

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений и условных обозначений	7
Терминология	8
Введение	9
1 Анализ решений в области восстановления поведенческих моделей	13
1.1 Критерии сравнительного анализа	13
1.1.1 Метод извлечения трасс	13
1.1.2 Алгоритм восстановления модели	14
1.1.3 Применимость к реальным проектам и возможность автоматизации	16
1.1.4 Доступ к исходному коду	16
1.2 Обзор работ по извлечению спецификаций	16
1.3 Результаты анализа	21
2 Задача извлечения поведенческих моделей и анализ путей её решения . .	23
2.1 Поиск проектов	24
2.2 Подготовка проектов к анализу	25
2.3 Извлечение трасс	26
2.4 Восстановление поведенческой модели	27
2.5 Общий подход	27
3 Проектирование	29
3.1 Общая схема работы	29
3.2 Получение и подготовка проектов	30
3.2.1 GitHub	30
3.2.2 Maven Central	32

3.2.3 Сборка	32
3.3 Извлечение трасс	33
3.3.1 Статический подход	34
3.3.2 Динамических подход	37
3.4 Восстановление поведенческих моделей	38
3.5 Результат проектирования	39
4 Реализация	40
4.1 Общая архитектура	40
4.2 Пакет repository	41
4.2.1 Получение проектов с GitHub	41
4.2.2 Получение проектов с Maven Central	43
4.2.3 Сборка проектов	44
4.3 Пакет analysis	45
4.3.1 Сбор точек входа в программу	46
4.3.2 Статическое извлечение трасс	47
4.3.3 Динамическое извлечение трасс	50
4.4 Пакет storage	53
4.5 Пакет inference	55
4.6 Реализованный инструмент	56
5 Тестирование	57
5.1 Полученные модели	58
5.1.1 ZipOutputStream	59
5.1.2 StringBuilder	61
5.1.3 Signature	61

5.1.4 Socket	63
5.1.5 SMTPProtocol	65
5.2 Выводы	66
Заключение	68
Список использованных источников	71

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБО- ЗНАЧЕНИЙ

- КА – конечный автомат
- ПО – программное обеспечение
- API – application programming interface
- ICFG – inter-procedural control flow graph
- JAR – Java archive
- JVM – Java virtual machine
- MBT – model based testing
- PBT – property based testing

ТЕРМИНОЛОГИЯ

- Динамический анализ – метод анализа программ, основанный на их реальном выполнении
- Мокирование – замена реальных компонентов программы на искусственные для имитации поведения
- Обратная совместимость – способность работы новой версии программного обеспечения с артефактами старой версии
- Символьное исполнение – техника анализа программ, основанная на трансляции кода в уравнения и их последующем решении
- Статический анализ – метод анализа программного кода без его выполнения
- Фаззинг – метод тестирования, при котором на вход программе подаются сгенерированные данные
- Фреймворк – определенный набор инструментов, определяющий шаблоны их использования
- Identity hash code – уникальное числовое значение, которое определяется для каждого объекта на основе его памяти адреса
- Reflection – механизм изменения и исследования программы во время её выполнения

ВВЕДЕНИЕ

С развитием области анализа программ разработчики при решении большого количества задач в этом направлении все чаще стали сталкиваться с необходимостью использования формальных спецификаций. Формальная спецификация – это описание поведения программы на специальном или целевом языке, включающее в себя такие детали, как пред- и постусловия вызовов, состояния и переходы между ними, что делает спецификации идеальным кандидатом для применения в области анализа программного обеспечения (ПО). Например, спецификации могут применяться в символьном исполнении, где они используются для аппроксимации поведения внешних библиотек или сложных частей программы. Это позволяет ускорить анализ или вовсе сделать его возможным в определенных местах. Реализацию данного подхода можно увидеть в USVM¹ и UtBot[1]. Ещё один пример использования формальных спецификаций – taint-анализ, когда в них отмечаются потенциальные места ввода и утечки информации. Наличие подобных данных позволяет анализаторам сфокусироваться на проверке размеченных мест, представляющих возможные ошибки, тем самым сильно повышая эффективность[2]. Кроме того, спецификации могут использоваться в тестировании, основанном на модели (МБТ) и на свойствах (РБТ), в качестве тестового оракула, отвечая на вопросы о корректности состояния ПО и переходов между ними, а также о том, удовлетворяют ли входные и выходные данные для различных методов соответствующим предикатам. Сами формальные спецификации при этом могут быть представлены с помощью подмножества используемых языков програм-

¹<https://github.com/UnitTestBot/usvm>

мирования, как в UtBot, или на специальных языках спецификации, например LibSL[3].

При этом формальные спецификации в общем случае не поставляются с программными библиотеками или другим ПО, что заставляет задуматься о способах их создания. Полностью ручное составление спецификаций – это довольно монотонная работа, при этом требующая от человека высокой квалификации в области разработки и анализа программ. Однако составление спецификаций можно частично автоматизировать.

Часть формальной спецификации можно найти в исходном коде библиотек или ПО[4]. Если приводить в пример языки в парадигме объектно-ориентированного программирования, то это классы и интерфейсы программы, их поля и сигнатуры методов. Другую часть спецификации, описывающую поведение программы, а именно состояния и переходы между ними, можно попытаться извлечь из реальных примеров использования.

Именно автоматизации получения поведенческих моделей библиотек посвящена данная работа. В рамках её выполнения будет разработан комплексный подход для получения моделей и для его апробации реализована утилита, позволяющая автоматически получать публичные Java проекты и с помощью методов статического и динамического анализа извлекать из них сценарии работы определенной библиотеки с целью последующего восстановления поведенческой модели в виде конечного автомата (КА). На данный момент комплексных автоматических решений для подобных задач нет, однако имеются работы в области восстановления КА и описаны способы получения трасс. Основные задачи, решаемые в этой работе, это автоматизация, интеграция и

применение на практике существующих наработок в области восстановления поведенческой модели библиотек.

Важно отметить, что предполагается ручная обработка полученных с помощью реализованной утилиты автоматов. Необходимость этого является следствием фундаментальных ограничений алгоритмов восстановления КА. Кроме того, предполагается использование пользовательских репозитория, которые не гарантируют корректного применения библиотек. Также свои ограничения накладывает статический и динамический анализ. Использование points-to анализа в статическом подходе не позволяет точно различать объекты, методы которых вызываются, что влияет на корректность получаемых трасс. Также при использовании статического анализа, по крайней мере в рамках данной работы, не будут предприниматься попытки обработать многопоточную работу и получить данные о состоянии программы в моменты вызовов. Что касается динамического анализа, то здесь на результат могут влиять содержательность имеющихся тестов, точки входа в программу и необходимое для запуска окружение.

В первом разделе представлен обзор существующих решений, связанных с задачами поиска проектов, извлечением из них трасс вызовов и восстановлением модели. Также в данном разделе будет уделено внимание предшествующей работе по данной теме. На основе первого раздела сделан выбор в пользу определенных решений, составляющих общий подход и используемых в реализации инструмента. Во втором разделе формулируются требования к создаваемому инструменту и описываются пути решения каждой из задач, стоящих на пути реализации. Третий раздел посвящен разработке подхода. В нем будет подробно описана задуманная схема работы, способы извлече-

ния трасс и их восстановления, детали работы с репозиториями. Четвертый раздел содержит описание реализации инструмента. Пятый раздел посвящен тестированию полученной утилиты. Тестирование заключается в сравнении получаемых автоматов с несколькими заготовленными эталонами, а также демонстрацией получаемых КА для некоторого набора библиотек. Помимо этого, будет проанализировано количество успешно автоматически собранных проектов и полученных различными методами трасс. В заключении проведен анализ полученных результатов, отмечены преимущества и недостатки предложенного подхода, а также рассмотрены пути развития.

1 АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

При изучении предметной области было выявлено, что на текущий момент нет исследований и инструментов, целью которых является полностью автоматизированный процесс получения спецификаций, начиная от получения проектов, использующих заданную библиотеку, и заканчивая извлечением из неё поведенческой модели. Тем не менее, в данной области достаточное количество работ, сосредоточенных на методах извлечения трасс и последующего восстановления модели библиотек, подразумевающих применение подходов к подготовленным для анализа программам. В данном разделе рассмотрены существующие способы извлечения трасс из программ и алгоритмы восстановления поведенческих моделей в виде КА и проведено их сравнение.

1.1 Критерии сравнительного анализа

Выделим определенные критерии, на которые будем обращать внимание при обзоре работ.

1.1.1 Метод извлечения трасс

Глобально методы можно поделить на статические и динамические. Первые подразумевают анализ исходного кода или байт-кода программы без его запуска. Динамические методы, напротив, предполагают запуск анализируемой программы. Статические методы уступают в точности, однако позволяют покрыть все возможные пути исполнения программы. Эта особенность даёт возможность находить ошибки в тех участках кода, которые не покрыты тестами и до которых исполнение не доходит при штатной работе программы. Дина-

мические методы, в свою очередь, за счет реального исполнения обеспечивают точность получаемых результатов, но с их помощью сложно получить все возможные состояния программы. Для восстановления поведенческой модели мы заинтересованы в получении как можно большего количества трасс, чему сопутствует использование статических методов, но в то же время ошибки в трассах неизбежно приведут к ошибкам в модели. Таким образом, недостатки одного метода являются преимуществом другого и наоборот. В работах нас интересует, как авторы реализовали преимущества и нивелировали недостатки выбранных методов.

1.1.2 Алгоритм восстановления модели

Алгоритм восстановления непосредственно влияет на качество получаемых моделей. При этом он определяет, какие данные необходимо извлечь из программы. Например, базовый алгоритм `k-tail`[5] требует на вход исключительно последовательности вызовов и параметр `k`, отвечающий за длину хвостов, используемых для слияния состояний. Другой алгоритм, `gk-tail`[6], дополнительно требует на вход значения аргументов.

Также существуют различные алгоритмы, основанные на использовании инвариантов или состояния программы в моменте вызова библиотеки. В рамках обзора важно обратить внимание, каких дополнительных усилий требует применение сложных алгоритмов восстановления, какие ограничения это накладывает и какой даёт прирост в точности и полноте получаемых автоматов.

Перед тем, как перейти к обзору современных работ, следует уделить особое внимание алгоритмам `k-tail`[5] и `gk-tail`[6], на которых основано большинство современных методов восстановления автоматов из трасс. `K-tail`

принимает на вход последовательность вызовов, полагая, что трасса – это КА, где переходами являются вызовы. Для каждого состояния рассматриваются хвосты длиной k (обычно равной один или два) и если эти хвосты эквивалентны, то они сливаются. Безусловным плюсом данного алгоритма является высокая точность при простоте применения – алгоритм не может породить модель, разрешающую несуществующие трассы, а также не требует дополнительной обработки входных данных. Но несмотря на то, что восстановленная модель описывает корректные последовательности, получаемые состояния КА не отражают реальные и являются грубой аппроксимацией реальной модели сверху.

Gk-tail основан на k-tail, однако помимо самих вызовов, также учитывает информацию об аргументах вызовов и контекстных переменных. Сначала трассы, состоящие из одинаковых вызовов, объединяются вместе с данными, накапливая множество возможных значений для переменных. Далее с помощью Daikon[7] (используется в оригинальной статье, возможно использование других подобных инструментов) выполняется вывод инвариантов для каждого перехода, основанный на накопленных данных. Затем применяется алгоритм k-tail, однако для потенциально сливаемых хвостов происходит проверка инвариантов на конфликты. Данный алгоритм более трудозатратный ввиду необходимости получения информации о значении аргументов и контекстных переменных, а также обязательного вывода инвариантов. Но взамен достигается более осмысленное деление на состояния, чем при использовании K-tail.

1.1.3 Применимость к реальным проектам и возможность автоматизации

Определенные подходы могут показывать отличные результаты и иметь минимальные недостатки, но при этом иногда они совершенно не применимы к реальным проектам, что обусловлено либо новизной, либо фундаментальными ограничениями подхода. Также применение некоторых методов, в частности основанных на динамическом анализе, требует определенной ручной работы, например, связанной с подготовкой анализируемой программы и её окружения. Это может сильно влиять на массовость применения подхода и его автоматизацию.

1.1.4 Доступ к исходному коду

Если авторы предоставляют доступ к инструментам, это позволяет убедиться в результатах проведенных экспериментов. И, что не менее важно, появляется возможность применять и развивать разработанный в рамках исследований подход и инструмент.

1.2 Обзор работ по извлечению спецификаций

В работе «Static Specification Mining Using Automata-Based Abstractions»[8] авторы, используя абстрактную интерпретацию[9], статически собирают трассы в виде последовательностей объектов одного типа. Для получения последовательностей вызовов над конкретным экземпляром объекта в исследовании используется points-to анализ на основе алгоритма Андерсена[10] (нечувствительный к потоку) и чувствительный к потоку access-paths анализ. При этом авторы не объединяют результаты применения анализов, а используют их в зависимости от потребности в максимально подробных и избыточных трассах (flow-insensitive) или точных и ограниченных (flow-

sensitive). Для восстановления поведенческой модели авторы используют собственный подход, основанный на эвристических правилах слияния состояний. Предложенные алгоритмы выглядят интересно, однако сложно оценить их точность, так как в исследовании приводится сравнение результатов вариаций описанных алгоритмов между собой, хотя было бы уместно провести сравнение с классическим алгоритмом k-tail. В ограничениях подхода авторы описывают невозможность его применения для анализа проектов, состоящих из десятков тысяч строк кода. Это ожидаемо, поскольку flow-sensitive подходы сталкиваются с проблемой взрыва состояний и применение access-paths анализа к реальной программе требует большого количества памяти даже при минимальной глубине анализа[11]. Авторы делают вывод, что получаемые поведенческие модели достоверно описывают поведение библиотек, однако являются сильной аппроксимацией сверху истинной модели и содержат множество лишних состояний и переходов. Однако предполагается, что выявление чистых функций в исходном коде библиотеки позволит избежать появления избыточных состояний, так как на этапе восстановления будет известно, что определенные вызовы не изменяют состояния программы, а значит, конечную модель можно упростить. В статье явно упоминается разработанный инструмент для проведения анализа, но ссылки на него не приводятся.

Авторы статьи «Automatic mining of specifications from invocation traces and method invariants»[12] подробно рассмотрели и сравнили четыре алгоритма восстановления моделей из трасс. При этом был рассмотрен базовый алгоритм k-tail, предложены улучшения для алгоритма Contractor[13], основанного на получении КА из инвариантов, а также разработаны новые подходы: SEKT

и ТЕМІ, заключающиеся в извлечении поведенческой модели из трасс, усиленных инвариантами, и инвариантов, усиленных трассами, соответственно. В рамках исследования авторы получали трассы и инварианты с помощью инструмента динамического анализа Daikon[7]. Daikon – очень мощный и полезный инструмент, однако его применение сложно автоматизировать для сторонних проектов, так как чтобы получить полные трассы и полезные инварианты из собственного целевого проекта, нужно проделать определенную нетривиальную работу. В статье очень большое внимание уделено сравнению методов восстановления КА. Авторы ввели метрики точности и полноты, где под точностью понимается доля трасс, сгенерированных по восстановленной модели и подходящих под эталонную модель, а полнота определяется как доля сгенерированных трасс по эталонной модели, не противоречащих восстановленной. В результате все методы, включая k-tail, показали точность близкую к 100 процентам для девяти эталонных моделей библиотек. Что касается полноты, k-tail и SEKT показали результат от 20% до 60%, имея примерно одинаковые значения в рамках конкретной библиотеки. ТЕМІ и Contractor++ показали лучшие результаты, достигая значений 100% для некоторых библиотек, однако также сохранялся большой разброс и худшие результаты были на уровне 40%. Стоит заметить, что несмотря на очевидное преимущество более сложных алгоритмов, k-tail, требующий минимальные входные данные, показывает конкурентноспособный результат. В данном исследовании авторы не делятся реализацией алгоритмов, хоть и детально описывают принцип их работы.

Интересный метод восстановления, а также его реализацию² в открытом доступе предлагают авторы статьи «Inferring Extended Finite State Machine models from software executions»[14]. Авторы развивают идею алгоритма gk-tail и предлагают использовать информацию о значении аргументов в анализируемых вызовах. Новизна заключается в том, что для поиска конфликтов слияния применяются обучаемые классификаторы. Под конфликтами понимаются слияния таких трасс, где из одного и того же состояния при одних и тех же вызовах осуществляется переход в отличные друг от друга состояния. Это говорит о том, что на самом деле начальное состояние было не одно и то же. В gk-tail поиск конфликтов между инвариантами происходит локально для отдельных участков трасс длиной k, из-за чего можно объединить состояния, где позже возникает конфликт. В предлагаемом подходе классификаторы используют трассы как источник данных для обучения, что позволяет осуществлять поиск конфликтов по всей совокупности данных. Также классификаторы избавляют от необходимости использовать тяжеловесные утилиты типа Daikon, неявно выполняя задачу вывода инвариантов. Благодаря одновременному учету всех трасс обеспечивается высокий уровень обобщенности получаемой поведенческой модели. Однако при этом на пользователя ложится задача подбора алгоритма для классификации данных, поскольку разные алгоритмы могут показывать разный результат в зависимости от входных данных. Авторы в своем исследовании приводят сравнение алгоритмов, а также предоставляют в реализованном инструменте возможность удобно его менять. Что касается получения трасс, в исследовании используются трассы полученные из двух

²<https://github.com/neilwalkinshaw/mintframework>

проектов с помощью Daikon. Отдельно стоит поблагодарить авторов за реализацию алгоритмов k-tail и gk-tail в предоставляемом инструменте.

Ещё один выделяющийся подход реализован в инструментах Tautoko[15] для генерации тестов и ADABU[16], представленных в соответствующих исследованиях. ADABU решает задачу получения трасс и состояний программы на основе инструментации и реализует предложенный в исследовании метод восстановления поведенческой модели. Общий подход заключается в отслеживании состояния программы до и после вызова библиотеки. После сбора трасс, собранные состояния классифицируются по определенным правилам, тем самым образуя состояния КА. Tautoko же является генератором тестов, позволяющим получить ранее не обнаруженные варианты поведения библиотеки. Авторы предлагают реализованный подход как решение проблемы ограниченного набора тестов при использовании инструментов по типу Daikon. К сожалению, в исследованиях не представлены сравнения с существующими алгоритмами восстановления и инструментами генерации тестов. Однако представленных результатов достаточно, чтобы убедиться в работоспособности предложенных подходов, а наличие инструментов в открытом доступе³ делает полученные результаты очень полезными. Но важно отметить, что инструменты реализованы в 2012 году и не получали никаких обновлений. Скорее всего, они не актуальны для анализа современных версий Java. Также данный подход имеет ограничение в виде необходимости работы над конкретными проектами для извлечения трасс, так как требуется плотное взаимодействие с исполняемыми файлами анализируемого ПО.

³<https://www.st.cs.uni-saarland.de/models/>

1.3 Результаты анализа

Все описанные работы предлагают работоспособные решения, подтверждаемые авторами в рамках проведенных экспериментов. Однако нигде не уделяется внимание автоматизации решения – зачастую авторы извлекают трассы из одного и того же проекта (даже в рамках разных исследований разных авторов). Причиной этого является применение чисто динамических подходов для получения информации о состоянии программы в момент вызовов, что требует плотного взаимодействия с бинарными файлами программы и её необходимым окружением, а это довольно трудозатратно. Одна из описанных работ[8] использует подход на основе статического анализа и имеет потенциал для автоматизации, однако авторы применяют чувствительный к потоку алгоритм для анализа псевдонимов, что делает подход неприменимым для реальных проектов. Краткий итог сравнения представлен в Таблица 1.

Таблица 1 — Анализ работ

Название	Извлечение трасс	Восстановление модели	Исх. код	Ограничения
Static Spec. Mining[8]	Абстрактная интерпретация	трассы	Нет	Невозможен анализ реальных проектов
SEKT/TEMI[12]	Daikon	трассы, состояния	Нет	Частный подход к проектам
MINT[14]	Daikon	трассы, состояния	Да	Частный подход к проектам
Tautoko[15]/ ADABU[16]	Собственная инструментация и генерация тестов	трассы, состояния	Да, устаревший	Частный подход к проектам
Gk-tail	Daikon	трассы, состояния	Да, в MINT	Частный подход к проектам
K-tail	-	трассы	Да, в MINT	Получаемая модель далека от реальной

Все это наводит на мысль о необходимости создания комплексного автоматизированного решения для извлечения трасс и поведенческих моделей библиотек. Безусловно, для начала автоматизация потребует некоторых уступок в требованиях к качеству получаемых автоматов и решения специфичных проблем. Но это положит начало развитию подобных автоматизированных методов и, возможно, позволит использовать извлечение автоматов в реальной жизни с меньшими усилиями.

2 ЗАДАЧА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АНАЛИЗ ПУТЕЙ ЕЁ РЕШЕНИЯ

Задача извлечения поведенческих моделей библиотек состоит из нескольких составляющих:

- Поиск проектов, использующих заданную библиотеку
- Подготовка проектов к анализу
- Извлечение трасс и состояний
- Восстановление автоматов из трасс

Каждая из этих задач требует отдельного внимания, а также определенного уровня согласованности с остальными. Из анализа существующих решений в предыдущем разделе видно, что методы извлечения трасс могут зависеть от требований к масштабированию подхода и от используемых для анализа программ (исходный код, исполняемые файлы, наличие тестов, необходимое окружение). Метод извлечения трасс в свою очередь определяет применимые для восстановления моделей методы. Поэтому важно комплексно подходить к выбору путей решения каждой из указанных составляющих.

Выбор путей решения в рамках данной работы будет основан на гипотезе о том, что в текущем состоянии предметной области получение части спецификаций, связанной с поведенческими моделями библиотек, является очень трудозатратным и требует автоматизации. Даже при использовании инструментов, предоставленных авторами статей, пользователю необходимо самостоятельно найти подходящий проект. Затем, в случае применения динамических методов, выполнить инструментирование, запустить программу (в т.ч. существующие тесты, сгенерированные или применить фаззинг) и оценить содержательность

получаемых трасс. Если говорить о статических подходах, то готовых решений обнаружено не было. Пользователь будет вынужден самостоятельно разрабатывать анализы на основе фреймворков статического анализа или изучать доступные символьные машины с целью применения их для сбора трасс. Только после успешного решения подобных задач и связанных с ними проблем можно перейти к самому восстановлению трасс. К счастью, забегаая вперед, MINT[14] предлагает действительно удобный модульный инструмент для применения собственного алгоритма восстановления, а также k-tail и gk-tail. Тем не менее, для получения КА на данный момент требуется преодолеть ряд сложных и неочевидных задач, требующих определенного погружения в область анализа ПО.

2.1 Поиск проектов

Для апробации подхода остановимся на Java проектах по нескольким причинам:

- Большинство исследований в области восстановления поведенческих моделей библиотек используют проекты на Java в качестве целевых, что позволяет перенимать практический опыт данных работ
- Для языка Java разработано большое количество библиотек, в том числе для статического и динамического анализа
- Несмотря на определенные недостатки, Java по-прежнему является популярным языком, на котором реализовано множество проектов, число которых продолжает расти

В качестве источников проекта предлагается использовать GitHub и Maven Central Repository. Рассмотрим данные варианты подробнее.

GitHub является крупнейшим сервисом хранения программных репозиторий и на текущий момент содержит более 420 миллионов репозиторий[17]. При этом GitHub предоставляет возможности поиска по коду и фильтрации через API. При этом репозитории могут содержать артефакты программ, а именно JAR файлы (Java Archive). Их наличие позволит избежать этапа сборки, тем самым ускоряя процесс анализа проекта и потенциально повышая число успешно обработанных проектов, так как для статического анализа необходимы бинарные файлы.

Несмотря на большое количество проектов на GitHub, среди них могут быть как серьезные рабочие проекты, так и множество неработоспособных программ. Поэтому в качестве альтернативы есть возможность использовать Maven Central Repository, где среднее качество проектов должно быть значительно выше. Репозиторий Maven предлагает поиск библиотек по API. Для каждого проекта можно получить список зависимых от него библиотек, что и требуется для поиска примеров использования.

2.2 Подготовка проектов к анализу

Для применения статических подходов необходимы скомпилированные программы, при этом наличие зависимостей не влияет на анализ. Для динамических же необходим исходный код, поскольку зависимости и тесты редко упаковываются в JAR файл. Из этого возникает необходимость выполнять сборку проектов перед извлечением трасс. Опираясь на то, что Java Virtual Machine (JVM) решает вопрос зависимости от платформы, а Java гарантирует обратную совместимость, можно предположить, что при доступности зависи-

мостей, указанных в проекте, и совпадении версий сборщиков Maven или Gradle, будет возможно успешно собрать определенную долю проектов.

2.3 Извлечение трасс

Для извлечения трасс возможно применение статического и динамического анализа. В рамках данной работы предполагается, что с помощью динамического подхода в автоматическом режиме будет получено меньше трасс, чем с помощью статического. Более того, уже имеющиеся тесты не гарантируют целостность получаемых трасс ввиду возможного мокирования и искусственного создания объектов с помощью reflection, что следует учитывать при проектировании инструмента.

Предлагаемый статический подход заключается в анализе межпроцедурного графа потока управления (в дальнейшем ICFG), поиске в нем вызовов искомой библиотеки и последующем применении Points-to анализа для определения объектов вызовов и формирования трасс. Предполагается использование анализа на основе алгоритма Андерсена[10] – для возможности применения такого подхода к реальным большим проектам мы вынуждены использовать нечувствительные к контексту или потоку алгоритмы. Хотя худшая сложность алгоритма Андерсена кубическая, что может стать проблемой в межпроцедурном анализе, в реальных программах она оказывается близкой к квадратичной[18].

Что касается динамического подхода, в рамках данной работы мы остановимся на сборе исключительно последовательностей вызовов, игнорируя значения аргументов и состояние программы. Сделано это с целью ограничить сложность работы, так как первоочередной целью является апробация идеи автоматизированного подхода к извлечению поведенческих моделей. Сбор

информации должен осуществляться через инструментацию и запуск тестов. Также предлагается воспользоваться методом фаззинга входных точек в программу. Он позволит обеспечить лучшую целостность получаемых трасс в случае успешного запуска и корректного выбора точек входа. Важно отметить, что выполнять запуск случайных сторонних программ небезопасно, поэтому предполагается, что использование динамических подходов следует проводить на специально выделенной для этого машине (в том числе виртуальной).

2.4 Восстановление поведенческой модели

Так как в рамках данной работы мы оперируем трассами, состоящими исключительно из последовательностей вызовов, это сильно ограничивает выбор алгоритма восстановления. По этой причине предлагается использовать алгоритм k-tail. Тем не менее алгоритм обладает рядом преимуществ:

- Он не уступает в точности более сложным алгоритмам, то есть сгенерированные по получаемому КА трассы будут корректны
- Простота алгоритма обеспечивает сравнительно высокую скорость работы, так как нет необходимости выводить инварианты и искать конфликты между сливаемыми состояниями
- Благодаря прозрачному принципу восстановления, интерпретация получаемых КА будет проще для пользователя

Для апробации общего подхода будем полагать, что возможностей данного алгоритма достаточно.

2.5 Общий подход

Из предложенных способов решения задач складывается общий подход. Мы должны получать проекты с GitHub и Maven Central, использующие

заданную библиотеку. Далее необходимо подготовить проекты к извлечению трасс, выполнив компиляцию исходного кода и тестов. Затем необходимо извлечь трассы с применением описанных выше подходов и подать полученные результаты на вход алгоритма восстановления поведенческой модели в виде КА. Каждый из шагов имеет множество сопутствующих проблем и будет подробно рассмотрен в следующем разделе, посвященном проектированию инструмента.

3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Перед реализацией предложенного подхода по получению поведенческих моделей библиотек необходимо сформулировать схему работы основных его составляющих и их взаимодействия. В данном разделе рассмотрены общая схема работы инструмента, получение и подготовка проектов, извлечение трасс и восстановление из них поведенческих моделей.

3.1 Общая схема работы

На Рис. 1 в общих чертах представлен полный цикл работы разрабатываемого инструмента. Предполагается возможность выбора режима работы, что позволит пропускать определенные этапы. Например, восстанавливать КА из заранее накопленных данных или извлекать трассы из уже подготовленных проектов, что не отражено на схеме. Цифрами обозначены основные части инструмента, которые будут рассмотрены в данной главе:

- 1) Получение и подготовка проектов
- 2) Извлечение трасс
- 3) Восстановление поведенческих моделей

Общая последовательность действий заключается в том, что изначально пользователь конфигурирует инструмент – задаёт целевую библиотеку, определяет параметры используемых алгоритмов, указывает пути к требуемому окружению и выбирает режим работы. Далее итеративно выполняется поиск проектов, их подготовка и извлечение трасс с последующим сохранением. После анализа заданного количества проектов или каких-либо других установленных условий остановки выполняется обработка полученных трасс и

восстановление КА. На более детальном уровне каждый шаг разобран в соответствующих подразделах.



Рисунок 1 — Общая схема работы

3.2 Получение и подготовка проектов

В качестве источника проектов предлагается использовать GitHub и Maven Central Repository. Каждый из них имеет свои механизмы поиска и получения проектов, поэтому рассмотрим их отдельно. Дополнительно должна быть предусмотрена возможность использования заранее подготовленных проектов. Также для анализа необходимы JAR файлы проектов и их зависимости, поэтому следует реализовать их автоматическую сборку.

3.2.1 GitHub

Для GitHub мы вынуждены использовать поиск по коду, так как другие варианты найти проекты, использующие заданную библиотеку, отсутствуют.

Пользователь может указать в качестве поискового запроса импорт основного пакета библиотеки или момент её подключения в `build.gradle` или `pom.xml` файле. При этом репозитории, помимо исходного кода, могут содержать другую полезную информацию:

- Тесты. Они необходимы для получения трасс с помощью динамического анализа
- JAR файлы. Наличие бинарного файла увеличивает вероятность того, что проект рабочий, а также избавляет от необходимости выполнять его компиляцию для статического извлечения трасс. В случае применения динамических подходов необходимо компилировать программу для получения её зависимостей
- Конкретные версии программы. При выпуске версии фиксируется коммит, определяющий состояние исходного кода на тот момент. Это также повышает вероятность того, что проект рабочий

При реализации модуля получения проектов должна быть предусмотрена возможность сбора всей полезной информации и фильтрация по ней, чтобы обеспечить возможность работы только с репозиториями, содержащими тесты или скомпилированные программы. Также необходимо отслеживать обработанные репозитории, так как в результатах поиска один проект может содержаться несколько раз.

Для поиска и получения проектов GitHub предоставляет бесплатный `application programming interface` (API). В случае отсутствия артефактов, получение проектов может быть реализовано через `git`.

3.2.2 Maven Central

Maven Central Repository содержит информацию об общедоступных библиотеках, а также об их зависимостях и зависящих от них проектах. Таким образом, есть возможность узнать, где используется заданная библиотека. Найденные подобным образом проекты являются целью анализа. Для работы с Maven Repository пользователь должен указать библиотеку и её версию.

Получение проектов предлагается выполнять с помощью Gradle, так как это позволит автоматически собрать её и получить зависимости. Получение исходного кода, хранящегося в Maven Central, бессмысленно, так как он не содержит тестов. На странице библиотек в Maven Central иногда расположены ссылки на GitHub репозитории, однако их нельзя получить с помощью API, а автоматическое получение и парсинг страниц может привести к блокировке на ресурсе.

Для получения информации о зависящих библиотек от заданной также не предусмотрен общий API. Однако после определенного исследования было обнаружено, что существует некий внутренний API, который реализует данную возможность. Чтобы убедиться в возможности использования данного API, был сделан запрос на почту по контактам Maven, где сообщили, что проблемы могут возникнуть только в случае попытки массовой выгрузки всего Maven Central, а это не входит в план работы.

3.2.3 Сборка

В рамках работы будут рассматриваться только проекты, использующие Gradle и Maven в качестве систем сборки, так как они используются чаще всего и относительно легко поддаются автоматизации.

Для работы с Gradle существует Gradle Tooling API, позволяющий автоматически получать необходимую версию сборщика и программно вызывать необходимые задачи. При этом остается возможность использовать конкретную версию для всех проектов или предустановленный Gradle. Maven не имеет подобного API, в связи с чем необходима предустановленная система сборки.

Java гарантирует обратную совместимость со старыми версиями, а JVM решает большинство проблем зависимости от платформы. Благодаря этому можно рассчитывать на успешную сборку определенной доли программ. Тем не менее, есть несколько причин, по которым не все проекты могут быть собраны:

- Проект может использовать специфические зависимости, получение и сборка которых выполняется вручную или иными способами
- Проект может использовать зависимости, которые больше недоступны из заданных репозиториев библиотек

Решение подобных проблем позволит увеличить процент собираемых программ, но это отдельная большая задача. В рамках данной работы она не будет рассматриваться. Мы вынуждены принять тот факт, что не все программы будут собраны.

3.3 Извлечение трасс

Для извлечения трасс предлагается использовать статический и динамический подходы. Каждый из них имеет сложную схему работы, определенные детали и требует тщательной разработки соответствующих методов.

3.3.1 Статический подход

Примерный алгоритм извлечения трасс с применением статического анализа представлен на Рис. 2. Общий подход заключается в том, что строится межпроцедурный граф потока управления для программы. Также необходимо получить набор точек входа в программу. Из каждой такой точки выполняется обход ICFG, в рамках которого выполняется обнаружение и сбор вызовов заданной библиотеки. Для каждого вызова определяется объект, над которым он выполняется, и с помощью анализа указателей формируются трассы для каждого объекта. Полученные трассы сохраняются для последующего восстановления поведенческой модели.

Что касается получения точек входа, предлагается предоставить пользователю возможность создавать определенные фильтры для методов, включающие в себя следующие параметры:

- Аннотации метода и класса
- Регулярное выражение для названия метода и класса
- Вид метода (конструктор, метод, блок статической инициализации)
- Типы аргументов и тип возвращаемого значения метода
- Модификаторы для метода и класса

Подобный набор должен обеспечить возможность поиска специфических точек входа. Как пример, это могут быть методы, отвечающие за обработку запросов по URL в различных фреймворках для создания веб-приложений.

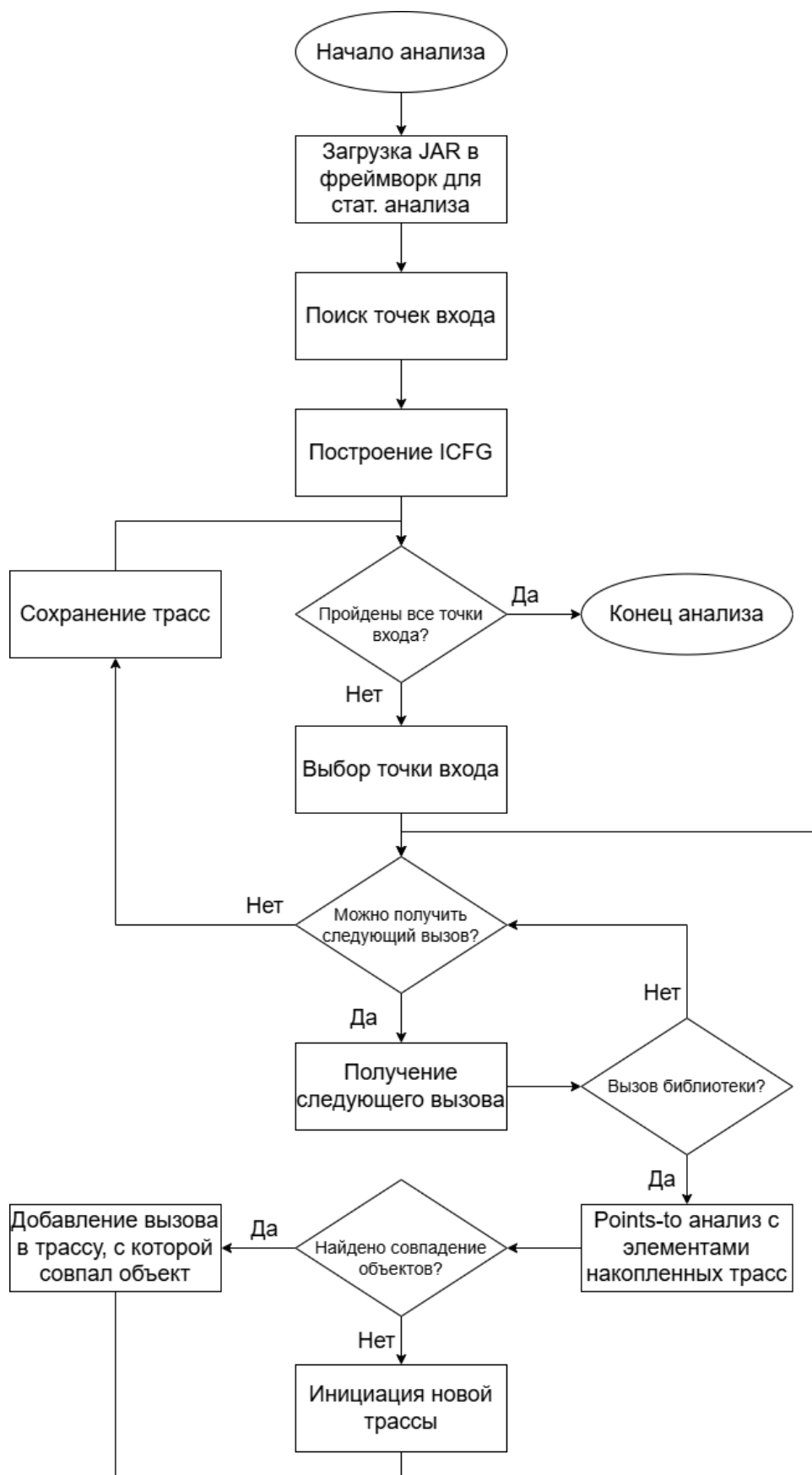


Рисунок 2 — Схема извлечения трасс с помощью статического анализа

Необходимость выполнения анализа указателей обусловлена тем, что общая последовательность нерепрезентативна и не содержит в себе реальных переходов и состояний библиотеки. Рассмотрим простой пример на Листинг 1.

```
1 FileOutputStream dest = new FileOutputStream(file);
2 ZipOutputStream zip1 = new ZipOutputStream(new BufferedOutputStream(dest));
3 ZipOutputStream zip2 = new ZipOutputStream(new BufferedOutputStream(dest));
4 zip1.write(1);
5 zip1.close();
6 zip2.write(1);
7 zip2.close();
```

Листинг 1 — Пример последовательностей вызовов

Извлекаемая трасса при игнорировании объектов будет выглядеть примерно как на Листинг 2.

```
1 1. init
2 2. init
3 3. write
4 4. close
5 5. write
6 6. close
```

Листинг 2 — Пример некорректной трассы

При восстановлении поведенческой модели окажется, что мы допускаем запись после того, как закрыли `ZipOutputStream`. Очевидно, такая модель не соответствует действительности. Применяв `points-to` анализ мы рассчитываем получить две идентичные трассы как на Листинг 3.

```
1 1. init
2 2. write
3 3. close
```

Листинг 3 — Пример правильной трассы

Предполагается применять `points-to` анализ на основе алгоритма Андерсена, так как это один самых точных (нечувствительных к контексту и потоку) алгоритмов, которые могут быть применимы для всей программы межпроцедурно. Конечно, существуют гораздо более точные алгоритмы, однако ввиду

экспоненциальной сложности их использование в таких условиях невозможно. В качестве инструмента для статического анализа выбран Soot⁴, так как он предоставляет возможности для построения ICFG, конкретные реализации points-to анализа, а также предлагает средства для инструментации программ, что будет необходимо для динамического подхода по извлечению трасс.

3.3.2 Динамических подход

Извлечение трасс с помощью динамического анализа заключается в предварительной инструментации на уровне байт-кода и последующем запуске программы. Инструментация может быть выполнена с помощью Soot и заключается во вставке специального кода после каждого вызова библиотеки. Вставленный код позволяет получить информацию о вызове и его объекте. Чтобы точно различать экземпляры объектов между собой, может быть использован identity hash code.

Чтобы получить трассы после инструментации, программу необходимо запустить. Для этого предлагается использовать тесты при их наличии и фаззинг входных точек в программу. Входные точки предлагается получать тем же способом, что и при статическом анализе.

В качестве инструмента для фаззинга предлагается использовать Jazzer⁵. Он поставляется в виде JAR файла и имеет режим автоматического фаззинга для указанных точек входа без предварительной подготовки целевого проекта. Для генерации данных Jazzer создаёт случайные массивы байт, интерпретируемые как необходимый объект и впоследствии мутирует их для увеличения покрытия кода.

⁴<https://github.com/soot-oss/soot>

⁵<https://github.com/CodeIntelligenceTesting/jazzer>

Общая схема динамического извлечения трасс представлена на Рис. 3.

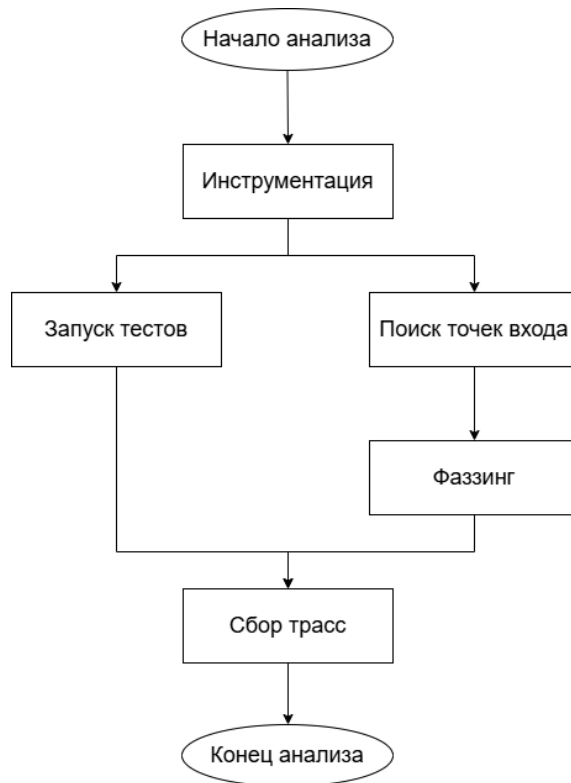


Рисунок 3 — Схема извлечения трасс с помощью динамического анализа

3.4 Восстановление поведенческих моделей

Из накопленных трасс необходимо восстановить поведенческую модель в виде КА. Для этого следует обработать полученные трассы и сформировать входные данные для алгоритма k-tail. Что касается обработки, ввиду использования двух подходов для извлечения трасс, возможно реализовать несколько режимов работы:

- Полученные разными способами трассы объединяются в единое множество и строится общий КА
- Для каждого способа получения трасс строятся соответствующие КА
- Динамические трассы являются верификатором для статических: в случае совпадения динамической трассы с подпоследовательностью статической, последняя считается подтверждённой

Имеет смысл попытаться уменьшить количество некорректных трасс. Трассы могут повторяться между собой, и если считать количество таких повторений для каждой трассы, мы получим частотное распределение. Чтобы исключить погрешности, можно воспользоваться фильтрацией по частоте повторения трасс, устанавливая абсолютный или относительный порог.

Получаемый в результате работы алгоритма КА может содержать ложные конечные состояния из-за слияний. Для правильного определения состояния необходимо их обойти и обозначить как конечные лишь те, из которых отсутствуют какие-либо переходы. После этого конечные состояния следует объединить, что приведет к сокращению состояний КА без потери информации о переходах.

Вместо собственной реализации алгоритма k-tail предлагается использовать фреймворк MINT, рассмотренный в рамках обзора существующих работ в области восстановления поведенческих моделей. Помимо этого, MINT содержит реализации алгоритмов, использующих информацию о переменных, что будет полезно при развитии инструмента.

Получаемые с помощью MINT КА выводятся в формате dot. Для более универсального представления, предлагается транслировать их в JSON.

3.5 Результат проектирования

В результате рассмотрены основные задачи и способы их решения, включая используемые инструменты и важные детали реализации. Для общего понимания представлены схемы предлагаемого подхода и наиболее сложных его частей.

4 РЕАЛИЗАЦИЯ

Создание инструмента для применения предложенного метода извлечения поведенческих моделей библиотек заключается в реализации каждой из его частей, разобранных ранее, и их связи между собой и пользователем. В данном разделе приведена общая архитектура инструмента и детали реализации его модулей, а также инженерные проблемы и пути их решения.

4.1 Общая архитектура

Реализованный инструмент может использоваться как консольное приложение или как библиотека, с помощью которой пользователь реализует свои сценарии анализа или использует её отдельные компоненты. Основой инструмента являются несколько пакетов:

- 1) `analysis` – пакет, содержащий реализацию извлечения трасс с помощью статического и динамического анализа, а именно построение ICFG, `points-to` анализ, фаззинг и сбор точек входа в программу
- 2) `inference` – пакет, обеспечивающий обработку трасс и восстановление из них поведенческих моделей
- 3) `repository` – пакет, реализующий получение репозитория и работу с ними
- 4) `storage` – пакет, отвечающий за работу с БД
- 5) `workflow` – пакет, связывающий все реализованные возможности между собой с помощью определенных сценариев работы. Стоит отметить, что по сути пакет содержит примеры использования компонентов и не требует детального рассмотрения

4.2 Пакет repository

Данный пакет решает задачи поиска, получения и сборки проектов из GitHub и Maven Central Repository. Также в рамках этого пакета реализована возможность запуска тестов, имеющихся в репозитории. Далее приведён разбор каждой из задач.

4.2.1 Получение проектов с GitHub

Несмотря на то, что GitHub предоставляет открытый API для поиска по коду, при разработке возникло несколько проблем:

- 1) Поиск происходит по файлам. Соответственно, сами репозитории могут повторяться. Необходимо это учитывать, чтобы не тратить лишнее время на получение и анализ уже рассмотренного ранее проекта
- 2) Один поисковой запрос может найти не более 1000 результатов, что указано в документации⁶. С учетом повторения репозитория, такого количества проектов может быть недостаточно для автоматической работы в течение длительного времени с целью изучения большого количества проектов. При этом сторонние системы поиска по коду, например SearchCode, имеют более сильные ограничения
- 3) Частые запросы к API приводят к достижению secondary rate limit⁷. При этом, основного лимита достаточно для выполнения запросов. Каким-то образом необходимо избежать введения искусственных задержек.

Для каждой из этих проблем были реализованы следующие решения:

⁶<https://docs.github.com/en/rest/search/search?apiVersion=2022-11-28#about-search>

⁷<https://docs.github.com/en/rest/using-the-rest-api/rate-limits-for-the-rest-api?apiVersion=2022-11-28#about-secondary-rate-limits>

- 1) Для исключения повторений информация о репозиториях хранится в БД. Это также будет полезно для остановок и возобновлений поисковых сессий
- 2) Чтобы обойти лимит результатов поиска, реализован адаптивный фильтр по размеру файла. Способ фильтрации предлагает сам GitHub. Таким образом, мы можем задать диапазон от 0 до максимального размера файла, который нас интересует, и проходить его определенными шагами, например, изначально 100 байт. Если количество результатов поиска находится между нулем и 1000, то не меняем шаг. Если количество результатов равно нулю, то мы увеличиваем шаг в два раза, а если максимальному значению – уменьшаем шаг в два раза
- 3) Во избежание secondary rate limit применяется ленивое получение репозиторий и их последовательный анализ, реализованное с помощью наследования Sequence в языке Kotlin. Каждый запрос к API возвращает набор файлов, из которых извлекаются уникальные репозитории, и до тех пор, пока все они не будут проанализированы, API не используется. Таким образом создаётся естественная задержка, позволяющая избегать лимита. Если он всё же был достигнут (например, подряд выполнялись несколько уменьшений или увеличений размера шага), то используется искусственная задержка перед очередной попыткой запроса

Для поиска и получения проектов с GitHub необходимо предварительно получить и указать свой токен для API в конфигурации инструмента, а на

вход подать поисковой запрос и шаблон имени файла. Это необходимо, так как можно искать по импорту среди:

- .java файлов (path:**/* .java)
- build.gradle (path:**/build.gradle)
- build.gradle.kts (path:**/build.gradle.kts или path:**/build.gradle* для всех вариаций)
- pom.xml (path:**/pom.xml)

Для работы с удаленными GitHub репозиториями реализован класс `GhRemoteRepository`, позволяющий получать доступные артефакты и исходный код всего проекта:

- 1) Определяется наличие выпущенной версии
- 2) Проверяется наличие JAR файла соответствующей версии
- 3) Проверяется наличие исходного кода соответствующей версии
- 4) Если найдены, скачиваются JAR файл и архив с кодом версии, иначе выполняется клонирование с помощью `git`

4.2.2 Получение проектов с Maven Central

Веб-сайт Sonatype⁸ предлагает возможность получения библиотек, зависящих от выбранной. Однако публичный API для этого не предоставлен. С помощью инструментов разработчика в браузере было найден внутренний API, решающий необходимую в работе задачу. Способ нахождения и структура тела запроса представлены на Рис. 4. Чтобы исключить вероятность блокировки при использовании данного API, было направлено электронное письмо в поддержку Sonatype. В ответе говорилось, что допустимо использовать внутренний

⁸<https://central.sonatype.com/>

API, если нет намерения протестировать весь Maven Central, что приемлемо в рамках выполняемой работы.

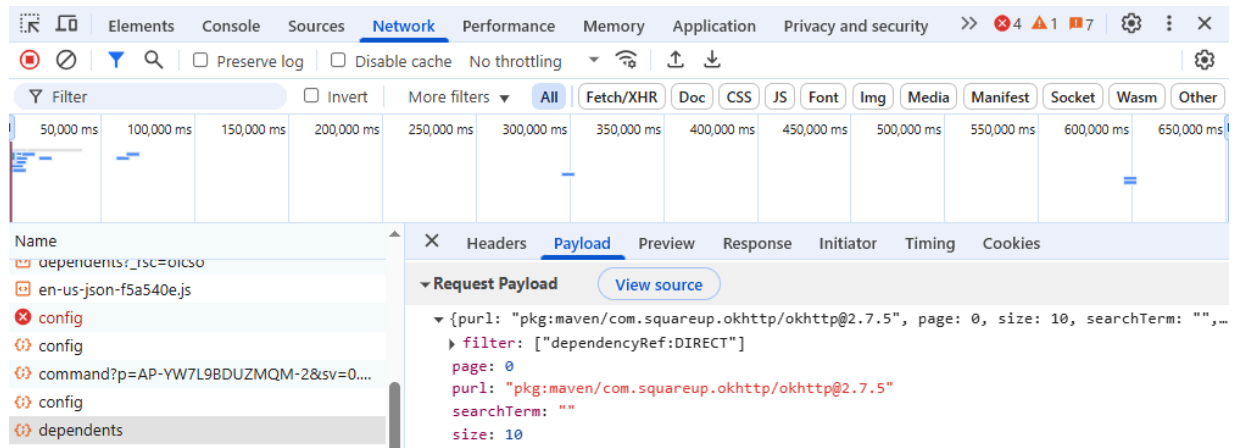


Рисунок 4 — Поиск необходимого API

Для поиска проектов следует указать группу, название и версию библиотеки.

Получение найденных проектов осуществляется с помощью специально созданного файла `build.gradle` на одну зависимость, позволяющего подставлять в него библиотеку для анализа и выполнять задачу разрешения зависимостей. Таким образом происходит автоматическое получение и сборка библиотеки для анализа и всех её зависимостей в заданную директорию.

Как уже было упомянуто в разделе, посвящённом проектированию, получение исходного кода из Maven Central бессмысленно, так как он не содержит тестов, а сборка выполнена автоматически при получении проекта с помощью Gradle.

4.2.3 Сборка проектов

Проекты из Maven Central собираются автоматически из-за выбранного метода их получения. Что касается проектов с GitHub, то даже при наличии JAR файла в репозитории, он может не содержать зависимости, а следовательно, он

может не запуститься. Также необходима компиляция тестов, если они есть в проекте.

Для этого требуется в первую очередь определить, какая система сборки используется в проекте. Это делается с помощью обхода файлов и поиска характерных файлов сборки: `build.gradle`, `build.gradle.kts`, `pom.xml`. Если ни один из файлов не обнаружен в корне проекта, то выполняется обход вложенных директорий, так как репозиторий может иметь нестандартные вложения или состоять из нескольких модулей.

Если проект использует Gradle, то вся работа с ним может быть выполнена с помощью Gradle Tooling API. В зависимости от конфигурации инструмента версия Gradle может быть установлена автоматически для каждого проекта, зафиксирована или может быть использован уже установленный на машине сборщик.

Maven не предполагает подобного API, поэтому в зависимости от конфигурации используется сборщик, путь к которому указан явно или берётся из переменных окружения.

Класс локальных репозиториев предусматривает методы сбора трасс из файлов, которые создаются в корне проекта в результате запуска инструментированного кода.

4.3 Пакет `analysis`

Данный пакет содержит реализацию статического анализа, инструментацию и запуск фаззинга, в совокупности предоставляя возможности для извлечения трасс вызовов библиотеки с применением статических и динамических подходов.

4.3.1 Сбор точек входа в программу

Как для статического извлечения трасс, так и для фаззинга необходимо предварительно получить возможные точки входа в программу. Помимо метода `main`, это могут быть:

- Обработчики событий. Например, методы, отвечающие за обработку запросов
- Конструкторы
- Конкретные известные пользователю методы

Чтобы иметь гибкость в вопросе выбора входных точек в программу, реализован механизм фильтрации для методов. Фильтры пишутся в формате YAML, в процессе работы инструмента десериализуются и используются для определения входных точек при анализе методов программы. Фильтр содержит следующие поля:

- 1) `methodAnnotation` – множество аннотаций метода, доступных в runtime
- 2) `methodName` – регулярное выражение для названия метода
- 3) `classAnnotation` – множество аннотаций класса, доступных в runtime
- 4) `className` – регулярное выражение для названия класса
- 5) `kind` – вид точки входа: метод, конструктор (`init`) или статический инициализатор (`clinit`)
- 6) `args` – список типов аргументов метода в их оригинальном порядке
- 7) `returnType` – возвращаемый тип
- 8) `modifiers` – модификаторы для метода: `static`, `public`, `protected`, `private`, `final`, `synchronized`, `native`

9) `classModifiers` – модификаторы для класса: `static`, `public`, `protected`, `private`, `final`, `synchronized`, `enum`

Если значение равно `null`, то параметр фильтра игнорируется. Пример фильтра для поиска публичных методов с названием, начинающимся на `main`, принимающих массив строк, приведен на Листинг 4.

```
1 methodAnnotations: ["API"]
2 methodName: "main.*"
3 classAnnotations: null
4 className: null
5 kind: "method"
6 returnType: null
7 args: ["java.lang.String[]"]
8 methodModifiers: ["public"]
9 classModifiers: null
```

Листинг 4 — Пример фильтра в `yaml` формате

4.3.2 Статическое извлечение трасс

Извлечение трасс с применением статического анализа состоит из нескольких основных шагов:

- 1) Получить точки входа в программу. Эта задача подробно разобрана чуть выше.
- 2) Построить ICFG. Решается с использованием стандартного API Soot, однако построение межпроцедурного графа потока управления требует запуска Soot в режиме «whole-program».
- 3) Выполнить обход ICFG для каждой точки входа, собирая вызовы и группируя их посредством применения `points-to` анализа к объектам. Рассмотрим данную задачу отдельно, так как она требует разработки определенного алгоритма обхода.

Для обхода ICFG и выполнения всех необходимых для извлечения трассы действий следует реализовать `SceneTransformer` и добавить его в

PackageManager. Именно созданный SceneTransformer будет определять проводимый анализ.

ICFG представляет собой все возможные пути выполнения программы и, очевидно, в среднем содержит множество циклов и ветвлений. Так как нас интересуют именно трассы исполнения, их длина может быть бесконечной и её следует ограничивать. Для этого были введены два параметра:

- Глубина обхода. Изначально устанавливается некоторое число, которое уменьшается каждый раз, когда мы уходим в реализацию вызова. Когда глубина равна 0, обход не может попасть в реализацию какого-либо вызова в рассматриваемом методе и обязан пройти его до конца. Возвращаясь на уровень выше, глубина инкрементируется.
- Длина. Задаёт лимит по количеству вершин графа при обходе.

Извлечение трасс из ICFG представляет собой рекурсивный обход в глубину. Псевдокод алгоритма приведен на Листинг 5. Каждое ветвление имеет собственный набор трасс, при этом оно содержит общую часть с трассами, которые будут собраны для других веток (имеются в виду ветки в одной и той же точке программы). Для того, чтобы не копировать наборы трасс, в методе фиксируется, какие трассы были дополнены на данной итерации. В конце каждого метода, после выполнения рекурсивных вызовов, с помощью сохраненных индексов трассы приводятся в свое изначальное состояние, которое было до ветвления. Сами трассы сохраняются в БД по достижению ограничений на обход или обходу всей программы. Для реализации обхода в глубину в специальном стеке сохраняется точка в программе, к которой необходимо вернуться после рассмотрения вызываемого метода до конца. Когда вызываемый метод рассмотрен, точка возврата снимается со стека.

Для поиска вызовов конкретной библиотеки выполняется сравнение с указанным префиксом названий пакетов. При обнаружении вызова применяется анализ указателей для объекта вызова и объектов из уже накопленных трасс, чтобы получить множества переменных, которые могут указывать на тот же объект. Если полученные множества пересекаются, то переменные могут указывать на один и тот же объект, и вызов помещается в соответствующую трассу, иначе создаётся новая. Таким образом, через points-to выражается alias-анализ.

При обходе перебираются все возможные в рамках наложенных ограничений по длине и глубине комбинации ветвлений. Благодаря этому удаётся достичь высокого покрытия кода и сбора содержательных трасс вызовов. Собранные трассы представляют собой последовательность из объектов класса `MethodData`. Пример можно увидеть в Листинг 6 как часть динамически получаемой трассы.

```

1 graphTraverseLib(
2   startPoint: Unit,
3   isMainMethod: Boolean,
4   ttl: Int = configuration.traversJumps,
5   depth: Int = configuration.traversDepth
6 ) {
7   val currentSuccessors = icfg.getSucessOf(startPoint)
8   if (currentSuccessors.size == 0 || ttl <= 0) {
9     if (ttl <= 0 || isMainMethod) {
10      save(extracted)
11    } else {
12      val succInfo = continueStack.removeLast()
13      graphTraverseLib(succInfo.first, succInfo.second, ttl - 1, depth + 1)
14      continueStack.add(succInfo)
15    }
16  } else {
17    for (succ in currentSuccessors) {
18      var method: SootMethod? = null
19      var continueAdded = false
20      var klass: String? = null
21      var indexesOfChangedTraces: List<Int>? = null
22      if (succ is JInvokeStmt || succ is JAssignStmt) {
23        succ as AbstractStmt
24        if (succ.invokeExpr.method.declaringClass in Scene.v().applicationClasses)
25          method = succ.invokeExpr.method
26        if (method?.foundLib(lib)) {
27          klass = method.declaringClass.toString()
28          if (extracted[klass] == null) extracted[klass] = mutableListOf()
29          indexesOfChangedTraces = saveInvokeToTrace(succ.invokeExpr, extracted[klass])
30        }
31      }
32      if (method != null && depth > 0) {
33        continueAdded = continueStack.add(Pair(succ, isMainMethod))
34        icfg.getStartPointsOf(method).forEach { methodStart ->
35          graphTraverseLib(methodStart, false, ttl - 1, depth - 1)
36        }
37      } else graphTraverseLib(succ, isMainMethod, ttl - 1, depth)
38
39      if (indexesOfChangedTraces != null) resetTraces(indexesOfChangedTraces, extracted[klass])
40      if (continueAdded) continueStack.removeLast()
41    }
42  }
43 }

```

Листинг 5 — Псевдокод алгоритма обхода

4.3.3 Динамическое извлечение трасс

Динамическое извлечение трасс в первую очередь требует инструментария. Она реализована с помощью создания собственного SceneTransformer в Soot и заключается во вставку кода после вызовов библиотеки. Вызовы

библиотеки определяются тем же способом, что и при статическом анализе.

Вставленный код собирает следующие данные:

- 1) Identity hash code объекта вызова
- 2) Время вызова в наносекундах
- 3) UUID запуска
- 4) Название метода
- 5) Аргументы
- 6) Возвращаемый тип
- 7) Класс метода

Для инструментации реализован вспомогательный класс, отвечающий за запись собранной информации в файл, который подкладывается в JAR. Файлы создаются для каждого потока, чтобы избежать конфликтов при многопоточной работе. UUID необходим, чтобы различать попытки запуска и исключить совпадение identity hash code в рамках разных рабочих сессий. Записи в файле представляют собой сериализованные объекты `InvokeData` и `MethodData`, которые успешно десериализуются при сборе трасс и группируются по identity hash code и UUID.

Soot при инструментации JAR файла теряет директорию META-INF, влияющую на его запуск. Несмотря на то, что тесты не используют JAR, а фаззинг требует на вход путь к конкретному методу, это учтено и реализован механизм сохранения изначальной мета-информации и добавления её в инструментированный JAR. Это полезно для пользовательских экспериментов по извлечению трасс, позволяя сохранять JAR действительно исполняемым.

Для получения трасс необходимо выполнить запуск тестов или фаззинг. Для запуска тестов используется Gradle Tooling API или предустановленный

Maven тем же образом, который описан в Раздел 4.2.3. При вызове задачи явно исключается сборка проекта, чтобы не потерять результаты инструментирования.

Для фаззинга автоматически при первом запуске происходит получение архива с исполняемыми файлами Jazzer под целевую операционную систему (в дальнейшем проверяется наличие исполняемых файлов). Фаззер вызывается как сторонний процесс для каждой точки входа и имеет следующие опции:

- `-runs=N`. Количество запусков указанного метода, где `N` – пользовательский параметр. Если `N = 0`, то ограничение отсутствует
- `-max_total_time=N`. Длительность работы фаззера в секундах, где `N` – пользовательский параметр. Для бесконечной работы опция не указывается
- `--keep_going=0`. Игнорирует найденные фаззером ошибки. Эта опция нужна, так как мы заинтересованы в трассах, а не в тестировании программы. На самом деле вместо нуля можно указать любое другое число, означающее количество игнорируемых ошибок
- `--autofuzz=qualified.reference.to.Class::method`. Указывает цель для фаззинга

Пример получаемой трассы для поиска вызовов класса `java.io.File` приведен в Листинг 6.

```

1 {"methodData":{"name":"<init>","args":
  ["java.lang.String"],"returnType":"void","isStatic":false,"klass":"java.io.File"},
2 "iHash":"443942537","date":"170309763...","uuid":"6b4..."}
3 {"methodData":{"name":"<init>","args":
  ["java.lang.String"],"returnType":"void","isStatic":false,"klass":"java.io.File"},
4 "iHash":"1243171897","date":"170309805...","uuid":"6b4..."}
5 {"methodData":{"name":"exists","args":[],"returnType":"boolean","isStatic":false,"klass":"java.io.File"},
6 "iHash":"1243171897","date":"170309805...","uuid":"6b4..."}
7 {"methodData":{"name":"createNewFile","args":[],"returnType":"boolean","isStatic":false,"klass":"java.io.File"},
8 "iHash":"1243171897","date":"170309806...","uuid":"6b4..."}
9 {"methodData":{"name":"toPath","args":[],"returnType":"java.nio.file.Path","isStatic":false,"klass":"java.io.File"},
10 "iHash":"1243171897","date":"170309807...","uuid":"6b4..."}
11 {"methodData":{"name":"<init>","args":
  ["java.lang.String"],"returnType":"void","isStatic":false,"klass":"java.io.File"},
12 "iHash":"1376151044","date":"170309807...","uuid":"6b4..."}
13 {"methodData":{"name":"delete","args":[],"returnType":"boolean","isStatic":false,"klass":"java.io.File"},
14 "iHash":"1376151044","date":"170309809...","uuid":"6b4..."}
15 {"methodData":{"name":"createNewFile","args":[],"returnType":"boolean","isStatic":false,"klass":"java.io.File"},
16 "iHash":"1243171897","date":"170309809...","uuid":"6b4..."}

```

Листинг 6 — Пример получаемой трассы

4.4 Пакет storage

Для хранения результатов поиска проекта и извлечения из них трасс использована база данных SQLite. Так как это локальная БД, она позволяет легко создавать переносимые хранилища в виде файла для различных запусков инструмента. Это позволяет в дальнейшем использовать их как отправную точку для поиска репозиторий, дополнять уже накопленные трассы, проводить эксперименты по восстановлению с разными параметрами и обмениваться накопленными данными. Также она не требует специального окружения и может создаваться с использованием соответствующей библиотеки. Работа с БД реализована с помощью ktorm.

БД состоит из двух таблиц:

- Repository. Таблица используется для хранения уже полученных репозиторий и краткой информации о них. Содержит следующие поля:
 - name – название репозитория

- namespace – иначе groupId, в случае если проект – библиотека из Maven
- version – версия
- author – автор
- locator – локация репозитория, для GitHub это URL, а для Maven – PURL
- source – источник, т.е. GitHub или Maven
- date – дата получения репозитория
- Trace. Данная таблица предназначена для хранения трасс и содержит в себе следующие поля:
 - trace - трасса из вызовов в JSON формате. На самом деле подобное решение противоречит нормализации БД и является неоптимальным, можно сохранять методы в отдельную таблицу и хранить исключительно идентификаторы методов из неё. Но в рамках работы выбор сделан в пользу удобства просмотра накопленных трасс без средств обработки, а сравнительно малый объем данных в БД позволяет пренебречь нормальной формой
 - class - класс, для которого собрана трасса
 - count - количество найденных идентичных трасс
 - isStatic - флаг, демонстрирующий, содержит трасса статические вызовы или обычные. Так как в рамках предлагаемого подхода невозможно определить контекст статического вызова, было решено выделить их в отдельную трассу

4.5 Пакет inference

После извлечения и сохранения определенного количества трасс появляется возможность восстановить поведенческую модель библиотеки. Процесс восстановления происходит в несколько этапов:

- 1) Выбор трасс и их предобработка в соответствии с режимом работы.
Это могут быть трассы, полученные только статическим или динамическим путем, а также статически полученные трассы, частично совпадающие с динамическими. Если был установлен порог погрешности, то также выполняется фильтрация трасс, которые будут использованы для восстановления
- 2) Формируется входной файл для фреймворка MINT, содержащий названия переходов и трассы
- 3) Применяется алгоритм k-tail, реализованный в рамках MINT. Результатом является граф в DOT формате
- 4) Определяются конечные состояния, т.е. такие, из которых отсутствуют любые переходы
- 5) Выполняется объединение конечных состояний. Для этого выбирается основное конечное состояние и у переходов, ведущих в остальные конечные состояния, подменяется точка назначения на основное. Лишние конечные состояния удаляются. Как уже было описано в разделе, посвященном проектированию, это действие не несет какой-либо потери информации
- 6) Выполняется трансляция DOT-графа в JSON для унификации формата хранения и возможной работы с ним (например, интерактивное

редактирование). При этом DOT-граф остается в качестве артефакта работы инструмента

Для восстановления можно управлять параметром k , влияющим на длину минимально совпадающих частей трасс для слияния, а также выбирать другие предоставляемые `mintframework` стратегии восстановления и алгоритмы классификации.

4.6 Реализованный инструмент

В результате разработан инструмент, реализующий подход автоматического извлечения поведенческих моделей библиотек из доступных программных репозиториях. В разработке учтена возможность использования модулей инструмента независимо друг от друга, а также предоставлены возможности настройки используемого окружения и библиотек. Исходный код проекта доступен в репозитории `LibMiner`⁹ на GitHub.

⁹<https://github.com/kechinvv/LibMiner>

5 ТЕСТИРОВАНИЕ

Для тестирования предложенного подхода и его реализации были получены поведенческие модели для классов нескольких библиотек:

- `java.util.zip.ZipOutputStream`
- `java.lang.StringBuilder`
- `java.security.Signature`
- `java.net.Socket`
- `org.columba.ristretto.smtp.SMTPProtocol`

Каждый из этих классов имеет модель разной сложности и, за исключением `StringBuilder`, рассматривался в упомянутых исследованиях[12,15,19], авторы которых сравнивали полученные КА с эталонными моделями. Эти модели расположены в репозитории GitHub¹⁰. Несмотря на то, что авторы использовали их как эталон, некоторые из представленных КА явно неполны и ограничены определенным набором вызовов (`Signature` и `SMTPProtocol`), а модель класса `Socket`, похоже, получена автоматически и вручную отредактирована. По этой причине сравнение и оценка полученных автоматов будут приблизительны и субъективны.

Стоит сказать, что отсутствие эталонов можно решить созданием собственных, однако это трудоемкая задача, о чем сообщалось в исследованиях с проведенным тестированием. Задача решалась усилиями нескольких человек, а все модели, которые можно было переиспользовать из других исследований, использовались повторно[12]. Поэтому в рамках выполняемой работы задача составления эталонов не выполнялась.

¹⁰<https://github.com/ModelInference/SpecForge>

Оценка точности и полноты получаемых поведенческих моделей не проводилась, так как в работе не разработаны собственные алгоритмы восстановления. Подробное сравнение алгоритмов проведено в исследовании «Automatic mining of specifications from invocation traces and method invariants»[12]. На качество моделей также влияет корректность получаемых трасс:

- Обход ICFG может получать все возможные пути исполнения, однако часто программы пишутся так, что не все состояния достижимы при реальном исполнении
- Фаззинг способен создавать некорректные входные объекты, что в теории может привести к появлению трасс, невозможных при реальном использовании (проблема, аналогичная предыдущему пункту)
- Анализ указателей имеет определенную погрешность

Влияние первых двух факторов сложно оценить и учесть. Что касается анализа указателей, то определением точности алгоритма Андерсена на практике занимались авторы работы «The Flow-Insensitive Precision of Andersen's Analysis in Practice»[20]. Результат показал, что точность очень сильно варьируется от проекта к проекту. Для полноты проведенного тестирования следует оценивать влияние качества трасс на получаемые КА, но ввиду отсутствия качественных эталонов и сложности их составления, эта часть не рассматривается в рамках данной работы.

5.1 Полученные модели

Все модели восстановлены в результате объединения трасс, полученных статическим и динамическим путем. Сделано это по той причине, что динами-

ческие трассы в среднем не добавляют нового покрытия, но полученные таким образом последовательности вызовов более надежны.

В качестве источника проектов использовался GitHub, так как наиболее наглядными и понятными примерами являются классы стандартной библиотеки, отсутствующие в Maven Central. Однако библиотеки с Maven Central в результате экспериментов обладали наиболее высоким процентом успешного применения фаззинга, что повышало качество получаемых моделей.

Запуск инструмента для каждого целевого класса выполнялся в следующих условиях:

- Лимит получаемых проектов: 100
- Лимит получаемых трасс: 1000000
- Лимит длины трассы: 200 вызовов
- Ограничение глубины обхода: 10
- Параметр k для k -tail: 1 или 2
- Количество запусков фаззера: 10000
- Ограничение времени работы фаззера: 300 секунд
- Системные характеристики: 20 гигабайт оперативной памяти, процессор Intel Core i5-8300H CPU 2.30GHz, 4 физических ядра

5.1.1 ZipOutputStream

Полученная модель представлена на Рис. 5, а эталонная – на Рис. 6. Важно отметить, что к данному эталону не возникает вопросов о его полноте и методе получения. Из рисунков видно, что обе модели покрывают все необходимые вызовы. Можно заметить, что полученная модель не противоречит эталону, но не содержит всех переходов и является неполной. Более длитель-

ный поиск проектов и трасс может улучшить ситуацию, но вряд ли даст эталонный результат.

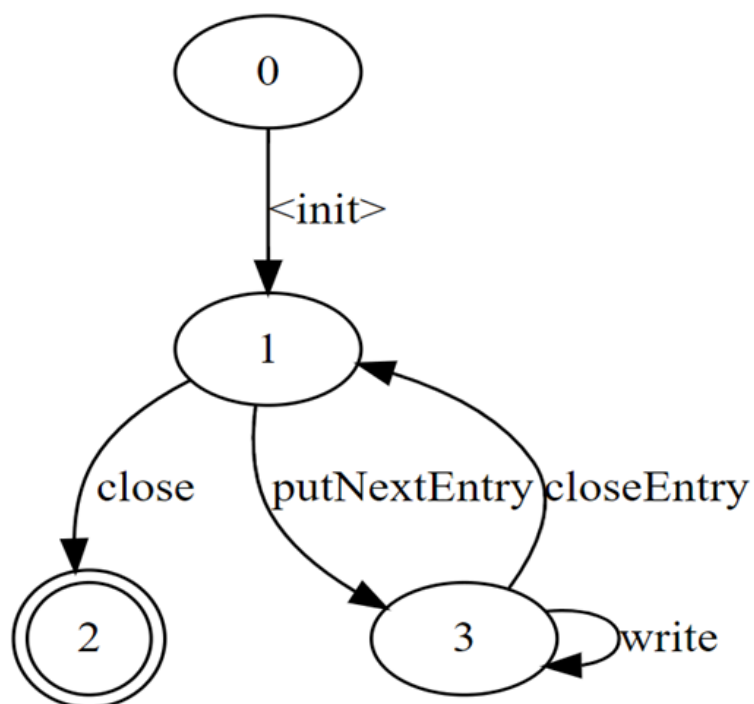


Рисунок 5 — Полученная модель ZipOutputStream

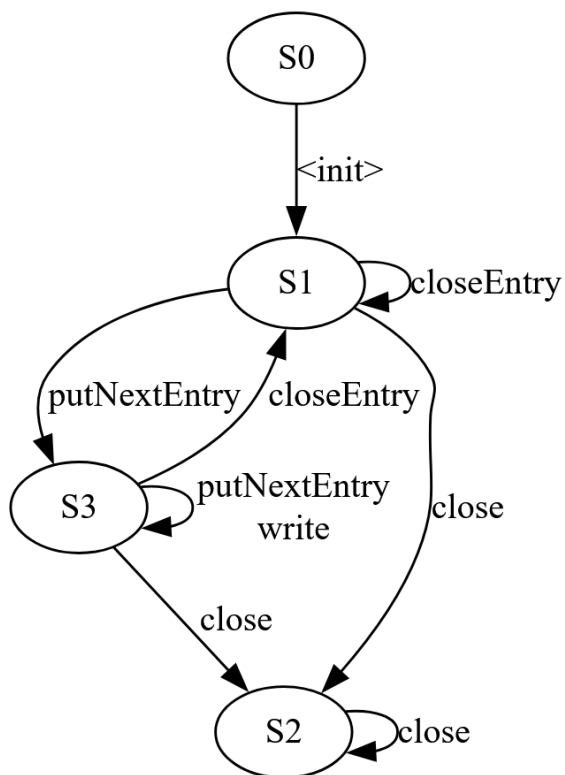


Рисунок 6 — Эталонная модель ZipOutputStream

5.1.2 StringBuilder

Для данной модели на Рис. 7 нет эталона, но легко заметить, что она не противоречит реальному использованию StringBuilder. Тем не менее, получены не все возможные вызовы библиотеки, а восстановленный КА тривиален. Более длительное применение инструмента обогатит данную модель новыми состояниями и переходами.

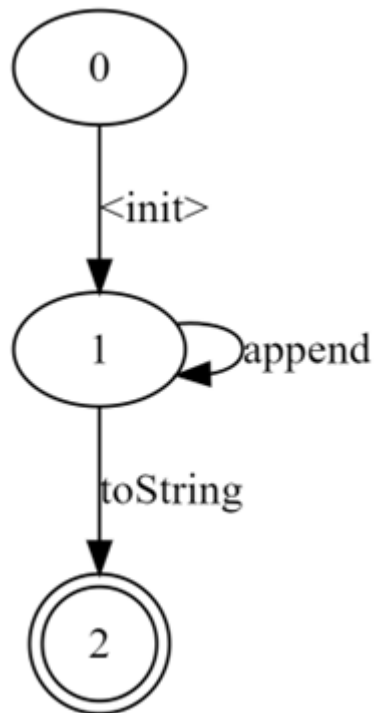


Рисунок 7 — Полученная модель StringBuilder

5.1.3 Signature

Для полученной модели, представленной на Рис. 8, существует эталон, но он содержит лишь небольшую часть действительно возможных вызовов и переходов. Тем не менее, из модели видно, что явно выделяются определенные повторяющиеся паттерны переходов между состояниями, а также присутствуют их дубликаты. Это является следствием работы алгоритма восстановления и

не может быть решено без потери подробностей КА или использования другого алгоритма.

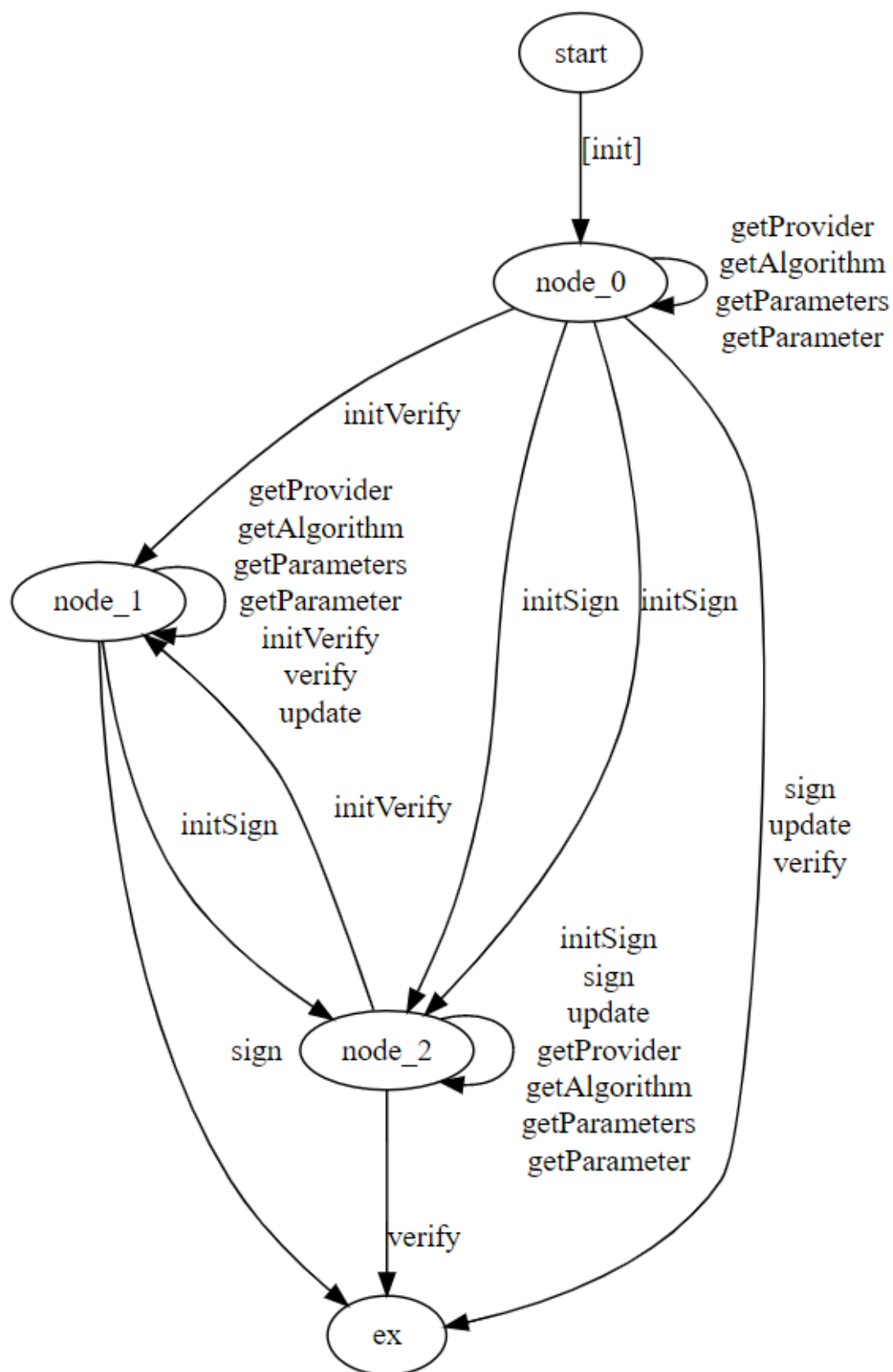


Рисунок 8 — Полученная модель Signature

5.1.4 Socket

При сравнении полученной модели с Рис. 9 и эталона с Рис. 10 видно, что полученный КА явно не содержит всех вызовов, а также имеет недостаточное обобщение. Также здесь видна погрешность статического подхода в том, что потеряно создание объекта и некоторые переходы происходят без вызова конструктора. Тем не менее, из полученного КА видны дальнейшие точки для ручного исправления. Например, объединение методов доступа к данным (get) в один переход.

Что касается эталонной модели, она вызывает сомнения, так как похоже, что КА может быть обобщен лучше. Состояние S9 играет роль начального, хотя вызова конструктора для неё нет. Это поведение также наблюдается в полученном КА и допускается, если объект был создан методом другого класса библиотеки. Тем не менее, складывается впечатление, что это автоматически полученный и обработанный вручную КА.

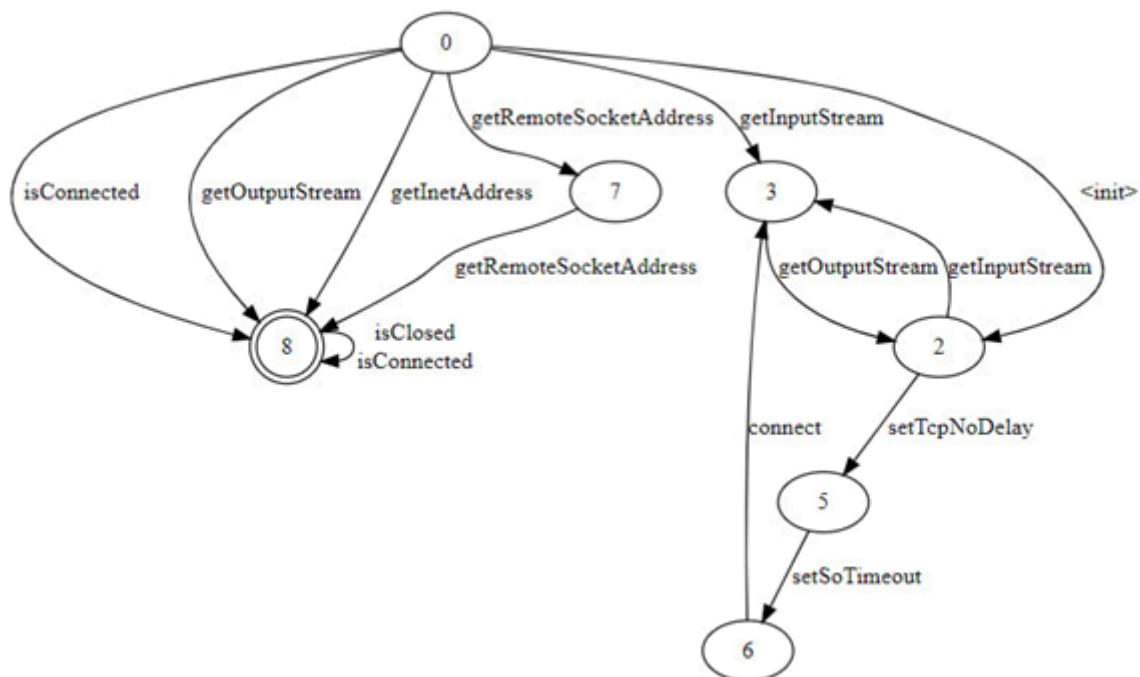


Рисунок 9 — Полученная модель Socket

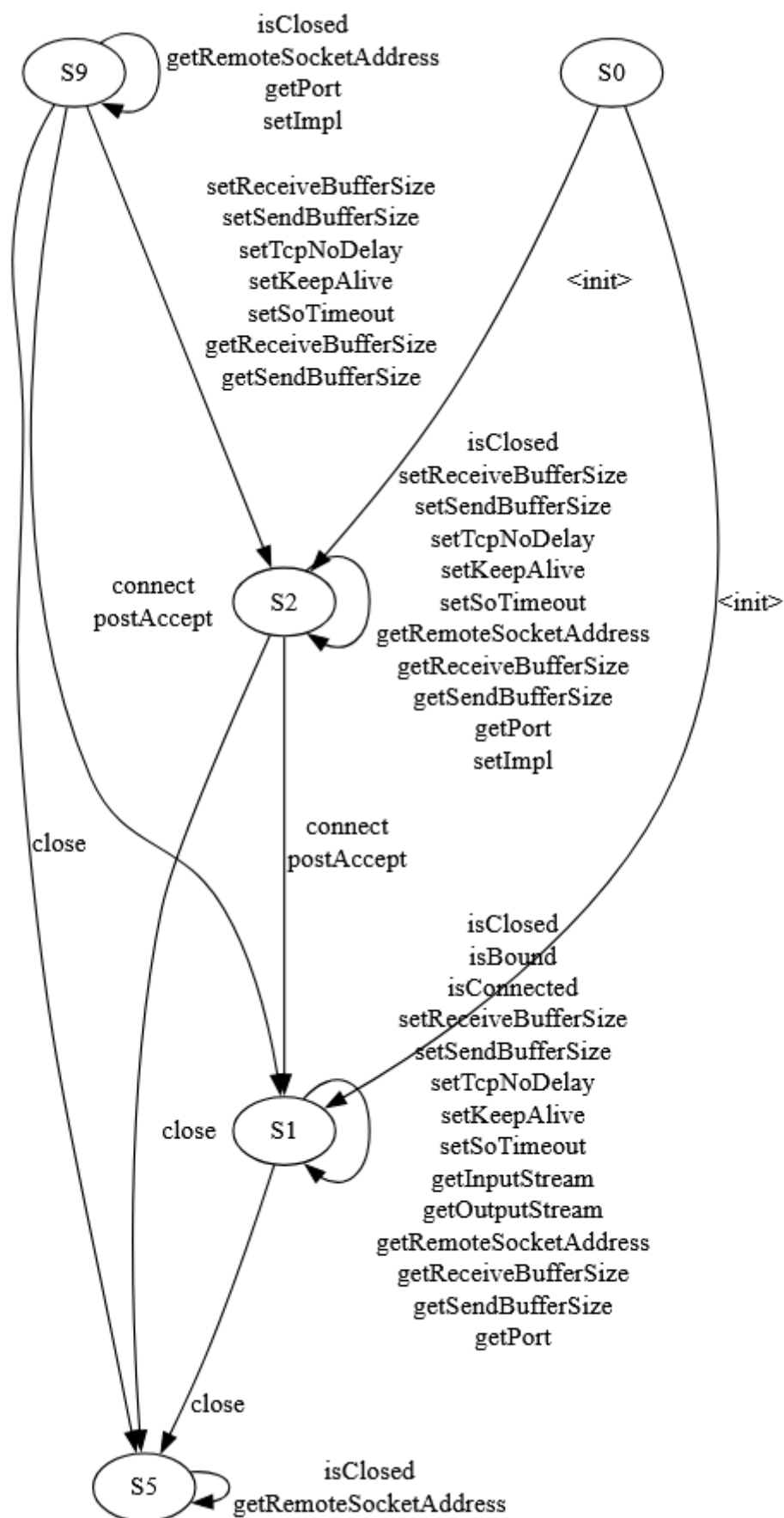


Рисунок 10 — Эталонная модель Socket

5.1.5 SMTPProtocol

Для модели с Рис. 11 также существует неполная эталонная модель, но она содержит очень малое количество доступных вызовов. Несмотря на это, из полученного КА также видно, что он имеет слабую обобщенность и визуально выделяющиеся повторяющиеся паттерны вызовов, которые, скорее всего, могут быть объединены вручную. Также следует отметить наличие большинства методов класса, что говорит об успехе сбора трасс.

ствительно являются аппроксимацией сверху, а представленный подход требует улучшений в области извлечения трасс и алгоритмов восстановления. Тем не менее, в автоматическом режиме успешно выполняется получение проектов, использующих заданную библиотеку, и происходит извлечение трасс как с применением статического, так и динамического подхода. Восстанавливаемые модели соответствуют полученным трассам и могут быть интерпретированы человеком для дальнейшей доработки. Более того, манипуляция параметрами поиска проектов, входных точек и параметров алгоритма восстановления может сильно улучшить результат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы предложен метод автоматического извлечения поведенческих моделей библиотек из открытых программных репозиториях. Метод заключается в применении статических и динамических подходов к полученным с GitHub или Maven Central Repository проектам для извлечения трасс и последующем применении алгоритма восстановления КА. Для апробации метода реализован инструмент, позволяющий запускать автоматические сценарии для получения поведенческих моделей в виде КА и предоставляющий элементы управления настройками поиска, анализа, восстановления и используемого окружения.

Результат исследования показал применимость предложенного подхода. С помощью поиска по GitHub и Maven Central Repository была решена задача получения общедоступных программ, использующих заданную библиотеку. Для извлечения трасс применены статический и динамический анализ. Статический заключается в обходе ICFG и применении Points-to анализа на основе алгоритма Андерсена, а динамический – в инструментации и запуске тестов или фаззинга входных точек в программу на основе Jazzer. Восстановление поведенческих моделей выполнено с применением алгоритма k-tail, реализованного в рамках инструмента MINT.

Представленный метод и инструмент требуют дальнейшего развития в нескольких направлениях.

Одна из проблем в том, что получаемые КА являются сильной аппроксимацией сверху и на сложных библиотеках имеют мало общего с истинными поведенческими моделями. Это является следствием используемого алгоритма восстановления и игнорирования состояния программы, включая значения

аргументов. Для решение этого необходимо провести работу над инструментацией, реализовав сбор значений аргументов и доступных в контексте переменных. Это позволит применять более сложные алгоритмы восстановления, обеспечивающие лучшую обобщенность модели. При этом важно сохранить простоту применения инструментации для работы в автоматическом режиме. Другой способ получения информации о состоянии программы, причем сразу в форме предикатов - использование символьного исполнение, но это также объект для отдельного исследования.

Ещё одна проблема, требующая решения – отсутствие тестов в проектах, их малое количество или плохая репрезентативность в контексте получаемых трасс. В данной работе для решения этой проблемы применяется фаззинг, но, вероятно, лучший результат покажет генерация тестов, направленная на получения трасс, содержащих поведение заданной библиотеки (схожее с Tautoko). Однако, это отдельная сложная задача, требующая соответствующего исследования.

Сильным ограничением для автоматизации динамических методов является зависимость программ от определенного внешнего окружения - базы данных, ПО, переменные окружения. Идеальным решением этого было бы мокирование подобного кода, интегрированное в задачу генерацию тестов. Это бы обеспечило высокую долю успешно исполняемых тестов. На текущий момент нет инструментов, позволяющих это осуществить – в связи со сложностью решения и узким направлением его применения актуален вопрос релевантности исследований по данной теме.

Не смотря на указанные недостатки, требующие дальнейшего развития и дополнительных исследований, предложенный метод является комплексным

решением задачи получения поведенческих моделей. При этом для его применения требуется сравнительно небольшое участие человека. Что касается необходимости вручную обрабатывать полученные КА – это ограничение всех существующих подходов к восстановлению, на данный момент не имеющее другого решения, кроме как использовать различные алгоритмы и экспериментировать с настройкой их параметров. Хочется надеяться, что инструменты, позволяющие автоматизировать получение поведенческих моделей, в будущем смогут улучшить опыт разработки и применения анализов, основанных на использовании формальных спецификаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ivanov D. и др. UTBot Java at the SBST2022 tool competition. 2023. сс. 39–40.
2. Ицыксон В.М. и др. Моделирование поведения функций стандартной библиотеки в задачах анализа программ // Информационно-управляющие системы. 2024. № 4. сс. 24–39.
3. Itsykson V. LibSL: Language for Specification of Software Libraries // Programmnaya Ingeneria. 2018. т. 9, № 5. сс. 209–220.
4. Феофилактов В.С. Платформа для извлечения частичных спецификаций библиотек. 2023.
5. Biermann A., Feldman J. On the Synthesis of Finite-State Machines from Samples of Their Behavior // IEEE Transactions on Computers. 1972. № 6. сс. 592–597.
6. Lorenzoli D., Mariani L., Pezzè M. Automatic generation of software behavioral models // Proceedings - International Conference on Software Engineering. 2008. сс. 501–510.
7. Ernst M.D., Perkins J.H., Guo P.J. The Daikon system for dynamic detection of likely invariants // Sci. Comput. Program. 2007. т. 69. сс. 35–45.
8. Shoham S., Yahav E., J. S.F. Static Specification Mining Using Automata-Based Abstractions // IEEE Transactions on Software Engineering. 2008. т. 34, № 5. сс. 651–666.
9. Cousot P., Cousot R. Abstract Interpretation: A Unified Lattice Model for Static Analysis of Programs by Construction or Approximation of Fixpoints. 1977. сс. 238–252.
10. Andersen L.O., Lee P. Program Analysis and Specialization for the C Programming Language. 2005.

11. Lerch J. и др. Access-Path Abstraction: Scaling Field-Sensitive Data-Flow Analysis with Unbounded Access Paths (T). 2015. cc. 619–629.
12. Krka I., Brun Y., Medvidovic N. Automatic mining of specifications from invocation traces and method invariants // Proceedings of the 22nd ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering. 2014. т. 9, № 5. cc. 178–189.
13. Caso G. и др. Automated Abstractions for Contract Validation // IEEE Trans. Software Eng. 2012. т. 38. cc. 141–162.
14. Walkinshaw N., Taylor R., Derrick J. Inferring Extended Finite State Machine models from software executions // 20th Working Conference on Reverse Engineering (WCRE). 2013. cc. 301–310.
15. Dallmeier V., Knopp N., Mallon C. Automatically Generating Test Cases for Specification Mining // IEEE Transactions on Software Engineering. 2012. т. 38, № 2. cc. 243–257.
16. Dallmeier V. и др. Mining object behavior with ADABU // WODA. 2006. с. .
17. About [электронный ресурс]. URL: <https://github.com/about>.
18. Sridharan M., Fink S.J. The Complexity of Andersen's Analysis in Practice // Static Analysis / под ред. Palsberg J., Su Z. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. cc. 205–221.
19. Le T.-D.B. и др. Synergizing Specification Miners through Model Fissions and Fusions // Proceedings of the 2015 30th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE). 2015. cc. 115–125.
20. Blackshear S. и др. The Flow-Insensitive Precision of Andersen's Analysis in Practice // Static Analysis / под ред. Yahav E. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. cc. 60–76.