

На правах рукописи



ЛЕЩИНСКАЯ Мария Владимировна

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ВЫВОДОМ
В КЛАССИЧЕСКОМ И НЕЧЕТКОМ МЕТОДЕ РЕЗОЛЮЦИЙ**

Специальность 1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Леденева Татьяна Михайловна

Официальные оппоненты **Тулупьев Александр Львович,**
доктор физико-математических наук, профессор; Северо-Западный институт управления Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, кафедра бизнес-информатики; профессор

Румовская София Борисовна,
кандидат технических наук; Калининградский филиал федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», лаборатория «Интеллектуальных технологий и систем»; старший научный сотрудник

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится 3 июля 2024 года в 15 часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета 24.2.288.11, созданного на базе Воронежского государственного университета, по адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Воронежского государственного университета и на сайте www.science.vsu.ru/disser.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.288.11
кандидат физико-математических
наук, доцент



Медведева
Ольга Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Применение искусственного интеллекта для решения технических и технологических задач позволяет повысить эффективность производственных процессов, ускорить разработку инновационных продуктов и обеспечить их высокое качество. Интерес к интеллектуальным системам в таких сферах, как информационные технологии и разработка сложного программного обеспечения, наряду с автомобилестроением, робототехникой и космической индустрией, подчеркивает значимость искусственного интеллекта в качестве ведущего двигателя технологической эволюции и промышленного инновационного прорыва. Одним из важнейших направлений искусственного интеллекта (ИИ) является развитие систем, основанных на знаниях. Логическая модель, базирующаяся на исчислении предикатов первого порядка, отличается возможностью строгого теоретического обоснования процедур обработки знаний, имеет высокий уровень формализации и обладает объяснительной способностью. Если предметная область включает детерминированные жесткие знания, то использование логической модели и алгоритмов логического вывода становится целесообразным. Пусть H_1, \dots, H_n – гипотезы и φ – некоторое утверждение. *Доказательством* называется поиск ответа на вопрос: является ли формула φ логическим следствием гипотез H_1, \dots, H_n , или, в соответствии с правилом обратной дедукции, является ли формула $H_1 \wedge \dots \wedge H_n \rightarrow \varphi$ общезначимой (в этом случае рассуждения называются правильными). Поиск доказательств для истинных формул (теорем) достаточно сложен, а раздел ИИ, посвященный данной проблеме, называется *автоматическим доказательством теорем* (существующие компьютерные системы доказательства теорем – Otter, SETHEO, E, Isabelle, Vampire, Waldmeister). Теоретической базой для построения большинства методов автоматического доказательства теорем является *метод резолюций*. Системы логического вывода и метод резолюций, в частности, выступают как уникальные инструменты для автоматизации процессов решения различных задач. Подход, основанный на системах логического вывода, играет все более важную роль в задаче автоматической верификации программ; для синтеза программного и аппаратного обеспечения (система помогает специалисту в создании программ из спецификаций); для разработки поисковых систем, основанных на рассуждениях; в задачах медицинской диагностики; при создании компьютерных игр.

Резолютивный вывод, являясь разновидностью логического вывода, имеет существенный недостаток, который заключается в формировании такого множества резольвент, большинство из которых оказываются ненужными, что увеличивает время, необходимое для обоснования решения. В связи с этим актуальными являются исследования, связанные с повышением эффективности метода резолюций на основе разработки стратегий управления выводом, в том числе в условиях неопределенных суждений, для формализации которых используется нечеткая логика.

Степень разработанности темы исследования. Автоматическое доказательство теорем берет начало от работ J. Herbrand; принцип резолюций был предложен J.A. Robison, а затем развит в исследованиях следующих ученых: J.R. Slagle, R.S. Boyer, D. Luckham, D.A. Plaisted, P.V. Andrews, W. Bibel, Н.А. Шанин, В.Н. Вагин (модификации принципа резолюций); R. Kowalski (основы логического программирования); L. Zadeh, D. Dubois, H. Prade, R.C.T. Lee, M. Mukaidono, M.A.C. Viedma, F.A. Fontano, B. Mondal, S. Raha (рассуждения в условиях неопределенности и нечеткий метод резолюций).

Диссертация выполнена в рамках одного из основных научных направлений Воронежского государственного университета «Математическое моделирование, программное и информационное обеспечение, методы вычислительной и прикладной математики и их применение к фундаментальным исследованиям в естественных науках».

Цель исследования заключается в разработке и обосновании новых стратегий управления выводом в классической и нечеткой логике для повышения эффективности метода резолюций в системах автоматического доказательства теорем.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

1. Анализ метода резолюций, включая его основные принципы, преимущества и недостатки, а также формулировка целей и задач исследования.
2. Разработка новых стратегий управления выводом в методе резолюций с учетом особенностей как исходных дизъюнктов, так и формируемых на основе резолютивного вывода.
3. Исследование подходов к определению нечеткой резольвенты и разработка стратегий управления выводом в методе резолюций для неопределенных суждений.
4. Программная реализация стратегий управления выводом в классическом и нечетком вариантах метода резолюций.

Объектом исследования являются автоматические рассуждения на основе формальной логики.

Предмет исследования – метод резолюций в классической и нечеткой логике.

Методы исследования базируются на принципах искусственного интеллекта и математического моделирования; теоретическая основа для получения научных результатов – это математическая логика, теория нечетких множеств и нечеткая логика, теория графов, теория алгоритмов. Для программной реализации использовались современные методы и технологии объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

- комплекс стратегий управления выводом в форме эвристических правил для выбора дизъюнктов при построении резольвенты, учитывающий особенности дизъюнктов, такие как унифицируемость, наличие одночленов, частоту использования при построении предыдущих резольвент, специальным образом формируемые весовые коэффициенты, что позволяет сократить количество формул в резолютивном выводе и, тем самым, обеспечить быстрое действие соответствующих алгоритмов;
- критерии для сравнения стратегий, отличающиеся учетом структурных характеристик графа вывода, при этом для каждой стратегии определена оценка сложности алгоритмической реализации, учитывающая количество предложений и среднее количество атомов в предложении, что позволяет на этапе выбора стратегии определить наиболее подходящую для повышения эффективности метода резолюций;
- совокупность утверждений о существовании логически значимой нечеткой резольвенты в смысле определений Ли и Мукайдано при условии, что для формализации основных логических связей используются треугольные нормы и конормы, позволяющие формализовать соответствующие стратегии управления выводом в условиях неопределенности с учетом семантики нечетких логических операций;
- алгоритмы построения резолютивного вывода для нечеткого метода резолюций, отличающиеся различными подходами к определению нечеткой

резольвенты, что расширяет область применимости метода для решения прикладных задач в контекстах, требующих учета неопределенности и обработки неопределенных суждений;

– структура и программная реализация приложения с различными вариантами метода резолюций, отличающегося возможностью выбора подходящей стратегии и предназначенного как для исследовательских целей, так и для решения практических задач, связанных с обоснованием принимаемых решений.

Соответствие Паспорту специальности. Полученные в диссертации результаты, характеризующиеся научной новизной, соответствуют следующим пунктам Паспорта специальности 1.2.1 «Искусственный интеллект и машинное обучение»: п.1 «Естественно-научные основы и методы искусственного интеллекта»; п. 3 «Методы и алгоритмы моделирования мыслительных процессов: рассуждений, аргументации, распознавания и классификации, формирования понятий»; п. 15 «Математические исследования в области статистики, логики, алгебры, топологии, анализа функций и других областях, необходимых для решения задач искусственного интеллекта и машинного обучения».

Теоретическая и практическая значимость. Предложенные стратегии управления выводом для классического и нечеткого метода резолюций расширяют возможности для повышения эффективности метода за счет сокращения количества резольвент и уменьшения времени обработки рассуждений. Исследования, касающиеся нечетких резольвент Ли и Мукайдано, а также их обобщения на случай использования для формализации нечетких логических связей (треугольных норм и конорм), расширяют теоретическую базу для построения методов автоматического доказательства теорем при решении задач в условиях неопределенности.

Практическая значимость исследования заключается в том, что предложенные подходы обеспечивают большую гибкость, улучшенную точность и эффективность принятия решений, что ведёт к повышению общей производительности систем, основанных на знаниях. Результаты диссертационной работы внедрены в деятельность отдела качества IT-компании «Серф» в форме мобильного приложения на iOS для отслеживания качества тестирования разрабатываемого программного обеспечения. Предложенные стратегии управления выводом и элементы нечеткого метода резолюций используются в учебном процессе Воронежского государственного университета в форме обучающих модулей по дисциплинам «Математическая логика и теория алгоритмов» и «Основы нечеткого моделирования».

Результаты и положения, выносимые на защиту:

– комплекс стратегий и соответствующих им алгоритмов управления выводом, расширяющий существующий арсенал стратегий, – это позволяет адаптироваться к различным задачам, в которых используется логическая модель представления знаний, а решение сводится к процессу автоматического доказательства теорем;

– совокупность критериев как основа для всесторонней оценки и анализа стратегий управления выводом в контексте различных условий и сценариев применения метода резолюций – это позволяет обосновать понятие эффективности и применимости стратегий;

– совокупность утверждений о существовании и свойствах нечеткой резольвенты, а также алгоритмы, реализующие стратегии на основе альтернативных определений нечеткой резольвенты, – это позволяет использовать метод резолюций в условиях неопределенности;

– структура приложения и программная реализация вариантов метода резолюций с различными стратегиями вывода, способная адаптироваться к разнообразным требованиям и специфике входной информации.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов диссертационного исследования основана на корректном использовании математического аппарата; обосновании выбора алгоритмических решений и их согласованностью с результатами вычислительного эксперимента; практическом внедрении результатов диссертации в учебный процесс и деятельность IT-компании, связанную с автоматизацией тестирования программного обеспечения. Результаты диссертации докладывались на профильных научных конференциях: Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (Воронеж, 2021-2023), Международная конференция по математическому моделированию систем управления, автоматизации и энергоэффективности (International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency) – SUMMA (Липецк, 2022); научные сессии профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Воронежского государственного университета (Воронеж, 2019-2023); Межвузовская научная конференция молодых ученых и студентов «Математика, информационные технологии, приложения» (Воронеж, 2023).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ (3 из которых опубликованы без соавторов), в том числе: 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК; 1 статья в издании, индексируемом в Scopus; 4 статьи в сборниках трудов конференции; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве, лично автором получены следующие результаты: [1] – элементы теоретического анализа определений нечетких резольвент, обоснование стратегий нечеткого метода резолюций; [2] – формулы для индексов схождения/несхождения, структура метода резолюций, основанного на введенных индексах; [3,6,7] – разработка и формализация новых стратегий, которые учитывают особенности дизъюнктов как в исходном множестве, так и в множествах, генерируемых в процессе вывода; [1,2,3,6,7,8,9] – разработка алгоритмической и программной реализации предложенных стратегий вывода, проведение вычислительных экспериментов.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 107 наименований, и приложения. Основная часть изложена на 134 страницах, содержит 27 рисунков, 14 таблиц.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, приводится общая характеристика полученных результатов.

В **первой главе** представлены общие сведения о методе резолюций, рассмотрены основные существующие стратегии управления выводом, проанализированы их преимущества и недостатки, тем самым, сформирована теоретическая основа исследования.

Пусть H_1, \dots, H_n – это некоторые гипотезы, формула φ – некоторое утверждение, и предположим, что нас интересует вопрос, следует ли утверждение φ из утверждений H_1, \dots, H_n . Рассуждения называются правильными, если формула

$H_1 \wedge \dots \wedge H_m \rightarrow \varphi \equiv \bar{H}_1 \vee \dots \vee \bar{H}_m \vee \varphi$ является общезначимой, т.е. теоремой. Но тогда отрицание этой формулы $\overline{\bar{H}_1 \vee \dots \vee \bar{H}_m \vee \varphi} \equiv H_1 \wedge \dots \wedge H_m \wedge \bar{\varphi}$ есть невыполнимая формула. Таким образом, чтобы доказать, что формула φ выводима из заданного множества гипотез, нужно показать, что множество формул $\{H_1, \dots, H_m, \bar{\varphi}\}$ противоречиво, и этот процесс называется *доказательством теоремы*. Для определения правильности рассуждений в исчислении высказываний и исчислении предикатов первого порядка используется метод резолюций. На этапе подготовки к его применению осуществляется преобразование множества формул $\{H_1, \dots, H_m, \bar{\varphi}\}$ в множество дизъюнктов (предложений) $S = \{D_1, \dots, D_n\}$. Для исчисления предикатов процедура преобразования включает следующие шаги: для каждой формулы строится приведенная нормальная форма, затем осуществляется сколемизация с последующим отбрасыванием кванторов всеобщности и переходом к бескванторной форме – матрице, затем для каждой формулы строится конъюнктивная нормальная форма (КНФ), а совокупность полученных элементарных дизъюнкций (дизъюнктов) образует базовое множество предложений S .

В исчислении высказываний литеры p и \bar{p} , входящие в дизъюнкты D_i и D_j , называются *контрарной парой*. Под *резолюцией* понимается правило вывода, применение которого к двум дизъюнктам, содержащим контрарные литеры, позволяет получить резольвенту в форме дизъюнкта. Для получения резольвенты $res(D_i, D_j)$ нужно из дизъюнктов D_i и D_j удалить контрарные литеры, а оставшиеся части формул объединить дизъюнкцией. В исчислении предикатов первого порядка рассматриваются контрарные пары литералов (литерал – это атом или отрицание атома), причем в общем случае списки их аргументов могут быть разными. Поэтому перед построением резольвенты требуется предварительная унификация, которая, однако, не всегда возможна, и тогда резольвенты не существует.

Резольвента $res(D_i, D_j)$, полученная из двух дизъюнктов D_i и D_j , является логическим следствием этих дизъюнктов. Пустой дизъюнкт ($res(p, \bar{p}) = \square$) по определению тождественно ложен, его можно понимать как невыполнимую формулу.

Пусть S – множество дизъюнктов. Последовательность формул ψ_1, \dots, ψ_n называется *резольвентивным выводом*, если любая формула ψ_i ($i = \overline{1, n}$) либо принадлежит S , либо является резольвентой каких-либо предыдущих формул.

Суть метода резолюций заключается в построении резольвентивного вывода, и, если он заканчивается пустым дизъюнктом \square , то этот факт является основанием для утверждения о том, что множество предложений S противоречиво, и, следовательно, рассуждения являются правильными. Если, используя все возможные комбинации подходящих дизъюнктов, получить пустой дизъюнкт не удастся, то множество предложений является выполнимым.

Если пустой дизъюнкт выводим из множества S , то он может быть получен на основе полного перебора. Однако для повышения быстродействия алгоритма вывода возможно сократить полный перебор за счет использования стратегий – эвристических правил поиска пустого дизъюнкта. К наиболее известным стратегиям относят следующие: стратегия полного перебора, стратегия опорного множества, стратегия

предпочтения одночленам, линейная стратегия. При построении резолютивного вывода допускается применений различных комбинаций перечисленных стратегий. Визуализация резолютивного вывода осуществляется на основе графа вывода.

Также в первой главе предложены пути повышения эффективности метода резолюций за счет разработки новых стратегий управления выводом, определены цель и задачи исследования.

Во **второй главе** представлен сравнительный анализ основных стратегий управления выводом с учетом существующих и оригинальных критериев сравнения. Предложены новые стратегии, учитывающие недостатки существующих, а также описаны соответствующие алгоритмы, построены деревья вывода для иллюстративных примеров. Опишем подробнее суть предложенных стратегий.

Рейтинговая стратегия. Данная стратегия, основанная на построении рейтинга предложений, позволяет проверять литералы на возможность унификации в определенном порядке. Она нацелена на предварительную работу с унифицируемыми литералами (именно такие литералы имеют наивысший рейтинг). Присвоение рейтинга предложениям в базовом множестве осуществляется по следующим правилам: а) отрицательный атом повышает рейтинг на 2, положительный – на 1 для ускорения поиска противоположных атомов; б) предложения из одного литерала получают дополнительный балл, чтобы упростить поиск пустого дизъюнкта и сократить перебор; в) часто встречающиеся атомы в предложении увеличивают рейтинг на 1 для быстрого сопоставления литералов в одноатомных предложениях. Рейтинг предложений обновляется после каждой итерации, которая включает просмотр списка предложений и их потенциальную унификацию. Процесс повторяется до обнаружения пустого дизъюнкта или остатка из не унифицируемых предложений. Такой метод поиска опровержения эвристически позволяет в некоторых задачах быстрее прийти к результату, сократить количество выводимых резольвент и уровней дерева вывода за счет предварительного анализа предложений перед унификацией.

Стратегия минимального дизъюнкта. В процессе работы метода резолюций, базовое множество дизъюнктов дополняется резольвентами с каждой итерации. Если появляется пустой дизъюнкт, базовое множество становится противоречивым. Для упрощения перебора формул, каждую итерацию можно использовать для формирования двух множеств предложений с унифицируемыми литералами. Длина дизъюнкта определяется количеством входящих в него атомов, при этом минимальный дизъюнкт имеет наименьшую длину, а одночлены являются минимальными дизъюнктами единичной длины. На каждой итерации формируются два множества. Идея алгоритма заключается в поиске на каждой итерации резольвенты дизъюнктов из различных множеств в форме минимального дизъюнкта. Заметим, что резольвента может не существовать по двум причинам: либо в выбранных дизъюнктах не существует контрарных литер, либо невозможна унификация дизъюнктов, содержащих подходящие атомы.

Стратегия на основе поиска похожих предложений. Данная стратегия ускоряет проверку унификации литералов, ища два похожих предложения в базовом множестве. Первое выбирается последовательно, а второе подбирается к базовому на каждой итерации. Поиск основан на нахождении контрарных литералов и применяется к каждому предложению. Метод эвристически ускоряет получение результата, уменьшая число резольвент и уровней в дереве вывода. Похожими считаются предложения с контрарными дизъюнктами или одночленами. На каждой k -ой

итерации рассматривается пара предложений D_i и D_j , и, в случае, если они являются похожими, то можно построить резольвенту.

Стратегия на основе поиска близких по весу дизъюнктов. Для эффективного поиска решения в методе резолюций может быть применена стратегия упорядоченной работы с весами атомов и предложений. Вес каждого атома в базовом множестве предложений используется для определения порядка проверки литералов на унифицируемость. Вычисление веса предложений осуществляется на основе следующих правил: если предложение содержит только один атом, его вес равен весу данного атома; если предложение состоит из нескольких атомов, его вес равен сумме весов атомов. Пересчет весов предложений не выполняется после каждой итерации, но, если появляется новое предложение после получения резольвенты, его вес вычисляется обязательно. Итерация включает полный просмотр списка предложений и возможную унификацию, продолжая до обнаружения пустого дизъюнкта или исчерпания новых предложений, вес которых не был рассчитан на предыдущих итерациях, или пока не останется конечное множество предложений, состоящих из не унифицируемых литералов.

В диссертации для каждой из перечисленных стратегий разработан соответствующий алгоритм вывода, причем возможна комбинация различных стратегий, что позволяет адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечить гибкость в управлении выводом.

Для сравнения стратегий вывода предложены следующие критерии, основанные на анализе графа вывода: *полнота стратегии; количество построенных резольвент; скорость роста дерева вывода; близость к двоичному дереву; реализуемость стратегии; количество уровней в дереве вывода; вычислительная сложность.* Основной особенностью предложенной системы критериев является возможность учета структуры графа вывода.

Данные критерии использовались для оценки новых стратегий вывода. В рамках вычислительного эксперимента установлены следующие их преимущества по сравнению, в частности, со стратегией полного перебора: 1) количество резольвент новых стратегии значительно меньше, чем в случае стратегии полного перебора; 2) новые стратегии определяют, в какой последовательности должны генерироваться резольвенты и эвристически помогают снизить построение лишних резольвент; 3) количество дизъюнктов, многократно участвующих в построении резольвент, также больше в случае алгоритма полного перебора; 4) деревья вывода для новых стратегии имеют больше уровней чем дерево, которое соответствует полному перебору, но в первом случае имеем упорядоченное двоичное дерево, которое обладает высоким уровнем объяснительной способности.

В диссертации проведена оценка сложности алгоритмов, реализующих предложенные стратегии. Пусть N – количество предложений, а M – среднее количество атомов в предложении. В табл. 1 представлена оценка сложности алгоритмов управления выводом.

Таблица 1. Сложность предложенных алгоритмов управления выводом

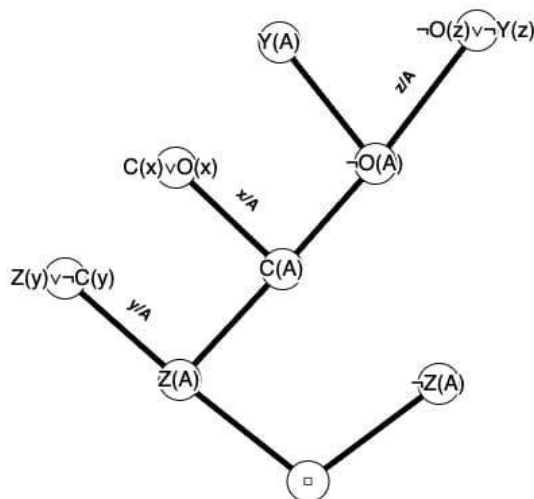
<i>Стратегия построения рейтинга</i>	<i>Стратегия поиска минимального дизъюнкта</i>	<i>Стратегия поиска похожих предложений</i>	<i>Стратегия с весами предложений</i>	<i>Стратегия полного перебора</i>
$O(M \cdot N^2)$	$O(M \cdot N)$	$O(M^2 + N^2)$	$O(N^2)$	$O(N^N)$

Таким образом, при выборе стратегии необходимо учитывать размерность данных (N, M) . Кроме того, допускается смена стратегий в процессе вывода. На рис. 1 представлены графы вывода для доказательства противоречивости множества предложений

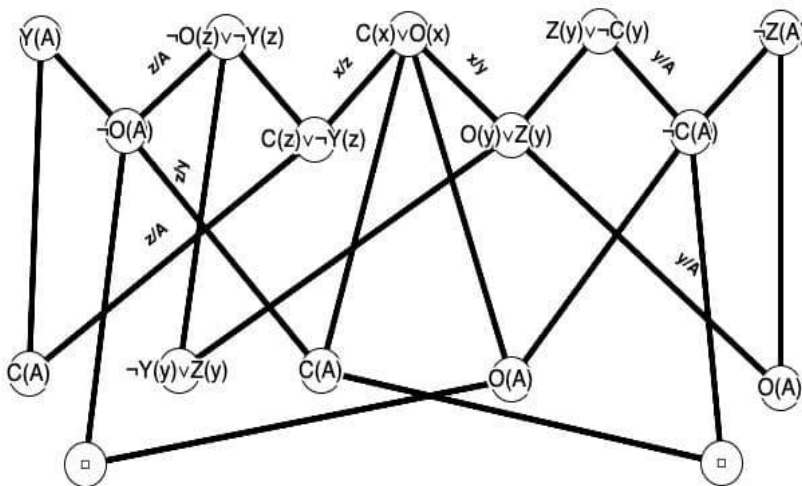
$$\{C(x) \vee O(x), Z(x) \vee \bar{C}(x), Y(A), \bar{Z}(A), \bar{O}(A) \vee \bar{Y}(z)\},$$

где C, O, Z, Y – атомы; x, z – переменные; A – константа.

Из приведенного примера видно, что выбор подходящей стратегии позволяет сократить время, необходимое для поиска решения.



а) граф вывода на основе рейтинговой стратегии



б) граф вывода на основе полного перебора

Рис. 1 – Графы вывода для различных стратегий

Третья глава посвящена методу резолюций для неопределенных суждений, при этом основной формализации является нечеткая логика, которую можно определить как алгебру $\langle [0,1], \wedge, \vee, \neg \rangle$, где множество значений истинности составляет замкнутый интервал $[0,1]$, а логические связки определяются следующим образом: $a \vee b = \max\{a, b\}$, $a \wedge b = \min\{a, b\}$, $\neg a = \bar{a} = 1 - a$. Заметим, что для операций \max и \min не выполняются только законы коммутативности, поэтому в нечеткой логике

высказывание, в котором a и \bar{a} встречаются одновременно, оказывается содержательным в отличие от классической логики.

В нечеткой логике каждому элементарному высказыванию x соответствует значение его истинности $t(x) \in [0,1]$. Коэффициентом доверия к степени истинности $t(x)$ называется величина $c_x = 2 \cdot (t(x) - 0.5) \in [-1,1]$.

Пусть F – некоторая формула. Выбрав интерпретацию и подходящую формализацию логических связей, можно получить ее значение истинности $t(F)$. Формула F является *выполнимой*, если $t(F) > 0.5$, и *невыполнимой*, если $t(F) < 0.5$. Если $t(F) = 0.5$, то интерпретация одновременно удовлетворяет и опровергает F . Если $\varphi = \{F_1, \dots, F_m\}$ – множество формул, то $t(\varphi) = t(F_1 \wedge \dots \wedge F_m)$.

Пусть $D_1 = p \vee D'_1$, $D_2 = \bar{p} \vee D'_2$, $res(D_1, D_2) = D'_1 \vee D'_2$.

Особенностью нечеткой резольвенты является то, что она может быть логически незначимой или логически значимой (уменьшает неопределенность). Резольвента является логически значимой или значимым логическим следствием, если она удовлетворяет неравенству $t(D_1 \wedge D_2) \leq t(res(D_1, D_2))$.

Нечеткая резольвента Ли (*L-резольвента*) дизъюнктов D_1 и D_2 имеет вид $res(D_1, D_2)_L = res(D_1, D_2)$, причем $t(res(D_1, D_2)) = t(D'_1 \vee D'_2) = \max\{t(D'_1), t(D'_2)\}$.

В диссертации приведены условия, при выполнении которых L-резольвента является значимым логическим следствием. Имеют место следующие утверждения.

Утверждение 1. Пусть $t(p) < 0.5$, тогда L-резольвента является значимым логическим следствием, если имеет место одна из следующих ситуаций:

a) для одного из дизъюнктов дизъюнкты D'_1 и D'_2 таковы, что для одного из них степень истинности больше $t(p)$, а степень истинности другого принадлежит промежутку $(\min\{t(D'_1), t(D'_2)\}, 1 - t(p))$;

b) дизъюнкты D'_1 и D'_2 таковы, что для одного из них степень истинности меньше $t(p)$, а степень истинности другого принадлежит промежутку $(t(p), 1 - t(p))$;

c) дизъюнкты D'_1 и D'_2 таковы, что $t(D'_1) < t(D'_2)$ и $t(D'_2) > 1 - t(p)$;

d) дизъюнкты D'_1 и D'_2 таковы, что $t(D'_1) < t(D'_2)$ и $t(D'_1) \in (1 - t(p), t(D'_2))$.

Утверждение 2. Если $t(p) > 0.5$, $t(D'_1) < t(D'_2)$, $t(D'_2) > t(p)$, то L-резольвента является значимым логическим следствием.

Нечеткая резольвента Мукайдано (*M-резольвента*) $res(D_1, D_2)_M$ дизъюнктов D_1 и D_2 , сопряженная со степенью доверия c_p , есть дизъюнкт $res(D_1, D_2)_M = res(D_1, D_2) \vee (p \wedge \bar{p})$, где согласно определению операций \vee и \wedge , степень истинности определяется формулой

$$t(res(D_1, D_2)_{c_p}) = \max\{\max\{t(D'_1), t(D'_2)\}, \min\{t(p), t(\bar{p})\}\}.$$

Множество дизъюнктов считается невыполнимым тогда и только тогда, когда существует вывод пустого дизъюнкта \square с ненулевой степенью доверия.

Имеет место следующее

Утверждение 3: если L -резольвента является значимым логическим следствием и $\max\{t(p), t(\bar{p})\} \leq t(\text{res}(D_1, D_2)_{c_p})$, то M -резольвента $t(\text{res}(D_1, D_2)_{c_p})$ также является значимым логическим следствием.

В данной главе также рассматривается вопрос о существовании L -резольвенты и M -резольвенты в случае, если нечеткие операции \wedge и \vee формализуются соответственно треугольными нормами T и конормами S . Пара (T, S) образует пару двойственных операций, если выполняются законы де Моргана относительно стандартного отрицания. Доказано, что для произвольной пары двойственных операций (T, S) L -резольвенты не существует; для комбинации произвольной треугольной нормы T и $S = \max$ определены условия, когда L -резольвента является значимым логическим следствием. Для той же пары M -резольвента существует, если степень истинности переменной p и треугольная норма T такие, что $T(t(p), t(\bar{p})) \geq 0.5$. На основе установленных теоретических положений разработан нечеткий метод резолюций, который реализуется согласно классической схеме на основе определений L -резольвенты и M -резольвенты. *Стратегия нечеткого метода резолюций, основанного на L -резольвенте*, заключается в вычислении только тех резольвент, которые являются логически значимыми. Тем самым, данный алгоритм не допускает образование лишних, не значимых дизъюнктов. *Стратегия нечеткого метода резолюций, основанного на M -резольвенте*, заключается в том, что порядок вычисления резольвент определяется степенью доверия c_p : чем она выше, тем построение резольвенты из дизъюнктов, содержащих p , происходит раньше. Таким образом, соответствующий алгоритм направлен в сторону просмотра литералов с максимальной степенью доверия. В качестве примера ниже представлен алгоритм резолютивного вывода на основе M -резольвенты, при этом для его компактного изложения введены следующие функции: функция **calculateConfidenceLevel(cp)** вычисляет степень доверия каждой литеры; функция **sortConfidenceLevels(cp)** сортирует последовательность степеней доверия литер в порядке убывания; функция **searchAndChoose(Di, Dj, cp)** осуществляет поиск таких дизъюнктов, которые содержат первую по порядку литеру из c_p и могут использоваться для построения логически значимой резольвенты; если подходящих дизъюнктов нет, то осуществляется поиск дизъюнктов, которые содержат следующую литеру c_p .

Также в данной главе рассмотрен подход к вычислению резольвенты, основанный на использовании оценки близости контрарных литер. Предложены различные варианты оценки сходства/несходства двух множеств A и B с учетом их различных комбинаций. В качестве наиболее подходящего выбран вариант оценки симметрической разности ΔB , которая включает элементы, принадлежащие только одному из множеств, тогда, если $\Delta B = \emptyset$, то $\Delta B = A \cup B$ и множества A и B равны, т.е. максимально схожи. В соответствии с данным подходом под *индексом сходства* будем понимать скалярную величину $Sim(A, B)$, обладающую следующими свойствами: $Sim(A, B) = 1$ тогда и только тогда, когда $\Delta B = \emptyset$; $Sim(A, B) = 0$, если $A \cap B = \emptyset$; $Sim(A, B) = Sim(B, A)$. В диссертации предложена следующая функция, которая удовлетворяет перечисленным свойствам:

Алгоритм построения М-резольвенты

Input: S – множество дизъюнктов, невыполнимость (противоречивость) которого исследуется, R – множество резольвент

Input: $k = 0, R_0 = \emptyset$

Output: Результат работы алгоритма – значение из множества $\{S \text{ is inconsistent}, S \text{ is unknown}\}$
// вычисляем степени доверия каждой литеры и сортируем степени доверия литер по убыванию значения

calculateConfidenceLevel(c_p); **sortConfidenceLevels**(c_p);
// алгоритм продолжает работу, если в C есть дизъюнкты, которые образуют резольвенту

while ($\exists D_i \in S$ and $\exists D_j \in S$) **do**
// если существует значимая резольвента, то добавляем ее в R

if ($\exists res D_i, D_j$ is significant) **do**

searchAndChoose (D_i, D_j, c_p); $R_{k+1} = R_k \cup res D_i, D_j$
// если в R есть \square , то S – противоречиво, конец программы

if ($\square \in R_{k+1}$) S is inconsistent; **end program**;
// если в R нет \square , то меняем множество S и идем дальше

else $S = S \setminus D_i \cup S \setminus D_j \cup res(D_i, D_j)$; $k=k+1$;

end if

end while
// если в S отсутствуют дизъюнкты для построения резольвенты, то считаем, что противоречивость S неизвестна, конец программы

S is unknown;
end program

$$Sim(A, B) = 1 - \frac{\max_x \left\{ \min \{1 - \mu_A(x), \mu_B(x)\}, \min \{\mu_A(x), 1 - \mu_B(x)\} \right\}}{\max_x \left\{ \mu_A(x), \mu_B(x) \right\}}.$$

Пусть $D_1 = p \vee D'_1$, $D_2 = p' \vee D'_2$ – дизъюнкты, $Sim(\bar{p}, p')$ – оценка сходства между \bar{p} и p' , $\varepsilon \in [0, 1]$ – пороговое значение. Резольвента дизъюнктов $res(D_1, D_2) = D'_1 \vee D'_2$ существует тогда и только тогда, когда $Sim(\bar{p}, p') \geq \varepsilon$, где $0 < \varepsilon < 0.5$.

Особенностью этого определения является то, что вместо контрарных литер здесь используется понятие сходства/несходства. В диссертации предложена процедура для нахождения заключения A' , близкого к A , и соответствующей степени доверия s , разработан метод резолюций на основе данной процедуры.

В четвертой главе приводится описание программного приложения **ResolutionMethodStrategies (ReMeStra)**, включающего функционал, который реализует различные стратегии управления выводом в методе резолюций в классической и нечеткой логике. Создание мобильного приложения с использованием библиотеки на C++ было выполнено с помощью SwiftUI, современного фреймворка разработки пользовательского интерфейса для iOS, который позволил обеспечить не только высокую производительность, но и отличное качество визуального представления, удобство использования и простоту внесения изменений.

Все предложенные стратегии были инкапсулированы в ряд функций, полное описание которых представлено в диссертации. Ниже перечислены функции, реализующие метод резолюций с различными стратегиями управления выводом.

Набор функций для реализации алгоритмов классической логики

```
// Exhaustive Search
string exhaustiveSearch(vector<Clause> vD, int n);
// Rating Search
bool compareAtoms(const Atom& a1, const Atom& a2);
vector<Atom> sortByFrequency();
bool compareClauseRatings(const ClauseRating& r1, const
ClauseRating& r2);
vector<Clause> sortByRating(vector<Clause> vD, vector<Atom> vC);
string RatingSearch(vector<Clause> vC);
// Minimal Clause Search
Clause findMinD(vector<Clause> &m, int n);
string MinimalClause(vector<Clause> vD, int n);
int MinimalClauseWithDescription(vector<Clause> vD, int n);
// Weight Search
int getWeightClause (vector<Clause> &vD, int i);
vector<int> getWeightD (vector<Clause> &m);
string WeightSearch(vector<Clause> vD);
```

Функция Exhaustive Search реализует стратегию полного перебора и рассматривает все возможные комбинации дизъюнктов, которые могут быть получены из данного набора предложений vD, чтобы найти пустой дизъюнкт. Набор функций Rating Search реализует стратегию поиска по рейтингу, в соответствии с которой для построения резольвенты используются наиболее часто встречающиеся атомы (или литералы). Набор функций Minimal Clause Search реализует стратегию поиска минимального дизъюнкта, которая выбирает для резолюции предложение с наименьшим количеством литералов. Набор функций Weight Search реализует стратегию поиска похожих предложений, присваивая каждому предложению вес.

Набор функций для реализации алгоритмов нечеткой логики

```
// Lee Search
string LeeSearch(vector<Clause> vD);
bool mClause(Clause d);
// Mukaidano Search
void calculateConfidenceLevel(vector<Clause> &vC);
void sortConfidenceLevel(vector<Clause> &vC);
void searchAndChoose(Clause &di, Clause &dj, vector<Clause> vC);
// Similarity Search
string SimilaritySearch(vector<Clause> vD);
bool simAtom(Atom a1, Atom a2);
bool resEmpty(Clause d, Clause ad);
```

Наборы функций Lee Search и Mukaidano Search реализуют одноименные алгоритмы, а Similarity Search – алгоритм, основанный на сходстве.

В рамках вычислительного эксперимента проводился сравнительный анализ предложенных стратегий на быстродействие. Всего рассматривалось по 50 тестовых задач из классической и нечеткой логики. Различные наборы данных обеспечили всесторонний анализ производительности стратегий. На рис. 2 представлено среднее время работы на тестовых примерах новых алгоритмов резолютивного вывода классической логики, а на рис. 3 – нечеткой логики. Заметим, что алгоритм, основанный на работе с весами предложений, является самым быстрым для большинства тестовых примеров в случае классической логики, а в случае нечеткой логики время работы алгоритма отличается несильно и сопоставимо с временем работы стратегии минимального дизъюнкта.

Search Algorithm	Search Time (s)	Answer
Exhaustive	0.114	INCONSISTENT
Rating	0.354	INCONSISTENT
Minimal Clause	0.063	INCONSISTENT
Weight	0.022	INCONSISTENT

Рис. 2 – Среднее время работы алгоритмов классической логики

Search Algorithm	Search Time (s)	Answer
Lee Search	0.063	INCONSISTENT
Mukaidano Search	0.058	INCONSISTENT
Similarity Search	0.074	INCONSISTENT

Рис. 3 – Среднее время работы алгоритмов нечеткой логики

Известно, что реализация каждого этапа жизненного цикла IT-проекта является необходимым условием для появления качественного программного продукта, поэтому имеет смысл говорить о важности тестирования в общем процессе разработки ПО, при этом можно выделить следующие тенденции: растет понимание необходимости промышленных методов тестирования, в частности, с применением специальных средств автоматизации; идет поиск возможностей для оптимизации затрат на выполнение данных работ с точки зрения общей организации процесса; начинает широко использоваться исследовательское тестирование, которое обуславливает важность опыта работы тестировщика. Алгоритмы метода резолюций, разработанные в рамках диссертационного исследования, были положены в основу мобильного приложения, которое предназначено для поддержки принятия решений при оценке качества тестирования ПО в рамках разработки различных IT-проектов (рис. 4).

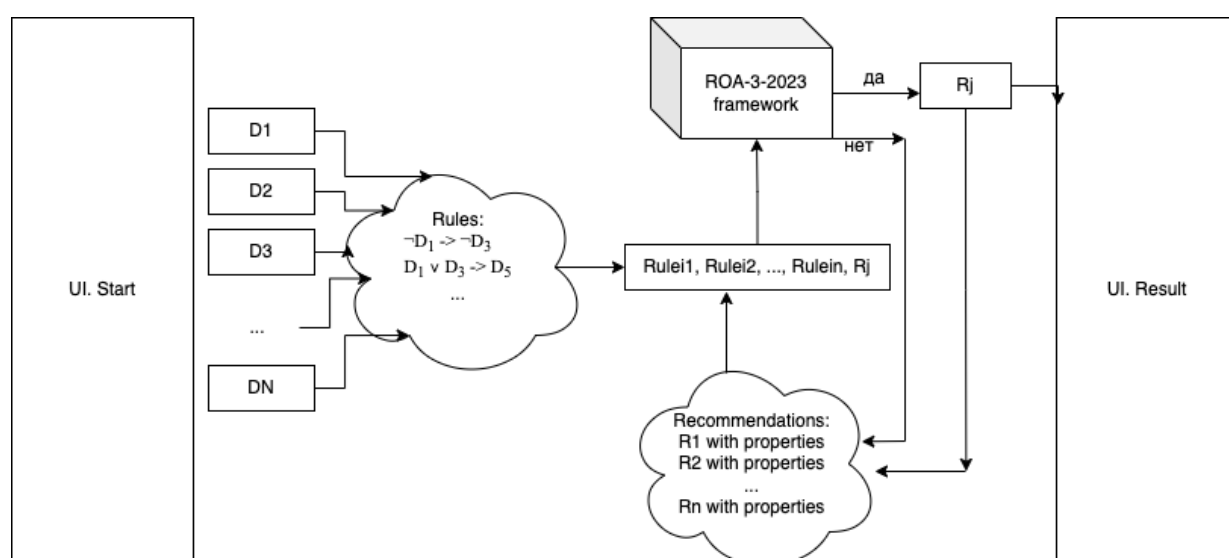


Рис.4 – Архитектура мобильного приложения

Основное функциональное назначение приложения заключается в формировании рекомендаций по повышению качества тестирования на основе оценки текущей ситуации. Для нее в приложении используется перечень параметров, влияющий на анализ и оценку качества тестирования, при этом некоторые параметры считаются

обязательными для обеспечения качества ведения проекта. Особенностью приложения является возможность интерактивной оценки общего критерия качества тестирования. Метод резолюции используется для разрешения возможных противоречий между установленными правилами проведения тестирования и работами-операциями, которые осуществляются на текущий момент времени. На первом этапе пользователь вводит данные о проекте (D_1, \dots, D_n) на стартовом экране, которые затем совместно с множеством правил *Rules* и множеством рекомендаций *Recommendations* преобразуются в необходимый формат и передаются на вход метода резолюций. В данном приложении используются стратегия минимального дизъюнкта и стратегия, основанная на нечеткой М-резольвенте. Выбор данных стратегий обусловлен их быстродействием. В процессе работы алгоритма осуществляется проверка характеристик каждой предлагаемой рекомендации на соответствие совокупности фактов и правил. После завершения работы основной функции, в структуру данных *recommendations* включаются рекомендации, которые успешно прошли проверку.

Анализ качества тестирования вручную в рамках одной итерации в среднем занимает около 4 часов (по данным компании, где осуществлялось внедрение), что является проблемой в компаниях, где различных ИТ-проектов, одновременно находящихся в работе, от 20 и больше. Использование приложения позволяет: сократить время тестирования в 2.5 раза; повысить своевременность предоставляемых рекомендаций по улучшению качества тестирования и степень обоснованности принимаемых решений; снизить затраты ресурсов на проведение работ; обеспечить современный уровень автоматизации процедур тестирования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Принцип резолюций составляет основу методов машинной логики и применяется в интерактивных системах, базирующихся на задаче автоматического доказательства теорем. Данная задача является NP-полной и в общем случае может быть решена полным перебором. Однако особенности знаний позволяют управлять логическим выводом с помощью эвристических правил – стратегий, что приводит к повышению быстродействия соответствующих систем и способствует их эффективности. В диссертации проведен анализ существующих стратегий управления выводом и предложены новые критерии, учитывающие структурные, временные и сложностные аспекты их алгоритмической реализации.

2. Процесс работы с базами знаний, которые используют логические модели является ресурсозатратным, поэтому одним из основных требований к алгоритмам логического вывода в этом случае является необходимость обеспечения их быстродействия. Предложен комплекс эвристических стратегий для выбора дизъюнктов при построении резолютивного вывода, который учитывает особенности множества предложений на каждом шаге резолютивного вывода. Установлено, что самые быстрые стратегии позволяют повысить эффективность поиска решения в 1.8 раза, при этом не затрачивая память на сохранение промежуточных решений (построенных дизъюнктов – резольвент), которые впоследствии оказываются лишними.

3. Неопределенность аргументации и выводов, характерных для неформальных суждений, значительно ограничивает применимость классического метода резолюций и обуславливает использование нечеткой логики. В диссертации получены условия, при выполнении которых нечеткая резольвента приводит к значимому логическому следствию. Исследована возможность использования для ее построения обобщений

логических операций – треугольных норм и конорм. Разработаны стратегии управления выводом в нечетком методе резолюций.

4. В контексте современной разработки программного обеспечения, мониторинг качества проектной деятельности приобретает особое значение. Разработанные алгоритмы использовались при создании программного приложения, которое обеспечивает возможность оперативного и своевременного определения статуса тестирования и принятия соответствующих решений для обеспечения его качества в рамках IT-проектов по разработке мобильных и веб-приложений. В результате использования приложения достигается снижение затрат ресурсов на проведение аналитических работ на 60%, что способствует более высокому уровню автоматизации процедур тестирования и улучшению общей продуктивности труда. Такая оптимизация процесса позволяет не только экономить время в масштабах крупных компаний с 20 и более IT-проектами, но и повышает точность и обоснованность предлагаемых решений по улучшению качества тестирования.

Рекомендации по использованию. Научные результаты, полученные в рамках диссертационного исследования, имеют практическое значение и могут быть рекомендованы для разработки интеллектуальных информационных систем, в которых база знаний формируется на основе логической модели, основанной на исчислении предикатов первого порядка, постановка задачи сводится к проверке правильности рассуждений, а основу обработки знаний составляет метод резолюций.

Перспективы развития результатов исследования связаны с дальнейшим совершенствованием стратегий управления выводом, в частности, с динамическим выбором стратегий на каждой итерации метода резолюций. Также представляет интерес исследование нечеткого метода резолюций в зависимости от конкретного вида треугольных норм, поскольку в других задачах, связанных с их использованием, различия в получаемых результатах наблюдаются. Кроме того, имеет смысл рассмотреть случай, когда «правило дизъюнктивного силлогизма» (именно он формализует принцип резолюции) обобщается на другие типы информации (например, когда степень истинности высказываний оценивается интервальным числом или лингвистическим термом).

Публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК РФ

1. Леденева, Т.М., Лещинская, М.В. Анализ подходов к определению нечеткой резольвенты / Т.М. Леденева, М.В. Лещинская // Информатика и ее применения, 2024. – Т. 18. – Вып. 1. – С. 76-83. DOI: [10.14357/19922264240113](https://doi.org/10.14357/19922264240113)

2. Леденева, Т.М., Лещинская, М.В. Интерпретация метода резолюций в нечеткой логике, основанная на сходстве дизъюнктов / Т.М. Леденева, М.В. Лещинская // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии, 2023. – № 3. – С. 143-155. DOI: <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2023/3/143-155>

3. Леденева, Т.М., Лещинская, М.В. Метод резолюций и стратегии поиска опровержений / Т.М. Леденева, М.В. Лещинская // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии, 2021. – № 1. – С. 98-111. DOI: <https://doi.org/10.17308/sait.2021.1/3374>

Публикации в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science

4. Ledeneva, T., Leshchinskaya, M. On the New Inference Control Strategy in the Resolution Method / T. Ledeneva, M. Leshchinskaya // 4th International Conference on

Свидетельство о регистрации программы

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023664399 Российская Федерация. Библиотека алгоритмов метода резолюций «ROA-3-2023» / М.В. Лещинская; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет». – № 2023664399; заявление 22.06.2023; опубл. 04.07.2023.

Статьи и материалы конференций

6. Лещинская, М.В., Леденева, Т.М. Новая стратегия поиска опровержений методом резолюций / М.В. Лещинская, Т.М. Леденева // Сб. тр. Междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (Воронеж, 13-15 декабря 2021 г.), 2021. – С. 1628-1633.

7. Лещинская, М.В. Стратегия управления выводом в методе резолюций с использованием весов дизъюнктов / М.В. Лещинская // Сб. тр. Междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (Воронеж, 12-14 декабря 2022 г.), 2022. – С. 1407-1411.

8. Лещинская, М.В. Реализация стратегии управления выводом на основе минимального дизъюнкта / М.В. Лещинская // Сб. тр. науч. конф. «Математика, информационные технологии, приложения», 2023. – С. 256.

9. Лещинская М.В. Мобильное приложение для предоставления рекомендаций по питанию на основе метода резолюций / М.В. Лещинская // Сб. тр. Междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», 2023. – С. 209-215.