоритм извлекает из очереди Q и обрабатывает одну вершину внутреннего графа. Вершины добавляются в очередь Q , только когда происходит добавление нового ребра в GSS. Так как количество ребер в GSS конечно, алгоритм завершает работу для любых входных данных. \square

Для того чтобы доказать корректность построения конечного представления леса разбора, нам потребуется следующее определение.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1. *Корректное дерево* — это упорядоченное дерево со следующими свойствами.

1. Корень дерева соответствует стартовому нетерминалу грамматики G .
2. Листья соответствуют терминалам грамматики G . Упорядоченная последовательность листьев соответствует некоторому пути во входном графе.

3. Внутренние узлы соответствуют нетерминалам грамматики G . Дети внутреннего узла (для нетерминала N) соответствуют символам правой части некоторой продукции для N в грамматике G .

Неформально корректное дерево — это дерево вывода некоторой цепочки из регулярного множества в эталонной грамматике. Далее нам необходимо доказать, во-первых, что конечное представление леса разбора SPPF содержит только корректные деревья, и во-вторых, что для каждой корректной относительно эталонной грамматики цепочки существует корректное дерево вывода в SPPF.

ЛЕММА. *Для каждого ребра $GSS(v_t, v_h)$ такого, что $v_t \in V_t.processed$, $v_h \in V_h.processed$, терминалы ассоциированного поддеревья соответствуют некоторому пути во входном графе из вершины V_h в V_t .*

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Будем строить доказательство при помощи индукции по высоте дерева вывода. База — это минимальное дерево: либо ϵ -дерево, либо дерево, состоящее из единственной вершины-терминала.

- ϵ -дерево соответствует пути длины 0; начальная и конечная вершины ребра, соответствующего такому дереву, совпадают, поэтому утверждение верно.
- Дерево, состоящее из одной вершины, соответствует терминалу, считанному с некоторого ребра (V_h, V_t) внутреннего графа, поэтому утверждение верно.

Корнем дерева высоты k является некий нетерминал N . По третьему пункту определения корректного дерева существует некоторое правило эталонной грамматики $N \rightarrow A_0, A_1, \dots, A_n$, где A_0, A_1, \dots, A_n являются детьми корневого узла. Поддерево A_i ассоциировано с ребром (v_t^i, v_h^i) графа GSS и, так как его высота равна $k - 1$, то по индукционному предположению существует путь во внутреннем графе из вершины V_h^i в вершину V_t^i . Вершина $V_t^i = V_h^{i+1}$, так как $v_t^i = v_h^{i+1}$, поэтому во внутреннем графе существует путь из вершины V_h^0 в вершину V_t^n , соответствующий рассматриваемому корректному дереву. \square

ТЕОРЕМА 2. *Любое дерево, извлечённое из SPPF, является корректным.*

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Рассмотрим произвольное извлечённое из SPPF дерево и докажем, что оно удовлетворяет определению 1. Первый и третий пункт опреде-

ления корректного дерева следует из определения SPPF. Второй пункт определения следует из ЛЕММЫ, если применить её к рёбрам GSS, начало которых лежит на последнем уровне стека и помечено принимающим состоянием, а конец — в вершинах на уровне 0. \square

ТЕОРЕМА 3. *Для каждой корректной относительно эталонной грамматики строки, соответствующей пути p во входном графе, из SPPF может быть порождено корректное дерево, соответствующее пути p .*

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Рассмотрим произвольное корректное дерево и докажем, что оно может быть извлечено из SPPF. Доказательство повторяет доказательство корректности для RNGLR-алгоритма, за исключением следующей ситуации. RNGLR-алгоритм строит граф GSS по слоям: гарантируется, что $\forall j \in [0..i-1]$, j -ый уровень GSS будет зафиксирован на момент построения i -ого уровня. В нашем случае это свойство не верно, что может приводить к появлению новых путей для свёрток, которые уже были ранее обработаны. Единственный возможный способ образования такого нового пути — это добавление ребра (v_t, v_h) , где вершина v_t ранее присутствовала в GSS и имела входящие ребра. Так как алгоритм сохраняет информацию о том, какие свёртки проходили через вершины GSS, то достаточно продолжить свёртки, проходящие через вершину v_t . Для выполнения данной операции реализована функция *applyPassingReductions*. \square

ЗАМЕЧАНИЕ. Построение леса разбора осуществляется одновременно с построением GSS, при этом дерево вывода нетерминала связывается с ребром GSS каждый раз при обработке соответствующей свёртки, вне зависимости от того, было ли ребро в графе до этого или добавлено на данном шаге. Это обстоятельство позволяет утверждать, что если все возможные редукции были выполнены, то и лес разбора содержит все деревья для всех корректных цепочек из аппроксимации.

Глава 4

Инструментальный пакет

В данной главе описан инструментальный пакет, предназначенный для разработки различных решений по статическому анализу динамически формируемых выражений. Представлена архитектура разработанного инструментария, архитектура обёртки, позволяющей создавать расширения для ReSharper, предоставляющие поддержку встроенных языков. Также приведён пример конкретного расширения для ReSharper, реализованного в рамках апробации. Изложенный выше алгоритм синтаксического анализа реализован в рамках одной из компонент инструментария.

4.1 Архитектура

Практически любой язык программирования может оказаться встроенным. Даже если рассматривать только SQL, то окажется, что у него множество различных диалектов, каждый из которых имеет свои особенности. Внешним языком также может быть любой язык программирования. Трудность заключается в том, что любое из сочетаний внешнего и встроенного языка может встретиться на практике, и задачи, которые необходимо для него решать, могут быть различными (поиск ошибок, подсчёт метрик, автоматизация трансформаций и т.д.). Реализовать универсальный инструмент, решающий все задачи для всех языков, не представляется возможным и в связи с этим необходимо создать набор инструментов, упрощающий создание конечных решений для конкретных языков и конкретных задач. В качестве примера можно рассмотреть инструментарию для

разработки компиляторов, которые включают в себя генераторы лексических, синтаксических анализаторов и набор библиотек с вспомогательными функциями, и тем самым упрощают создание конкретного компилятора для выбранного языка и целевой платформы.

Создаваемый набор инструментов должен поддерживать весь процесс обработки кода со встроенными языками, который может выглядеть так, как представлено на рисунке 4.1. Можно выделить следующие основные шаги.

- Анализ основного кода, который выполняется сторонним инструментом. Результат этого шага — это дерево разбора с информацией, достаточной для выполнения дальнейших шагов.
- Построение аппроксимации множества возможных значений динамически формируемых выражений.
- Лексический анализ построенной на предыдущем шаге аппроксимации.
- Синтаксический анализ, результатом которого является лес разбора, пригодный для дальнейшей обработки.
- Обработка леса разбора, вычисление семантики.

На каждом шаге может быть получена информация, полезная для пользователя, такая как список ошибок, и её необходимо вернуть и отобразить соответствующим образом.

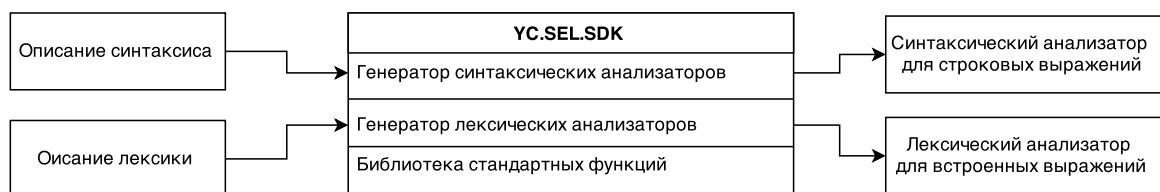


Рисунок 4.1: Диаграмма последовательности обработки встроенных языков

Так как анализ внешнего языка является большой самостоятельной задачей, то в рамках разработанного инструментария делается предположение, что такой анализ производится внешними инструментами. Предполагаем, что на вход можно получить дерево разбора внешнего языка с информацией, достаточной

для решения поставленных в данной работе задач. Таким образом, первый шаг, выполнение которого необходимо обеспечить, — это построение аппроксимации. В нашем случае строится регулярное приближение множества значений динамически формируемого выражения.

Для того чтобы упростить процесс создания конечных инструментов, создан пакет, одной из компонент которого является генератор синтаксических анализаторов на основе предложенного алгоритма. Также в него входит генератор лексических анализаторов, библиотека построения регулярной аппроксимации, набор вспомогательных функций.

Существующие инструменты для работы со встроенными языками реализуют поддержку какого-то одного конкретного языка, или поддержка нового языка может потребовать нетривиального ручного вмешательства. Чтобы получить поддержку встроенного языка без изменений в исходном коде инструмента, необходимо предоставить механизм для простой реализации поддержки нового языка и интеграции его в систему. Подобный механизм будет описан далее.

4.1.1 Архитектура SDK

Разработанный инструментальный пакет (SDK) включает компоненты, необходимые для реализации шагов, представленных на рисунке 4.1 и описанных ранее, за исключением анализа внешнего языка. Архитектура SDK изображена на рисунке 4.2 и включает в себя генераторы анализаторов и различные библиотеки времени исполнения.

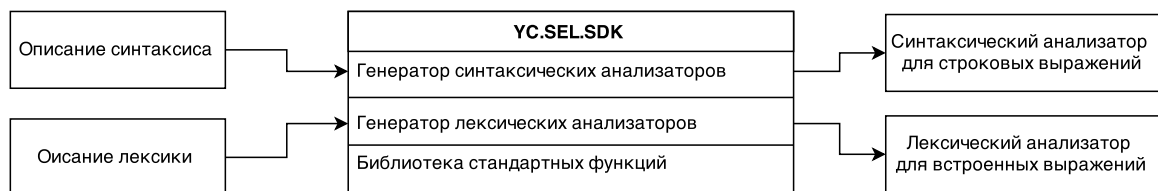


Рисунок 4.2: Архитектура SDK целиком

Построение регулярной аппроксимации основано на алгоритме, изложенном в работе [?], который позволяет строить приближение сверху для множества значений выражений. То есть L_R , задаваемый регулярным приближением, не меньше, чем L_1 , задаваемый программой (выполняется включение $L_R \in L_1$).

Это позволяет говорить о надёжности дальнейших анализов в том смысле, что они не теряют информации о L_1 . Например, это важно при поиске ошибок. Если в L_R не обнаружено ошибок (то есть $L_R \in L_2$, где L_2 — эталонный), значит и в L_1 ошибок нет. При этом могут быть найдены ошибки в L_R , которых нет в L_1 , то есть будут ложные срабатывания. Однако наличие ложных срабатываний лучше, чем пропущенные ошибки, и их количество может быть уменьшено путём повышения точности аппроксимации.

Для того чтобы сделать построение приближения независимым от внешнего языка, реализовано обобщённое представление графа потока управления (Control Flow Graph, CFG) ??, которое содержит всю необходимую для дальнейшей работы информацию. Таким образом, разработчику необходимо реализовать построение обобщённого представления CFG для конкретного внешнего языка. В результате компонента строит конечный автомат, являющийся приближением множества значений динамически формируемых выражений.

Компонента, отвечающая за **лексический анализ**, состоит из двух частей: генератора лексических анализаторов, который по описанию лексики обрабатываемого языка строит соответствующий конечный преобразователь, и интерпретатора, который производит анализ входной структуры данных на основе построенного генератором преобразователя. Архитектура компоненты представлена на рисунке 4.3. На вход принимается конечный автомат над символами, результатом работы является конечный автомат над алфавитом токенов анализируемого языка.

Лексический анализатор реализован на основе инструмента FsLex, который является стандартным генератором лексических анализаторов для языка F#. Переиспользован язык описания лексики и некоторые структуры данных.

Реализованный генератор лексических анализаторов обладает следующими особенностями.

- Поддерживаются разрывные токены, то есть ситуации, когда одна лексическая единица формируется из нескольких строковых литералов.
- Сохраняется привязка лексических единиц к исходному коду: сохраняется информация о строковом литерале, из которого породился токен и координаты его внутри этой строки. Так как одна лексическая единица может

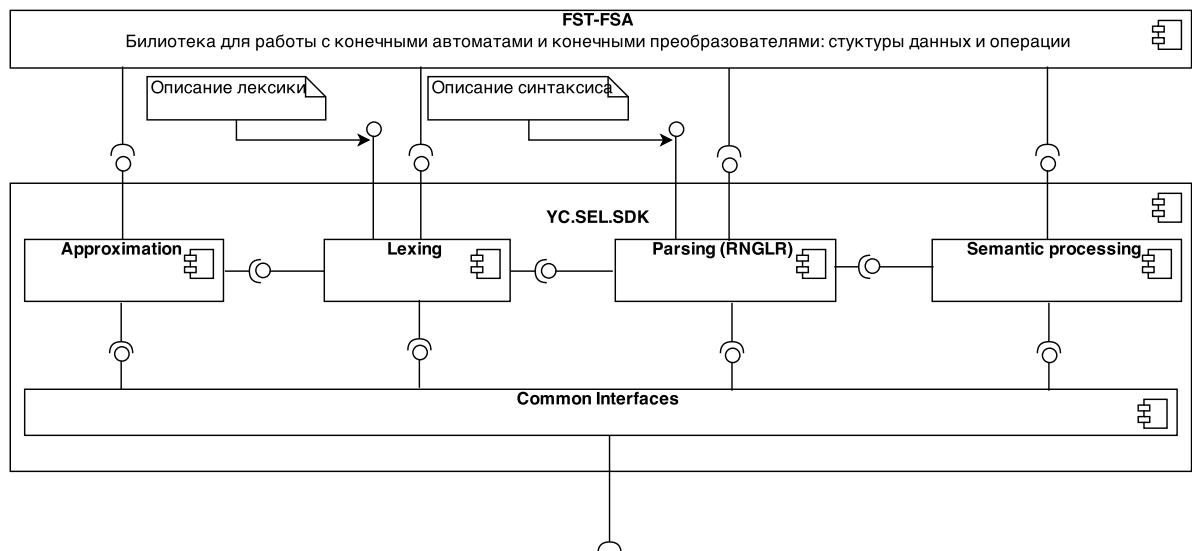


Рисунок 4.3: Архитектура лексического анализатора

формироваться из нескольких строковых литералов, то привязка сохраняется отдельно для каждой части.

- Поддерживается обработка входных конечных автоматов, содержащих циклы.
- Так как значение токена может формироваться с помощью цикла и, как следствие, быть бесконечным, то каждый токен содержит конечный автомат, порождающий все возможные значения для данного токена, а не единственное значение, как это реализовано в классическом лексическом анализе.

Генератор синтаксических анализаторов реализован на основе алгоритма, описанного в разделе ???. Его архитектура представлена на рисунке 4.4.

По грамматике обрабатываемого языка строятся управляющие таблицы анализатора. Далее анализатор, реализованный в виде отдельной библиотеки, обрабатывает конечный автомат, полученный после лексического анализа. В результате будет получен SPPF, который может быть использован для дальнейшей обработки (например, подсчёта метрик). Для упрощения работы с SPPF реализован ряд вспомогательных функций.

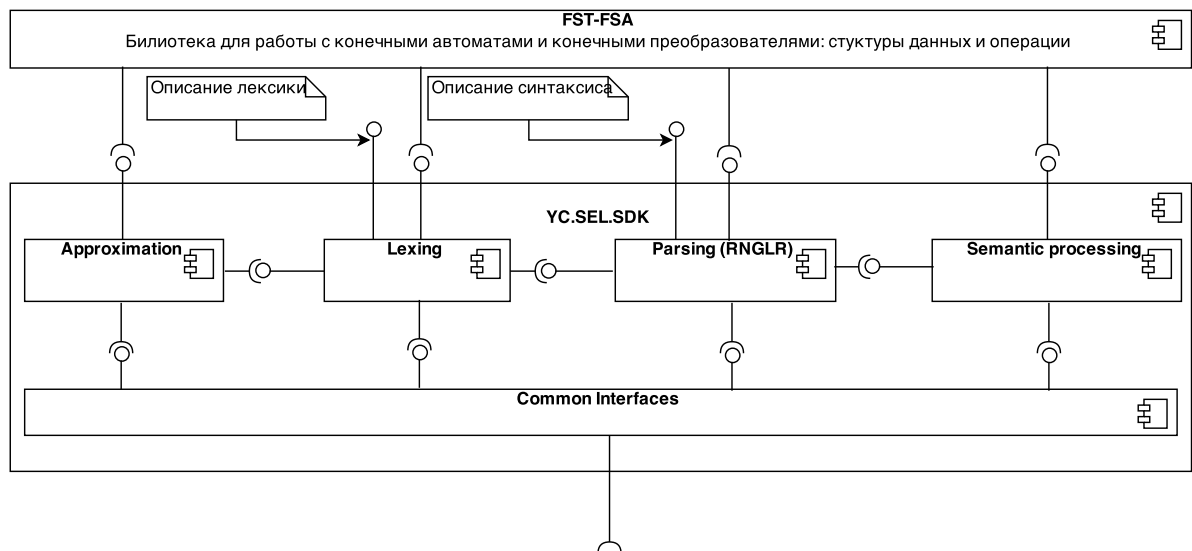


Рисунок 4.4: Архитектура синтаксического анализатора

4.1.2 Архитектура расширения для ReSharper

ReSharper — это расширение к Microsoft Visual Studio IDE, предоставляющее широкий спектр дополнительной функциональности по анализу и рефакторингу кода. ReSharper поддерживает несколько языков, например C#, Visual Basic .NET, JavaScript, и этот список может быть расширен благодаря наличию свободно распространяемого ReSharper SDK, описание которого было представлено ранее в разделе ???. SDK позволяет получить деревья разбора для поддерживаемых языков, предоставляет набор готовых анализов и упрощает взаимодействие с Microsoft Visual Studio IDE и её компонентами. Более того, предоставляется возможность разработки собственных расширений для ReSharper на основе SDK.

Microsoft Visual Studio является достаточно распространённой средой разработки, но не поддерживает встроенные языки, поэтому было решено разработать ряд расширений к ReSharper с использованием разработанного инструментария, которые будут устранять данный недостаток.

Стоит отметить, что не ставилось задачи поддержать все встроенные языки, так как встроенным может быть любой язык программирования. Также не было необходимости поддерживать все внешние языки программирования. Необходимо на базе разработанного инструментария создать инфраструктуру, позволяющую реализовывать поддержку новых встроенных языков в Microsoft Visual Studio

через расширения к ReSharper и реализовать несколько расширений, демонстрирующих возможности созданной инфраструктуры.

Так как необходимо поддерживать различные языки, то необходимо обеспечить расширяемость по языкам. Классический подход к решению такой задачи для интегрированных сред разработки заключается в том, что поддержка нового языка реализуется в виде независимой компоненты. Если пользователь хочет получить поддержку какого-либо языка в своей среде разработки, то он должен установить соответствующий пакет. При этом поддержка различных языков осуществляется независимо, однако часто выделяется общая функциональность, которая может быть оформлена в виде отдельного пакета.

Для предоставления описанных выше возможностей была реализована обёртка над основным SDK, упрощающая создание расширений для ReSharper. Её архитектура представлена на рисунке 4.5.

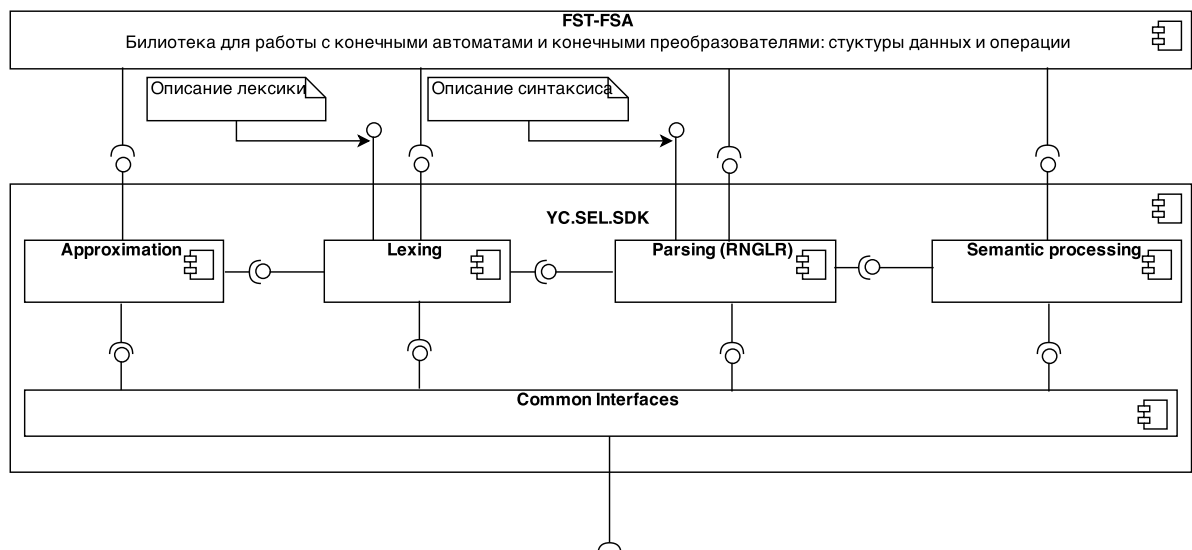


Рисунок 4.5: Архитектура инфраструктуры

Встроенными могут быть различные языки, и учесть заранее все их особенности не представляется возможным. Кроме того, даже при использовании одного встроенного языка могут использоваться различные способы выполнения сформированного запроса. Таким образом, необходимо предоставлять возможность настройки плагинов конечным пользователем. Была реализована возможность управления следующими основными параметрами.

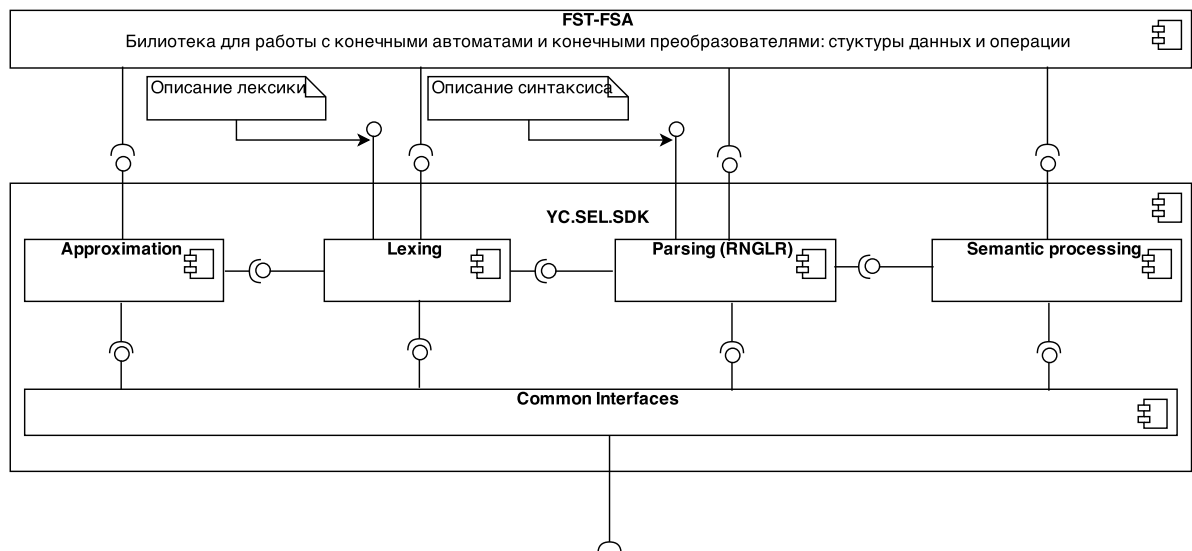


Рисунок 4.6: Архитектура конкретного плагина

- Подсветка синтаксиса для каждого языка. Предоставлена возможность указать цвет для каждого типа токена.
- Указание парных элементов. Для каждого языка можно указать, какие лексические единицы считать парными: для каждой пары указывается “левый” (открывающая скобка) и “правый” (закрывающая скобка) элементы. При расположении курсора в тексте рядом с одним из элементов пары будут подсвечены соответствующие элементы. Пример подсветки парных элементов приведён на рисунке ??
- **Точки интереса** или хотспоты (hotspot) — это места, в которых должно быть сформировано финальное выражение. Необходимо знать, какой хотспот какому языку соответствует. При этом нужно учитывать, что одному языку может соответствовать несколько хотспотов. Например, динамически сформированный SQL-запрос в программе на языке программирования C# может быть выполнен с помощью метода `ExecuteQuery` класса `DataContext` ¹ или же текст запроса может быть передан как аргумент конструктора класса `SqlCommand` ² с последующим выполнением с помощью метода `ExecuteReader`.

¹Документация метода **ExecuteQuery** (посещено !!!): [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/system.data.linq.datacontext.executequery\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/system.data.linq.datacontext.executequery(v=vs.110).aspx)

²Документация класса **SqlCommand** (посещено !!!): [https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/sebfsz50\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/sebfsz50(v=vs.110).aspx)

Настройка указанных выше параметров хранится в соответствующих конфигурационных файлах в формате XML, которые на данный момент редактируются вручную. Настройка подсветки синтаксиса и парных элементов совмещена в одном файле и для каждого языка создаётся отдельный такой файл. Конфигурационный файл с точками интереса является общим для всех языков и, соответственно, для всех установленных расширений для поддержки встроенных языков.

В листинге 10 приведён пример конфигурации подсветки синтаксиса и парных скобок для языка Calc. Для указания цвета используются имена, принятые в ReSharper (например "CONSTANT_IDENTIFIER_ATTRIBUTE"), что должно сделать настройку цветов более единообразной. В xml-тэге `Matched` содержится описание парных элементов. Каждая пара описывается в xml-тэге `Pair` и для одного языка может быть указано более одной такой пары.

```

1 <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2 <SyntaxDefinition name="CalcHighlighting">
3     <Colors>
4         <Tokens color="CONSTANT_IDENTIFIER_ATTRIBUTE">
5             <Token> DIV </Token>
6             <Token> LBRACE </Token>
7             <Token> MINUS </Token>
8             <Token> MULT </Token>
9             <Token> NUMBER </Token>
10            <Token> PLUS </Token>
11            <Token> POW </Token>
12            <Token> RBRACE </Token>
13        </Tokens>
14    </Colors>
15    <!-- Dynamic highlighting: -->
16    <Matched>
17        <Pair>
18            <Left> LBRACE </Left>
19            <Right> RBRACE </Right>
20        </Pair>
21    <!-- You can specify more then one pair:
22        <Pair>
23            <Left> LEFT_SQUARE_BRACKET </Left>
24            <Right> RIGHT_SQUARE_BRACKET </Right>
25        </Pair>
26        <Pair>
27            <Left> LEFT_FIGURE_BRACKET </Left>
28            <Right> LEFT_FIGURE_BRACKET </Right>
29        </Pair>
30    -->
31    </Matched>
32 </SyntaxDefinition>

```

Listing 10: Пример конфигурационного файла для настройки подсветки синтаксиса

Листинг 11 содержит пример описания точек интереса. Для каждой точки интереса должна быть указана следующая информация.

- Какому встроенному языку соответствует точка. Тэг `Language`.

- Полное имя метода, являющегося точкой интереса. Тэг Method.
- Порядковый номер аргумента данного метода, являющегося выражением на встроенном языке. Нумерация начинается с нуля. Тэг ArgumentPosition.
- Возвращаемый тип метода. Тэг ReturnType.

```

1 <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2 <!-- comment about body -->
3 <Body>
4     <!-- comment about hotspot -->
5     <Hotspot>
6         <!-- comment about tsql -->
7         <Language> TSQL </Language>
8         <!-- comment about fullName -->
9         <Method>Program.ExecuteImmediate</Method>
10        <!-- zero-based -->
11        <ArgumentPosition> 0 </ArgumentPosition>
12        <!-- comment about return type -->
13        <ReturnType> void </ReturnType>
14    </Hotspot>
15    <Hotspot>
16        <Language> Calc </Language>
17        <Method>Program.Eval</Method>
18        <ArgumentPosition> 0 </ArgumentPosition>
19        <ReturnType> int </ReturnType>
20    </Hotspot>
21 </Body>

```

Listing 11: Пример конфигурационного файла для настройки точек интереса

4.2 Особенности реализации

Разработка инструментального пакета с описанной выше архитектурой и плагинов для ReSharper велась в рамках исследовательского проекта YaccConstructor (YC), описанного в разделе ???. Разработка велась на платформе .NET и основным язык реализации — F# [45]. Весь исходный код опубликован

на GitHub: <https://github.com/YaccConstructor>. Большинство компонент опубликовано под “открытой” лицензией Apache License Version 2.0 ³.

За основу алгоритма синтаксического анализа динамически формируемых выражений был взят реализованный в YC алгоритм синтаксического анализа RNGLR. Генератор управляющих таблиц был использован практически без модификаций, а интерпретатор был реализован отдельный. Кроме этого, общими являются некоторые структуры данных и вспомогательные функции, такие как представление леса разбора и его печать в формате DOT ⁴, представление GSS.

Лексический анализ реализован на основе инструмента FsLex, который потребовал значительных доработок для того, чтобы обеспечить обработку конечного автомата, а не линейного входа. Все остальные компоненты, необходимые для статического анализа динамически формируемых выражений, такие как построение аппроксимации, вспомогательные функции для упрощения построения целевых инструментов были реализованы “с нуля” в рамках проекта YC.

Бинарные пакеты, содержащие основную функциональность, опубликованы в сети интернет на NuGet ⁵.

³Что-то там про лицензию!!!!

⁴DOT — текстовый язык описания графов. !!!!

⁵NuGet — менеджер пакетов для платформы .NET и одноимённый ресурс для их публикации. Позволяет публиковать и устанавливать пакеты, автоматически отслеживать зависимости между ними. Домашняя страница: <https://www.nuget.org/>

Глава 5

Методика использования

В данной главе будет изложена методика применения разработанного SDK, представлены области применения, описаны основные шаги использования SDK и их результаты.

5.1 Области применения

Разработанный инструментальный пакет предназначен для создания инструментов статического анализа динамически формируемых строковых выражений. Решения, созданные с помощью описанного SDK, могут использоваться для работы с проектами, активно использующими динамически формируемые строковые выражения, и применяться в следующих областях.

- Реинжиниринг программного обеспечения.
- Поддержка встроенных языков в средах разработки.
- Оценка качества и сложности кода.

Общим для всех этих областей является то, что для решения многих задач необходимо структурное представление динамически формируемого кода. При этом анализируемые языки могут быть различными и процесс их анализа часто тесно связан с анализом внешнего языка.

Отметим, что встроенные языки используются всё менее активно в молодых проектах и системах. На смену им приходят более надёжные способы композиции языков и метапрограммирования. Например LINQ или ORM-технологии.

Однако это не всегда так. Использование строковых выражений для взаимодействия с базами данных и генерации WEB-страниц в приложениях на PHP всё ещё широко распространено. Это необходимо учитывать при поддержке встроенных языков в средах разработки. Для каких-то языков на первый план выходят возможности по изучению и модификации уже созданного кода, а для каких-то — возможность быстро и удобно создавать новый код. Во втором случае могут возникнуть дополнительные требования к скорости работы инструмента, так как подразумевается выполнение некоторых операций “на лету”, что может послужить ограничением на использование SDK, так как многие механизмы, реализованные в нём, не предусматривают возможности уменьшения точности в пользу увеличения быстродействия.

Оценка качества и сложности кода часто может выполняться в рамках комплекса задач по реинжинирингу системы, однако может быть и самостоятельной задачей, например, при оценке сложности работ по поддержке и сопровождению информационной системы.

5.2 Способы применения

Детали применения SDK могут варьироваться в зависимости от решаемых задач и контекста использования. Например, механизм построения регулярной аппроксимации может быть реализован независимо в рамках внешнего инструмента. Однако основной сценарий использования аналогичен использованию инструментариев для разработки компиляторов. Последовательность шагов, представленная ниже может быть изменена в зависимости от особенностей задачи.

- Создание грамматики обрабатываемого языка. Грамматика может быть создана на основе документации соответствующего языка или переиспользована готовая, что оправданно, например, при создании анализатора для динамического SQL, когда внешний и встроенный языки совпадают.
- Генерация синтаксического анализатора по созданной грамматике. Для этого используется генератор синтаксических анализаторов, присутствующий в SDK. Результатом работы генератора является файл с исходным кодом

на языке программирования F#, который должен быть включён в разрабатываемый код. Файл содержит описание типов для лексических единиц, управляющие таблицы анализатора и функцию, которая по конечному автомату над алфавитом токенов анализируемого языка построит SPPF, содержащий деревья вывода всех корректных цепочек.

- Создание лексической спецификации обрабатываемого языка. Спецификация может быть извлечена из документации или заимствована из других проектов. При обработке динамически формируемого SQL возможно переиспользовать спецификацию, созданную для основного языка, которым также является SQL. При этом необходимо обратить внимание на то, что типы лексических единиц определяются на основе созданного на предыдущих шагах синтаксического анализатора.
- Генерация лексера по созданной спецификации. Для этого применяется генератор лексических анализаторов, входящий в состав SDK. В результате его применения получается файл с исходным кодом на языке F#, который должен быть подключён к разрабатываемому решению.
- Реализация механизма построения регулярной аппроксимации, результатом которого является функция, строящая конечный автомат над алфавитом символов. Данный механизм может быть реализован либо на основе предоставляемого в рамках SDK, либо независимо. В первом случае от разработчика требуется построить обобщённый CFG для внешнего языка. Во втором случае необходимо только гарантировать правильность возвращаемого конечного автомата. Второй подход может быть использован, например, при наличии реализованного механизма протягивания констант для внешнего языка. Это позволит создать возможно менее точное, но, скорее всего, более быстрое построение аппроксимации. Такой подход применим при автоматизированном реинжиниринге, когда ручная доработка кода является обязательным шагом и абсолютная точность автоматической обработки не требуется. Ещё одна возможная область применения второго подхода — это поддержка встроенных языков в средах разработки. Здесь также часто не требуется высокая точность для подсказок пользователю, однако

производительность крайне важна. Поэтому иногда приходится жертвовать точностью анализа для достижения нужной скорости работы.

- Реализация работы с SPPF. Синтаксический анализатор возвращает SPPF — конечное представление леса разбора всех корректных цепочек из аппроксимации. Дальнейшая работа с ним может строиться по двум основным сценариям.
 - Непосредственная обработка SPPF. В этом случае все вычисления происходят над SPPF без извлечения отдельных деревьев. Это позволит ускорить обработку результатов разбора, так как количество деревьев может быть бесконечным, а SPPF является конечной структурой данных. Однако существует несколько проблем, связанных с таким подходом. Во-первых, требуется создание новых процедур обработки, так как классические, как правило, ориентированы на работу с деревьями. Во-вторых, могут возникнуть трудности при выполнении некоторых анализов, вызванные тем, что в SPPF хранятся “бесконечные” деревья. Например, необходимо вычислить максимальную глубину вложенности конструкции `if`, являющуюся одной из стандартных метрик сложности кода. SPPF может содержать циклы и может оказаться так, что конструкция `if` встречается в цикле таким образом, что потенциальная глубина вложенности может быть бесконечной. Такая ситуация не является стандартной при обработке деревьев разбора и её надо отслеживать отдельно.
 - Извлечение отдельных деревьев из SPPF и их обработка. Данный подход может оказаться удобным, если уже существуют процедуры обработки синтаксических деревьев для языка, который оказался встроенным. Это помогает избежать затрат на создание новой функциональности. Такое может произойти при работе с динамическим SQL. В этом случае для работы с деревом разбора внешнего языка и деревьями, извлечёнными из SPPF, можно использовать одни и те же процедуры, так как языки идентичны.

Недостатком данного подхода является то, что конечность числа деревьев не гарантирована. Это значит, что не удастся обработать все

деревья. Стоит отметить, что даже в случае конечности числа деревьев, перебор и обработка всех деревьев разбора может потребовать значительных ресурсов.

- Реализация механизмов сбора, обработки и отображения информации, такой как сообщения об ошибках или любой другой, полученной в процессе анализа. Необходимо для предоставления пользователю информации, ожидаемой в рамках решаемой задачи.

На рисунке 5.1 изображён один из возможных сценариев использования SDK. Особенностью является цикличность процесса, характерная, например для реинжиниринга программного обеспечения.

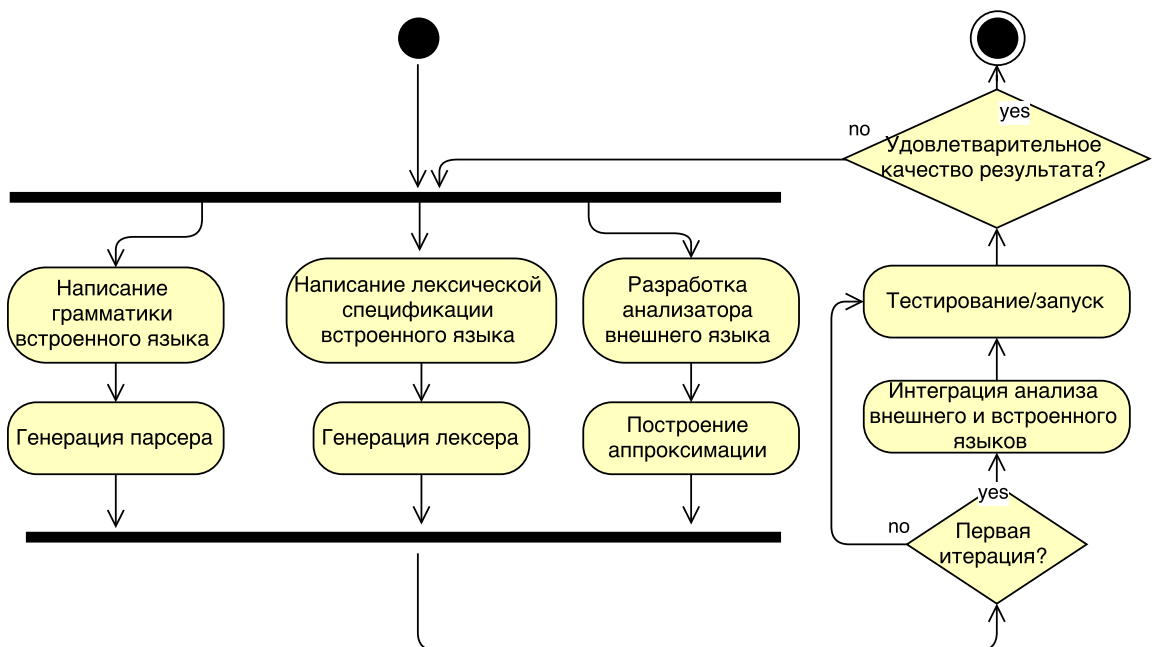


Рисунок 5.1: Один из возможных вариантов использования SDK в проектах по реинжинирингу

Встраивание анализа строковых выражений в последовательность обработки кода всей системы зависит от решаемых задач. Первыми шагами идут действия, необходимые для того, чтобы получить входные данные для анализа. Для этого необходимо провести лексический и синтаксический анализ внешнего языка, построить граф потока управления. После этого возможно построение аппроксимации и дальнейший анализ встроенных языков. Параллельно с этим может проводиться дальнейшая обработка внешнего языка. Степень параллельности зависит

от независимости решаемых задач. Например, некоторые метрики сложности для основного кода и для динамически формируемого можно считать независимо и выводить отдельно. С другой стороны, может возникнуть необходимость вычислить некую комплексную метрику, учитывающую параметры и внешнего и динамически формируемого кода, что приведёт к необходимости синхронизации.

Глава 6

Экспериментальное исследование и апробация YC.SEL.SDK и YC.SEL.SDK.ReSharper

В рамках экспериментального исследования и апробации проводилось, в основном, изучение предложенного в данной работе алгоритма синтаксического анализа, архитектуры реализованного инструментария и предложенной методики, так как это является основными новыми результатами данной работы.

6.1 Экспериментальная оценка алгоритма

Алгоритм синтаксического анализа динамически формируемых выражений, описанный выше, был протестирован на нескольких сериях синтетических тестов, цель которых — убедиться в приемлемой производительности алгоритма на практически значимых входных данных. Анализ промышленного проекта по миграции базы данных с MS-SQL Server 2005 на Oracle 11gR2 показал, что запросы часто формируются конкатенацией фрагментов, каждый из которых формируется с помощью ветвлений или циклов. Ниже приведена эталонная грамматика G_t , использованная в этих тестах.

$start_rule ::= s$

$s ::= s \text{ PLUS } n$

$n ::= \text{ONE} \mid \text{TWO} \mid \text{THREE} \mid \text{FOUR} \mid \text{FIVE} \mid \text{SIX} \mid \text{SEVEN}$

Входные данные представляли собой конечные автоматы над алфавитом терминальных символов грамматики G_t , построенные с помощью конкатенации базовых блоков. Предполагается, что такие графы могут быть получены в результате построения регулярной аппроксимации по некоторой программе и выполнения её лексического анализа. В данном случае базовый блок — это шаблонный конечный автомат, который используется для построения тестовых конечных автоматов. Каждая серия тестов характеризовалась тремя параметрами:

- *height* — количество ветвлений в базовом блоке;
- *length* — максимальное количество повторений базовых блоков;
- *isCycle* — наличие в базовом блоке циклов (если ложь, то используются базовые блоки, изображённые на рисунке 6.1, если истина — то изображённые на рисунке 6.2).

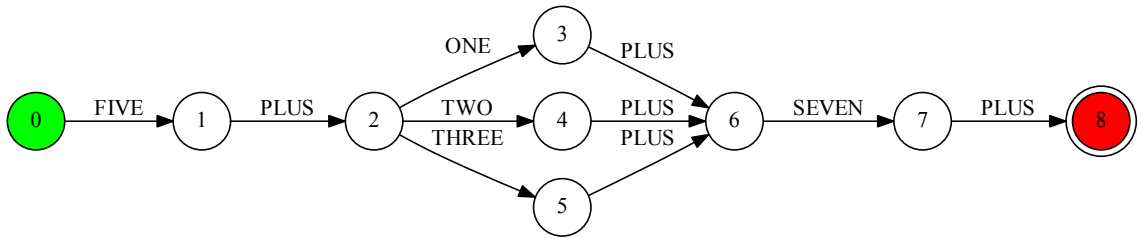


Рисунок 6.1: Базовый блок без циклов при $height = 3$

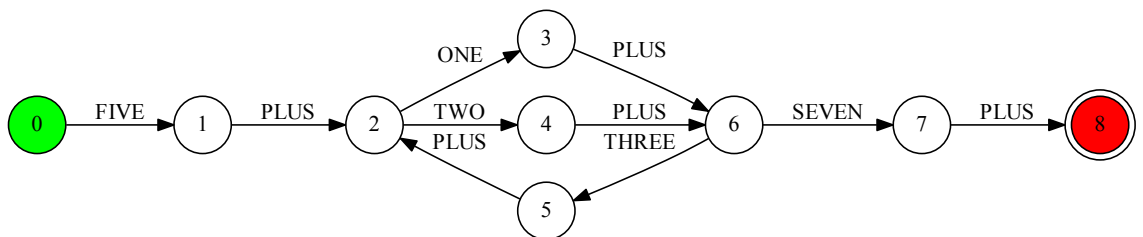


Рисунок 6.2: Базовый блок, содержащий цикл, при $height = 3$

Замеры проводились на вычислительной станции со следующими характеристиками.

Чтобы выявить зависимость времени от размера входных данных, тесты проводились сериями. Каждая серия объединяет набор из 500 тестов, каждый из которых содержит одинаковое количество ветвлений в базовом блоке. При этом количество повторений блока совпадает с порядковым номером теста, то есть $length = i$ для i -того теста. Для каждого теста измерялось время, затраченное на синтаксический анализ. Измерения проводились 10 раз, после чего усреднялись. График, представленный на рисунке 6.3, иллюстрирует зависимость времени, затрачиваемого на синтаксический анализ, от количества повторения базового блока и количества ветвлений в каждом из них. Можно заметить, что время, затрачиваемое на анализ, растёт линейно, в зависимости от размера входного графа. График на рисунке 6.4 показывает, что наличие циклов в графе, при одинаковом значении параметра *height*, увеличивает продолжительность анализа, при этом зависимость времени от размера графа остаётся линейной.

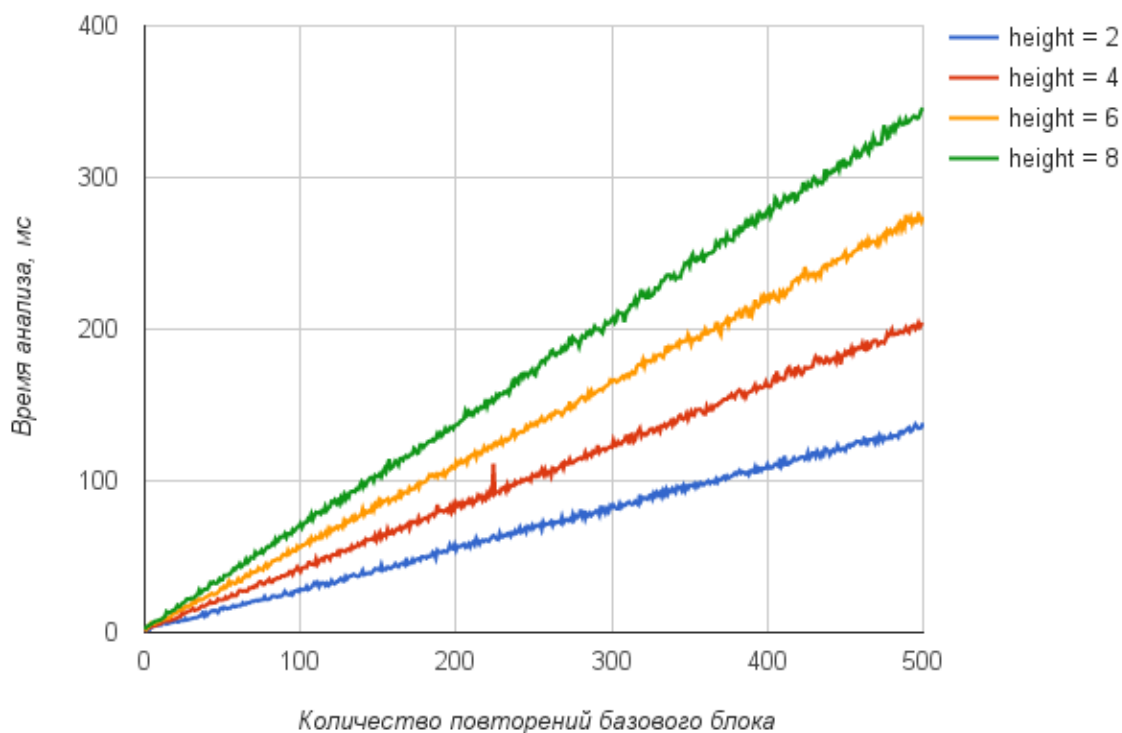


Рисунок 6.3: Зависимость времени работы алгоритма от размера входного графа при $isCycle = false$

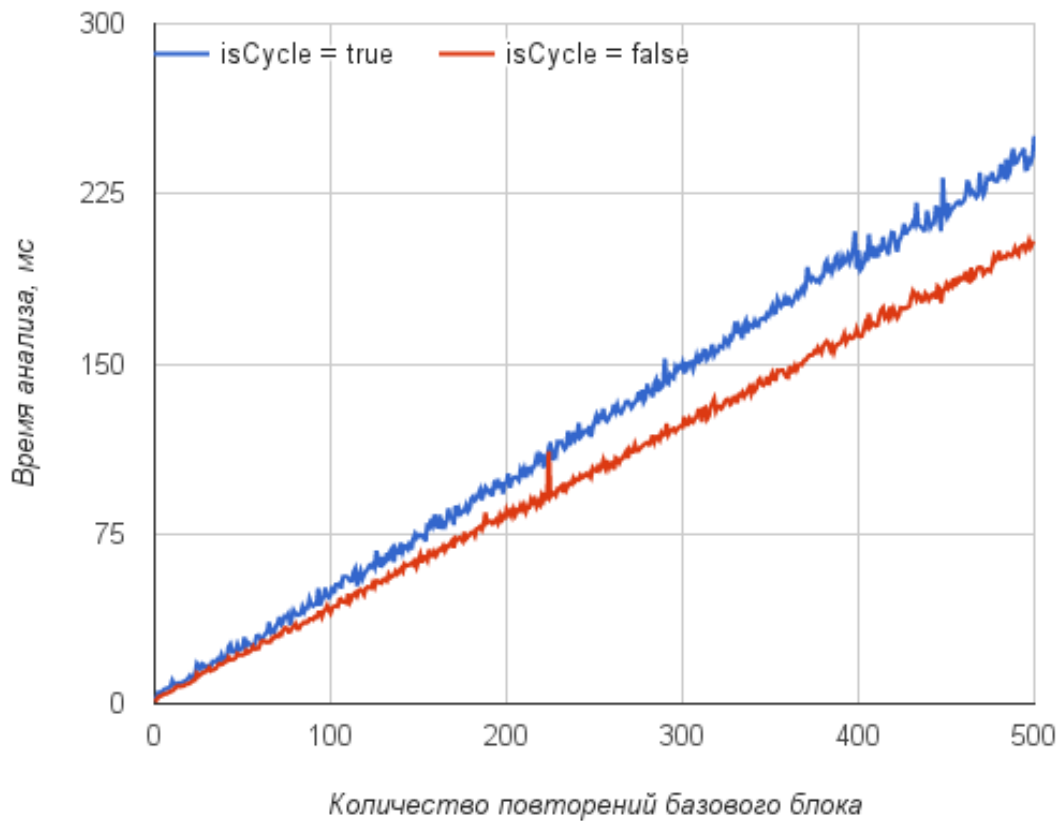


Рисунок 6.4: Зависимость времени работы алгоритма от размера входного графа и наличия в нем циклов при $height = 4$

6.2 Апробация в промышленном проекте по реинжинирингу

Реализованный инструментарий был апробирован в рамках промышленного проекта по миграции базы данных с MS-SQL Server 2005 на Oracle 11gR2, что позволило апробировать как предложенную методику, так и протестировать некоторые части инструментария на реальных данных.

Обрабатываемая система состояла из 850 хранимых процедур и содержала около 2,6 миллионов строк кода. В ней присутствовало 2430 точек выполнения динамических запросов, из которых больше 75% могли принимать более одного значения и при их формировании использовалось от 7 до 212 операторов. При этом среднее количество операторов для формирования запроса равнялось 40.

Ранее в данном проекте использовался алгоритм, предложенный и реализованный автором данной работы, детали которого описаны в статье ???. Поэтому требовалось внедрить новый алгоритм синтаксического анализа в уже существующую инфраструктуру. Однако так как вопрос выполнения трансляции над

SPPF не исследован и его изучение не входило в данную работу, а возможность извлечения конечного числа деревьев, что аналогично ранее используемому алгоритму, была показана ранее, то в рамках данной апробации ставилась иная задача. Было необходимо вычислить набор метрик динамически формируемого кода непосредственно по SPPF.

Для вычисления были выбраны, на основе работ ??, следующие метрики.

– Количество используемых в запросе таблиц.

–

–

Действия по созданию инструмента подтвердили изложенную ранее методику. Так как анализатор T-SQL был разработан ранее, то была взята готовая грамматика и по ней построен синтаксический анализатор. Построение регулярной аппроксимации и лексический анализ были переиспользованы, что показало преимущества разделения шагов анализа.

Далее были реализованы функции вычисления метрик и вывода результата, после чего полученная функциональность была встроена в существующую цепочку обработки основного кода.

В результате работы реализованных функций формировался отчёт, пример которого приведён в таблице 6.1

Таблица 6.1: Пример метрик

Инструмент	Платформа	Лес разбора	Синт. ошибки	Сем. ошибки	Подсветка	Модульность
AbsPars	—	+— ¹	+	+	—	—
Alvor	—	—	+	—	—	+
JSA	—	—	+	—	—	—
PHPSA	—	—	+	—	—	—
IntelliLang	+— ³	—	+	+	+	+
Varis	—	+ ²	+	—	+	—
YC	+	+	— ⁴	+	+	+

Возможно, какое-то обсуждение + сравнение с аналогичными результатами на старом движке.

Алгоритм синтаксического анализа был отдельно протестирован на наборе данных, взятых из описанного выше проекта. Реализация алгоритма была внедрена в проект по миграции, заменив ранее используемую версию алгоритма синтаксического анализа. При этом грамматика языка T-SQL была полностью переиспользована. Алгоритм запускался на данной системе 10 раз, время анализа усреднялось. Тесты проводились на вычислительном устройстве с параметрами, эквивалентными указанным в разделе ??

Алгоритм успешно завершил работу на 2188 входных графах, аппроксимирующих множества значений запросов. Ручная проверка входных графов, на которых алгоритм завершался с ошибкой, показала, что они действительно не содержали ни одного корректного в эталонном языке выражения. Причиной этого стала либо некорректная работа лексического анализатора, либо наличие в выражениях конструкций, не поддерживаемых в существующей грамматике. Дальнейшие значения приводятся только для графов, которые удалось проанализировать. 604 из этих графов содержали ровно один путь и анализировалось не более 1 миллисекунды. Общее время синтаксического анализа составило порядка 27 минут, из них 13 минут было затрачено на разбор графов, не содержащих ни одного корректного выражения. В среднем один такой граф анализировался 386 миллисекунд. На разбор 1790 графов ушло не более 10 миллисекунд. На анализ двух графов было затрачено более 2 минут: 152,215 и 151,793 секунд соответственно. Первый граф содержал 2454 вершин и 54335 рёбер, второй — 2212 вершин и 106020 рёбер. Распределение входных графов по промежуткам времени, затраченных на анализ, приведено на графике на рисунке 6.5.

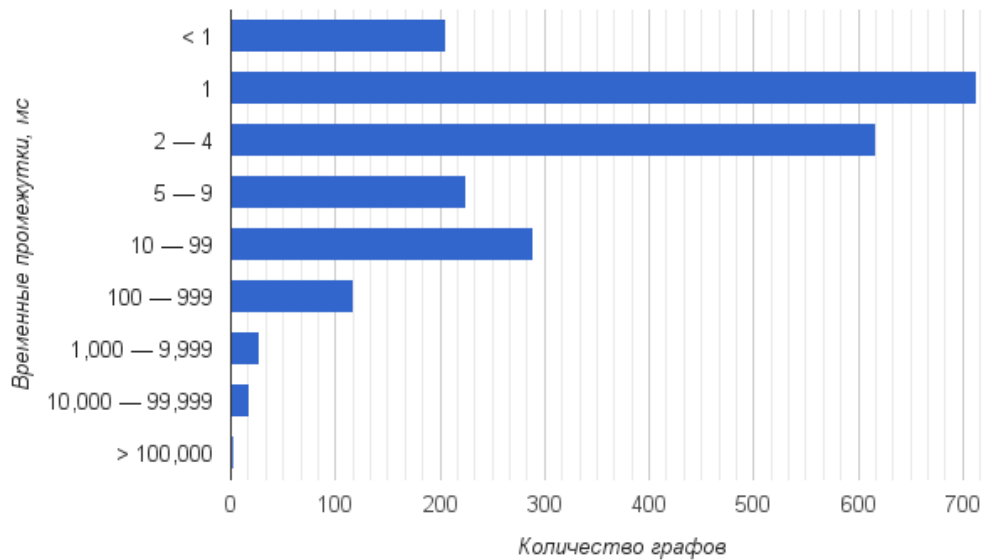


Рисунок 6.5: Распределение запросов по времени анализа

Результаты данных замеров показывают, что ресурсоёмкость синтаксического анализа уменьшилась, так как при использовании нового алгоритма только один запрос не был обработан из-за превышения времени, отведённого на вычисления. В предыдущей версии количество таких запросов равнялось !!!! ??. Это позволяет повысить уровень автоматизации, так как большее количество запросов можно обработать автоматически.

Тестирование на реальных данных показало, что предложенный в работе алгоритм синтаксического анализа применим для синтаксического анализа регулярной аппроксимации множества значений динамически формируемых выражений, используемых в коде промышленных информационных систем. Также данная апробация показала, что предложенная методика применима при разработке средств реинжиниринга, а модульность позволяет использовать отдельные инструменты независимо. В ходе апробации были выявлены особенности, на которые следует обратить внимание при исследовании вопроса о вычислении семантики непосредственно над SPPF. Результаты успешно внедрены в проект компании ЗАО “Ланит-Терком”.

6.3 Разработка расширений для поддержки встроенных языков

На основе YC.SEL.SDK и YC.SEL.SDK.ReSharper, которые были представлены ранее, в рамках апробации были реализованы расширения к ReSharper, которые предоставляют поддержку для двух встроенных языков: подмножества T-SQL и Calc. Реализация данных расширений также являлась апробацией предложенной методики использования разработанного инструментального пакета.

В рамках предложенной методики были созданы лексические спецификации и грамматики соответствующих языков. Исходный код описаний опубликован в открытом доступе: [!!!!](#). Далее с помощью генераторов из разработанного инструментария, по этим грамматикам построены синтаксические анализаторы, а по лексическим спецификациям — лексические анализаторы.

При создании расширений был также апробирован механизм построения регулярной аппроксимации. Для построения графа потока управления внешнего вида использовалась функциональность ReSharper SDK. Затем полученный граф переводился в обобщённое представление, по которому строилась регулярная аппроксимация силами разработанного инструмента.

После того, как отдельные части были готовы, они собирались в единое целое на основе YC.SEL.SDK.ReSharper. В результате было получено два расширения, предоставляющие поддержку соответствующих языков и ядро, содержащее общую, независимую от языков, функциональность, связанную прежде всего с обеспечением взаимодействия между ReSharper и реализованными расширениями.

Расширения предоставляют следующую функциональность: подсветка синтаксиса (рисунок 6.6), подсветка парных (рисунок 6.7) элементов. Для языка Calc также реализована статическая диагностика семантических ошибок, а именно поиск использования необъявленных переменных, что показывает, с одной стороны, возможность непосредственного использования SPPF для проведения анализа динамически формируемого кода, а с другой — возможность реализации дополнительной функциональности, не являющейся общей функциональностью SDK.

Статический поиск использования необъявленных переменных показан на рисунке 6.8. В данном примере переменная *x* объявляется в одной из веток условного оператора и не объявляется в другой, что может привести к ошибке в точке использования, о чём и сообщено пользователю.

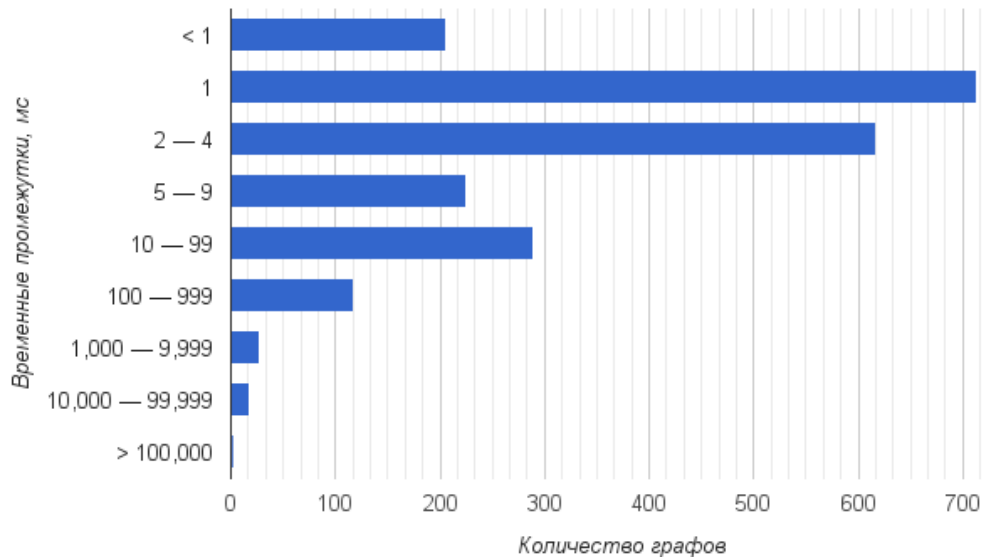


Рисунок 6.6: Пример подсветки синтаксиса для встроенного SQL

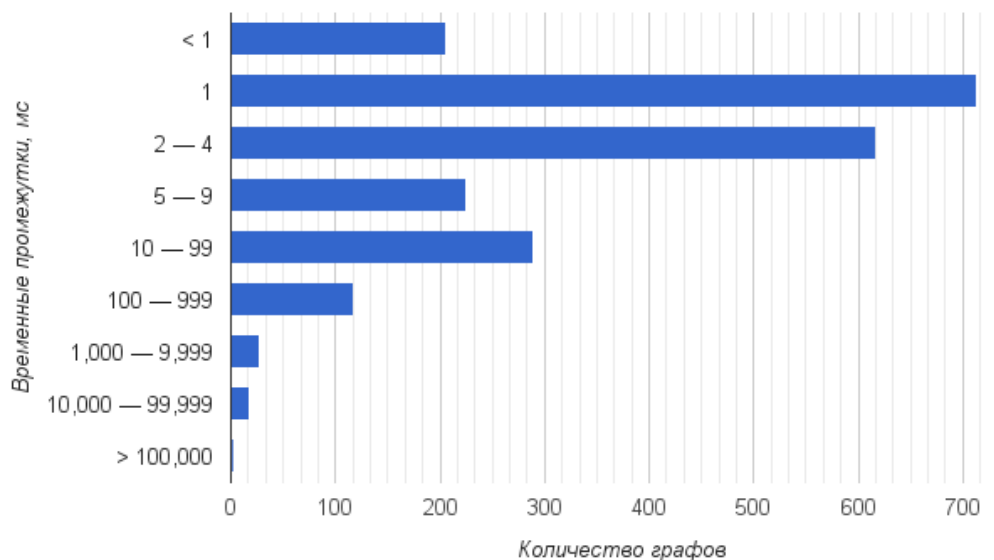


Рисунок 6.7: Пример подсветки парных скобок

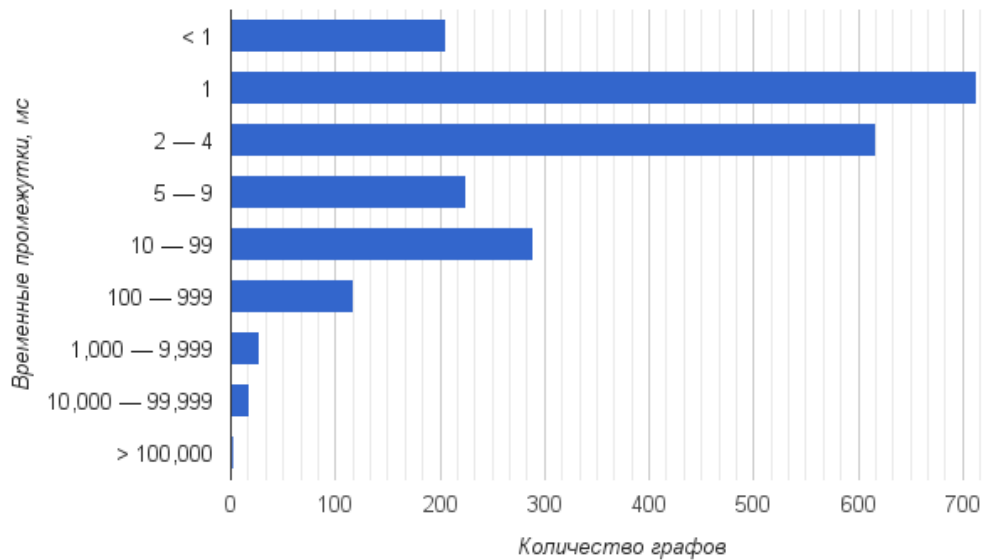


Рисунок 6.8: Пример статического обнаружения семантических ошибок для языка Calc

Расширения опубликованы в виде готовых к использованию бинарных пакетов. Функциональность, отвечающая за поддержку каждого языка распространяется в виде самостоятельного бинарного пакета и может быть независимо подключена или отключена. Структура пакетов представлена на рисунке 6.9.

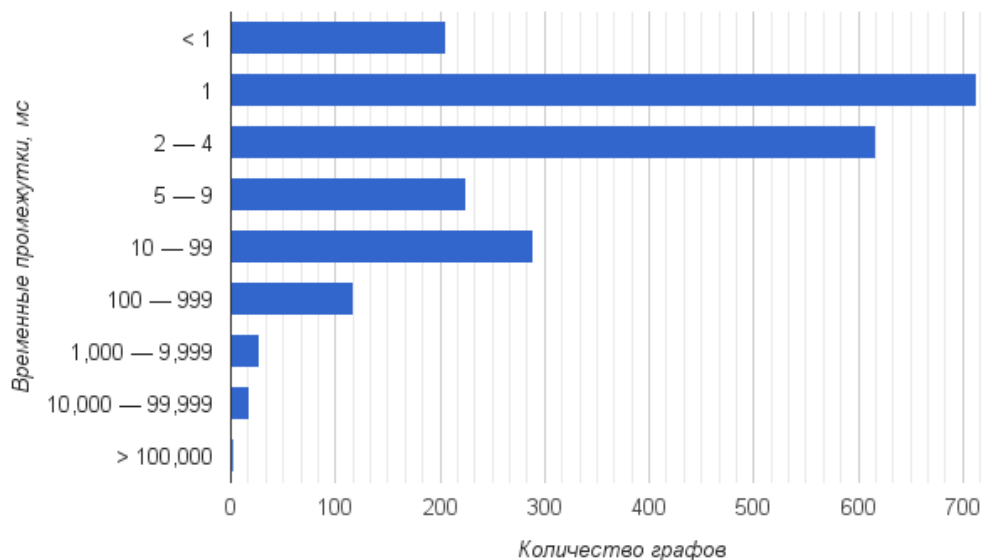


Рисунок 6.9: Структура пакетов расширений для ReSharper, предоставляющих поддержку встроенных T-SQL и Calc

Дополнительно в результате разработки расширений было выяснено, что анализаторы языков могут быть независимо переиспользованы. Например, они используются в тестах, никак не связанных с ReSharper. Это показывает, что неза-

зависимость шагов обработки динамически формируемых выражений позволяет достаточно просто переиспользовать компоненты, реализующие эти шаги, что является плюсом реализованного решения.

Глава 7

Сравнение и соотнесение

В данной главе представлено сравнение разработанного решения с основными существующими решениями в области анализа динамически формируемых строковых выражений. Описание существующих решений представлено в разделе ?? данной работы, поэтому далее приводится только сравнение.

В качестве инструментов, с которыми производилось сравнение выбраны следующие: Alvor, JSA, PHPSA, IntelliLang, Varis. Так же проводилось сравнение с инструментом, названным нами AbsPars, реализованным авторами работ по абстрактному синтаксическому анализу ?. Несмотря на то что в свободном доступе реализации алгоритма, изложенного в указанных статьях не обнаружено, самими авторами приводятся достаточно подробные результаты апробации реализации алгоритма, что позволяет сделать некоторые выводы о его основных возможностях.

Для сравнения были выбраны следующие критерии. Названия соответствуют именам колонок в таблице 7.1.

- **Платформа.** Предоставляется ли в явном виде платформа для создания новых инструментов.
- **Построение леса разбора.** Предоставляет ли инструмент функциональность по построению леса разбора динамически формируемого кода.
- **Синтаксические ошибки.** Обнаруживает ли инструмент синтаксические ошибки в динамически формируемом коде.

- **Семантические ошибки.** Обнаруживает ли инструмент семантические ошибки в динамически формируемом коде.
- **Подсветка синтаксиса.** Обеспечивает ли инструмент подсветку синтаксиса.
- **Модульность.** Выделены ли отдельные независимые шаги обработки или же анализ является монолитным.

В таблице 7.1 приведены основные результаты сравнения инструментов статического анализа динамически формируемых строковых выражений. Используются следующие обозначения.

- + – функциональность, соответствующая критерию, полностью реализована.
- – – функциональность, соответствующая критерию, полностью не реализована.
- + – – соответствующая функциональность реализована частично.

Таблица 7.1: Сравнение инструментов анализа динамически формируемых строковых выражений

Инструмент	Платформа	Лес разбора	Синт. ошибки	Сем. ошибки	Подсветка	Модульность
AbsPars	–	+ – ¹	+	+	–	–
Alvor	–	–	+	–	–	+
JSA	–	–	+	–	–	–
PHPSA	–	–	+	–	–	–
IntelliLang	+ – ³	–	+	+	+	+
Varis	–	+ ²	+	–	+	–
YC	+	+	– ⁴	+	+	+

Проведённое сравнение позволяет выявить несколько аспектов.

- Инструменты, предназначенные для поддержки встроенных языков в средах разработки часто жертвуют точностью анализа для обеспечения возможности интерактивной работы, что делает их не применимыми для решения задач в других областях.

- Многие инструменты могут быть расширены, однако ранее не предоставлялось полноценного самостоятельного инструментария для создания новых инструментов для обработки динамически формируемых выражений.
- Инструменты реализованы на основе разных подходов и предназначены для решения разных задач, поэтому детальное сравнение их возможностей, производительности и других аспектов не представляется оправданным.

В результате можно утверждать, что УС является единственной полноценной платформой для создания различных инструментов статического анализа динамически формируемых выражений, применимых в разных областях и обладающих широкими функциональными возможностями.

Отдельно было приведено сравнение производительности синтаксического анализа с инструментом Alvor, так как он реализует очень близкий подход: независимые шаги анализа, синтаксический анализ основан на GLR-алгоритме.

Так как Alvor не предоставляет платформы для простой реализации поддержки новых языков, то для сравнения было выбрано подмножество языка SQL, общее для Alvor и реализованного в рамках апробации инструмента. Тесты строились по принципу, аналогичному изложенному в разделе ??.

!!!Далее сколько-то картинок и выводы!!!

Заключение

В ходе выполнения исследования получены следующие результаты.

- Разработан алгоритм синтаксического анализа динамически формируемых выражений, позволяющий обрабатывать произвольную регулярную аппроксимацию множества значений выражения в точке выполнения, реализующий эффективное управление стеком и гарантирующий конечность представления леса вывода. Доказана завершаемость и корректность предложенного алгоритма при анализе регулярной аппроксимации, представимой в виде произвольного конечного автомата без эпсилон-переходов.
- Создана архитектура инструментария для разработки программных средств синтаксического анализа динамически формируемых строковых выражений.
- Реализован инструментальный пакет для разработки средств статического анализа динамически формируемых выражений. На его основе реализован плагин для ReSharper. Код опубликован на сервисе GitHub: <https://github.com/YaccConstructor/YaccConstructor> под лицензией Apache License Version 2.0, автор работал под учётной записью с именем gsvgit
- Разработана методика анализа динамически формируемых строковых выражений в проектах по реинжинирингу информационных систем. Данная методика применена в проекте компании ЗАО “Ланит-Терком” по переносу информационной системы с MS-SQL Server на Oracle Server, для чего реализованы соответствующие программные компоненты.

Кроме того, планируется развитие платформы и плагина. На уровне платформы необходимо реализовать механизмы, требующиеся для трансформаций кода

на встроенных языках. Механизмы трансформации встроенных языков требуются для проведения миграции с одной СУБД на другую [8] или для миграции на новые технологии, например, LINQ. Эта задача связана с двумя проблемами: возможностью проведения нетривиальных трансформаций и доказательство корректности трансформаций. Планируется реализация проверки корректности типов. Для SQL это должна быть как проверка типов внутри запроса, так и проверка того, что тип возвращаемого запросом результата соответствует типу хост-переменной, выделенной для сохранения результата в основном коде.

Более общей проблемой, подлежащей дальнейшему исследованию, является возможность выполнения семантических действий непосредственно над SPPF. Это необходимо для рефакторинга, улучшения качества трансляции, автоматизации перехода на более надёжные средства метапрограммирования [?].

Важной задачей является теоретическая оценка сложности предложенного алгоритма синтаксического анализа. В известных работах не приводятся строгих оценок подобных алгоритмов, поэтому данная задача является самостоятельным исследованием.

С целью обобщения предложенного подхода к синтаксическому анализу, а также для получения лучшей производительности и возможностей для более качественной диагностики ошибок, планируется переход на алгоритм обобщённого LL-анализа (GLL) [?, 48]. Планируется исследовать возможность улучшения предложенного алгоритма при переходе на другие алгоритмы обобщённого LR-анализа, такие как BRNGLR [49] и RIGLR [50].

Литература

1. 9075:1992 ISO. ISO/IEC. Information technology — Database languages — SQL. — 1992.
2. Hougland Damon, Tavistock Aaron. Core JSP. — Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2000.
3. PHP MySQL interface. <http://php.net/manual/en/mysqli.query.php>.
4. SQL Ways. <http://www.ispirer.com/products>.
5. Kirilenko Iakov, Grigorev Semen, Avdiukhin Dmitriy. Syntax Analyzers Development in Automated Reengineering of Informational System // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems*. — 2013. — Vol. 174, no. 3. — Pp. 94–98.
6. String-embedded Language Support in Integrated Development Environment / Semen Grigorev, Ekaterina Verbitskaia, Andrei Ivanov et al. // Proceedings of the 10th Central and Eastern European Software Engineering Conference in Russia. — CEE-SECR '14. — New York, NY, USA: ACM, 2014. — Pp. 21:1–21:11. <http://doi.acm.org/10.1145/2687233.2687247>.
7. Grigorev Semen, Kirilenko Iakov. GLR-based Abstract Parsing // Proceedings of the 9th Central & Eastern European Software Engineering Conference in Russia. — CEE-SECR '13. — New York, NY, USA: ACM, 2013. — Pp. 5:1–5:9. <http://doi.acm.org/10.1145/2556610.2556616>.

8. *Grigorev Semen, Kirilenko Iakov*. From Abstract Parsing to Abstract Translation // Preliminary Proceedings of the 8th Spring/Summer Young Researchers Colloquium on Software Engineering. — 2013. — Pp. 135–139.
9. An Interactive Tool for Analyzing Embedded SQL Queries / Aivar Annamaa, Andrey Breslav, Jevgeni Kabanov, Varmo Vene // Proceedings of the 8th Asian Conference on Programming Languages and Systems. — APLAS'10. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. — Pp. 131–138. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1947873.1947886>.
10. *Yu Fang, Cova Marco*. String Analysis.
11. *Chomsky Noam*. Three models for the description of language // *IRE Transactions on Information Theory*. — 1956. — Pp. 113–124.
12. *Pitts Andrew M*. Lecture Notes on Regular Languages and Finite Automata for Part IA of the Computer Science Tripos. — 2010.
13. *Hanneforth Thomas*. Finite-state Machines: Theory and Applications Unweighted Finite-state Automata / Institut fur Linguistik Universitat Potsdam. — 2010.
14. *Mohri Mehryar*. Finite-state Transducers in Language and Speech Processing // *Comput. Linguist.* — 1997. — . — Vol. 23, no. 2. — Pp. 269–311. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=972695.972698>.
15. *Smith Zachary*. Development of Tools to Manage Embedded SQL // Proceedings of the 49th Annual Southeast Regional Conference. — ACM-SE '11. — New York, NY, USA: ACM, 2011. — Pp. 358–359. <http://doi.acm.org/10.1145/2016039.2016147>.
16. *Fenton Norman, Pfleeger Shari Lawrence*. Software Metrics (2Nd Ed.): A Rigorous and Practical Approach. — Boston, MA, USA: PWS Publishing Co., 1997.
17. *Brink Huib van den, Leek Rob van der, Visser Joost*. Quality Assessment for Embedded SQL // Proceedings of the Seventh IEEE International Working Conference on Source Code Analysis and Manipulation. — SCAM '07. — Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2007. — Pp. 163–170. <http://dx.doi.org/10.1109/SCAM.2007.18>.

18. *van den Brink Huib J.* A Framework to Distil SQL Queries Out of Host Languages in Order to Apply Quality Metrics. — 2007.
19. *Cleve Anthony, Meurisse Jean-Roch, Hainaut Jean-Luc.* Journal on Data Semantics XV / Ed. by Stefano Spaccapietra. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. — Pp. 130–157. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2028156.2028162>.
20. *Cleve Anthony, Hainaut Jean-Luc.* Dynamic Analysis of SQL Statements for Data-Intensive Applications Reverse Engineering // Proceedings of the 2008 15th Working Conference on Reverse Engineering. — WCRE '08. — Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2008. — Pp. 192–196. <http://dx.doi.org/10.1109/WCRE.2008.38>.
21. A Static Analysis Framework For Detecting SQL Injection Vulnerabilities / Xiang Fu, Xin Lu, Boris Peltzberger et al. // Proceedings of the 31st Annual International Computer Software and Applications Conference - Volume 01. — COMPSAC '07. — Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2007. — Pp. 87–96. <http://dx.doi.org/10.1109/COMPSAC.2007.43>.
22. *Asveld Peter R. J., Nijholt Anton.* The Inclusion Problem for Some Subclasses of Context-free Languages // *Theor. Comput. Sci.* — 1999. — . — Vol. 230, no. 1-2. — Pp. 247–256. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3975\(99\)00113-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3975(99)00113-9).
23. *Christensen Aske Simon, Møller Anders, Schwartzbach Michael I.* Precise Analysis of String Expressions // Proc. 10th International Static Analysis Symposium (SAS). — Vol. 2694 of *LNCS*. — Springer-Verlag, 2003. — June. — Pp. 1–18. — Available from <http://www.brics.dk/JSA/>.
24. *Minamide Yasuhiko.* Static Approximation of Dynamically Generated Web Pages // Proceedings of the 14th International Conference on World Wide Web. — WWW '05. — New York, NY, USA: ACM, 2005. — Pp. 432–441. <http://doi.acm.org/10.1145/1060745.1060809>.
25. *Doh Kyung-Goo, Kim Hyunha, Schmidt David A.* Abstract Parsing: Static Analysis of Dynamically Generated String Output Using LR-Parsing Technology //

- Proceedings of the 16th International Symposium on Static Analysis. — SAS '09. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. — Pp. 256–272. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-03237-0_18.
26. *Doh Kyung-Goo, Kim Hyunha, Schmidt David A.* Formal Modeling / Ed. by Gul Agha, José Meseguer, Olivier Danvy. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. — Pp. 90–109. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2074591.2074599>.
 27. *Doh Kyung-Goo, Kim Hyunha, Schmidt David A.* Static Validation of Dynamically Generated HTML Documents Based on Abstract Parsing and Semantic Processing // Static Analysis. — Springer Berlin Heidelberg, 2013. — Vol. 7935 of *Lecture Notes in Computer Science*. — Pp. 194–214.
 28. *Aho Alfred V., Sethi Ravi, Ullman Jeffrey D.* Compilers: Principles, Techniques, and Tools. — Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1986.
 29. *Annamaa Aivar, Breslav Andrey, Vene Varmo.* Using Abstract Lexical Analysis and Parsing to Detect Errors in String-Embedded DSL Statements // Proceedings of the 22nd Nordic Workshop on Programming Theory. — 2010. — Pp. 20–22.
 30. PL/SQL Developer. <http://www.allroundautomations.com/plsqldev.html>.
 31. SwissSQL. <http://www.swissql.com/>.
 32. Сайт проекта Java String Analyzer. <http://www.brics.dk/JSA/>.
 33. Сайт проекта PHP String Analyzer. <http://www.score.cs.tsukuba.ac.jp/~minamide/phpsa/>.
 34. Сайт проекта Alvor. <http://code.google.com/p/alvor/>.
 35. Сайт проекта JFlex. <http://jflex.de/>.
 36. Сайт плагина IntelliJLang. <https://www.jetbrains.com/idea/help/intelli-lang.html>.

37. Сайт интегрированной среды разработки PHPStorm. <https://www.jetbrains.com/phpstorm/>.
38. *Nguyen Hung Viet, Kästner Christian, Nguyen Tien N.* Varis: IDE Support for Embedded Client Code in PHP Web Applications // Proceedings of the 37th International Conference on Software Engineering (ICSE). — New York, NY: ACM Press, 2015. — . — Formal Demonstration paper.
39. *Cousot Patrick, Cousot Radhia.* Abstract Interpretation: A Unified Lattice Model for Static Analysis of Programs by Construction or Approximation of Fixpoints // Proceedings of the 4th ACM SIGACT-SIGPLAN Symposium on Principles of Programming Languages. — POPL '77. — New York, NY, USA: ACM, 1977. — Pp. 238–252. <http://doi.acm.org/10.1145/512950.512973>.
40. *Grune Dick, Jacobs Criel J. H.* Parsing Techniques: A Practical Guide. — Upper Saddle River, NJ, USA: Ellis Horwood, 1990.
41. *Tomita Masaru.* An Efficient Context-free Parsing Algorithm for Natural Languages // Proceedings of the 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2. — IJCAI'85. — San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1985. — Pp. 756–764. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1623611.1623625>.
42. *Rekers Jan.* Parser Generation for Interactive Environments. — 1992.
43. *Scott Elizabeth, Johnstone Adrian.* Right Nulled GLR Parsers // *ACM Trans. Program. Lang. Syst.* — 2006. — . — Vol. 28, no. 4. — Pp. 577–618. <http://doi.acm.org/10.1145/1146809.1146810>.
44. Сайт проекта YaccConstructor. <https://github.com/YaccConstructor/>.
45. *Syme Don, Granicz Adam, Cisternino Antonio.* Expert F# (Expert's Voice in .Net).
46. Официальная документация проекта ReSharper SDK. <https://www.jetbrains.com/resharper/devguide/README.html>.
47. Сайт проекта ReSharper. <https://www.jetbrains.com/resharper/>.

48. *Scott Elizabeth, Johnstone Adrian*. GLL Parsing // *Electron. Notes Theor. Comput. Sci.* — 2010. — . — Vol. 253, no. 7. — Pp. 177–189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.entcs.2010.08.041>.
49. *Scott Elizabeth, Johnstone Adrian, Economopoulos Rob*. BRNGLR: A Cubic Tomita-style GLR Parsing Algorithm // *Acta Inf.* — 2007. — . — Vol. 44, no. 6. — Pp. 427–461. <http://dx.doi.org/10.1007/s00236-007-0054-z>.
50. *Scott Elizabeth, Johnstone Adrian*. Generalized Bottom Up Parsers With Reduced Stack Activity // *Comput. J.* — 2005. — . — Vol. 48, no. 5. — Pp. 565–587. <http://dx.doi.org/10.1093/comjnl/bxh102>.

Список рисунков

1.1	Формирование строкового выражения с помощью цикла for и while в среде разработке Eclipse с установленным плагином Alvor	27
1.2	Формирование строкового выражения с помощью строковой операции replace в среде разработке Eclipse с установленным плагином Alvor	28
1.3	IntelliJ IDEA с установленным расширением IntelliLang: переменная html отмечена, как содержащая встроенный язык, а body не отмечена	28
1.4	Пример функциональности Varis: автодополнение и подсветка синтаксиса во встроенном HTML в среде разработки Eclipse	29
1.5	Пример GSS	33
1.6	Пример SPPF для грамматики G_1 и входа ABC	34
1.7	Архитектура платформы YaccConstructor	39
2.1	Конечный автомат, задающий регулярную аппроксимацию выражения expr	53
2.2	Конечное представление леса разбора для выражения expr	54
2.3	Дерево вывода для выражения $expr = "()"$	54
2.4	Дерево вывода для выражения $expr = "()()"$	55
2.5	Дерево вывода для выражения $expr = "()()()"$	55
4.1	Диаграмма последовательности обработки встроенных языков . . .	60
4.2	Архитектура SDK целиком	61
4.3	Архитектура лексического анализатора	63
4.4	Архитектура синтаксического анализатора	64
4.5	Архитектура инфраструктуры	65
4.6	Архитектура конкретного плагина	66

5.1	Один из возможных вариантов использования SDK в проектах по реинжинирингу	75
6.1	Базовый блок без циклов при $height = 3$	78
6.2	Базовый блок, содержащий цикл, при $height = 3$	78
6.3	Зависимость времени работы алгоритма от размера входного графа при $isCycle = false$	79
6.4	Зависимость времени работы алгоритма от размера входного графа и наличия в нем циклов при $height = 4$	80
6.5	Распределение запросов по времени анализа	83
6.6	Пример подсветки синтаксиса для встроенного SQL	85
6.7	Пример подсветки парных скобок	85
6.8	Пример статического обнаружения семантических ошибок для языка Calc	86
6.9	Структура пакетов расширений для ReSharper, предоставляющих поддержку встроенных T-SQL и Calc	86

Список таблиц

6.1	Пример метрик	81
7.1	Сравнение инструментов анализа динамически формируемых строковых выражений	89