

Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»

На правах рукописи

Григорьев Семён Вячеславович

Синтаксический анализ динамически формируемых программ

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	14
1.1 Языки и грамматики	14
1.2 Конечные автоматы и преобразователи	19
1.3 О применимости статического анализа строковых выражений	22
1.4 Подходы к анализу встроенных языков	24
1.5 Обзор инструментов для работы со встроенными языками	27
1.6 Алгоритмы и структуры данных для обобщённого синтаксического анализа	30
1.6.1 Алгоритм обобщённого LR-анализа	31
1.6.2 Структурированный в виде графа стек	32
1.6.3 Сжатое представление леса разбора	33
1.6.4 Алгоритм RNGLR	34
1.7 Используемые инструменты	38
1.7.1 YaccConstructor	38
1.7.2 ReSharper SDK	41
1.8 Выводы	43
2 Алгоритм синтаксического анализа регулярной аппроксимации	45
2.1 Постановка задачи	45
2.2 Описание алгоритма ослабленного синтаксического анализа регулярной аппроксимации	48
2.2.1 Построение компактного представления леса разбора	52
2.3 Доказательство корректности алгоритма ослабленного синтаксического анализа регулярной аппроксимации	54

3	Инструментальный пакет	59
3.1	Архитектура	59
3.1.1	Архитектура YS.SEL.SDK	61
3.1.2	Архитектура YC.SEL.SDK.ReSharper	65
3.2	Области и способы применения YC.SEL.SDK	71
3.3	Особенности реализации	75
4	Метод реинжиниринга встроенного программного кода	77
4.1	Особенности	77
4.2	Метод	79
5	Эксперименты, ограничения, обсуждение	92
5.1	Апробация в промышленном проекте по реинжинирингу	94
5.2	Экспериментальная оценка производительности алгоритма	97
5.3	Сравнение с инструментом Alvor	100
5.4	Разработка расширений для поддержки встроенных языков	102
5.5	Ограничения	106
6	Сравнение и соотнесение	109
	Заключение	113
	Литература	116
	Список рисунков	127
	Список таблиц	129

Введение

Актуальность работы

Статический анализ исходного кода [1–3] — 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 используется при решении задач трансформации исходного кода и реинжиниринге [4]. Однако многие языки программирования позволяют использовать конструкции, которые существенно затрудняют статический анализ кода.

Например, взаимодействие приложений с базами данных, часто реализуется с помощью встроенных языков: приложение, созданное на одном языке, генерирует программу на другом языке и передаёт её на выполнение в соответствующее окружение. Примерами могут служить не только динамические SQL-запросы к базам данных в Java-коде, но и формирование HTML-страниц в PHP-приложениях, динамический SQL (Dynamic SQL [5]), фреймворк JSP [6], PHP MySQL interface [7]. 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 1, 2 и 3. более того, одна программа может генерировать код на нескольких языках (листинг 3).

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 конструи-

ровании SQL-запросов). Кроме того, использование динамически формируемых строковых выражений избавлено от дополнительных накладных расходов, присущих таким технологиям, как ORM¹, что позволяет достичь высокой производительности. Благодаря этим факторам, использование динамически генерируемых программ было широко распространено и большое количество систем используют такой подход. Вместе с этим, несмотря на появление новых технологий, динамическая генерация SQL-запросов активно используется и в настоящее время [9].

```

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

```

Листинг 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
14        // Invocable interface.
15        Invocable inv = (Invocable) engine;
16        // invoke the global function named "hello"
17        inv.invokeFunction("hello", "Scripting!!" );
18    }
19 }

```

Листинг 2: Вызов JavaScript из Java

¹ORM или Object-Relational Mapping — технология программирования, которая связывает базы данных с концепциями объектно-ориентированных языков программирования [8].

```

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    ?>

```

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

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 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 реинжиниринга 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 [10]. С другой стороны, распространённой практикой при написании кода является использование интегрированных сред разработки (Integrated Development Environment, IDE), выполняющих подсветку синтаксиса и автодополнение, сигнализирующих о синтаксических ошибках, предоставляющих возможность проводить рефакторинг кода. Такая функциональность значительно упрощает процесс разработки и отладки приложений и полезна не только для основного языка, но и для встроенных языков. Для решения таких задач необходимы инструменты, проводящие статический анализ множества выражений, которые могут быть получены на этапе исполнения из строковых выражений исходного языка.

Степень разработанности темы

Аналізу динамически формируемых строковых выражений посвящены работы таких зарубежных учёных как Кюнг-Гу Дох (Kyung-Goo Doh) [11–13], Ясучико Минамиде (Minamide Yasuhiko) [14], Андерс Мёллер (Anders Møller) [15] и отечественных учёных А.А. Бреслава [16, 17] и других. Вопросы проверки корректности динамически формируемых выражений и поиска фрагментов кода, уязвимых для SQL-инъекций [18, 19] достаточно подробно изучены, однако актуальным представляется так же проведение более сложных видов статического анализа, требующих построения структурного представления динамически формируемого кода. То есть требуется механизм синтаксического анализа динамически формируемых выражений, позволяющий строить лес вывода для всех возможных значений соответствующего выражения.

Методы обобщённого синтаксического анализа, лежащие в основе данной работы, изложены в трудах таких учёных как Масару Томита (Masaru Tomita) [20], Элизабет Скотт (Elizabeth Scott) и Адриан Джонстон (Adrian Johnstone) [21, 22] из университета Royal Holloway (Великобритания), Ян Рекерс (Jan Rekers, University of Amsterdam) [23], Элко Виссер (Eelco Visser) [24, 25] и других.

Так же важным является предоставление компонентов, упрощающих создание новых инструментов для решения конкретных задач. Данный подход хорошо исследован в области разработки компиляторов, где широкое распространение получили генераторы анализаторов и пакеты стандартных библиотек (работы А. Ахо [26], А. Брукера [27], С. Джонсона [28] и др.).

В работах отечественных учёных М.Д. Шапот и Э.В. Попова [29], а так же зарубежных учёных Антони Клеви (Anthony Cleve), Жан-Люк Эно (Jean-Luc Hainaut) [30], Йост Виссер (Joost Visser) [31] и других рассматриваются различные аспекты реинжиниринга систем, использующих встроенные SQL-запросы, однако не формулируется общего метода реинжиниринга таких систем. Разработка такого метода является актуальной задачей.

Таким образом, актуальной является задача дальнейшего исследования синтаксического анализа динамически формируемых строковых выражений, а также возможностей построения структурного представления динамически формируемого кода. Кроме этого важным является решение вопросов практического применения средств анализа динамически формируемого кода: упрощение разработки инструментов анализа и создание методов их применения в реинжиниринге программного обеспечения.

Объект исследования

Объектом исследования являются методы, алгоритмы и программные средства обработки динамически формируемых программ, а также задачи реинжиниринга информационных систем.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью данной работы является создание комплексного подхода к статическому синтаксическому анализу динамически формируемых программ.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**.

1. Разработать алгоритм синтаксического анализа динамически формируемых программ, позволяющий обрабатывать регулярную аппроксимацию множества значений выражения в точке выполнения, и гарантирующий конечность представления леса вывода.
2. Разработать архитектуру инструментария для разработки программных средств статического анализа динамически формируемых строковых выражений.
3. Разработать метод анализа и обработки встроенного программного кода в проектах по реинжинирингу информационных систем.

Методология и методы исследования

Методология исследования основана на подходе к спецификации и анализу формальных языков, который начал активно развиваться в 50-х годах 20-го века при изучении естественных языков (работы Н. Хомского [32, 33]). В последствии этот подход получил широкое распространение в областях, связанных с обработкой языков программирования. При этом основными элементами данного подхода являются алфавит и грамматика языка, разбиение автоматической обработки языка на выполнение таких шагов, как лексический, синтаксический и семантический анализ. Решаемые в связи с этим задачи связаны с поиском эффективных алгоритмов, выполняющих эти шаги.

В работе применяется алгоритм обобщённого восходящего синтаксического анализа RNGLR [21], созданный Элизабет Скотт (Elizabeth Scott) и Адриан Джонстон (Adrian Johnstone) из университета Royal Holloway (Великобритания). Для компактного хранения леса вывода использовалась структура данных 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.

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. Доказана завершаемость и корректность предложенного алгоритма при анализе регулярной аппроксимации, представимой в виде произвольного конечного автомата без ε -переходов.
2. Создана архитектура инструментария для разработки программных средств статического анализа динамически формируемых строковых выражений.

3. Разработан метод анализа и обработки встроенного программного кода в проектах по реинжинирингу информационных систем.

Научная новизна работы

Научная новизна полученных в ходе исследования результатов заключается в следующем.

1. Алгоритм, предложенный в диссертации, отличается от аналогов (работы Андрея Бреслава [16, 17], Кюнг-Гу Дох [11, 12], Ясухико Минамиде [14]) возможностью построения компактной структуры данных, содержащей дерева вывода для всех корректных значений выражения, при проведении синтаксического анализа динамически формируемых выражений. Это позволяет как проверять корректность анализируемых выражений, так и проводить более сложные виды анализа, используя деревья вывода, хранящиеся в построенной структуре данных. Многие из существующих алгоритмов предназначены только для проверки корректности выражений (JSA [15] [16, 17], PHPSA [14]), 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 Кюнг-Гу Дох (Kyung-Goo Doh) [11, 12] рассматривается применение механизмов синтаксического анализа для работы с динамически формируемыми выражениями, однако не решается вопрос эффективного представления результатов разбора.
2. Новизна представленной архитектуры заключается в том, что она позволяет создать платформу для разработки инструментов, решающих широкий круг задач анализа динамически формируемого кода. Существующие архитектуры готовых инструментов для анализа динамически формируемых строковых выражений (JSA, PHPSA, Alvor, Varis) предназначены для решения конкретных задач для определённых языков. Решение новых задач или поддержка других языков с помощью этих инструментов затруднены ввиду ограничений, накладываемых архитектурой и возможностями используемого алгоритма анализа.
3. Метод анализа и обработки встроенного программного кода в проектах по реинжинирингу информационных систем предложен впервые. Как отмеча-

ют К.В. Ахтырченко и Т.П. Сорокваша [34], присутствуют проблемы в методологической основе реинжиниринга: существующие работы в области реинжиниринга программного обеспечения либо содержат высокоуровневые решения, не касающиеся деталей, важных при решении прикладных задач (например, работы К. Вагнера [35], Х. Миллера [36]), либо являются набором подходов к решению конкретных задач (например, работы [4,37]). При этом, встроенный программный код часто не учитывается. С другой стороны, работы, например, М.Д. Шапот и Э.В. Попова [29], С.Л. Трошина [4], А. Клеви [30], посвящены решению конкретных задач обработки встроенного программного кода в контексте реинжиниринга информационных систем, но не предлагают формального метода их решения.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке формального алгоритма синтаксического анализа динамически формируемого кода, решающего задачу построения конечного представления леса вывода, не решаемую ранее, а также в формальном доказательстве завершаемости и корректности разработанного алгоритма.

На основе полученных в работе научных результатов был разработан инструментарий (Software Development Kit, SDK), предназначенный для создания средств статического анализа динамически формируемых выражений. Данный инструментарий позволяет автоматизировать создание лексических и синтаксических анализаторов при разработке программных средств для решения задач реинжиниринга — изучения и инвентаризации систем, автоматизации трансформации выражений на встроенных языках. Также данный инструментарий может использоваться при реализации поддержки встроенных языков в интегрированных средах разработки.

С использованием разработанного инструментария было реализовано расширение к инструменту ReSharper (ООО “ИнтеллиДжей Лабс”, Россия), предоставляющее поддержку встроенного T-SQL в проектах на языке программирования C# в среде разработки Microsoft Visual Studio. Так же было выполнено внедрение результатов работы в промышленный проект по переносу хранимого SQL-кода с MS-SQL Server 2005 на Oracle 11gR2 (ЗАО “Ланит-Терком”, Россия).

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность и обоснованность результатов исследования опирается на использование формальных методов исследуемой области, проведенные доказательства, рассуждения и эксперименты.

Основные результаты работы были доложены на ряде научных конференций: 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 [38], проект № 162ГУ1/2013 и проект № 5609ГУ1/2014).

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертации изложены в 7 научных работах из которых 3 [39–41] опубликованы в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, 1 [42] индексируются Scopus. В [43] С. Григорьеву принадлежит реализация ядра платформы YaccConstructor. В [40, 41] и [44] С. Григорьеву принадлежит постановка задачи, формулирование требований к разрабатываемым инструментальным средствам, работа над текстом. В [42] автору принадлежит идея, описание и реализация анализа встроенных языков на основе RNGLR алгоритма. В [39] С. Григорьеву принадлежит реализация инструментальных средств, проведение экспериментов, работа над текстом. В работе [45] автору принадлежит алгоритм синтаксического анализа динамически формируемого кода.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения 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 конеч-

ную 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 YC.SEL.SDK, разработанный в ходе данной работы на основе алгоритма, описанного во второй главе. YC.SEL.SDK предназначен для разработки инструментов анализа динамически формируемых выражений. Описывается архитектура компонентов и особенности их реализации. Также описывается YC.SEL.SDK.ReSharper — “обёртка” для YC.SEL.SDK, позволяющая создавать расширения к ReSharper для поддержки встроенных языков. В четвёртой главе описывается метод реинжиниринга встроенного программного кода. В пятой главе приводятся результаты экспериментального исследования YC.SEL.SDK. Шестая глава содержит результаты сравнения и соотнесения реализованного алгоритма с основными существующими аналогами.

Глава 1

Обзор

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

1.1 Языки и грамматики

В данном разделе приведён ряд обозначений, понятий и определений из теории формальных языков, которые используются 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 .

Цепочка $b \in (T \cup N)^*$ непосредственно выводима из цепочки $a \in (T \cup N)^+$ в грамматике $G = \langle T, N, P, S \rangle$ (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. Язык, порождаемый грамматикой

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

Определение 7. Левосторонний вывод цепочки ω в грамматике

$G = \langle T, N, P, S \rangle$ — это вывод, в котором на каждом шаге 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, то есть на каждом шаге 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 правило $A \rightarrow X_1 \dots X_k \in P$.
- Если его внутренний узел помечен $A \in N$ и ε — пометка единственного сына этого внутреннего узла, то правило $A \rightarrow \varepsilon \in P$.
- $\omega = a_1 \dots a_m$, где $a_1, \dots, a_m \in T \cup \{\varepsilon\}$ перечисленные слева направо пометки всех листьев этого дерева.

Определение 12. *Динамически формируемое строковое выражение* — это строковое выражение, значение которого будет известно только в момент выполнения программы.

Определение 13. 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 [16]). Например, для листинга 4 внешним языком является C#. Про переменную `sehes`, 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 анализом строк (string analysis [46]).

```

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

```

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

Одним из распространённых способов классификации грамматик является иерархия грамматик по Хомскому [47]. Рассмотрим её более подробно, так как различия между классами играют важную роль в решении задач данной работы.

- **Грамматика типа 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.
- **Грамматикой типа 1** будем называть неукорачивающую грамматику. 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. 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 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.

- **Грамматикой типа 2** будем называть контекстно-свободную грамматику. 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 3** является регулярная грамматика, определение которой приведено ниже.

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**.

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:

1. механизм распознавания, когда описывается процедура, проверяющая принадлежность цепочки описываемому языку;
2. механизм порождения (генерации), когда задаётся механизм, способный построить все цепочки описываемого языка.

Основной способ 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 14. *Конечный автомат* (*Finite State Automata*, [48]) — это пятёрка $M = \langle Q, \Sigma, \Delta, I, F \rangle$, где:

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

Определение 17. ε -НКА A — это НКА, где $\delta : Q \times (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \rightarrow 2^Q$.

Определение 18. Язык, распознаваемый конечным автоматом M , — это язык $L(M)$, состоящий из всех допускаемых данным автоматом цепочек. 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 диаграмм 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.

В рамках рассматриваемой предметной области конечные автоматы широко применяются для приближения множества возможных значений динамически генерируемой программы [15, 16, 49]: в результате анализа программы-генератора строится конечный автомат, описывающий регулярное множество R , являющееся приближением множества генерируемых программ S . При решении многих задач необходимо, чтобы R было приближением S сверху, то есть

выполнялось включение $R \supseteq S$. Например, при поиске ошибок это позволит оценивать полноту анализа: если алгоритм не выявил некорректных цепочек в R , то их точно нет и в S . Однако возможны ложные срабатывания: алгоритм обнаружил некорректную цепочку $\omega \in R$, но $\omega \notin S, \omega \in R - S$. Для того, чтобы минимизировать количество промахов, необходимо уменьшать $R - S$, то есть строить как можно более точное приближение. В работе [49] предлагается алгоритм построения такого приближения. Он будет использоваться в данной работе.

Определение 19. *Конечный преобразователь (Finite State Transducer, [50]) — 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 [51]). Кроме этого, 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 следующим образом: выход первого конечного преобразователя подаётся на вход второму, что

позволяет описывать цепочки трансформаций. Ниже дано формальное определение операции композиции над конечными преобразователями, допускающие наличие ε -переходов.

Определение 20. *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 [52]. Рассмотрим пример и поясним, какие задачи необходимо решать 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 широко распространённых задач, является оценка качества кода и его сложности с использованием различных формальных метрик [53]. При вычислении таких метрик важно учитывать, что использование динамически формируемых выражений, сложность их конструирования, количество и содержание возможных значений и многие другие характеристики сказываются на качестве

```

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
17        + " FROM ts." + tbl +
18        "as t1 JOIN tCreData cd (NOLOCK) ON cd.ncredataid "
19        + " = t1.ncredataid";
20
21    string sWhere = nType == 0
22        ? "WHERE nOrderType = 0 AND nStatus > 2 "
23        : "WHERE nStatus > 0 ";
24
25    sExec = "INSERT INTO reports (description, creditInfo, id)"
26        + " VALUES " + sExec + sWhere;
27
28    db.Execute(sExec);
29 }

```

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

и сложности содержащего их кода. По этой причине необходимо иметь возможность оценивать сложность динамически формируемых выражений с различных точек зрения [31, 54]. С одной стороны, необходимо оценивать сложность формирования выражения. Так в примере, представленном в листинге 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 листинге 5, в динамически формируемом запросе, используется конструкция соединения таблиц (JOIN, строка 17). Большое количество соединений и сложность условий часто становится причиной проблем

с производительностью и может служить признаком неудачного дизайна схемы данных [54].

Другой набор задач, связанный с сопровождением и модификацией систем, разработанных с активным использованием динамически формируемых выражений — это извлечение знаний о системе [55] и автоматизированный реинжиниринг программного обеспечения [30]. Например, при активном использовании встроенного SQL может возникать задача анализа или восстановления схемы данных [52]. Проанализировав структурное представление динамически формируемого SQL-кода в примере из листинга 5, можно сделать вывод о том, что данный код обращается к таблицам `InOrders`, `OutOrders` и `tCreData` на чтение, а к таблице `reports` на запись. Без анализа строковых выражений эта информация не может быть получена, а она может быть полезна, например, при модификации схемы данных.

Так как встроенные языки активно 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 ручном 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 выражения, 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

Существуют два класса подходов к анализу программного кода: динамический и статический [56]. Динамический анализ подразумевает изучение поведения программы во время её работы. Статический анализ позволяет получать знание о программе без её выполнения. Анализ динамически формируемых вы-

ражений, как вид анализа кода программ, актуален как в задачах обеспечения безопасности программного обеспечения (поиск мест в коде, уязвимых для SQL-инъекций [18]), так и для разработки, сопровождения и модернизации систем, разработанных с применением встроенных языков. Для решения подобных задач применимы оба класса анализов: существуют работы по анализу динамически формируемых программ во время выполнения (например работа [29], посвященная трансляции встроенных SQL-запросов во время выполнения), а так же ряд работ по статическому анализу динамически генерируемого кода ([14–16, 49] и др.). Динамический анализ обладает одним принципиальным недостатком — он недостоверен (unsound), так как анализирует только те части программы, которые были выполнены [56]. Статический анализ, напротив, обрабатывает всю программу целиком и избавлен от этого недостатка. По этой причине наиболее интересны подходы к статическому анализу встроенных языков, основные из которых рассмотрены ниже.

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 [14, 15]. Основной недостаток 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 регулярных L_1 и L_2 , являющегося однозначным контекстно-свободным языком [57]. Инструмент, реализующий данный подход, — Java String Analyzer [15], являющийся анализатором строковых выражений в коде на Java.

- Контекстно-свободное приближение: L_1 является контекстно-свободным языком. Достоинством такого приближения является его бóльшая точность, однако проверка включения одного контекстно-свободного языка в другой является неразрешимой в общем случае задачей [57]. По этой причине при использовании такого приближения будет получено неточное решение, так как потребуются применение эвристик. Данный подход реализован в инструменте PHPSA [14], 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 (Hanyang University, South Korea) предлагается комбинация анализа потока данных и синтаксического анализа на основе LALR(k) алгоритма, позволяющая строить множество LR-стеков для всех значений строкового выражения [11–13]. Так как задача проверки включения для двух контекстно-свободных языков неразрешима, то представлено приближённое решение. В работе [13] обоснована возможность семантического анализа на основе классического для LR-анализа механизма: атрибутивных грамматик [26] 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 [16, 17] 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 [17]. 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 разнообразных программных инструментов.

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 приложений баз данных. Для её решения существует ряд промышленных инструментов. В силу особенностей решаемой задачи нас интересуют инструменты для трансляции хранимого кода приложений баз данных. Самыми известными в данной области являются такие инструменты как PL-SQL Developer [58], SwisSQL [59], SQL Ways [60]. 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 анализа динамически формируемых выражений. Мно-

гие из них предназначены для предоставления поддержки встроенных языков в интегрированных средах разработки. Как правило, эти инструменты реализуют один из основных подходов, описанных в разделе 1.4.

Java String Analyzer (JSA, [15, 61]) — инструмент для анализа 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 этого 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, [14, 62]) — инструмент для статического анализа строк в программах на PHP. Расширяет подход инструмента JSA [15]. Использует контекстно-свободную аппроксимацию, что достигается благодаря отсутствию этапа преобразования контекстно-свободной грамматики в регулярную, и это повышает точность проводимого анализа. Для того, чтобы обрабатывать строковые операции и учитывать их при построении контекстно-свободной грамматики, используется конечный преобразователь. Дальнейший анализ строковых выражений полностью заимствован из инструмента JSA.

Alvor [16, 17, 63] — плагин к среде разработки Eclipse [64], предназначенный для статической проверки корректности SQL-выражений, встроенных в Java¹. 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 ав-

¹ Во время написания данного текста велась работа над поддержкой встроенных языков в PHP.

томат над терминалами при использовании конечного преобразователя, полученного генератором лексических анализаторов JFlex [65]. Несмотря на то, что абстрактная строка позволяет конструировать строковые выражения при участии циклов, плагин в процессе работы выводит сообщение о том, что не может поддержать данные языковые конструкции. Также инструмент Alvor не поддерживает обработку строковых операций, за исключением конкатенации, о чём так же выводится сообщение во время работы.

IntelliLang [66] — плагин к средам разработки PHPStorm [67] и IntelliJ IDEA², 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 разработки 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.

PHPStorm [67] — 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 [69] — плагин для Eclipse, представленный в 2015 году и 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.

Абстрактный синтаксический анализ. Kyung-Goo Doh, Hyunha Kim, David A. Schmidt (Hanyang University, South Korea) в серии работ [11–13] 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

²IntelliJ IDEA — среда разработки для JVM-языков [68].

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* [70]). В работе [13] 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

В этом разделе будет описан алгоритм обобщённого восходящего синтаксического анализа RNGLR [21], используемый в данной работе. Кроме этого, будут описаны основные структуры данных, специфичные 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 [71], в рамках которого разработаны эффективные методы работы с множеством стеков и дере-

вьев 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 [72]. 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 автомат 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 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 может однозначно решить, какое действие совершить в текущем состоянии. Таким образом возникают конфликты shift/reduce, когда можно либо прочесть очередной символ, либо произвести свёртку, и reduce/reduce, когда можно произвести свёртку по нескольким правилам грамматики.

Для решения данной проблемы Масару Томитой (Carnegie-Mellon University, Pittsburgh) был предложен алгоритм Generalized LR (GLR) [20], изначально предназначенный для анализа естественных языков. GLR-алгоритм был предназначен для работы с неоднозначными контекстно-свободными грамматиками, а значит позволял 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) [20] 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: “наивное” решение копировать стеки при возникнове-

нии конфликтов приводит к дублированию информации, чего можно избежать при использовании GSS.



Рисунок 1: Пример GSS

1.6.3 Сжатое представление леса разбора

Для переиспользования общих поддеревьев вывода Ян Рекерс (Jan Rekers, University of Amsterdam) предложил сжатое представление леса разбора (Shared Packed Parse Forest, SPPF) [23], 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 (листинг 6) и входа ABC приведён на рисунке 2. Представлены два различных дерева вывода (2a и 2b) и результат их объединения в SPPF 2c. Узлы с именами вида “n <name>” — это нетерминальные узлы, “e <name>” — терминальные, “prod <num>” — дополнительные узлы,

```

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

```

Листинг 6: Грамматика G_1

показывающие, согласно какой продукции из грамматики производился вывод нетерминала, являющегося предком данного узла.

1.6.4 Алгоритм RNGLR

RNGLR-алгоритм (Right-Nullled Generalized LR) [21] является модификацией предложенного Масару Томитой алгоритма, который не был способен обрабатывать все контекстно-свободные грамматики. Чтобы устранить данный недостаток, Элизабет Скотт (Elizabeth Scott) и Адриан Джонстон (Adrian Johnstone) из университета Royal Holloway (Великобритания) предложили RNGLR-алгоритм, который 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. Его подробное описание в виде псевдокода приведено ниже.

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 символ со входа. Свёртка или сдвиг модифицируют GSS следующим образом. Предположим, что в GSS необходимо добавить ребро (v_t, v_h) . По построению, конечная вершина добавляемой дуги к такому моменту уже обязательно нахо-

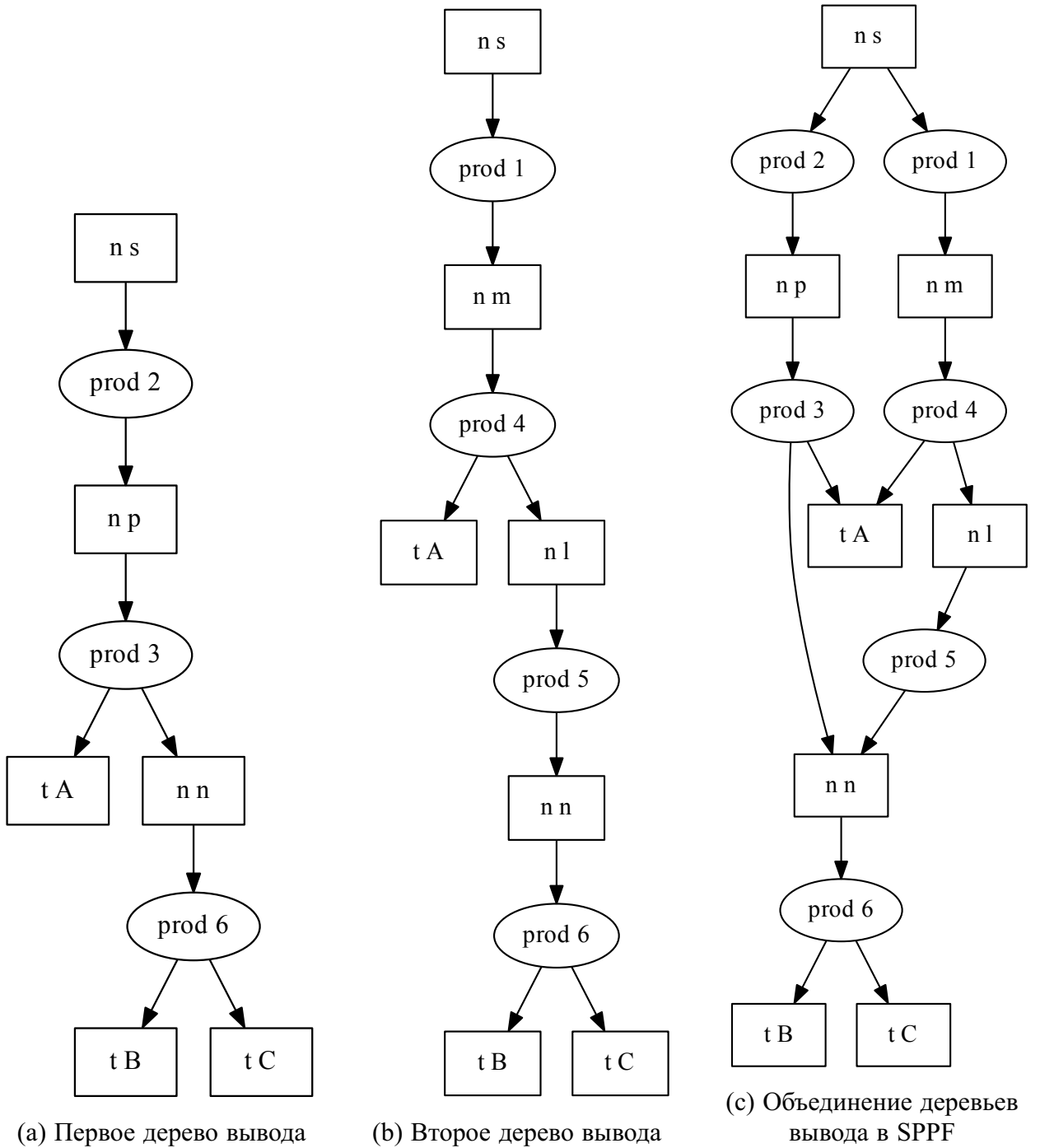


Рисунок 2: Пример SPPF для грамматики G_1 и входа **ABC**

дится 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

```

1: function PARSE(grammar, input)
2:    $\mathcal{R} \leftarrow \emptyset$        $\triangleright$  Очередь троек: вершина GSS, нетерминал, длина свёртки
3:    $\mathcal{Q} \leftarrow \emptyset$        $\triangleright$  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, vh, 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)

```

Листинг 7: RNGLR-алгоритм

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 представлено в листинге 8.

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

```

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  $\mathcal{R}$ 

```

Листинг 8: Построение GSS

SPPF, являющееся ориентированным графом и в данном случае обладающее следующей структурой.

1. *Корень* 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 такие 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.

Листинг 7 представляет более детальное описание алгоритма.

1.7 Используемые инструменты

В этом разделе описываются основные инструменты, использованные в работе: YaccConstructor [39, 73], выбранный в качестве основы для реализации алгоритма синтаксического анализа динамически формируемых выражений, и ReSharper SDK [74], использованный для разработки расширений для microsoft Visual Studio IDE.

1.7.1 YaccConstructor

Одной из задач данной работы является создание инструментария, упрощающего разработку целевых инструментов статического анализа строковых выражений, которые включают такие этапы, как лексический и синтаксический анализ. 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 YaccConstructor (YC) [39, 73] — исследовательский проект лаборатории языковых инструментов JetBrains, 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 .NET³, основным языком разработки — F#⁴ [77].

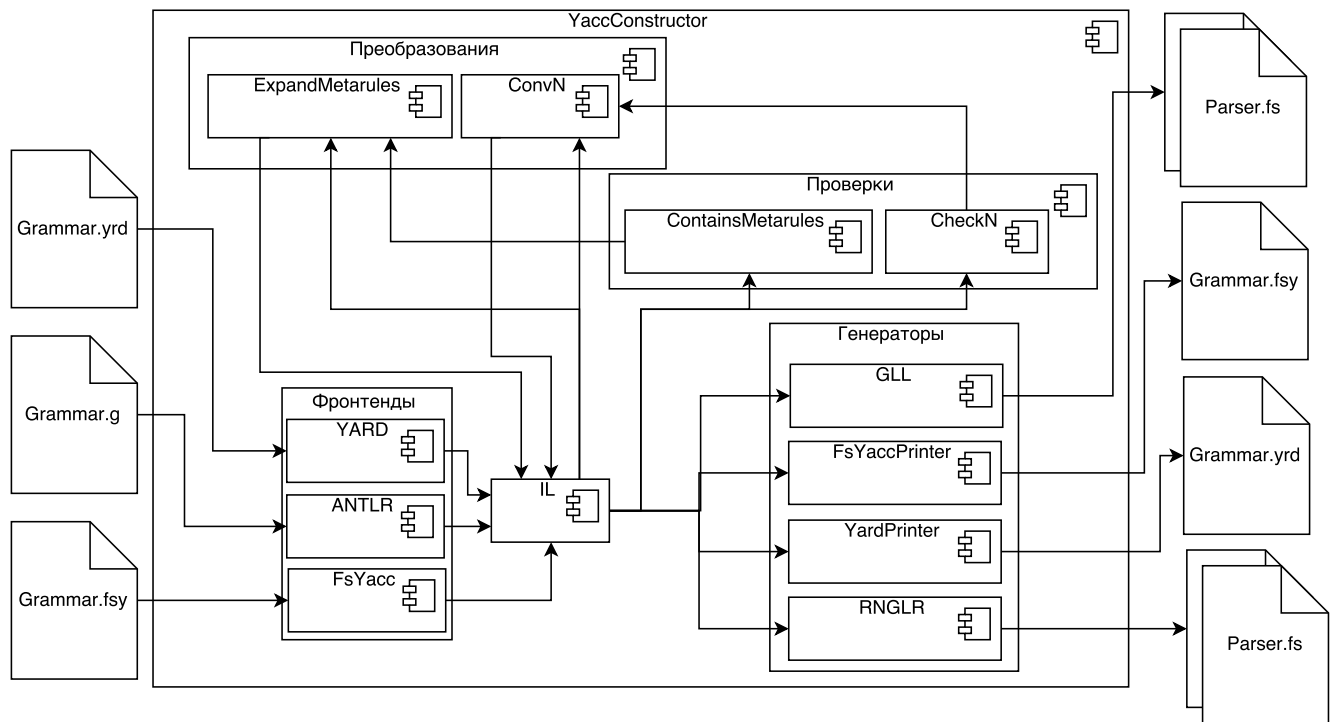


Рисунок 3: Архитектура платформы YaccConstructor

Архитектура YC, представленная на рисунке 3, 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 по внутреннему представлению грамматики получают результат, полезный для конечного пользователя. Например, это могут быть генераторы синтаксических анализаторов, основанные на различных алгоритмах или принтеры, генерирующие текст грамматики в определённом формате или на заданном языке. YC является расширя-

³Microsoft .NET — платформа для разработки программных продуктов компании Microsoft [75].

⁴F# — функциональный язык программирования для платформы .NET [76].

емой 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 ⁵ и многое другое. В листинге 9 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]

```

Листинг 9: Пример грамматики языка арифметических выражений на языке YARD

Выразительный синтаксис языка описания грамматики удобен для разработчика, однако генераторы, как правило, не поддерживают обработку грамматик в таком виде. Часто требуется, чтобы правая часть правила грамматики не содержала регулярных выражений, а состояла бы из цепочки из терминалов и нетерминалов. Это необходимо для работы алгоритма построения таблиц. Для решения этой задачи в УС реализован ряд преобразований грамматик. В результате их применения к грамматике, представленной в листинге 9, можно получить грамматику, представленную в листинге 10.

```

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

```

Листинг 10: Пример преобразованной грамматики языка арифметических выражений

Также в рамках платформы УС в качестве одного из модулей ранее был реализован генератор синтаксических анализаторов на основе RNLRLR-алгоритма.

⁵EBNF — расширенная форма Бэкуса-Наура. Грамматики в этой форме позволяют использовать регулярные выражения в правых частях правил [78].

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 представляется целесообразным создать на его основе целевое решение. Для этого необходимо окружение, способное обрабатывать внешний язык, поскольку такие операции над внешним языком, как построение дерева разбора, базовый анализ (например, 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 IDE [79]. 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 универсаль-

ностью. При решении нашей задачи универсальность не требовалась, поэтому можно было бы использовать менее универсальный и более простой механизм.

Такой механизм предоставляется ReSharper SDK [74]. ReSharper [80] — расширение для Microsoft Visual Studio, предоставляющее пользователю широкий набор дополнительных анализов кода. Для разработчиков предоставляется свободно распространяемая SDK, реализующая анализ 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, ReSharper SDK предоставляет более удобную “обёртку” над многими интерфейсами Microsoft Visual Studio, что упрощает взаимодействие с ней и полезно, например, при предоставлении результатов пользователю.

Следует также отметить, что 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 также и различные внешние.

Может быть выделена следующая функциональность ReSharper SDK, необходимую для реализации поддержки встроенных языков в Microsoft Visual Studio.

- Построение дерева 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 разработки целевого инструмента на основе представленных в данной работе результатов.

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.
- 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.
- Для эффективного решения этих задач необходимо структурное представление кода, однако на текущий момент не представлено законченного решения, позволяющего строить деревья вывода для динамически формируемых выражений.

Кроме того, обзор позволяет выявить следующие подходы, технологии и средства.

- В качестве приближения множества значений целесообразно использовать регулярную аппроксимацию [15, 49], 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 встроженных 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 динамически формируемых выражений можно выбрать алгоритм обобщённого синтаксического анализа [71], так как в нём 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 формально описана задача синтаксического анализа динамически формируемых выражений, а так же изложен алгоритм её решения. Также сформулированы и доказаны утверждения о корректности данного 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. Кроме того, программа \mathcal{P} может генерировать не все возможные выражения на SQL. 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 [57]. При этом разрешима в общем случае проверка включения регулярного языка в однозначный контекстно-свободный [57]. В однозначные контекстно-свободные языки попадают такие практически значимые классы, как LR(k) и LL(k), что позволяет использовать в качестве L_2 практически значимые языки. При этом для L_1 необходимо строить регулярное приближение L_R .

Чтобы обеспечить надёжность анализа строковых выражений, необходима 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

избегать слишком большого количества ошибок. В работе [49] 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 аппроксимация, построенная непосредственно по исходному коду, 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 и $\Sigma_1 \not\subseteq T$. Чтобы устранить эту проблему, можно воспользоваться конечным преобразователем, 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 $\Sigma_2 \subseteq T$. Преобразование конечного автомата над алфавитом символов в конечный автомат над алфавитом токенов называется 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 следую-

щим образом. Для данной однозначной контекстно-свободной грамматики $G = \langle T, N, P, S \rangle$ и детерминированного конечного автомата без ε -переходов $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, q_f)$ 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, необходимо построить алгоритм \mathbb{P} такой, что

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

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

Здесь $AST(t, \omega, G)$ — 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* (relaxed) синтаксического анализа регулярной аппроксимации динамически формируемого выражения.

2.2 Описание алгоритма ослабленного синтаксического анализа регулярной аппроксимации

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 , и не содержит 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, см. листинг 11).

Алгоритм производит обход графа входного автомата и последовательно строит стек в виде GSS подобно тому, как это делается 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 изменяет операции

```

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

```

Листинг 11: Алгоритм ослабленного синтаксического анализа регулярной аппроксимации динамически формируемого выражения

shift и reduce (смотри строку 5 в алгоритме 12 и строки 9 и 21 в алгоритме 13). Для того, чтобы управлять порядком обработки вершин входного графа, мы используем глобальную очередь Q . Каждый раз, когда добавляется новая вершина в GSS, сначала необходимо произвести все свёртки длины 0, и после этого выполнить сдвиг следующих токенов входного потока. Таким образом необходимо добавить соответствующую вершину графа в очередь на обработку. Добавление нового ребра в 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 листинге 11. 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 свёртки (смотри функцию `applyPassingReductions` в листинге 12).

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 изложе-

```

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( $v_h, startV, state_t, false$ )

```

Листинг 12: Обработка вершины внутреннего графа

нии называемую *внутренним графом*) посредством копирования графа входного автомата и связывания с его вершинами следующих коллекций:

- *processed* — содержит вершины GSS, для которых ранее были вычислены все операции push; это множество агрегирует все вершины GSS, ассоциированные с вершиной внутреннего графа;
- *unprocessed* — содержит вершины GSS, операции push для которых ещё только предстоит выполнить; это множество аналогично множеству \mathcal{Q} алгоритма RNGLR;

- *reductions* — это очередь, аналогичная очереди \mathcal{R} RNGLR-алгоритма: все операции *reduce*, которые ещё только предстоит выполнить;
- *passingReductionsToHandle* — содержит пары (a,b) , где a — это вершина GSS, а b — это ребро GSS, вдоль которого необходимо осуществлять проходящие свёртки.

Будем предполагать, что доступ к данным коллекциям осуществляется как к полям вершины: $V_1.processed$ — доступ к коллекции *processed*, связанной с вершиной V_1 .

```

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                                      $\triangleright$  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, statet, isZeroReduction)
14:   ( $v_t$ , isNew)  $\leftarrow$  ADDVERTEX(innerGraphV, statet)
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:      $Q.Enqueue(innerGraphV)$ 
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

```

Листинг 13: Построение GSS

Помимо состояния анализатора *state* и уровня *level* (который совпадает с состоянием входного автомата) в вершине GSS хранится также коллекция *проходящих свёрток*, то есть троек $(startV, N, l)$, соответствующих свёрткам, 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. листинг 12).

2.2.1 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. Непо-

средственно 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 различным 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.

Представленный в листинге 14 код динамически формирует выражение **expr** в строке 4.

```

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

Листинг 14: Пример кода на языке программирования C#, динамически формирующего скобочную последовательность

Множество значений выражения **expr** аппроксимируется регулярным выражением $(LBR\ RBR)^*$, где LBR — открывающая скобка, а RBR — закрывающая. Граф конечного автомата, задающего такую аппроксимацию, изображён на рисунке 4.

В результате работы предложенного алгоритма будет получено конечное представление леса разбора SPPF, изображённое на рисунке 5.

Из построенного SPPF можно извлечь бесконечное количество деревьев, каждое из которых является деревом вывода некоторой цепочки из регулярной аппроксимации. На серии рисунков 6, 7, 8 представлены извлечённые деревья разбора для различных значений выражения **expr**.



Рисунок 4: Конечный автомат, задающий регулярную аппроксимацию выражения **expr**



Рисунок 5: Конечное представление леса разбора для выражения **expr**

2.3 Доказательство корректности алгоритма ослабленного синтаксического анализа регулярной аппроксимации

ТЕОРЕМА 1. Алгоритм завершает работу для любых входных данных.



Рисунок 6: Дерево вывода для выражения $expr = "()"$



Рисунок 7: Дерево вывода для выражения $expr = "()()"$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. С каждой вершиной внутреннего представления графа входного конечного автомата ассоциировано не более N вершин графа GSS, где N — это количество состояний синтаксического анализатора. Таким образом, количество вершин в графе GSS ограничено сверху числом $N \times n$, где n — это 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.



Рисунок 8: Дерево вывода для выражения $expr = "()()()"$

Вершины добавляются в очередь Q только тогда, 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 .

Таким образом, 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, во-вторых, что для каждой корректной относительно эталонной грамматики цепочки существует корректное дерево вывода в SPPF.

ЛЕММА. Пусть обрабатывается внутренний граф $\mathcal{G} = (V, E)$. Тогда для каждого ребра GSS (v_t, v_h) такого, что $v_t \in V_t.\text{processed}$, $v_h \in V_h.\text{processed}$, где $V_t \in V$ и $V_h \in V$, терминалы ассоциированного поддерева соответствуют некоторому пути из вершины V_h в V_t в графе \mathcal{G} .

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Будем строить доказательство при помощи индукции по высоте дерева вывода H .

База индукции: $H = 1$. Возможны два случая.

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

Индукционный переход. Пусть корнем дерева высоты k является нетерминал N . По третьему пункту определения корректного дерева существует 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 связано с ребром (v_t^i, v_h^i) графа GSS и, так как его высота не больше $k - 1$, 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

Так как SPPF является сжатым представлением леса разбора, то для получения конкретного дерева его необходимо *извлечь* из SPPF.

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

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Рассмотрим произвольное дерево, извлечённое из SPPF, и докажем, что оно удовлетворяет определению 1. Первый и третий пункт определения корректного дерева следует из определения SPPF. Второй пункт определения следует из ЛЕММЫ, если применить её к рёбрам из GSS, начало которых лежит на последнем уровне стека и помечено принимающим состоянием, а конец — в вершинах на уровне 0. \square

ТЕОРЕМА 3. Для каждой строки, соответствующей пути p во входном графе, и выводимой в эталонной грамматике G , из SPPF может быть извлечено корректное дерево t . То есть t будет являться деревом вывода цепочки, соответствующей пути p , в грамматике G .

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Рассмотрим произвольное корректное дерево и докажем, что оно может быть извлечено из SPPF. Доказательство повторяет доказательство корректности для RNGLR-алгоритма [21], 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, так как во входном графе могут быть циклы и нет возможности упорядочить обработку его вершин. Это, в свою очередь, 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 . Таким образом гарантируется выполнение всех возможных свёрток и построение корректного дерева вывода. \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 3

Инструментальный пакет

В данной главе описан разработанный в рамках данной работы инструментальный пакет (Software Development Kit, SDK) **YC.SEL.SDK**, предназначенный для разработки различных решений по статическому анализу динамически формируемых выражений. Представлена архитектура разработанного SDK, а также архитектура надстройки **YC.SEL.SDK.ReSharper**, позволяющей создавать расширения для ReSharper, предоставляющие поддержку встроенных языков. Изложенный выше алгоритм синтаксического анализа реализован в рамках одной из компонент SDK. YC.SEL.SDK и YC.SEL.SDK.ReSharper являются **платформами** для разработки инструментов статического анализа динамически формируемого кода.

3.1 Архитектура

Практически любой язык программирования может использоваться как встроенный. При этом нет необходимости рассматривать различные языки, достаточно ограничиться диалектами одного языка. Например, существует множество различных диалектов SQL, каждый из которых имеет свои особенности и каждый из которых может оказаться встроенным языком. 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 решать в этой ситуации, могут быть различными (поиск ошибок, подсчёт метрик, автоматизация трансформаций и

т.д.). Реализовать универсальный инструмент, решающий все задачи для всех языков, не представляется возможным. Более целесообразно создать набор инструментов, упрощающий создание конечных решений для конкретных языков и конкретных задач. В качестве примера можно рассмотреть инструменты 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.

Требуемый набор инструментов для работы со встроенными языками должен поддерживать весь процесс обработки кода, который может выглядеть так, как представлено на рисунке 9. 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 отобразить для него соответствующим образом.

Существующие инструменты для работы со встроенными языками обычно реализуют поддержку какого-то фиксированного набора языков. При этом поддержка нового языка, как правило, требует нетривиальной доработки инструмента. Чтобы получить поддержку встроенного языка без изменений в исходном коде базового инструмента, необходимо предоставить соответствующий механизм.



Рисунок 9: Диаграмма последовательности обработки встроенных языков

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

Так как анализ внешнего языка является сложной самостоятельной задачей, то он не включён в разработанный SDK. На вход созданному на основе SDK инструменту должно подаваться дерево разбора внешнего языка с информацией, достаточной для решения поставленных в данной работе задач.

3.1.1 Архитектура YS.SEL.SDK

Разработанный SDK включает компоненты, необходимые для реализации шагов, представленных на рисунке 9 и описанных ранее, за исключением анализа внешнего языка. Архитектура SDK изображена на рисунке 10 и включает в себя генераторы анализаторов и различные библиотеки времени исполнения.

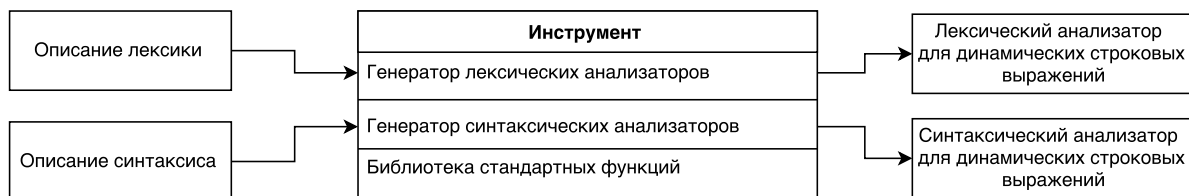


Рисунок 10: Архитектура SDK целиком

Так как анализ внешнего языка не входит в задачи разработанного SDK, то первый шаг, выполнение которого необходимо обеспечить, — это построение аппроксимации. В нашем случае строится регулярное приближение множества значений динамически формируемого выражения.

Построение регулярной аппроксимации основано на алгоритме, изложенном в работе [49], 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) [26], 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.

Архитектура компоненты, отвечающей за лексический анализ, представлена на рисунке 11. Основой является лексический анализатор, который состоит из двух частей: генератора лексических анализаторов, который по описанию лексики обрабатываемого языка, задаваемой в виде файла с расширением fsl (Lexer.fsl), строит соответствующий конечный преобразователь, и интерпретатор

ра, который производит анализ входной структуры данных на основе построенного генератором преобразователя. Конечный преобразователь, построенный по входной спецификации, описывается с виде кода на языке F# и сохраняется в файле (Lexer.fs). Далее данный файл может быть использован в пользовательском приложении, в рамках которого разрабатывается лексический анализатор, который устроен следующим образом. На вход принимается конечный автомат над символами, результатом работы является конечный автомат над алфавитом токенов анализируемого языка, полученный с помощью интерпретатора и преобразователя, построенного генератором. Входной конечный автомат может быть построен с помощью компоненты построения регулярной аппроксимации. Основные структуры данных — конечный автомат и конечный преобразователь — и функции работы с ними описаны в соответствующей библиотеке.

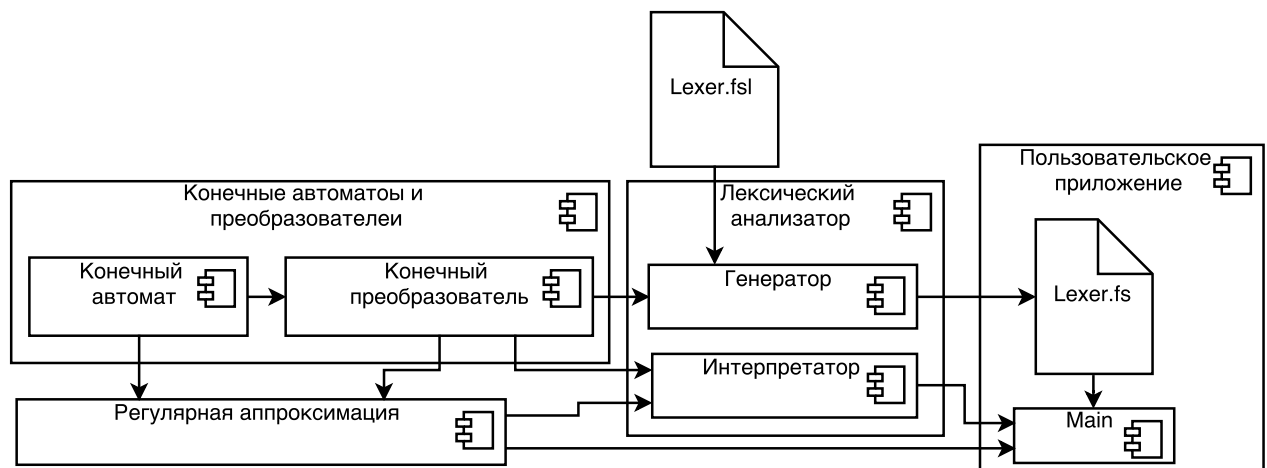


Рисунок 11: Архитектура лексического анализатора

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

Реализованный генератор лексических анализаторов обладает следующими особенностями.

- Поддерживаются разрывные токены, то есть токены формируемые из нескольких строковых литералов.
- Сохраняется привязка лексических единиц к исходному коду: сохраняется информация о строковом литерале, из которого породился токен и коор-

динаты его внутри этой строки. Так как одна лексическая единица может 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, названный ARNGLR, реализован на основе алгоритма, описанного в разделе 2.2. Его архитектура представлена на рисунке 12.

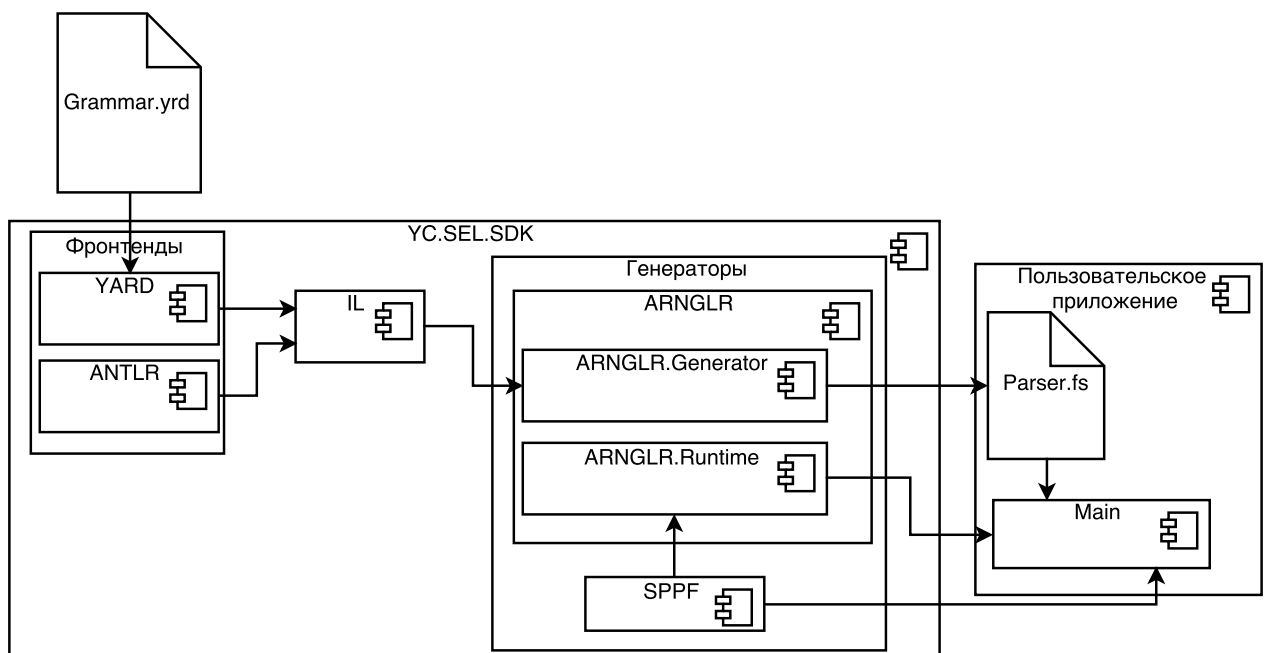


Рисунок 12: Архитектура синтаксического анализатора

Генератор реализован как один из модулей YC и может принимать на вход внутреннее представление грамматики (IL), которое может быть получено с помощью различных фронтендов (Frontends), однако в рамках YC.SEL.SDK основным фронтендом является YARD, так как он предоставляет наиболее развитые

средства для описания грамматик. По грамматике обрабатываемого языка строятся управляющие таблицы анализатора, которые сохраняются в файле `Parser.fs`. Построенные таблицы должны быть включены в разрабатываемое приложение `UserApplication`. Интерпретатор, предназначенный для синтаксического разбора конечного автомата, полученный после лексического анализа, реализован в виде отдельной библиотеки `ARNGLR.Runtime`, которая также должна быть подключена к разрабатываемому приложению. В результате работы интерпретатора будет получен SPPF, который может быть использован для дальнейшей обработки (например, подсчёта метрик). Для упрощения работы с SPPF реализован ряд вспомогательных функций.

3.1.2 Архитектура `YC.SEL.SDK.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 1.7.2. ReSharper.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 ReSharper.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 поддерживать все встроенные языки, так как встроенным может быть любой язык программирования. Также не было необходимости поддерживать все внешние языки программирования. Необходимо на базе разработанного `YC.SEL.SDK` 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 новыми языками. 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 надстройка над YC.SEL.SDK, упрощающая создание расширений для ReSharper, названная YC.SEL.SDK.ReSharper. В неё включены компоненты, реализующие функции, которые упрощают взаимодействие YC.SEL.SDK и ReSharper.SDK. Назначение основных из них описаны ниже.

- Общая точка расширения, необходимая для подключения функциональности для различных встроенных языков, которая может быть реализована в различных расширениях, к ReSharper через общий интерфейс. Также общая точка расширения позволяет использовать общую функциональность, необходимую для работы со встроенными языками.
- Отображение в IDE информации, полученной в ходе анализа. Например, подсветка синтаксиса и ошибок. Вывод диагностических сообщений с информацией об ошибках.
- Преобразование данных, из формата, используемого в ReSharper.SDK, в формат для YC.SEL.SDK. Например, преобразование графа потока управления внешнего языка, построенного ReSharper.SDK, в формат, пригодный для построения регулярной аппроксимации средствами YC.SEL.SDK.
- Управление работой анализаторов, необходимое, с одной стороны, для обеспечения своевременной реакции на изменения в коде, совершённые пользователем, а с другой, для прекращения вычислений, результаты которых уже не актуальны. Управление построено на основе общего для

ReSharper механизма, обеспечивающего асинхронную работу анализаторов. При этом вычисления могут быть прерваны, если, например, пользователь внёс в код изменения, делающие анализ или его результаты некорректными.

Как уже говорилось, 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 расширений конечным пользователем. Для этого в рамках YC.SEL.SDK.ReSharper была реализована возможность управления следующими основными параметрами расширений.

- 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 23.
- 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` [81] или же текст запроса может быть передан как аргумент конструктора класса `SqlCommand` [82] с последующим выполнением с помощью метода `ExecuteReader`.

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 15 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>

```

Листинг 15: Пример конфигурационного файла для настройки подсветки синтаксиса

Листинг 16 содержит пример описания точек интереса. Для каждой точки интереса должна быть указана следующая информация.

- Какому встроенному языку соответствует точка. Информация хранится в Xml-тэге `Language`.
- Полное имя метода, являющегося точкой интереса. Информация хранится в Xml-тэге `Method`.
- Порядковый номер аргумента данного метода, являющегося выражением на встроенном языке. Нумерация начинается с нуля. Информация хранится в Xml-тэге `ArgumentPosition`.
- Возвращаемый тип метода. Информация хранится в Xml-тэге `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>

```

Листинг 16: Пример конфигурационного файла для настройки точек интереса

3.2 Области и способы применения YC.SEL.SDK

Разработанный SDK предназначен для создания инструментов статического анализа динамически формируемых строковых выражений. Решения, созданные с его помощью, могут применяться для работы с проектами, активно использующими динамически формируемые строковые выражения. Необходимость работать с такими проектами может возникнуть, например, 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 [9]. 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.

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.

Шаг 1. 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.

Шаг 2. 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.

Шаг 3. 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.

Шаг 4. 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.

Шаг 5. Реализация механизма построения регулярной аппроксимации, результатом которого является функция, строящая конечный автомат над алфавитом символов. Данный механизм может быть реализован либо на основе предо-

ставляемого 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.

Шаг 6. 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.

Первый сценарий — 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.

Второй сценарий — 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 второго 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.

Шаг 7. 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 13 изображён один из возможных сценариев использования SDK. Особенностью является цикличность процесса, характерная, например для реинжиниринга программного обеспечения.



Рисунок 13: 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.

3.3 Особенности реализации

Разработка инструментального пакета с описанной выше архитектурой и плагинов для ReSharper велась в рамках исследовательского проекта YaccConstructor (YC), описанного в разделе 1.7.1. Разработка велась на платформе .NET и основным языком реализации — F# [77]. Весь исходный код опубликован на GitHub [73]. Большинство компонент опубликовано под “открытой” лицензией Apache License Version 2.0 [83].

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 ¹, 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 по-

¹DOT — текстовый язык описания графов [84].

строение аппроксимации, вспомогательные функции для упрощения построения целевых инструментов были реализованы “с нуля” в рамках проекта УС.

Бинарные пакеты, содержащие основную функциональность, опубликованы в сети интернет на NuGet ².

²NuGet — менеджер пакетов для платформы .NET и одноимённый ресурс для их публикации. Позволяет публиковать и устанавливать пакеты, автоматически отслеживать зависимости между ними [85].

Глава 4

Метод реинжиниринга встроенного программного кода

В данной главе изложен метод реинжиниринга встроенного программного кода, рассмотрены основные типы задач, указаны особенности обработки встроенных языков. Основной акцент сделан на обработку динамически формируемого SQL-кода, однако изложенный метод может быть адаптирован к обработке систем, использующих другие встроенные языки.

4.1 Особенности

Реинжиниринг информационных систем, как правило, является комплексной задачей, которая может включать в себя различные шаги, такие как анализ кода, рефакторинг, трансформацию, перенос на другие программно-аппаратные платформы [4]. При этом часто проводится всесторонний анализ многокомпонентной системы целиком, что приводит к необходимости учитывать различные особенности системы и работать с разнообразными артефактами: документацией, исходным кодом, конфигурационными скриптами, скриптами баз данных и т.д. В связи с высокой сложностью такого анализа, реинжиниринг, как правило, является автоматизированным, а не полностью автоматическим процессом, что означает возможность (и необходимость) активного участия человека. Напри-

мер, может оказаться, что в системе имеются файлы особого формата, и для их автоматической обработки потребуется создание уникального инструмента, что, в свою очередь, потребует значительных ресурсов. Однако размер этих файлов невелик и их ручной анализ прост. Таким образом, в ситуации, когда затраты на создание инструмента значительно выше затрат на ручной анализ с тем же качеством результата, часто оказывается выгоднее отказаться от создания инструмента.

При реинжиниринге информационных систем часто необходимо учитывать и динамически формируемый встроенный код. С одной стороны, такой код может содержать важную информацию о системе. Например, в динамически формируемых SQL-запросах могут содержаться сведения о схеме данных и особенностях работы с базой данных, не извлекаемые из внешнего кода. С другой стороны, при активном использовании динамически формируемый код является артефактом, требующим отдельного внимания и, следовательно, должен быть учтён, например, при оценке сложности системы, часто проводимой на начальных этапах реинжиниринга.

При большом количестве встроенного кода процесс его обработки необходимо автоматизировать. Однако, информационные системы используют встроенные языки с разной интенсивностью и разными способами. В зависимости от характера использования встроенных языков меняются требования к автоматизации их обработки: необходима ли инструментальная поддержка или ручная обработка потребует меньше ресурсов, чем создание или освоение инструмента, какими именно инструментами пользоваться в тех или иных случаях, на какие аспекты необходимо обратить внимание при принятии решений.

Необходимо отметить, что метод реинжиниринга информационных систем, учитывающий встроенный код, на настоящий момент отсутствует. Ниже такой метод представлен. Он является набором рекомендаций по выбору разработке конкретного инструментария для использования при реинжиниринге. Обработка системы сильно зависит от особенностей конкретного инструмента и решаемых задач и во многом должна быть изложена в инструкции по применению инструмента. По этой причине данный вопрос рассматриваться не будет.

4.2 Метод

Общая последовательность шагов метода представлена на рисунке 14.

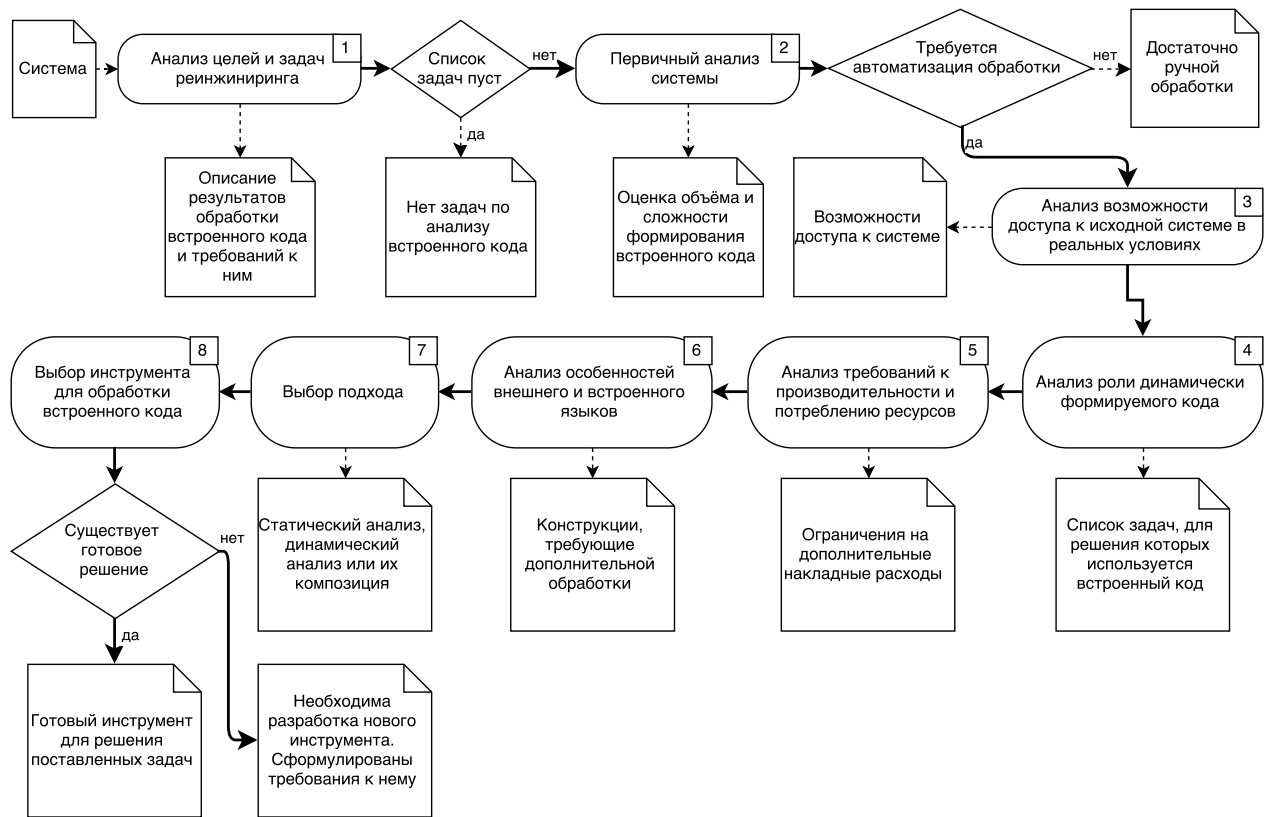


Рисунок 14: Основные шаги метода обработки встроенных языков и их результаты

В таблице 1 представлено подробное описание шагов с указанием вопросов, на которые необходимо ответить на каждом шаге и информации, необходимой для принятия соответствующих решений. Обсуждение этих шагов с описанием некоторых деталей и примеров приведено далее.

№	Шаг	Вопросы	Ресурсы	Результат
1	Анализ целей и задач.	Зачем. Что нужно сделать.	Цели. Задачи.	Цели реинжиниринга, для достижения которых необходима обработка встроенного кода. Список задач, при решении которых необходимо обрабатывать строковые выражения.

№	Шаг	Вопросы	Ресурсы	Результат
2	Первичный анализ системы.	Сколько в системе строковых выражений, требующих обработки. На сколько сложные строковые выражения используются.	Исходный код системы. Исходный код системы.	Количество точек интереса в анализируемой системе. Количество операторов для каждой точки интереса, участвующих в формировании соответствующего запроса.
3	Оценка доступа к исходной системе в реальных условиях.	Важность наличия доступа. Что доступно на чтение. Какие изменения возможно вносить в работающую систему.	Список задач, требующих обработки строковых выражений. Результаты шага 2: наличие динамически формируемых выражений. Заказчик. Заказчик.	Есть ли задачи, решение которых упрощается при наличии доступа к работающей системе. Можно ли их решать при его отсутствии. Какие данные и в каком объёме можно получать от работающей системы. Какого рода изменения и в какие модули можно вносить.
4	Выяснение роли встроенного кода в обрабатываемой системе.	Для чего используется встроенный код. На сколько активно используется встроенный код.	Код, документация, заказчик. Код, документация, заказчик.	Функциональная и архитектурная роли встроенного кода: является ли его использование основой дизайна системы, в каких компонентах используется. Количество точек интереса на компоненту/модуль/процедуру, на сколько интенсивно выполняется, на сколько производительность данной компоненты критична.

№	Шаг	Вопросы	Ресурсы	Результат
5	Анализ производительности и вычислительных ресурсов.	<p>Необходимо ли проводить данный анализ.</p> <p>На сколько критичен встроенный код.</p> <p>Какие существуют возможности для оценки использования и доступности вычислительных ресурсов.</p> <p>Есть ли запас вычислительных ресурсов.</p>	<p>Список задач, требующих обработки строковых выражений.</p> <p>Результаты шага 4.</p> <p>Заказчик, результаты шага 3.</p> <p>Заказчик.</p>	<p>Есть ли задачи, решение которых требует дополнительных накладных расходов во время работы системы. Можно ли их решать иными способами.</p> <p>На сколько производительность компонент, использующих встроенный код, критична для системы и на сколько она зависит от производительности встроенного кода.</p> <p>Есть ли возможность практически измерить потребление и доступность ресурсов.</p> <p>Есть ли запас вычислительных ресурсов, который можно использовать, в условиях работы целевой системы.</p>
6	Анализ языковых особенностей.	<p>Выделение особенностей, потенциально влияющих на решение поставленных задач.</p> <p>Проверка наличия выделенных особенностей в системе.</p>	<p>Список задач, требующих обработки строковых выражений, информация о используемых языках и средствах работы со встроенным кодом.</p> <p>Исходный код системы.</p>	<p>Список особенностей, потенциально сложных мест, обработка которых может потребовать дополнительных затрат.</p> <p>Список особенностей, присутствующих в обрабатываемой системе, их классификация и описание.</p>

№	Шаг	Вопросы	Ресурсы	Результат
7	Выбор подхода.	<p>Требуется ли изменение встроенного кода и сопровождение результатов.</p> <p>Наличие доступа к системе, работающей в реальных условиях.</p> <p>Доступность дополнительных вычислительных ресурсов.</p> <p>Требуемая точность при решении поставленных задач.</p> <p>Анализ особенностей.</p> <p>Анализ поставленных задач.</p>	<p>Цели реинжиниринга, список задач, требующих обработки строковых выражений.</p> <p>Результаты шага 3, список задач, требующих обработки строковых выражений.</p> <p>Результаты шага 5.</p> <p>Список задач, требующих обработки строковых выражений.</p> <p>Результаты шага 6.</p> <p>Список задач, требующих обработки строковых выражений.</p>	<p>На сколько естественным для разработчика должен выглядеть результат изменения встроенного кода.</p> <p>Возможности по работе с системой в реальных условиях, упрощающие решение поставленных задач.</p> <p>Есть ли возможность использовать дополнительные вычислительные ресурсы для динамической обработки встроенного кода.</p> <p>Сравнение точности при решении поставленных задач с использованием динамического и статического анализа и её соотнесение с требуемой.</p> <p>Есть ли в обрабатываемой системе особенности, влияющие на выбор подхода.</p> <p>Есть ли задачи, требующие строго определённого подхода к решению.</p>
8	Выбор инструмента для обработки встроенного кода.	<p>Требуется ли структурное представление встроенного кода.</p> <p>Как обрабатывать сложные случаи использования встроенного кода.</p> <p>Какой подход предпочтительнее: динамический или статический.</p> <p>Какая точность необходима при решении поставленных задач.</p>	<p>Список задач, требующих обработки строковых выражений.</p> <p>Результаты шага 6.</p> <p>Результаты шага 7.</p> <p>Цели, список задач, требующих обработки строковых выражений, заказчик.</p>	<p>Список задач, для решения которых требуется структурное представление встроенного кода.</p> <p>Дополнительные ограничения и требования, соблюдение которых необходимо для обработки сложных случаев, присутствующих в системе, и их реализуемость в рамках подходов и инструментов.</p> <p>Преимущества и недостатки подходов в контексте решаемых задач и ограничений и их соотнесение с возможностями инструментов.</p> <p>Оценка требуемой точности при решении поставленных задач и её сравнение с возможностями подходов и инструментов.</p>

Таблица 1: Основные шаги по подготовке к реинжинирингу системы, содержащей строковые выражения

Рассмотрим представленные в таблице 1 шаги более подробно.

1. Анализ целей и задач реинжиниринга.

На данном шаге необходимо проанализировать цели и задачи, ставящиеся в рамках проекта по реинжинирингу конкретной информационной системы. От того, какие задачи необходимо решать, напрямую зависит выбор средств и инструментов. Основные классы задач реинжиниринга информационных систем, затрагивающих динамически формируемый код, которые можно выделить на данном этапе, приведены ниже.

- Оценка качества кода и его сложности, что часто сводится к расчёту различных формальных метрик кода [53, 54]. Здесь необходимо определить, требуется ли построение структурного представления кода для вычисления требуемых метрик с необходимой точностью.
- Анализ надёжности системы, поиск различного рода уязвимостей и ошибок [86, 87]. При этом требуется изучение типов ошибок, которые предполагается обнаруживать: обнаружение некоторых типов ошибок требуют построения структурного представления кода (семантические ошибки), в то время, как в других случаях это не требуется (лексические, синтаксические ошибки).
- Извлечение или восстановлению утраченных знаний о системе [4, 86]. В зависимости от деталей этой задачи может потребоваться динамический анализ или структурное представление встроеного кода.
- Трансформация исходной системы: рефакторинг, перенос на новые программно-аппаратные системы [4, 86]. Для решения подобных задач, как правило, требуется структурное представление кода.

Особенно важен данный шаг при необходимости решать задачи трансформации динамически формируемого кода. Например, если необходимо как можно быстрее получить работающую систему, дальнейшее развитие которой не планируется, то можно пожертвовать качеством кода результирующей системы, что может существенно упростить его обработку. Однако, если после выполнения трансформации планируется активная разработка

или поддержка полученной системы, то к результирующему коду предъявляются дополнительные требования. Важными становятся, например, форматирование кода, его однородность (использование нескольких диалектов SQL вместо одного затрудняет работу с кодом), требуется сохранить не только внешнее поведение системы, но и её внутреннюю структуру на всех уровнях (пакеты, модули, процедуры). Выполнение этих условий упростит дальнейшую работу с кодом системы, позволит уменьшить затраты на обучение команды, поиск новых специалистов.

Например, при трансляции с одного диалекта на другой хранимого SQL-кода который активно использует динамический SQL, важно сохранить однородность результирующей системы в том смысле, что и основной код и встроенный должны быть написаны на одном и том же диалекте. Это особенно важно, если планируется дальнейшее развитие системы. Обусловлено это тем, что различные диалекты SQL содержат большое количество особенностей и разработчики на SQL часто оказываются специалистами достаточно узкого профиля. Таким образом, наличие двух различных диалектов вместо одного может усложнить набор команды. Более того, в процессе разработки необходимость переключаться между несколькими диалектами так же может вызвать трудности.

Таким образом, один из основных вопросов, на которые необходимо ответить при анализе целей: планируется ли активное изменение системы после её реинжиниринга, если он включает трансформации.

2. **Первичный анализ проекта.** На данном этапе необходимо проанализировать исходный код информационной системы и выяснить характеристики встроенного кода. Для этого, как правило, можно использовать стандартные средства статического анализа программного кода. Однако, скорее всего, они будут требовать модификации, поэтому необходимо иметь доступ к исходному коду этих инструментов. Необходимо оценить следующие характеристики кода информационной системы.

- Количество точек интереса — тех точек, где сформированное строковое выражение передаётся на обработку соответствующей компоненте. Это позволит оценить интенсивность использования встроенно-

го кода. Как правило, за выполнение выражений на встроенном языке отвечают характерные языковые конструкции, например EXECUTE в языке T-SQL. следовательно, необходимо оценить количество таких конструкций. Для грубой оценки можно использовать простой текстовый поиск. Он может оказаться полезным, так как если такой поиск говорит о полном отсутствии соответствующих конструкций, то дальнейший анализ можно не проводить. Для более точной оценки необходимо использовать структурное представление кода, чтобы, например, не учитывать код, находящийся в комментариях. Получить структурное представление и доступ к нему можно с помощью библиотек синтаксического анализа соответствующего языка.

- Сложность формирования строковых выражений. Прежде всего необходимо определить наличие динамически формируемого кода и оценить сложность его формирования, так как в случае использования только константных строковых литералов не потребуются специальных инструментов для анализа встроенного кода.

Для данной оценки можно использовать алгоритм протягивания констант [26], являющееся одним из стандартных шагов при статическом анализе кода. Однако потребуется его модификаций. Необходимо, чтобы отдельно обрабатывались выражения, отвечающие за формирование кода, и собиралась следующая информация о процессе формирования кода как для каждой точки выполнения, так и для всей системы в целом.

- Количество конкатенаций.
- Количество операторов ветвления: `if-then-else`, `switch-case` и т.д.
- Количество строковых функций: `replace`, `substring` и т.д.
- Количество циклов, как “явных” (`while`, `for`), так и организованных с помощью рекурсии.
- Количество переменных, значение которых нельзя полностью вычислить статически (например, они получают значение из пользовательского ввода).

- Факт формирования кода в “телах” более чем одного метода/-процедуры. Для получения данной информации в используемом инструменте необходима поддержка межпроцедурного анализа.

3. Возможности доступа к исходной системе в реальных условиях. Возможность изучения системы в реальных условиях может дать большое количество полезной информации, например интенсивность выполнения встроенного кода, что трудно или даже невозможно получить другими способами, так как даже тесты часто не воспроизводят реальные сценарии функционирования системы. Однако такой доступ часто оказывается невозможным или крайне затруднённым, что вызывается, с одной стороны, вопросами безопасности, с другой стороны, отсутствием возможности гарантировать, что внесение изменений, необходимых для получения требуемой информации (например, ведение дополнительного журнала) не отразится на работоспособности системы.

- Необходимо определить, есть ли доступ к системе, работающей в реальных условиях и что именно доступно: чтение определённых журнальных файлов, перехват сообщений на каком-либо уровне, доступ к базе данных системы.
- Необходимо выяснить, модификации какого рода разрешены, какая информация не является закрытой и может быть передана разработчикам. Это влияет на то, какие задачи можно решать при помощи динамического анализа.
- Необходимо определить, возможен ли запуск модифицированной системы в реальных условиях. Если это возможно, то важно убедиться, что будет возможность получить доступ к собранной информации. Наличие такой возможности может позволить, например, собрать информацию о том, с какими объектами работают с использованием динамически формируемых запросов при выполнении конкретных сценариев.

4. Роль динамически формируемого кода в системе. На данном шаге необходимо определить, какую роль в системе играют динамически формируемые запросы. Возможны следующие существенно различные ситуации.

- Использование динамически формируемого кода является один из основных элементов архитектуры системы. Данная ситуация, как правило, характеризуется большим количеством точек исполнения и наличием сложно формируемого кода. Важно определить, какие именно компоненты системы построены таким образом, так как использование встроенных языков может быть неоднородным. Средние значения по всей системе могут быть не велики, при этом ряд ключевых компонент могут быть построены с активным использованием динамически формируемого кода, а в остальных он отсутствует. При этом может оказаться, что ключевые компоненты являются ещё и самыми критическими по производительности частями системы.
- Динамически формируемый код используется как вспомогательное средство. Явным признаком такой ситуации является малое количество или полное отсутствие такого кода, но это не всегда так. Возможна ситуация, когда динамически формируемый код активно используется для реализации служебной и вспомогательной функциональности, например, для сбора статистики, администрирования и диагностики системы. Тот факт, что данная функциональность не является основной для системы, может позволить обращать меньше внимания, например, на производительность результатов трансформации встроенного кода. Это даёт больше возможностей для использования динамического подхода, так как накладные расходы на дополнительные вычисления во время работы системы не окажут существенного воздействия на производительность основных её функций.

5. Анализ требований к производительности и потреблению ресурсов. Необходимо определить, позволительны ли дополнительные накладные расходы на обработку встроенного кода при работе реальной системы. Ответ на данный вопрос особенно важен, например, при выборе между статическим и динамическим подходом к трансляции динамически форми-

руемого кода. Выполнение динамически формируемых SQL-запросов само по себе требует дополнительных ресурсов. Если на предыдущих шагах было выяснено, что динамически формируемый код активно используется в критическом по производительности фрагменте системы, а вычислительные ресурсы ограничены, то применение динамического подхода неприемлемо. Это связано с тем, что дополнительные вычисления для обработки кода существенно ухудшат быстродействие критических фрагментов системы.

6. Анализ особенностей конкретного внешнего и встроенного языков.

Многие задачи требуют комплексной обработки внешнего и встроенного кода. Например, при статическом поиске ошибок, включающем ошибки использования типов переменных, необходимо проводить анализ, проверяющий, что тип переменной во внешнем коде соответствует типу, возвращаемому запросом. Пример несовпадения типов приведён в листинге 17: переменная `result` имеет тип `List<string>`, однако запрос возвращает коллекцию двухэлементных кортежей.

Наличие некоторых связей внешнего и встроенного кода делает невозможным полностью динамический подход, так как без статического анализа не будет получена информация, необходимая для корректного преобразования внешнего кода. Примером такой ситуации может служить трансформация кода хранимой процедуры с динамическими запросами, формирующими запрос `SELECT` из T-SQL в PL-SQL. При этом результат данного запроса должен быть результатом процедуры. В T-SQL вне зависимости от типа сформированного запроса его выполнение производится с помощью команды `EXECUTE` и результат выполнения автоматически возвращается в качестве результата процедуры, а в PL-SQL для того, чтобы получить результат выполнения запроса и вернуть его наружу из процедуры необходимо использовать конструкцию `EXECUTE IMMEDIATE ... INTO out_var`¹, при этом `out_var` должна быть объявлена аргументом процедуры с модификатором `OUT`².

¹Языковая конструкция, которая позволяет выполнить запрос и сохранить результат его выполнения в переменной [88].

²Модификатор `OUT` для аргумента подпрограммы означает его передачу по ссылке, что позволяет возвращать его значение в вызывающую подпрограмму [89].

```

1 public List<string> NewReport
2   (int prodId = 0, int status = 0, int nType = 0)
3   {
4       int nProdIdL = prodId;
5
6       string sMagicKey = "[" + prodId.ToString() + ";
7
8       string tbl = status == 0 ? "InOrders " : "OutOrders ";
9
10      while (nProdIdL > 0)
11      {
12          sMagicKey = "[" + sMagicKey + ";
13          nProdIdL = nProdIdL - 1;
14      }
15
16      string sExec =
17          "SELECT sOrderDescription, " + sMagicKey
18          + " FROM ts." + tbl;
19
20      List<string> result = db.Execute(sExec);
21      return result;
22  }

```

Листинг 17: Пример кода метода на языке программирования C#, в котором ожидаемый и реальный тип результата запроса не совпадают

То есть в данном случае без статического анализа динамически формируемого кода невозможно корректно преобразовать внешний код.

Отдельно нужно проверить наличие конструкций, которые заведомо усложняют автоматическую обработку системы. Примером такой конструкции может служить оператор MERGE³ в PL-SQL, проекция которого в другие языки может потребовать существенных усилий.

7. **Выбор подхода.** Основной вопрос, который необходимо решить на данном шаге — это выбор между статическим и динамическим подходом или их композицией. На предыдущих шагах могли быть выявлены особенности, накладывающие ограничения на выбор. Может оказаться, что необходим не чистый статический [43] или динамический [29] подходы, а их смесь. Такая ситуация возникает, например, когда решение задачи с помощью статического анализа крайне затруднено или невозможно, но динамический подход требует неприемлемых накладных расходов. В данном случае

³Операция позволяющая одновременно добавлять новые записи и обновлять существующие [90].

может быть применён смешанный подход. Примером может послужить обработка конструкции MERGE, статическая проекция которой сложна. В данном случае на этапе статического анализа вычисляется вся информация, необходимая для трансформаций во время выполнения, которая может быть вычислена, и сохраняется, например, в специальных переменных. Далее, во время выполнения происходит окончательная трансформация кода и наличие заранее вычисленной информации сокращает накладные расходы.

8. Выбор инструмента для обработки встроенного кода. Результатом проделанного анализа должно стать решение о том, какими именно средствами проводить анализ встроенного кода. С одной стороны, необходимо выбрать готовый инструмент, если это возможно. Обзор основных существующих решений приведён в разделе 1.5 данной работы. Рассмотрим ситуаций, в которых возможно использование рассмотренных инструментов.

- Статический поиск синтаксических ошибок может быть автоматически проведён с помощью таких инструментов как JSA [61] или RHPSA [62] для сложно формируемых выражений. Для детальной диагностики может потребоваться применение таких инструментов, как Alvor [63], IntelliLang [66] или PHPStorm [67].
- Статическая трансформация встроенного кода, каждое выражение которого полностью содержится в константном литерале, может быть автоматически осуществлена SQL Ways [60].
- Для интерактивного изучения кода на PHP со встроенным HTML и JavaScript может использоваться Varis [69].
- Статическая трансформация встроенного кода со сложной логикой формирования может быть автоматизирована с помощью инструментов, разработанных на основе платформы, аналогичной представленной в данной работе.

С другой стороны необходимо определить границы автоматизации процесса, то есть определить, какая часть работ выполняется с помощью инструментов (автоматически), а какая — вручную. Провести чёткое разделение

крайне сложно, так как возможны различные ситуации в диапазоне от наличия готового инструмента, решающего необходимые задачи и специалистов, умеющих с ним работать, до отсутствия инструмента и специалистов, способных его создать. В такой ситуации характеристики системы, оцененные на предыдущих шагах, не являются решающим фактором в принятии решения о ручной обработке или автоматизации и её границах, однако являются необходимым условием для принятия правильного решения.

Кроме того, после изучения существующих инструментов, может быть принято решение о необходимости разработки собственного. В таком случае, проведённый анализ позволит сформулировать требования к нему, а основой для разработки может стать инструментальный пакет, предложенный в данной работе.

Использование изложенного выше метода позволяет принять решение о способе и инструментах обработки встроенного кода в системах, использующих встроенные языки, в контексте реинжиниринга. При этом метод учитывает такие характеристики динамически формируемого кода, как частота использования, сложность формирования выражений, его роль в системе, особенности целей и задач обработки системы.

Глава 5

Эксперименты, ограничения, обсуждение

Завершаемость и корректность предложенного алгоритма формально доказаны в рамках работы, однако его производительность требует экспериментальной оценки. При этом основной интерес представляет оценка на входных данных, близких к реальным. Кроме того, требуется оценить предложенную архитектуру и реализующую её платформу. Вместе с этим необходимо обсудить границы применимости полученных в работе результатов. Таким образом, в данной главе решаются следующие задачи.

- Описываются эксперименты, нацеленные на изучение перечисленных ниже вопросов.
 - Оценка производительности предложенного алгоритма.
 - Оценка возможностей предложенной архитектуры.
- Выявляются и обсуждаются ограничения полученных в данной работе результатов.

Оценка производительности производилась как на реальных данных, так и на синтетических. Краткое описание экспериментов приведено в таблице 2.

Таблица 2: Эксперименты по оценке производительности алгоритма синтаксического анализа динамически формируемых программ

Эксперимент	Что исследовалось
Измерения на промышленном проекте	Особенности реальных входных данных, времени работы на реальных данных
Измерение производительности на синтетических данных	Зависимость времени работы от структуры и размера входных данных
Сравнение производительности с другими реализациями аналогичных алгоритмов	Время работы на одинаковых входных данных

Краткое описание экспериментов по оценке предложенной в работе архитектуры и реализующей её платформы представлено в таблице 3.

Таблица 3: Эксперименты по оценке предложенной архитектуры

Эксперимент	Что исследовалось
Разработка синтаксического анализатора в промышленном проекте	Возможность заменять компоненты платформы на сторонние, реализованные ранее без использования платформы.
Разработка расширений для Microsoft Visual Studio IDE	Возможность переиспользования компонент при разработке нескольких однотипных инструментов на основе предложенной платформы. Функциональные возможности инструментов, разработанных на основе платформы.

Далее приводятся детальные описания экспериментов и их результатов.

5.1 Апробация в промышленном проекте по реинжинирингу

Реализованный инструментарий был апробирован в рамках промышленного проекта “S2O” по миграции базы данных с MS-SQL Server 2005 на Oracle 11gR2 компании ЗАО “Ланит-Терком”.

Система состояла из 850 хранимых процедур и содержала около 2,6 миллионов строк кода на T-SQL. В ней присутствовало 2430 точек выполнения динамических запросов, из которых больше 75% могли принимать более одного значения, а при их формировании использовалось от 7 до 212 операторов. При этом в среднем использовалось 40 операторов для формирования запроса [43].

Так как анализатор языка T-SQL был разработан ранее в рамках проекта, в котором происходило внедрение, то для создания анализатора встроенного SQL была использована готовая грамматика и по ней построен синтаксический анализатор. Построение регулярной аппроксимации и лексический анализ также были реализованы ранее в рамках основного проекта и были переиспользованы. Возможность комбинирования сторонних компонент, и компонент, созданных на основе YC.SEL.SDK, 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 5

Тесты проводились на вычислительном устройстве с параметрами, эквивалентными указанным в разделе 5.2. В ходе экспериментов измерялись следующие характеристики для каждой точки выполнения динамически формируемого запроса.

- Время обработки t в миллисекундах. Проводилось 10 запусков, время анализа усреднялось.
- Размер входного конечного автомата: количество состояний $\#Q$ и количество переходов $\#T$.
- Размер построенного SPPF: количество вершин $\#V$ и количество рёбер $\#E$.

- Результат анализа: '+' — завершился успешно, '—' — завершился с ошибкой, Т — завершён по таймауту.

Таблица 4: Распределение динамически формируемых SQL-запросов по времени обработки

Категория динамически формируемых запросов	Количество запросов	Время обработки (минуты)
Содержат корректные выражения	2188	14
Не содержат ни одного корректного выражения	240	9
Обработка завершена по таймауту	1	4
Всего	2430	27

Результаты измерений времени работы представлены в таблице 4. 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 поддержанных в существующей грамматике. Так как лексический анализатор и грамматика были полностью заимствованы из оригинального проекта, то наличие этих ошибок не является недоработками алгоритма синтаксического анализа. Общее время синтаксического анализа составило 27 минут, из них 13 минут было затрачено на разбор графов, не содержащих ни одного корректного выражения. Из них 256 секунд — обработка одного графа (5747 рёбер и 3897 вершин), прерванная по таймауту. Дальнейшие значения приводятся только для графов, которые удалось проанализировать. 604 из этих графов прождали ровно одно значение и анализировалось не более 1 миллисекунды. 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 15.

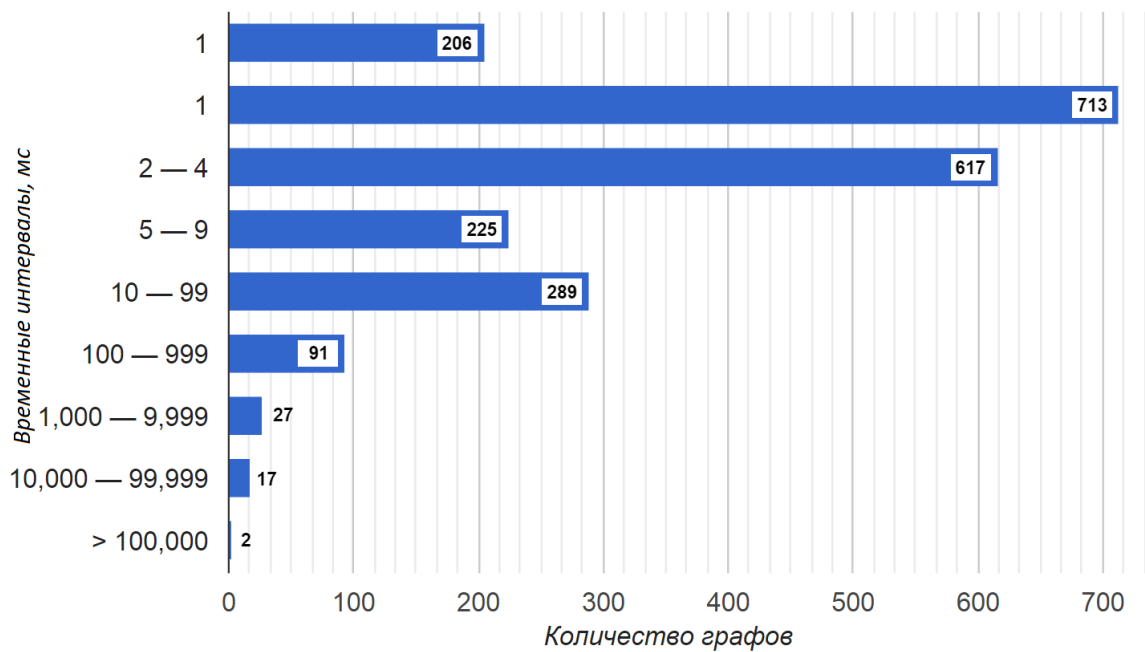


Рисунок 15: Распределение запросов по времени анализа

Таблица 5: Пример отчёта по результатам запуска синтаксического анализа в проекте “S2O”

№	t(мс)	r	Размер DFA		Размер SPPF	
			#Q	#T	#V	#E
1	6	+	75	76	1074	1075
2	73	+	104	806	18786	26377
3	64	+	79	750	17237	23954
4	15982	+	817	32281	920618	1885112
5	3	+	108	107	996	995
6	256000	T	3897	5747	0	0
7	28360	+	924	41408	1315491	2794517
8	17	+	236	506	4608	5165
9	207	+	928	2249	38709	57352
10	110	+	390	942	14757	21805
11	111	+	377	967	14812	21902
12	262	+	764	1907	33332	49955
13	3	+	117	116	1093	1092
14	3	+	92	92	1391	1391

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 архитектура SDK позволяет использовать отдельные компоненты независимо и комбинировать их. Результаты успешно внедрены в проект компании ЗАО “Ланит-Терком”.

5.2 Экспериментальная оценка производительности алгоритма

Алгоритм синтаксического анализа динамически формируемых выражений, описанный выше, был протестирован на нескольких наборах синтетических тестов, цель которых — убедиться в приемлемой производительности алгоритма на практически значимых входных данных. Анализ проекта “S2O” 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.

$$\begin{aligned} start_rule &::= s \\ s &::= s \text{ PLUS } n \\ n &::= \text{ONE} \mid \text{TWO} \mid \text{THREE} \mid \text{FOUR} \mid \\ &\quad \text{FIVE} \mid \text{SIX} \mid \text{SEVEN} \end{aligned}$$

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 лексического анализа регулярной аппроксимации, построенной по некоторой программе. В данном случае базовый блок — это шаблонный конечный автомат, который используется для построения тестовых конечных автоматов. Каждый пакет тестов характеризовался 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 16, если истина — то изображённые на рисунке 17).



Рисунок 16: Базовый блок без циклов при $height = 3$



Рисунок 17: Базовый блок, содержащий цикл, при $height = 3$

Замеры проводились на вычислительной станции со следующими характеристиками.

- Операционная система: Microsoft Windows 8.1 Pro.
- Тип системы: x64-based PC.
- Процессор: Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU @ 3.60GHz, 3601 Mhz, 4 Core(s), 8 Logical Processor(s).
- Объём оперативной памяти: 16.0 GB.

Чтобы выявить зависимость времени работы алгоритма от размера входных данных, были созданы пакеты из 500 тестов. Все тесты в каждом из пакетов содержали 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 вычислялось среднее время обработки одного графа. График, представленный на рисунке 18, иллюстрирует зависимость времени, затрачиваемого на синтаксический анализ, от количества повторения базового блока и количества ветвлений в каждом из них. Можно заметить, что время растёт линейно в зависимости от размера входного графа. График на рисунке 19 показывает, что наличие циклов в графе, при

одинаковом значении параметра *height*, увеличивает продолжительность анализа, при этом зависимость времени от размера графа остаётся линейной.



Рисунок 18: Зависимость времени работы алгоритма от размера входного графа при *isCycle = false*



Рисунок 19: Зависимость времени работы алгоритма от размера входного графа и наличия в нём циклов при *height = 4*

5.3 Сравнение с инструментом Alvor

Единственным доступным для сравнения инструментом, производящим синтаксический анализ динамически формируемого кода, является Alvor [16, 17]. Другие инструменты либо основаны на других подходах и решают другие задачи (например, [14, 15]), либо отсутствуют в открытом доступе (например, инструмент описываемый в работах [11, 12]). Alvor реализует близкий к представленному в работе подход: независимые шаги анализа, что позволяет легко выделить синтаксический анализ, который основан на GLR-алгоритме. Существенным отличием от разработанного алгоритма является то, что Alvor не строит деревья вывода. Важным для успешного проведения измерений является то, что исходный код Alvor опубликован [63], что позволяет модифицировать его таким образом, чтобы измерять параметры выполнения конкретных методов.

Сравнение производилось на синтетических тестах, которые строились по принципу, аналогичному изложенному в разделе 5.2. Так как Alvor на вход принимает регулярное выражение, называемое *абстрактной строкой* [17], а анализатор, созданный на основе YC.SEL.SDK — конечный автомат, то был реализован генератор, который по входным параметрам создает файл с абстрактной строкой и с описанием соответствующего автомата в формате DOT [84]. Синтаксис описания абстрактной строки приведён в листинге 18. При этом, абстрактная строка подвергалась последовательно лексическому и синтаксическому анализу и измерялось время работы последнего, а конечный автомат строился сразу над алфавитом токенов и подвергался синтаксическому анализу.

```

1 absStr = "str"
2       | '{'absStr(',' absStr)+'}' //alternatives
3       | absStr absStr           //concatenation
4       | absStr '*'               //closure

```

Листинг 18: Синтаксис описания абстрактной строки

Примеры тестовых входов для одинаковых входных параметров (однократного и двукратного повторения базовых блоков и $height = 2$) для инструмента на YC.SEL.SDK и Alvor представлены на рисунке 20 и листинге 19 соответственно.

Результаты измерений представлены в таблице 6 и на графике 20. В легенде и в заголовке таблицы указан инструмент (YC или Alvor) и значение параметра

```

1 "select "{"X3 + Y4","1"}",d from tbl"
2 "select "{"X3 + Y4","1"}","{"X7 + Y8","5"}",d from tbl"

```

Листинг 19: Пример абстрактных строк для $height = 2$ одного и двух повторений базового блока

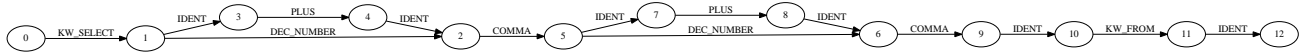


Рисунок 20: Входной граф для синтаксического анализатора на базе YC.SEL.SDK при $height = 2$ и двух повторениях базового блока

$height$ (например, $h=2$). При более чем шестнадцатикратном повторении блоков с $height = 2$ время работы Alvor превысило 30 минут и измерения были прекращены. Аналогичная ситуация возникает и при более чем десятикратном повторении блоков с $height = 3$. Таким образом, измерения показывают, что время работы анализатора Alvor растёт экспоненциально относительно количества повторений базового блока при $height > 1$. Анализатор созданный на основе YC.SEL.SDK в таких случаях имеет лучшую производительность. При этом на линейном входе Alvor работает быстрее. Однако, асимптотика YC.SEL.SDK на входных данных, имеющих подобную структуру, такая же, как у оригинального алгоритма RNGLR, что показано в предыдущих экспериментах. При этом существуют возможности для оптимизации текущей реализации, благодаря чему производительность на линейном входе может быть улучшена.

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. Отсутствие возможности быстро построить новый анализатор на основе Alvor помешало сравнению на реальных данных, так как даже только спецификация грамматики T-SQL является задачей, требующей большого количества времени. По этой причине замеры производились на синтетических тестах. В результате измерений выяснено, что производительность реализованного алгоритма синтаксического анализа лучше чем производительность аналогичного алгоритма, реализованного в инструменте Alvor на входных данных, содержащих большое количество ветвлений: Alvor показывает экспоненциальный рост времени обработки, а реализованный алгоритм полиномиальный, что согласуется с результатами, полу-

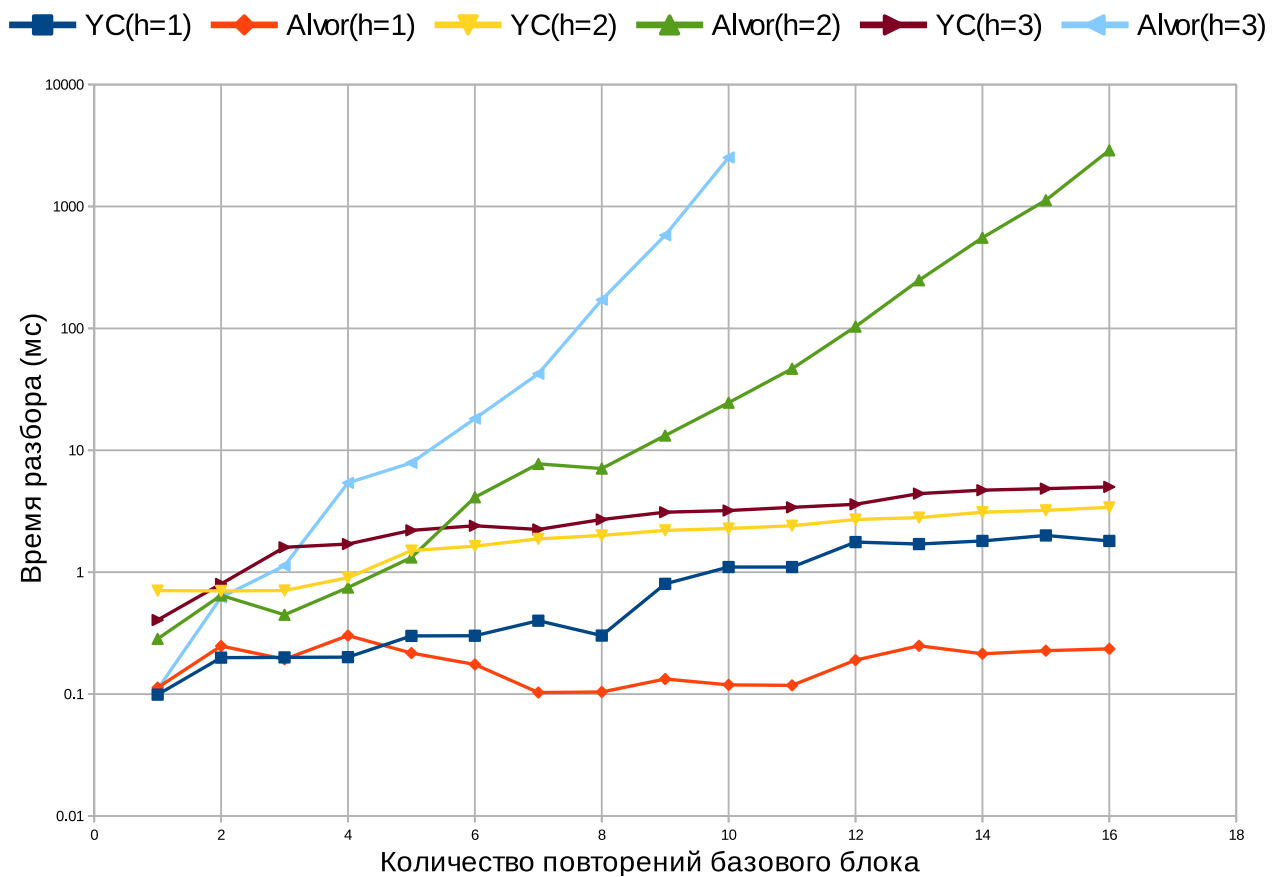


Рисунок 21: Сравнение производительности Alvor и синтаксического анализатора на базе YC.SEL.SDK

ченными в предыдущем разделе. При этом, Alvor не строит деревья разбора, в отличие от алгоритма, реализованного в данной работе.

5.4 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 языка T-SQL [91] и языка арифметических выражений Calc. Реализация данных расширений также являлась апробацией предложенной архитектуры разработанного инструментального пакета.

В рамках данного шага апробации были созданы лексические спецификации и грамматики соответствующих языков. Исходный код описаний опубликован в открытом доступе [92]. Далее, с помощью генераторов разработанного инстру-

Таблица 6: Результаты сравнения производительности Alvor и синтаксического анализатора на базе YC.SEL.SDK

YC(h=1)	Alvor(h=1)	YC(h=2)	Alvor(h=2)	YC(h=3)	Alvor(h=3)
0.099	0.113	0.706	0.284	0.405	0.11
0.199	0.248	0.702	0.646	0.801	0.622
0.2	0.193	0.707	0.447	1.601	1.129
0.201	0.302	0.901	0.748	1.701	5.403
0.3	0.217	1.502	1.32	2.203	7.89
0.301	0.175	1.635	4.114	2.402	18.187
0.4	0.103	1.877	7.734	2.24	42.447
0.302	0.104	2.002	7.076	2.704	171.529
0.802	0.133	2.202	13.204	3.104	580.545
1.102	0.119	2.282	24.578	3.204	2521.318
1.102	0.118	2.404	46.662	3.403	
1.766	0.19	2.704	103.417	3.605	
1.701	0.249	2.803	248.107	4.408	
1.803	0.214	3.103	554.314	4.706	
2.001	0.227	3.217	1125.976	4.843	
1.803	0.235	3.403	2886.261	5.006	

ментария 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 вода использовалась функциональность ReSharper SDK. Затем полученный граф переводился в обобщённое представление, по которому строилась регулярная аппроксимация средствами разработанного инструмента.

После того, как отдельные части были готовы, они были объединены в готовый плагин 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.

Компоненты предоставляют следующую функциональность: подсветка синтаксиса (рисунок 22), подсветка парных элементов (рисунок 23). Для языка Calc также реализована статическая диагностика семантических ошибок, а именно поиск использования необъявленных переменных. Это показывает, с одной сто-

роны, возможность непосредственного использования SPPF для проведения анализа динамически формируемого кода, а с другой — возможность реализации дополнительной функциональности, не являющейся общей функциональностью SDK.

Результаты статического поиска использования необъявленных переменных показан на рисунке 24. 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 сообщается пользователю.

```

33 public static void Execute()
34 {
35     Program.Eval("(1 + 2) * 3");
36     Program.ExecuteImmediate("insert into y (x,v) values (1,2)");
37 }

```

Рисунок 22: Пример подсветки синтаксиса для нескольких встроенных языков: SQL и Calc

<pre> 26 public static void Insert(bool cond) 27 { 28 var insertQuery = "insert into y(x"; 29 if (cond) 30 insertQuery += ", v"; 31 else 32 insertQuery = insertQuery + ", u"; 33 insertQuery += " values (1, 2)"; 34 Program.ExecuteImmediate(insertQuery); 35 } </pre>	<pre> 26 public static void Insert(bool cond) 27 { 28 var insertQuery = "insert into y(x"; 29 if (cond) 30 insertQuery += ", v"; 31 else 32 insertQuery = insertQuery + ", u"; 33 insertQuery += " values (1, 2)"; 34 Program.ExecuteImmediate(insertQuery); 35 } </pre>
<p>(a) Одной открывающей скобке соответствует несколько закрывающих</p>	<p>(b) Одной закрывающей скобке соответствует одна открывающая</p>

Рисунок 23: Пример подсветки парных скобок

```

17 public static void Execute(bool cond)
18 {
19     string query = "varX = 1;";
20     if (cond)
21         query += "varY = 2;";
22     query += "varZ = varX + varY;";
23     Program.ExtEval(query);
24 }

```

Рисунок 24: Пример статического обнаружения семантических ошибок для языка Calc


```

43  static int Calculate(bool cond)
44  {
45      Program.ExecuteImmediate("insert into y (x,v) values (1,2)");
46      var expr = "(10";
47      for (int i = 0; i < 10; ++i)
48      {
49          expr += " + 1";
50          if (cond)
51              expr += TrueCaseStr();
52      }
53      return Program.Eval(expr + ") /2");
54  }
55
56  static string TrueCaseStr()
57  {
58      return "*3";
59  }

```

Рисунок 25: Пример межпроцедурной обработки встроенных языков

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 26. Два пакета YC.SEL.Plugins.Calc и YC.SEL.Plugins.TSQL содержат функции, необходимые для поддержки соответствующих языков. Они расширяют возможности ReSharper как непосредственно, так и через пакет YC.SEL.Plugins.Core, который содержит функции, общие для обработки произвольных встроенных языков, что показывает возможность эффективного переиспользования при разработке однотипных инструментов.



Рисунок 26: Структура пакетов расширений для ReSharper, предоставляющих поддержку встроенных T-SQL и Calc

Дополнительно в результате разработки расширений было подтверждено, что независимость шагов обработки динамически формируемых выражений позволяет гибко переиспользовать компоненты, реализующие эти шаги. Например, анализаторы, разработанные в рамках расширений для ReSharper, используются в тестах, не связанных с ReSharper, то есть одни и те же анализаторы используются вместе с различными компонентами для построения аппроксимации.

5.5 Ограничения

Используемые подходы и алгоритмы накладывают ограничения на платформу и разрабатываемые на её основе инструменты. Данный раздел посвящён обсуждению этих ограничений.

Множество, являющееся аппроксимацией значений динамически формируемого выражения, принимаемое на вход алгоритмом синтаксического анализа, должно быть регулярным. То есть аппроксимация задаёт регулярный язык, в то время как язык, генерируемый программой, может быть рекурсивно-перечислимым. Это означает, что на этапе построения аппроксимации будет происходить потеря точности. Например, нехвостовая рекурсия не выражима в терминах регулярных множеств. Точность построения конкретной регулярной

аппроксимации зависит от конкретного алгоритма, используемого для этого. Алгоритм может реализовывать или не реализовывать межпроцедурный анализ, поддерживать или не поддерживать строковые операции, разными способами обрабатывать пользовательский ввод и другие ситуации, когда значение выражения вычислить невозможно. Наш алгоритм поддерживает межпроцедурный анализ и строковые операции.

Эталонный язык должен быть описан детерминированной контекстно-свободной грамматикой. Большинство языков программирования могут быть описаны такой грамматикой. Однако бывают исключения, например C++. С другой стороны, в документации языка может быть приведена недетерминированная грамматика, а её приведение к детерминированной может потребовать значительных временных затрат, так как общего алгоритма для такого преобразования не существует.

Вопросы быстродействия инструментов зависят от контекста их использования. Если при реинжиниринге время обработки кода не всегда является существенным фактором, то для многих инструментов, используемых в средах разработки, время отклика критично. Особенно это важно для функциональности, работающей в режиме “на лету”: подсветка синтаксиса, автодополнение, подсказки. Так как платформа создавалась с ориентацией на создание инструментов для реинжиниринга, то некоторые компоненты направлены на увеличение точности анализа в ущерб производительности. Так компонента построения регулярной аппроксимации, которая реализовывает алгоритм, гарантирующий построение приближения сверху, учитывает циклы и строковые функции [49]. Это повышает точность анализа, однако производительность может оказаться слишком низкой для использования в средах разработки. С другой стороны, при создании инструмента для IDE возможно заменить алгоритм построения аппроксимации на более быстрый, но менее точный. Например в инструменте Alvor [17], предназначенном прежде всего для интерактивной работы в среде разработки, предлагается именно такой алгоритм. При этом важно, что возможности платформы позволяют комбинировать различные реализации компонент. То есть можно использовать один и тот же синтаксический анализатор с разными вариантами лексического для получения требуемых характеристик результирующего инструмента. С другой стороны, текущая реализация содержит воз-

возможности для различного рода оптимизаций: некоторые алгоритмы могут быть ускорены с помощью распараллеливания. Выбор оптимальных структур данных, например для конечных автоматов, активно использующихся в рамках платформы, является темой отдельного исследования [93].

В 2015 году была опубликована работа [94], являющаяся одной из первых, посвящённой систематическому исследованию работы с SPPF в контексте обобщённого синтаксического анализа. В рамках анализа динамически формируемых выражений исследований в этом направлении не обнаружено. По этой причине в рамках данной работы реализован только прототип библиотеки, позволяющей решать некоторые задачи, например, поиск необъявленных переменных, над SPPF в общем виде. Теоретическое исследование данного вопроса является отдельной задачей. С другой стороны, было доказано, что из построенного SPPF могут быть извлечены деревья вывода для любых цепочек из аппроксимации, а с деревьями можно работать с помощью стандартных методов.

Глава 6

Сравнение и соотнесение

В данной главе представлено сравнение полученных результатов с основными существующими решениями в области анализа динамически формируемых строковых выражений. Описание существующих решений представлено в разделе 1.5 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 условно AbsPars, реализованным авторами работ по абстрактному синтаксическому анализу [11–13]. 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. Кроме того, стоит отметить, что Varis является очень молодым инструментом: впервые он был представлен в 2015 году на конференции ICSE¹. По этой причине детальная оценка его возможностей затруднена.

Для сравнения инструментов были выбраны критерии, представленные в таблице 7. Данные критерии позволяют оценить два основных результаты данной работы: алгоритм синтаксического анализа динамически формируемых выражений и архитектуру инструмента.

В таблице 8 приведены основные результаты сравнения инструментов статического анализа динамически формируемых строковых выражений на основе критериев, представленных ранее. Используются следующие обозначения.

¹Международная конференция по разработке программного обеспечения ISCE (International Conference on Software Engineering) [95].

Таблица 7: Критерии сравнения инструментов анализа динамически формируемых строковых выражений

Критерий	Название колонки в таблице с результатами сравнения 8	Описание
Алгоритм синтаксического анализа динамически формируемых выражений		
Построение леса разбора	Лес разбора	Предоставляет ли алгоритм и соответствующий инструмент функциональность по построению леса разбора динамически формируемого кода.
Поиск синтаксических ошибок	Синт. ошибки	Реализует ли алгоритм и соответствующий инструмент поиск синтаксических ошибок в динамически формируемом коде.
Поиск семантических ошибок	Сем. ошибки	Предоставляет ли алгоритм возможности для поиска семантических ошибок в динамически формируемом коде.
Архитектура		
Платформа для разработки	Платформа	Предоставляется ли в явном виде платформа для создания новых инструментов статического анализа динамически формируемых выражений.
Модульность обработки	Модульность	Выделены ли отдельные независимые шаги обработки или же анализ является монолитным. Реализованы ли соответствующие выделенным шагам независимые компоненты.

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

Таблица 8: Сравнение инструментов анализа динамически формируемых строковых выражений

Инструмент	Лес разбора	Синт. ошибки	Сем. ошибки	Платформа	Модульность
AbsPars	+– [*]	+	+	–	–
Alvor	–	+	–	–	+
JSA	–	+	–	–	–
PHPSA	–	+	–	–	–
IntelliLang	–	+	+	+– ^{**}	+
Varis	+ ^{***}	+	–	–	–
YC.SEL.SDK	+	– ^{****}	+	+	+

^{*} В работе [13] утверждается, что поддерживаются атрибутные грамматики для описания языка. Это даёт возможность описать семантику построения леса. При этом, в работе обсуждаются проблемы с падением точности анализа при использовании семантики, а построение леса не обсуждается. Возможность построения корректного конечного представления леса разбора требует отдельного исследования.

^{**} IntelliLang использует возможности платформы IntelliJ IDEA [68], по этому расширение некоторых возможностей унифицировано, однако самостоятельной платформы для анализа встроенных языков не предоставляется.

^{***} Такие свойства конструируемой структуры данных, как конечность, а так же возможности её дальнейшей обработки в общем виде не обсуждаются.

^{****} Возможность диагностики синтаксических ошибок не реализована на данный момент в рамках платформы. Однако данная задача может быть решена другими инструментами, так как обработка производится по шагам и возможно добавить новый без существенных затрат.

Метод реинжиниринга встроенного программного кода сформулирован впервые. Большинство существующих работ и инструментов посвящены решению конкретных задач, часто входящих в состав мероприятий по реинжинирингу. Вместе с этим, работа [31] рассматривает вопрос учёта встроенного SQL-кода при оценке качества информационных систем и описывает метод решения данной задачи. Однако, метод затрагивает только часть области и является более специальным и узко направленным, чем предложенный в данной работе.

Проведённое сравнение позволяет выявить несколько аспектов.

- Многие инструменты могут быть расширены, однако ранее не предоставлялось полноценного самостоятельного инструментария специально предназначенного для создания новых инструментов для обработки динамически формируемых выражений.
- Основная цель большинства инструментов — это проверка корректности динамически формируемого кода. Прежде всего осуществляется поиск синтаксических ошибок.
- Инструменты реализованы на основе разных подходов и предназначены для решения разных задач, поэтому детальное сравнение их возможностей, производительности и других аспектов не представляется оправданным. Например, инструмент PHPSA изначально создавался для решения задачи проверки корректности динамически формируемых выражений и отсутствие подсветки синтаксиса не является его недостатком.
- Существование различных инструментов для решения различных задач и создание новых говорит о том, что обработка встроенных языков является актуальной задачей.

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

Заключение

Итоги диссертационной работы

В качестве итогов работы приведём основные полученные в ходе выполнения исследования результаты.

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. Доказана завершаемость и корректность предложенного алгоритма при анализе регулярной аппроксимации, представимой в виде произвольного конечного автомата без ε -переходов.
2. Создана архитектура инструментария для разработки программных средств статического анализа динамически формируемых строковых выражений.
3. Разработан метод реинжиниринга встроенного программного кода в проектах по реинжинирингу информационных систем. Данный метод применён 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, реализован инструментальный пакет для разработки средств статического анализа динамически формируемых выражений. На его основе реализован плагин для ReSharper. Код опубликован на сервисе GitHub под лицензией Apache License Version 2.0 [73].

Рекомендации по применению результатов работы

При применении результатов работы в индустрии и научных исследованиях необходимо учитывать следующие аспекты.

- Множество, являющееся аппроксимацией значений динамически формируемого выражения, принимаемое на вход алгоритмом синтаксического анализа, должно быть регулярным.
- Эталонный язык должен быть описан детерминированной контекстно-свободной грамматикой.
- Так как платформа создавалась с ориентацией на создание инструментов для реинжиниринга, то некоторые компоненты направлены на увеличение точности анализа в ущерб производительности. При этом важно, что возможности платформы позволяют комбинировать различные реализации компонент. С другой стороны, текущая реализация содержит возможности для различного рода оптимизаций: некоторые алгоритмы могут быть ускорены с помощью распараллеливания. Выбор оптимальных структур данных, например для конечных автоматов, активно использующихся в рамках платформы, является темой отдельного исследования [93].
- Теоретическое исследование вопросов, связанных с обработкой SPPF в общем виде, является открытой исследовательской задачей. С другой стороны, было доказано, что из построенного SPPF могут быть извлечены деревья вывода для любых цепочек из аппроксимации, а с деревьями можно работать с помощью стандартных методов.

Перспективы дальнейшей разработки тематики

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 [96, 97].

Важной задачей является теоретическая оценка сложности предложенного алгоритма синтаксического анализа. В известных работах не приводится 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) [41, 98]. Планируется исследовать возможность улучшения предложенного алгоритма при переходе на другие алгоритмы обобщённого LR-анализа [71], например, такие как BRNGLR [99] и RIGLR [22].

Кроме того, важной задачей является реализация диагностики ошибок, решение которой для обобщённого восходящего анализа активно исследуется [24, 25, 100, 101]. Адаптация предложенных решений для применения в представленном алгоритме требует отдельной работы.

Также в дальнейшем 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 [43] 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.

Литература

1. Louridas, P. Static code analysis / P. Louridas // Software, IEEE. — 2006. — Vol. 23, no. 4. — P. 58–61.
2. Black, P. Static analyzers in software engineering / P. Black // CrossTalk, The Journal of Defense Software Engineering. — 2009. — P. 16–17.
3. Bardas, A. G. Static Code Analysis / A. G. Bardas // Journal of Information Systems & Operations Management. — 2010. — Vol. 4, no. 2. — P. 99–107.
4. Терехов, А.Н. Автоматизированный реинжиниринг программ / А.Н. Терехов, А.А Терехов. — СПб: Издательство С.-Петербургского университета, 2000.
5. 9075:1992, ISO. ISO/IEC. Information technology — Database languages — SQL. — 1992.
6. Hougland, D. Core JSP / D. Hougland, A. Tavistock. — Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2000.
7. Описание взаимодействия программ на PHP с СУБД mySQL [Электронный ресурс]. — URL: <http://php.net/manual/en/mysql.query.php> (дата обращения: 11.06.2015).
8. O’Neil, E. J. Object/relational mapping 2008: hibernate and the entity data model (edm) / E. J. O’Neil // Proceedings of the 2008 ACM SIGMOD international conference on Management of data / ACM. — 2008. — P. 1351–1356.
9. Cleve, A. Data-Intensive System Evolution / A. Cleve, T. Mens, J. L. Hainaut // IEEE Computer. — 2010. — Vol. 43, no. 8. — P. 110–112.

10. Seipel, D. JSquash: Source Code Analysis of Embedded Database Applications for Determining SQL Statements / D. Seipel, A. M. Boehm, M. Fröhlich // Proceedings of the 18th International Conference on Applications of Declarative Programming and Knowledge Management. — INAP'09. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. — P. 153–169.
11. Doh, K. G. Abstract Parsing: Static Analysis of Dynamically Generated String Output Using LR-Parsing Technology / K. G. Doh, H. Kim, D. A. Schmidt // Proceedings of the 16th International Symposium on Static Analysis. — SAS '09. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. — P. 256–272.
12. Doh, K. G. Abstract LR-parsing / K. G. Doh, H. Kim, D. A. Schmidt // Formal Modeling / Ed. by Gul Agha, José Meseguer, Olivier Danvy. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. — P. 90–109.
13. Doh, K. G. Static Validation of Dynamically Generated HTML Documents Based on Abstract Parsing and Semantic Processing / K. G. Doh, H. Kim, D. A. Schmidt // Static Analysis. — Springer Berlin Heidelberg, 2013. — Vol. 7935 of *Lecture Notes in Computer Science*. — P. 194–214.
14. Minamide, Y. Static Approximation of Dynamically Generated Web Pages / Y. Minamide // Proceedings of the 14th International Conference on World Wide Web. — WWW '05. — New York, NY, USA: ACM, 2005. — P. 432–441.
15. Christensen, A. S. Precise Analysis of String Expressions / A. S. Christensen, A. Møller, M. I. Schwartzbach // Proc. 10th International Static Analysis Symposium (SAS). — Vol. 2694 of *LNCS*. — Springer-Verlag, 2003. — P. 1–18.
16. Annamaa, A. An Interactive Tool for Analyzing Embedded SQL Queries / A. Annamaa, A. Breslav, J. Kabanov, V. Vene // Proceedings of the 8th Asian Conference on Programming Languages and Systems. — APLAS'10. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. — P. 131–138.
17. Annamaa, A. Using Abstract Lexical Analysis and Parsing to Detect Errors in String-Embedded DSL Statements / A. Annamaa, A. Breslav, V. Vene // Proceedings of the 22nd Nordic Workshop on Programming Theory. — 2010. — P. 20–22.

18. Fu, X. A Static Analysis Framework For Detecting SQL Injection Vulnerabilities / X. Fu, X. Lu, B. Peltsverger, S. Chen, K. Qian, L. Tao // Proceedings of the 31st Annual International Computer Software and Applications Conference - Volume 01. — COMPSAC '07. — Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2007. — P. 87–96.
19. Dasgupta, A. A Static Analysis Framework for Database Applications / A. Dasgupta, V. Narasayya, M. Syamala // Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Data Engineering. — ICDE '09. — Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009. — P. 1403–1414.
20. Tomita, M. An Efficient Context-free Parsing Algorithm for Natural Languages / M. Tomita // Proceedings of the 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2. — IJCAI'85. — San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1985. — P. 756–764.
21. Scott, E. Right Nulled GLR Parsers / E. Scott, A. Johnstone // ACM Trans. Program. Lang. Syst. — 2006. — Vol. 28, no. 4. — P. 577–618.
22. Scott, E. Generalized Bottom Up Parsers With Reduced Stack Activity / E. Scott, A. Johnstone // Comput. J. — 2005. — Vol. 48, no. 5. — P. 565–587.
23. Rekers, J. G. Parser Generation for Interactive Environments. — 1992.
24. de Jonge, M. Natural and Flexible Error Recovery for Generated Modular Language Environments / M. de Jonge, L. C. Kats, E. Visser, E. Söderberg // ACM Trans. Program. Lang. Syst. — 2012. — Vol. 34, no. 4. — P. 15:1–15:50.
25. Kats, L. C. Providing Rapid Feedback in Generated Modular Language Environments: Adding Error Recovery to Scannerless generalized-LR Parsing / L. C. Kats, M. de Jonge, E. Nilsson-Nyman, E. Visser // SIGPLAN Not. — 2009. — Vol. 44, no. 10. — P. 445–464.
26. Aho, A. V. Compilers: Principles, Techniques, and Tools / A. V. Aho, R. Sethi, J. D. Ullman. — Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1986.

27. Brooker, R.A. The compiler compiler / R.A. Brooker, I.R. MacCallum, D. Morris, J.S. Rohl // Annual review in automatic programming. — 1963. — Vol. 3. — P. 229–275.
28. Johnson, S. C. Yacc: Yet another compiler-compiler / S. C. Johnson. — Bell Laboratories Murray Hill, NJ, 1975. — Vol. 32.
29. Шапот, М.Д. Реинжиниринг баз данных / М.Д Шапот, Э.В. Попов // Открытые системы. — 2004. — № 4. — С. 110–112.
30. Cleve, A. Dynamic Analysis of SQL Statements for Data-Intensive Applications Reverse Engineering / A. Cleve, J. L. Hainaut // Proceedings of the 2008 15th Working Conference on Reverse Engineering. — WCRE '08. — Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2008. — P. 192–196.
31. Van, Den Brink H. Quality Assessment for Embedded SQL / Den Brink H. Van, Der Leek R. Van, J. Visser // Proceedings of the Seventh IEEE International Working Conference on Source Code Analysis and Manipulation. — SCAM '07. — Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2007. — P. 163–170.
32. Chomsky, N. Some methodological remarks on generative grammar / N Chomsky // Aspects of the Theory of Syntax. — 1961. — P. 183–218.
33. Chomsky, N. Syntactic structures / N Chomsky. — Walter de Gruyter, 2002.
34. Ахтырченко, К.В. Методы и технологии реинжиниринга ИС / К.В. Ахтырченко, Т.П. Сорокваша // Труды Института системного программирования РАН. — 2003. — Vol. 4.
35. Wagner, C. Model-Driven Software Migration: A Methodology: Reengineering, Recovery and Modernization of Legacy Systems / C. Wagner. — Springer Science & Business Media, 2014.
36. Miller, H. W. Reengineering legacy software systems / H. W. Miller. — Digital Press, 1998.
37. Arnold, R. Software Reengineering (IEEE Computer Society Press Tutorial) / R. Arnold // IEEE Computer Society. — 1993.

38. Список победителей конкурса УМНИК [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.fasie.ru/obyavleniya/9-obyavleniya-dlya-zayavitelej/1762-opublikovan-spisok-pobeditelej-programmy-umnik-2-go> (дата обращения: 29.07.2015).
39. Kirilenko, I. Syntax Analyzers Development in Automated Reengineering of Informational System / I. Kirilenko, S. Grigorev, D. Avdiukhin // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. — 2013. — Vol. 174, no. 3. — P. 94–98.
40. Кириленко, Я. А. Инструментальная поддержка встроенных языков в интегрированных средах разработки / Я. А. Кириленко, С. В. Григорьев, Д. А. Авдюхин // Моделирование и анализ информационных систем. — 2014. — Т. 21, № 6. — С. 131–143.
41. Grigorev, S. Generalized Table-Based LL-Parsing / S. Grigorev, A. Ragozina // Systems and Means of Informatics. — 2014. — Vol. 25, no. 1. — P. 89–107.
42. Grigorev, S. GLR-based Abstract Parsing / S. Grigorev, I. Kirilenko // Proceedings of the 9th Central and Eastern European Software Engineering Conference in Russia. — CEE-SECR '13. — New York, NY, USA: ACM, 2013. — P. 5:1–5:9.
43. Grigorev, S. From Abstract Parsing to Abstract Translation / S. Grigorev, I. Kirilenko // Preliminary Proceedings of the 8th Spring/Summer Young Researchers Colloquium on Software Engineering. — 2013. — P. 135–139.
44. Grigorev, S. String-embedded Language Support in Integrated Development Environment / S. Grigorev, E. Verbitskaia, A. Ivanov, M. Polubelova, E. Mavchun // Proceedings of the 10th Central and Eastern European Software Engineering Conference in Russia. — CEE-SECR '14. — New York, NY, USA: ACM, 2014. — P. 21:1–21:11.
45. Verbitskaia, E. Relaxed Parsing of Regular Approximations of String-Embedded Languages / E. Verbitskaia, S. Grigorev, D. Avdyukhin // Preliminary Proceedings of the PSI 2015: 10th International Andrei Ershov Memorial Conference. — PSI'15. — 2015. — P. 1–12.

46. Yu, F. String Analysis. — 2008.
47. Chomsky, N. Three models for the description of language / N. Chomsky // IRE Transactions on Information Theory. — 1956. — P. 113–124.
48. Pitts, A. M. Lecture Notes on Regular Languages and Finite Automata for Part IA of the Computer Science Tripos / A. M. Pitts / Cambridge University Computer Laboratory. — 2010.
49. Yu, F. Automata-based Symbolic String Analysis for Vulnerability Detection / F. Yu, M. Alkhalaf, T. Bultan, O. H. Ibarra // Form. Methods Syst. Des. — 2014. — Vol. 44, no. 1. — P. 44–70.
50. Hanneforth, T. Finite-state Machines: Theory and Applications Unweighted Finite-state Automata / T. Hanneforth / Institut fur Linguistik Universitat Potsdam. — 2010.
51. Mohri, M. Finite-state Transducers in Language and Speech Processing / M. Mohri // Comput. Linguist. — 1997. — Vol. 23, no. 2. — P. 269–311.
52. Smith, Z. Development of Tools to Manage Embedded SQL / Z. Smith // Proceedings of the 49th Annual Southeast Regional Conference. — ACM-SE '11. — New York, NY, USA: ACM, 2011. — P. 358–359.
53. Fenton, N. Software Metrics (2Nd Ed.): A Rigorous and Practical Approach / N. Fenton, S. L. Pfleeger. — Boston, MA, USA: PWS Publishing Co., 1997.
54. Van, Den Brink H. A Framework to Distil SQL Queries Out of Host Languages in Order to Apply Quality Metrics. — 2007.
55. Cleve, A. Database semantics recovery through analysis of dynamic SQL statements / A. Cleve, J. R. Meurisse, J. L. Hainaut // Journal on data semantics XV. — Springer, 2011. — P. 130–157.
56. Ernst, M. D. Static and dynamic analysis: Synergy and duality / M. D. Ernst // WODA 2003: ICSE Workshop on Dynamic Analysis / Citeseer. — 2003. — P. 24–27.

57. Asveld, P. R. J. The Inclusion Problem for Some Subclasses of Context-free Languages / P. R. J. Asveld, A. Nijholt // Theor. Comput. Sci. — 1999. — Vol. 230, no. 1-2. — P. 247–256.
58. Сайт инструмента PL/SQL Developer [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.allroundautomations.com/plsqldev.html> (дата обращения: 11.06.2015).
59. Сайт инструмента SwissSQL [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.swissql.com/> (дата обращения: 11.06.2015).
60. Сайт инструмента SQL Ways [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.ispirer.com/products> (дата обращения: 11.06.2015).
61. Сайт проекта Java String Analyzer [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.brics.dk/JSA/> (дата обращения: 11.06.2015).
62. Сайт проекта PHP String Analyzer [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.score.cs.tsukuba.ac.jp/~minamide/phpsa/> (дата обращения: 11.06.2015).
63. Сайт проекта Alvor [Электронный ресурс]. — URL: <http://code.google.com/p/alvor/> (дата обращения: 11.06.2015).
64. Сайт интегрированной среды разработки Eclipse [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.eclipse.org/ide/> (дата обращения: 29.07.2015).
65. Сайт проекта JFlex [Электронный ресурс]. — URL: <http://jflex.de/> (дата обращения: 11.06.2015).
66. Сайт плагина IntelliJLang [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.jetbrains.com/idea/help/intelli-lang.html> (дата обращения: 11.06.2015).
67. Сайт интегрированной среды разработки PhpStorm [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.jetbrains.com/phpstorm/> (дата обращения: 11.06.2015).

68. Сайт интегрированной среды разработки IntelliJ IDEA [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.jetbrains.com/idea/> (дата обращения: 29.07.2015).
69. Nguyen, H. V. Varis: IDE Support for Embedded Client Code in PHP Web Applications / H. V. Nguyen, C. Kästner, T. N. Nguyen // Proceedings of the 37th International Conference on Software Engineering (ICSE). — New York, NY: ACM Press, 2015. — Formal Demonstration paper.
70. Cousot, P. Abstract Interpretation: A Unified Lattice Model for Static Analysis of Programs by Construction or Approximation of Fixpoints / P. Cousot, R. Cousot // Proceedings of the 4th ACM SIGACT-SIGPLAN Symposium on Principles of Programming Languages. — POPL '77. — New York, NY, USA: ACM, 1977. — P. 238–252.
71. Economopoulos, G. R. Generalised LR parsing algorithms. — 2006.
72. Dick, G. Parsing Techniques: A Practical Guide / G. Dick, H. Criel. — Upper Saddle River, NJ, USA: Ellis Horwood, 1990.
73. Сайт проекта YaccConstructor [Электронный ресурс]. — URL: <https://github.com/YaccConstructor/> (дата обращения: 11.06.2015).
74. Официальная документация проекта ReSharper SDK [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.jetbrains.com/resharper/devguide/README.html> (дата обращения: 11.06.2015).
75. Общие сведения о платформе Microsoft .NET [Электронный ресурс]. — URL: [https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/zw4w595w\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/zw4w595w(v=vs.110).aspx) (дата обращения: 29.07.2015).
76. Документация на язык программирования F# [Электронный ресурс]. — URL: <http://fsharp.org> (дата обращения: 29.07.2015).
77. Syme, D. Expert F# (Expert's Voice in .Net) / D. Syme, A. Granicz, A. Cisternino.

78. 1996(E), ISO. ISO/IEC 14977 :. Information technology — Syntactic metalanguage — Extended BNF. — 1996.
79. Сайт среды разработки Microsoft Visual Studio IDE [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.visualstudio.com/> (дата обращения: 29.07.2015).
80. Сайт проекта ReSharper [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.jetbrains.com/resharper/> (дата обращения: 11.06.2015).
81. Документация метода ExecuteQuery .NET класса DataContext [Электронный ресурс]. — URL: [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) (дата обращения: 29.07.2015).
82. Документация класса SqlCommand [Электронный ресурс]. — URL: [https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/sebfsz50\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/sebfsz50(v=vs.110).aspx) (дата обращения: 29.07.2015).
83. Текст “открытой” лицензии Apache License Version 2.0 и сопроводительные материалы [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0> (дата обращения: 29.07.2015).
84. Спецификация текстового языка спецификации графов DOT [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.graphviz.org/doc/info/lang.html> (дата обращения: 29.07.2015).
85. Менеджер пакетов NuGet [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.nuget.org/> (дата обращения: 29.07.2015).
86. Tahvildari, L. Quality-driven software re-engineering / L. Tahvildari, K. Kontogiannis, J. Mylopoulos // Journal of Systems and Software. — 2003. — Vol. 66, no. 3. — P. 225–239.
87. Merlo, E. Automated protection of php applications against SQL-injection attacks / E. Merlo, D. Letarte, G. Antoniol // Software Maintenance and Reengineering, 2007. CSMR'07. 11th European Conference on / IEEE. — 2007. — P. 191–202.

88. Описание конструкции EXECUTE IMMEDIATE языка PL-SQL [Электронный ресурс]. — URL: http://docs.oracle.com/cd/B12037_01/appdev.101/b10807/13_elems017.htm (дата обращения: 29.07.2015).
89. Описание создание хранимых процедур на языке PL-SQL [Электронный ресурс]. — URL: http://docs.oracle.com/cd/A97630_01/appdev.920/a96624/08_subs.htm#752 (дата обращения: 29.07.2015).
90. Описание конструкции MERGE языка PL-SQL [Электронный ресурс]. — URL: http://docs.oracle.com/cd/B10500_01/appdev.920/a96624/13_elems30.htm (дата обращения: 29.07.2015).
91. Документация по языку T-SQL [Электронный ресурс]. — URL: [https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/bb510741\(v=sql.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/bb510741(v=sql.110).aspx) (дата обращения: 29.07.2015).
92. Репозиторий проекта YaccConstructor, содержащий набор различных грамматик [Электронный ресурс]. — URL: <https://github.com/YaccConstructor/YC.GrammarZOO> (дата обращения: 29.07.2015).
93. Hooimeijer, P. An Evaluation of Automata Algorithms for String Analysis / P. Hooimeijer, M. Veanes // Proceedings of the 12th International Conference on Verification, Model Checking, and Abstract Interpretation. — VMCAI'11. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. — P. 248–262.
94. Zaytsev, V. Coupled Transformations of Shared Packed Parse Forests / V. Zaytsev // Sixth International Workshop on Graph Computation Models (GCM) / Ed. by Detlef Plump. — Vol. 1403 of *CEUR Workshop Proceedings*. — CEUR-WS.org, 2015. — P. 2–17.
95. Сайт конференции International Conference on Software Engineering [Электронный ресурс]. — URL: <http://2015.icse-conferences.org/> (дата обращения: 29.07.2015).

96. Lester, M. M. Position Paper: The Science of Boxing / M. M. Lester // Proceedings of the Eighth ACM SIGPLAN Workshop on Programming Languages and Analysis for Security. — PLAS '13. — New York, NY, USA: ACM, 2013. — P. 83–88.
97. Lester, M. Information Flow Analysis for a Dynamically Typed Language with Staged Metaprogramming / M. Lester, L. Ong, M. Schäfer // 2013 IEEE 26th Computer Security Foundations Symposium, New Orleans, LA, USA, June 26–28, 2013. — 2013. — P. 209–223.
98. Scott, E. GLL Parsing / E. Scott, A. Johnstone // Electron. Notes Theor. Comput. Sci. — 2010. — Vol. 253, no. 7. — P. 177–189.
99. Scott, E. BRNGLR: A Cubic Tomita-style GLR Parsing Algorithm / E. Scott, A. Johnstone, R. Economopoulos // Acta Inf. — 2007. — Vol. 44, no. 6. — P. 427–461.
100. Valkering, R. Syntax error handling in scannerless generalized LR parsers / R. Valkering // Group, University of Amsterdam. — 2007.
101. Malone, S. GLR Parsing for Erroneous Input / S. Malone, S. Felshin // Generalized LR Parsing / Ed. by M. Tomita. — Boston: Kluwer, 1991. — P. 129–140.

Список рисунков

1	Пример GSS	33
2	Пример SPPF для грамматики G_1 и входа ABC	35
3	Архитектура платформы YaccConstructor	39
4	Конечный автомат, задающий регулярную аппроксимацию выражения expr	54
5	Конечное представление леса разбора для выражения expr	54
6	Дерево вывода для выражения $expr = "()"$	55
7	Дерево вывода для выражения $expr = "()()"$	55
8	Дерево вывода для выражения $expr = "()()()"$	56
9	Диаграмма последовательности обработки встроенных языков	61
10	Архитектура SDK целиком	62
11	Архитектура лексического анализатора	63
12	Архитектура синтаксического анализатора	64
13	Один из возможных вариантов использования SDK в проектах по реинжинирингу	74
14	Основные шаги метода обработки встроенных языков и их результаты	79
15	Распределение запросов по времени анализа	96
16	Базовый блок без циклов при $height = 3$	98
17	Базовый блок, содержащий цикл, при $height = 3$	98
18	Зависимость времени работы алгоритма от размера входного графа при $isCycle = false$	99
19	Зависимость времени работы алгоритма от размера входного графа и наличия в нем циклов при $height = 4$	99

20	Входной граф для синтаксического анализатора на базе YC.SEL.SDK при $height = 2$ и двух повторениях базового блока	101
21	Сравнение производительности Alvor и синтаксического анализатора на базе YC.SEL.SDK	102
22	Пример подсветки синтаксиса для нескольких встроенных языков: SQL и Calc	104
23	Пример подсветки парных скобок	104
24	Пример статического обнаружения семантических ошибок для языка Calc	104
25	Пример межпроцедурной обработки встроенных языков	105
26	Структура пакетов расширений для ReSharper, предоставляющих поддержку встроенных T-SQL и Calc	106

Список таблиц

1	Основные шаги по подготовке к реинжинирингу системы, содержащей строковые выражения	82
2	Эксперименты по оценке производительности алгоритма синтаксического анализа динамически формируемых программ	93
3	Эксперименты по оценке предложенной архитектуры	93
4	Распределение динамически формируемых SQL-запросов по времени обработки	95
5	Пример отчёта по результатам запуска синтаксического анализа в проекте “S2O”	96
6	Результаты сравнения производительности Alvor и синтаксического анализатора на базе YC.SEL.SDK	103
7	Критерии сравнения инструментов анализа динамически формируемых строковых выражений	110
8	Сравнение инструментов анализа динамически формируемых строковых выражений	111