

На правах рукописи



Грузенкин Денис Владимирович

**МОДЕЛИ ОПИСАНИЯ И АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ
ДИВЕРСИФИЦИРОВАННОСТИ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЙ В МУЛЬТИВЕРСИОННЫХ ПРОГРАММНЫХ
СИСТЕМАХ**

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет». г. Красноярск.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Ковалев Игорь Владимирович

Официальные оппоненты:

Дулесов Александр Сергеевич

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Хакасский
государственный университет им.
Н.Ф. Катанова», г. Абакан, профессор
кафедры цифровых технологий и
дизайна

Карцан Игорь Николаевич

доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение
«Экспертно-аналитический центр»
(ФГБНУ «Аналитический центр»),
г. Москва, главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Институт вычислительного моделирования Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, г. Красноярск

Защита состоится 23 октября 2026 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.403.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» по адресу: 660037, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий» 31, зал заседаний диссертационного совета, ауд. Л-205.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» и на сайте <https://www.sibsau.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим отправлять по адресу: 660037, Россия, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (СибГУ им. М.Ф. Решетнева), Диссертационный совет
E-mail: dissovet@sibsau.ru

Автореферат разослан « ___ » _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Панфилов Илья Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из хорошо себя зарекомендовавших на практике направлений повышения надёжности программного обеспечения (ПО) информационных управляющих систем (ИУС) является мультиверсионное программирование, основанное на принципе программной избыточности и диверсифицированности версий, который позволяет обеспечить независимость сбоев в мультиверсиях. Однако, несмотря на признанную эффективность данного подхода, вопросы формализации и количественной оценки диверсифицированности мультиверсий, а также их влияние на процессы принятия решений и оптимизации в мультиверсионных программных системах, остаются недостаточно разработанными, хотя являются одними из наиболее важных, поскольку, чем больше различий между мультиверсиями, тем ниже вероятность возникновения связанных ошибок. Такие ошибки в нескольких версиях могут привести к получению идентичных неверных результатов, что значительно затрудняет процесс принятия решения о выборе действительно правильного ответа.

Для повышения надёжности ПО в целом и ИУС в частности существует множество подходов. Все они могут быть разделены на 4 группы: предупреждение ошибок, обнаружение ошибок, исправление ошибок и обеспечение устойчивости к ошибкам. К последней группе относится методология мультиверсионного программирования.

Мультиверсионное программное обеспечение подобно аппаратной части вычислительной системы обеспечивает надёжность за счёт внедрения избыточности. Однако, простое дублирование одного и того же кода, где возникла ошибка, не является эффективным, поскольку отсутствует независимость сбоев, как в случае с аппаратной частью.

Успех мультиверсионного подхода обеспечивается следующими принципами его работы: применение программной избыточности, поддержание диверсифицированности мультиверсий и инкапсуляция.

Помимо перечисленных выше основных принципов также выделяют принцип использования контрольных точек. Его применение позволяет во время выполнения мультиверсии оценить корректность промежуточных результатов и сделать выводы о стабильности и корректности работы мультиверсий, а также в случае возникновения сбоя позволяет запустить версию или модуль с последней контрольной точки.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью создания формальных моделей и алгоритмов, позволяющих не только описывать и оценивать уровень разнообразия мультиверсий, но и использовать эти оценки для повышения эффективности и надёжности функционирования сложных систем управления и обработки информации.

Степень разработанности проблемы.

Приведённые выше принципы описаны в профессиональной литературе множеством авторов, работа по усовершенствованию мультиверсионного ПО в данных направлениях идёт непрерывно. Однако впервые вопросы диверсифицированности в рамках методологии мультиверсионного программирования рассмотрены в работах Альгирдаса Авижиенса. Автор постулировал, что версии одного модуля должны отличаться по следующим

признакам (либо по одному из них): язык программирования, алгоритм, средства разработки или средства тестирования. Также все версии одного модуля должны разрабатываться различными изолированными друг от друга командами разработки. Совместно с Авижиенсом (Algirdas Avizienis) данное направление развивали такие учёные как Лиминг Чен (Liming Chen), Джон Келли (John PJ Kelly), Джин-Клауд Лаприе (Jean-Claude Laprie) и другие. Эти принципы рассматривались также в работках таких авторов, как Ковалёв И.В., Царёв Р.Ю., Морозов В.А. и другие.

Стоит отметить, что в своих работах, например, Морозов В.А., Царёв Р.С., О. Берман (O. Berman), Н. Ашрафи (N. Ashrafi), Хо-Вон Джунг (Ho-Won Jung), Бьёунгджу Чой (Byoungju Choi) и другие авторы приводили и иные модели мультиверсий, основанные на их характеристиках, таких как потребление различного рода ресурсов, стоимость разработки и сопровождения, а также их априорная надёжность. При использовании данного подхода появляется возможность не только определить на основе заданных характеристик оптимальный состав мультиверсионного модуля или всей системы целом, но и рассчитать надёжность модуля или мультиверсионной системы, как предлагали Ефимов С.Н. Терсков В.А., Ксяолин Тенг (Xiaolin Teng), Ноанг Фам (Hoang Pham), Ксянг Ли (Xiang Li), Ян Фу Ли (Yan Fu Li), Мин Ксие (Min Xie), Сцу Хуи Нг (Szu Hui Ng) и другие авторы. Однако среди всего множества характеристик, описывающих мультиверсии, мера их разнообразия авторами ранее не определялась. Ни для мультиверсионных систем, ни для их модулей ранее не определялась и не рассчитывалась степень разнообразия входящих в них версий.

Хотя, вне контекста мультиверсионного программирования, работы по нахождению меры различия между программами (их исходным кодом) всё же ведутся. Так многие авторы, например, Косьяненко И.А., Романов В.А., Иванов В.В., Горчаков А.В., Куртукова А.В., Романов А.С., Alina Petukhova, João P. Matos-Carvalho, Nuno Fachada, D Álvarez-Fidalgo, F Ortin, Gary A. McCully, John D. Hastings, Shengjie Xu, Adam Fortier в своих работах представляют программный код в виде эмбедингов, т.е. векторов, с помощью технологий искусственного интеллекта и используют их для сравнения с заданными образцами или друг с другом. Такой подход применяется, например, для генерации описания кода или определения соответствия его стандарту кодирования, для верификации авторства или поиска уязвимостей и во многих других случаях. Однако в контексте мультиверсионного ПО это не применяется, хотя величина различия созданных на основе исходного кода программ векторов может быть включена в предложенную модель мультиверсии как ещё одна метрика разнообразия.

Таким образом, может быть сделан вывод о недостаточной проработке вопроса реализации базового принципа мультиверсионного ПО, связанного с разнообразием мультиверсий, то есть их диверсификацией. На сегодняшний день отсутствует формальный аппарат применения принципа разнообразия при принятии решений в мультиверсионных программных системах.

Проведенный анализ обуславливает необходимость разработки моделей и алгоритмов, описывающих и обеспечивающих анализ меры различия, т.е. уровень диверсифицированности мультиверсионного программного обеспечения.

Цель диссертационной работы состоит в повышении эффективности принятия решений на основе диверсифицированности при выборе корректного ответа в мультиверсионных программных системах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ моделей, методов и алгоритмов, используемых в процессе выбора верных результатов в мультиверсионных программных системах.
2. Разработать модели представления мультиверсий и модулей в мультиверсионных программных системах.
3. Разработать алгоритм оценки диверсифицированности для блоков принятия решений в мультиверсионных информационных управляющих системах, который позволяет определить группу наиболее различных между собой по набору заданных критериев мультиверсий.
4. Разработать обобщенную методику модификации алгоритмов голосования в мультиверсионных программных системах с учётом использования предложенных моделей представления мультиверсий и модулей.
5. Модифицировать по разработанной методике алгоритм голосования согласованным большинством для подтверждения её применимости и эффективности.
6. Применить модифицированный алгоритм голосования в реальной информационной управляющей системе для подтверждения на практике полученных теоретических результатов.

В диссертационной работе описана и решена актуальная научная задача повышения вероятности выбора верного ответа в ходе голосования в методологии мультиверсионного программного обеспечения.

Методы исследования. При выполнении работы использовались методы и подходы теории вероятностей, методы анализа и проектирования архитектуры информационно-управляющих и программных систем, системного анализа, теории голосования, мультиверсионного проектирования программного обеспечения отказоустойчивых систем, методы теории графов.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.1: п. №3 - разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; п. №4 разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; п. №11 - методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества, надежности функционирования сложных систем управления и их элементов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана новая комбинированная модель формального описания мультиверсий на основе метрики диверсифицированности, отличительной особенностью которой является возможность количественно оценивать разнообразие версий в мультиверсионном программном обеспечении для повышения надёжности функционирования ИУС, в отличие от существующих моделей представления мультиверсий, которые зачастую применяются для формирования оптимального состава мультиверсионных

модулей, покрытия их тестами или обеспечения конкретных архитектурных характеристик.

2. Разработана новая графовая модель представления мультиверсионного программного модуля, отличительной особенностью которой является возможность формального сравнения групп мультиверсий посредством анализа изоморфизма графов, что позволило формализовать задачу оценки и сопоставления структурных различий между версиями, в отличие от существующих моделей представления мультиверсионных программных модулей.
3. Впервые разработан алгоритм оценки диверсифицированности для поддержки принятия решений при выборе состава мультиверсионных модулей ИУС, результаты работы которого обеспечивают поддержку автоматизированного выбора групп мультиверсий с более высоким уровнем диверсифицированности, что способствует повышению отказоустойчивости ИУС – ранее степень различия версий не применялась при формировании состава мультиверсионного модуля.
4. Разработана новая методика модификации алгоритмов голосования с использованием модели описания мультиверсий, обеспечивающая повышение вероятности выбора корректного результата в условиях неопределённости и неоднородности поведения версий, позволившая получить новую модификацию алгоритма голосования согласованным большинством с интеграцией оценки диверсифицированности для принятия решений в ситуациях, когда классические процедуры голосования не обеспечивают достаточной устойчивости к связанным ошибкам из-за равенства голосов между группами версий.

Значение для теории состоит в разработке новой модели описания мультиверсий, основанной на применении метрик диверсифицированности, нового алгоритма оценки разнообразия версий модуля, а также в усовершенствованном алгоритме голосования, что в совокупности расширяет возможности оценки надёжности функционирования программного обеспечения ИУС.

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, создают теоретическую основу для разработки нового специального алгоритмического обеспечения среды исполнения мультиверсионного ПО ИУС, в частности блока голосования в таких системах. Благодаря предложенным модели и алгоритмам обеспечивается повышение эффективности процессов обработки информации и управления в высоконадёжных программных системах.

Практическая ценность. Предложенные в диссертации модели и алгоритмы позволяют рассчитать меру различия мультиверсий, что позволяет получить оценку качества мультиверсионных модулей путём сравнения мультиверсий практически на любом из этапов жизненного цикла мультиверсионного программного обеспечения ИУС. Данное обстоятельство обеспечивает возможность оперативного принятия решений о модификации мультиверсионного программного комплекса, если это необходимо, а также позволяет оценивать его меру разнообразия, поскольку на аксиоме независимости сбоев в различных версиях, основанной на их диверсифицированности, и построен мультиверсионный подход. Это утверждение подтверждается множеством успешных практических применений методологии

мультиверсионного программирования на практике, например, на железной дороге, в атомной энергетике, авиации и многих других сферах, что подтверждается большим количеством публикаций.

Предложенная методика модификации алгоритмов голосования позволяет повышать эффективность алгоритмов голосования, используемых в блоке принятия решений мультиверсионной информационной управляющей системы, что является важной практической задачей.

Модифицированный метод голосования согласованным большинством позволяет более эффективно производить выбор верного варианта решения в мультиверсионных ИУС за счёт введения показателя диверсифицированности, который помогает сделать выбор в условиях неопределённости.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Комбинированная модель формального описания мультиверсий программных модулей, основанная на метрике диверсифицированности, которая позволяет количественно оценивать разнообразие версий мультиверсионного программного обеспечения, что является необходимым условием для повышения надёжности функционирования информационных управляющих систем.
2. Графовая модель представления мультиверсионного программного модуля, которая позволяет производить сравнение программных модулей (групп мультиверсий) между собой с целью поддержки принятия решений при выборе верного ответа всего модуля или при формировании его состава.
3. Алгоритм оценки диверсифицированности на основе графовой модели представления программного модуля, позволяющей формально сравнивать группы версий, обеспечивает автоматизированный выбор групп с максимальным уровнем разнообразия для повышения отказоустойчивости ПО ИУС.
4. Методика модификации алгоритмов голосования на основе разработанной модели описания мультиверсий позволяет повысить устойчивость мультиверсионных ИУС к ошибкам, присущим каждой версии и модифицировать алгоритм голосования относительным большинством для повышения вероятности выбора верного ответа в условиях неопределённости.

Достоверность полученных результатов подтверждается результатами моделирования в имитационной среде, а также реализацией мультиверсионного программного модуля с применением описанных в диссертации результатов, внедрённого в лабораторную ИУС ОАО «Красцветмет». Противоречий между теоретическими расчётами и реальными данными, полученными в ходе моделирования и реализации описанных методов и алгоритмов, не выявлено.

Результаты внедрения. Созданный для лабораторной информационной управляющей системы ОАО «Красцветмет» мультиверсионный программный модуль обеспечил возможность безотказной работы ПО в ходе проведения анализов рентгеноспектральным методом вторичного сырья на основе золота.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 25-11-20040, <https://rscf.ru/project/25-11-20040/>», гранта Красноярского краевого фонда науки.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы прошли всестороннюю апробацию на следующих конференциях: международной научно-

практической конференции «Новая наука: от идеи к результату» (г. Сургут, 2016 г.), на международной конференции «Математические и информационные технологии, MIT-2016» (г. Врнячка Баня, Сербия – г. Будва, Черногория, 2016), на международной конференции «Information Technologies in Business and Industry» (г. Новосибирск, 2019 г.), на VI Международной научной конференции "Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании" (г. Красноярск, 2022 г.), на III Всероссийской научной конференции с международным участием «Наука, технологии, общество: Экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий» (г. Красноярск, 2022 г.), на Международной школе-семинаре НММОС-III «Гибридные методы моделирования и оптимизации в сложных системах» (г. Красноярск, 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ (3 без соавторов), из них 7 статьи в журналах перечня ВАК и 4 в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и/или Scopus.

В работах, опубликованных в соавторстве, которые приведены в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: [7] – определена метрика диверсифицированности мультиверсий на уровне алгоритмов; [5] – определена метрика диверсифицированности на уровне языков программирования; [4] – предложена и описана графовая модель производственного плана, основанная на метрике диверсифицированности на уровне алгоритмов, которая позволила определять дублирующиеся производственные планы; [6] – описан процесс создания мультиверсионного программного модуля с применением метрик диверсифицированности на уровне языков программирования и алгоритмов; [3] – обобщён подход $t/(n-1)$ -вариантного программирования в рамках исследования алгоритмов голосования; [10, 12] – определены критерии и проведено сравнение методологий мультиверсионного программирования и блоков восстановления; [2] – определена общая метрика диверсифицированности, основанная на нескольких частных метриках; [1] – проведён анализ моделей, используемых в программном обеспечении ИУС для принятия решений; [8, 9] – дано расширенное обоснование метрик диверсифицированности мультиверсий на уровне алгоритмов и языков программирования, соответственно.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 103 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика проблемы, актуальность выбранной темы, определены цель и задачи исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приводится анализ проблемы принятия решений в мультиверсионных ИУС в ходе выбора корректного значения из множества вариантов, полученных от различных версий. Результаты проведённого анализа показали, что базовый принцип мультиверсионного программного обеспечения, декларирующий обязательное разнообразие версий одного модуля, недостаточно проработан, как с теоретической, так и с практической точки зрения. Отмечается отсутствие формального аппарата применения принципа многообразия

(диверсифицированности) при принятии решений в мультиверсионных ИУС. Данное обстоятельство обуславливает необходимость разработки моделей, представляющих мультиверсии в контексте их разнообразия. Описанное направление исследований имеет высокий потенциал к развитию, поскольку основывается на одном из базовых принципов мультиверсионной парадигмы программирования.

В ходе проведения описанного анализа потребовалась формализация данных задач, а также алгоритмизации их решения с учётом особенностей, отражённых на рисунке 1.



Рисунок 1. Дизайн исследования

Вторая глава посвящена разработке модели мультиверсии на основе метрики диверсифицированности (разнообразия).

Каждая мультиверсия представляется в виде точки в N -мерном пространстве, благодаря чему между ними может быть найдено расстояние (например, Евклидово), которое показывает степень удалённости версий друг от друга в общей системе координат. Мерность пространства зависит от того, сколько признаков для определения различий между мультиверсиями используется в каждом конкретном случае.

Классические признаки разнообразия: язык программирования, алгоритм реализации, средства разработки, средства тестирования. Этот список может быть расширен или сокращён в соответствии со спецификой решаемой задачи. Для каждого из признаков определяется метрика разнообразия, которая позволяет определить положение мультиверсии в пространстве по данной координате.

В качестве признаков для выявления меры различия между версиями предложены метрики диверсифицированности мультиверсий на уровне алгоритмов и языков программирования. Процесс разработки модели мультиверсии включал в себя 2 этапа: формирование метрик диверсифицированности на уровне алгоритмов и языков программирования.

Первый этап. Для обеспечения возможности сравнения алгоритмов выполнения двух программных функционально эквивалентных решений, предлагается на этапе разработки мультиверсий заложить в них фиксацию текущего состояния в заранее определённых контрольных точках, количество и места вставки которых определяются индивидуально для каждой версии. По этим точкам строится

трасса выполнения каждого алгоритма, которую можно сравнивать с другими трассами.

С целью выполнения анализа трасс, (для введения меры различия между алгоритмами, т.е. метрики) для предметной области программных алгоритмов было определено следующее: значения набора переменных (состояние версии) в каждой контрольной точке – точка в многомерном пространстве (подпространстве этой метрики); каждые две точки в многомерном пространстве образуют вектор; совокупность изменений состояния версии за время работы алгоритма образует трассу; если в течение нескольких шагов алгоритма состояние остаётся неизменным, точка остаётся на месте; метрическое пространство может считаться таковым только тогда, когда выполняются 3 аксиомы, в числе которых аксиома симметрии, гласящая, что расстояние от точки a до точки b должно быть равно расстоянию от точки b до точки a . Поэтому в метрическое пространство вводится начало координат – минимальное остовное дерево Штейнера, поскольку оно включает в себя все вершины всех трасс мультиверсий и при этом связывает их.

Стоит отметить, что, если разные мультиверсии возвращают разное количество значений переменных в контрольных точках, то для помещения их в одно метрическое пространство производится допущение, что недостающие координаты у версий с меньшим числом переменных, определяющих текущее состояние, равны нулю, как при переводе двумерного графика в трёхмерный может быть добавлена нулевая координата Z (высота), поскольку все точки плоского изображения находятся на одной высоте, которую можно принять за нулевую.

Таким образом, при использовании минимального дерева Штейнера для сравнения с ним трасс алгоритмов могут быть введены следующие критерии:

1. отношение количества общих отрезков (рёбер) у сравниваемой трассы с минимальным деревом Штейнера к количеству рёбер в минимальном дереве Штейнера: $S(V) = \frac{|SV|}{|V_{ST}|}$, где $|V_{ST}|$ – количество рёбер в минимальном дереве Штейнера, $|SV|$ – количество рёбер трассы, совпадающих с рёбрами минимального дерева Штейнера;

2. отношение количества общих точек (узлов) у сравниваемой трассы и минимальным деревом Штейнера к количеству узлов в минимальном дереве Штейнера: $S(E) = \frac{|SE|}{|E_{ST}|}$, где $|E_{ST}|$ – количество точек в минимальном дереве Штейнера, $|SE|$ – количество точек сравниваемой трассы, совпадающих с точками в минимальном дереве Штейнера;

3. отношение длины совпадающих отрезков у сравниваемой трассы и минимального дерева Штейнера к длине минимального дерева Штейнера: $S(Vl) = \frac{l_{CV}}{l_{ST}}$, l_{CV} - суммарная длина совпадающих рёбер трассы, сравниваемой с минимальным деревом Штейнера, l_{ST} - длина минимального дерева Штейнера.

Для нахождения меры различия полученный показатель схожести необходимо вычесть из 100% или из единицы (в зависимости от выбранных единиц измерения):

$$D_i = 1 - S_i, \quad (1)$$

где D_i – мера диверсифицированности алгоритмов по i -му показателю, S_i – мера схожести алгоритмов, определяемая на основании i -го показателя трасс алгоритмов из набора: $\{S(V), S(E), S(VI)\}$.

В результате итоговая мера диверсифицированности двух алгоритмов определяется как Евклидово расстояние между точками в многомерном пространстве. Такими точками являются меры диверсифицированности по каждому из показателей трасс алгоритмов, вычисленные по формуле (1):

$$D_A = \sqrt{\sum_{i=1}^n (D_i^1 - D_i^2)^2}, \quad (2)$$

где D_i^1 – мера диверсифицированности трассы 1 по i -му показателю, D_i^2 – мера диверсифицированности трассы 2 по i -му показателю.

Второй этап. Метрика диверсифицированности на уровне языков программирования вводится на основании возможности сравнения языков программирования, на которых реализованы мультиверсии, по определённым признакам. Например, по способам работы с памятью или возможностью программирования в нескольких парадигмах.

Таким образом, каждому признаку каждого языка программирования может быть поставлено в соответствие некоторое непустое множество значений. Путём нахождения мощности пересечения двух множеств значений какого-либо признака двух языков программирования определяется количество сходных значений данного признака. При делении этого значения на общее число значений данного признака для конкретного языка определяется соотношение схожести одного языка с другим. Тогда степень схожести двух языков программирования по k -му признаку определяется как: $S_{ij}^k = \frac{|set_i(k) \cap set_j(k)|}{|set_i(k)|}$, $i = 1, 2, j = 1, 2, i \neq j$, где i и j – индексы языков программирования, k – номер признака из всего множества признаков, $set_i(k)$ – множество значений k -го признака i -го языка программирования.

Важно отметить, что метрика на уровне языков имеет вероятностную природу, то есть чем больше общих или схожих конструкций или подходов к работе транслятора имеют между собой языки, тем выше вероятность возникновения в написанных на них программах схожих или даже зависимых ошибок.

Для расчета степени схожести двух языков программирования с учетом всех признаков используется формула: $S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m S_{ij}^k}{m}$, где i и j – индексы языков программирования, k – номер признака из всего множества признаков, m – число признаков, S_{ij}^k – степень схожести двух языков программирования по k -му признаку.

Например, один язык позволяет писать код в функциональном и объектно-ориентированном стиле, а другой – в объектно-ориентированном, процедурном и функциональном. Тогда можно утверждать, что по заданному критерию мера схожести первого языка со вторым равна 1, а второго языка с первым – 2/3, поскольку у него с первым совпали только 2 значения признака из трёх. Поэтому вероятно, что и написанные на этих языках версии будут отличаться друг от друга по заданному критерию в том же соотношении. Однако снова встаёт вопрос определения единой точки начала координат в данном метрическом пространстве.

В качестве такой точки отсчёта было предложено использовать «идеальный» язык программирования, который включает в себя все значения всех критериев сравниваемых языков программирования. И уже с этим «идеальным» языком

сравниваются все остальные языки программирования, на которых были реализованы мультиверсии.

Описанное логическое заключение приводит предыдущую формулу к следующему виду: $S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (S_{ip}^k - S_{jp}^k)}{m}$, где i и j – индексы сравниваемых языков программирования, p – индекс для обозначения «идеального» языка программирования, k – номер признака из всего множества признаков, m – число признаков, S_{ip}^k и S_{jp}^k – степени схожести i -го и j -го языков программирования, соответственно, по k -му признаку с «идеальным» языком программирования (p), который является началом координат в метрическом пространстве.

В итоге метрика диверсифицированности двух мультиверсий одного модуля мультиверсионного программного обеспечения ИУС на уровне языков программирования (D_L) может быть рассчитана, как разница между единицей и степенью схожести сравниваемых версий, аналогично формуле 1.

Таким образом, мультиверсия может быть описана как точка в многомерном пространстве:

$$V(D_1, D_2, \dots, D_N), \quad (3)$$

где V – это мультиверсия, D_1, D_2, \dots, D_N – значение метрик диверсифицированности мультиверсий, определяющие как координаты её положение N -мерном пространстве, N – количество метрик диверсифицированности, определённых в модели.

В таком случае метра диверсифицированности двух мультиверсий может быть определена как Евклидово расстояние между точками в многомерном пространстве. Такими точками являются меры диверсифицированности на каждом из уровней диверсификации: $D = \sqrt{\sum_{n=1}^N (D_n^1 - D_n^2)^2}$, где D_n^1 – мера диверсифицированности мультиверсии 1 по n -ой метрике, D_n^2 – мера диверсифицированности мультиверсии 2 по той же, n -ой, метрике, $n = \overline{1, N}$, N – количество метрик диверсифицированности, определённых в модели.

В случае описании мультиверсии с помощью вышеизложенных метрик диверсифицированности (на уровне алгоритмов и языков программирования) её формульное представление выглядит следующим образом: $V(D_A, D_L)$.

А расстояние между мультиверсиями в случае использования метрик на уровне языков программирования и алгоритмов, т.е. мера их разнообразия, представляется формулой: $D = \sqrt{(D_L^1 - D_L^2)^2 + (D_A^1 - D_A^2)^2}$.

Важно отметить, что обе метрики (D_A, D_L) имеют одинаковую размерность – значения находятся в диапазоне от 0 до 1 (включая границы), поскольку вычисляются они как разность единицы частных показателей схожести по формулам (1) и (2).

С помощью приведённого описания мультиверсионный модуль может быть представлен как взвешенный граф, вершинами которого являются мультиверсии, т.е. точки в N -мерном пространстве.

Таким образом, предложенная в данной главе комбинированная модель описывает мультиверсию как точку в многомерном пространстве. На основании описанной модели мультиверсии предложена модель описания мультиверсионного программного модуля, которая представляет его в виде

минимального остовного дерева. Предложенная модель позволяет сравнивать группы мультиверсий между собой путём проверки графов на изоморфизм.

В третьей главе представлены алгоритм оценки диверсифицированности для блоков принятия решений в мультиверсионных ИУС, методика модификации алгоритмов голосования с применением общей метрики диверсифицированности, а также описан модифицированный алгоритм голосования согласованным большинством с экспериментальным подтверждением его эффективности.

На основе представленной модели мультиверсии был разработан алгоритм оценки диверсифицированности для блоков принятия решений в мультиверсионных ИУС, который позволяет определить группу наиболее различных по набору заданных критериев мультиверсий. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 2.

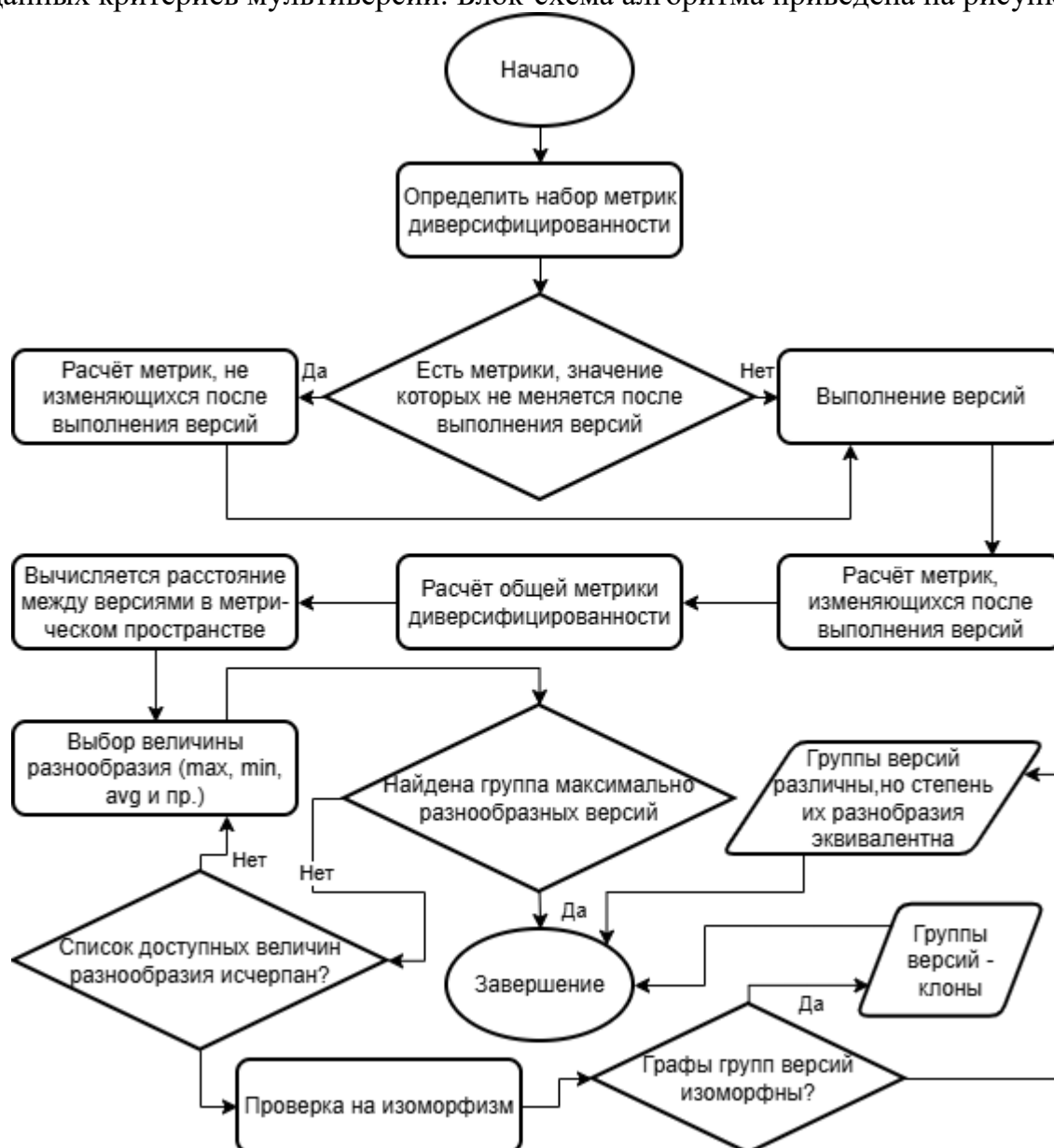


Рисунок 2 – Алгоритм оценки диверсифицированности для блоков принятия решений в мультиверсионных ИУС

Суть алгоритма сводится к тому, что после вычисления частных метрик диверсифицированности выполняется формирование модели мультиверсии в виде

общей (интегральной) метрики диверсифицированности, заданной формулой (3) – мультиверсии модуля становятся точками в многомерном пространстве. Задаётся величина, определяющая меру различия между модулями, например, минимальное, максимальное, среднее или медианное (или любое другое, соответствующее контексту конкретной решаемой задачи) расстояние между его мультиверсиями. Далее вычисляются конкретные расстояния между версиями и на их основе вычисляется заданная величина, которая их агрегирует.

Если удалось найти группу максимально различных версий, то алгоритм завершён, иначе выбирается другая величина, агрегирующая все расстояния (например, среднее расстояние между версиями в двух группах было одинаковым – можно попробовать медиану) – так перебираются все доступные для данной задачи величины разнообразия модуля, пока не будет найдена максимально различная группа версий. Если такую группу после перебора всех величин найти не удалось, то каждая группа версий представляется в виде взвешенного графа – графы проверяются на изоморфизм. Если они изоморфны, то сравнение бессмысленно, иначе делается вывод, что группы версий различны, но для определения меры их различия необходим вывод дополнительных или иных метрик (в зависимости от решаемой задачи).

Таким образом, был разработан алгоритм оценки диверсифицированности для блоков принятия решений в мультиверсионных ИУС, который находит группу наиболее различных по набору заданных критериев мультиверсий или идентичные группы мультиверсий (клоны).

Целью разработки методики модификации алгоритмов голосования является получение такого алгоритма голосования, который в случае неопределённости мог бы использовать предложенную модель мультиверсии, основанную на метрике диверсифицированности, как дополнительный критерий выбора, а не принимать решение случайным образом.

Для достижение описанной выше цели необходимо в процессе голосования использовать описанную метрику диверсифицированности для определения группы наиболее различных между собой версий с целью определения верного ответа с более высокой вероятностью, поскольку мультиверсионная методология основана на утверждении, что чем более разнообразны версии в модуле, тем ниже вероятность возникновения в них зависимых или идентичных сбоев.

Для модификации алгоритмов голосования с применением общей метрики диверсифицированности была разработана следующая методика:

1. Выполняются действия алгоритма оценки диверсифицированности для блоков принятия решений в мультиверсионных информационных управляющих системах. Если в рамках выполнения этого алгоритма не производился запуск мультиверсий, то переход к шагу 3, иначе – к шагу 2.
2. Выполнить мультиверсии для получения результатов их вычислений.
3. Результаты выполнения мультиверсий сравниваются между собой по заданному алгоритму голосования для нахождения единственного верного ответа. Если единственный результат алгоритма голосования найден, то он принимается за результат работы модуля. Если алгоритм голосования обнаружил, что несколько групп мультиверсий, куда входит одинаковое количество версий, выдали разные результаты, то переход к шагу 4;

4. Производится выбор верного варианта ответа с использованием описанной модели мультиверсии и алгоритма оценки диверсифицированности.

Для модификации по описанной выше методике подходят алгоритмы, позволяющие сравнивать в том числе одинаковые по количеству группы версий, например, $t/(n-1)$ -вариантное программирование, а также алгоритм голосования согласованным большинством. Алгоритмы голосования, которые в любом случае выдают результат, не используя случайный выбор в случаях неопределённости, модифицировать нецелесообразно.

Таким образом, была разработана методика модификации алгоритмов голосования с применением новой модели описания мультиверсий, которая позволяет повысить вероятность выбора корректного результата в условиях неопределённости.

Если применить описанную методику к модификации алгоритма голосования согласованным большинством, то этапы нового алгоритма будут выглядеть так, как показано на рисунке 3. Добавленные в классический алгоритм шаги выделены пунктирными линиями.

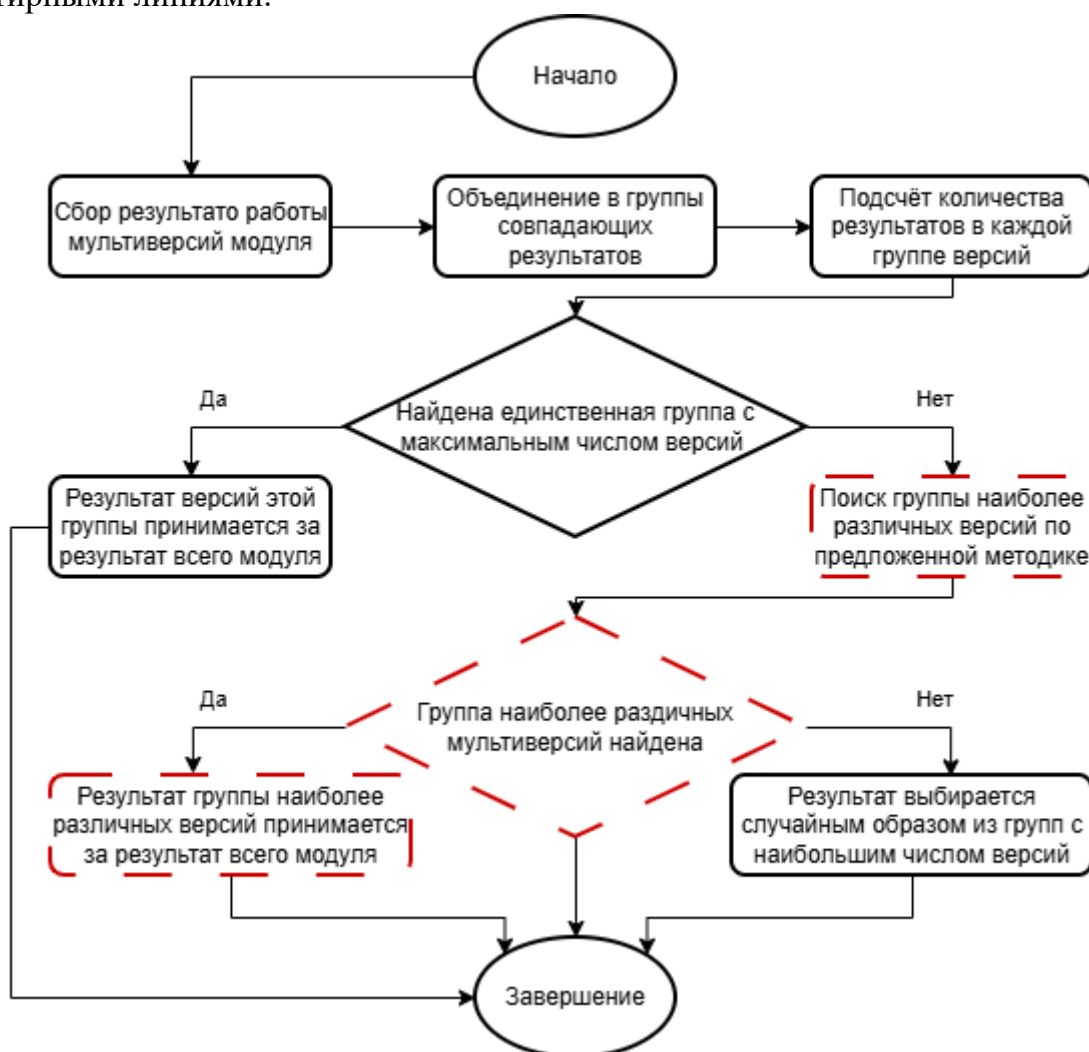


Рисунок 3 – Модифицированный алгоритм голосования согласованным большинством

Таким образом, был модифицирован алгоритм голосования согласованным большинством путём применения в ходе голосования алгоритма оценки диверсифицированности с целью обеспечения его более надёжной работы в условиях неопределённости.

Для проверки модифицированного алгоритма был проведён модельный эксперимент. Для его постановки была реализована программа, имитирующая работу мультиверсионной ИУС, которая по заданным правилам генерировала результаты работы мультиверсий для определённого числа запусков. После чего запускались алгоритмы голосования для выбора верного решения.

Результаты проведённого эксперимента приведены в таблице 1.

Данная программа сгенерировала по 4 набора выходных данных для каждого из трёх мультиверсионных модулей (первый модуль состоял из 3 мультиверсий, второй – из 5 и третий – из 7 мультиверсий): 10 итераций в первом наборе, 100 – во втором, 1000 – в третьем и 10000 – в четвёртом.

Генерация выходов мультиверсий производилась на основе их априорных показателей надёжности. Если версия генерировала неверный ответ, то случайным образом определялось, будет ли её ответ совпадать с неверным ответом другой мультиверсии модуля для обеспечения тех случаев, когда необходимо было получить идентичные неверные ответы, соответствующие зависимым сбоям.

В результате проведения эксперимента были получены следующие результаты: в модуле из 5 версий на выборке из 10000 запусков модуля, в 5 случаях возникла ситуация неопределённости, корректно обработанная модифицированным алгоритмом, благодаря чему были выбраны действительно верные результаты. На 10000 запусках модуля, состоящего из 7 версий, подобная ситуация неопределённости возникла 2 раза, что логично, поскольку вероятность выдачи эквивалентных некорректных ответов группой версий снижается по мере увеличения числа версий в группе. В данном случае модифицированный алгоритм также в ситуациях неопределённости выбрал действительно верные ответы.

Таблица 1. Сравнение эффективности работы алгоритмов голосования

Алгоритм Число запусков	Верных ответов на число запусков				
	Среднее	Согласованное большинство	Согласованное большинство (модификация)	Медиана	$\frac{t}{N-1}$
10000 (N = 7)	5109	9998	10000	9998	9996
1000 (N = 7)	516	1000	1000	999	999
100 (N = 7)	57	100	100	100	100
10 (N = 7)	5	10	10	10	10
10000 (N = 5)	6710	9995	10000	9994	9990
1000 (N = 5)	653	999	1000	1000	997
100 (N = 5)	61	100	100	100	100
10 (N = 5)	6	10	10	10	10
10000 (N = 3)	8456	9976	9976	9972	9965
1000 (N = 3)	873	1000	1000	1000	999
100 (N = 3)	84	100	100	99	99
10 (N = 3)	7	10	10	10	10

Для подтверждения значимости полученных результатов был рассчитан критерий Уилкоксона. Сравнивались пары выборок из десяти тысяч запусков для модулей, состоящих из 5 и 7 мультиверсий. В качестве значений выборок использовались 0 и 1, где 1 обозначает совпадение выбранного алгоритмом голосования ответа с верным ответом, который был известен заранее, 0 – несовпадение. Более формально это может быть выражено так: $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{10000}\}$, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{10000}\}$, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{10000}\}$, $m_i \in M, c_i \in C, a_i \in A, i = \overline{1, 10000}$, $m_i = \begin{cases} 1, & a_i = c_i \\ 0, & a_i \neq c_i \end{cases}, i = \overline{1, 10000}$, где M – множество, хранящее отметки о том, был ли выбран верный ответ алгоритмом голосования, A – множество ответов модуля, определённых алгоритмом голосования, C – множество заранее известных верных ответов, ожидаемых от модуля на каждой итерации.

В множество M записывается 1, если алгоритм голосования выдал корректный ответ на i -й итерации, 0 – в противном случае.

В ходе такого преобразования в сформированной выборке для немодифицированного алгоритма голосования согласованным большинством присутствовали 5 и 2 нуля для модулей, состоящих из 5 и 7 версий, соответственно. Т.е. алгоритм голосования согласованным большинством выбрал неверный результат в 5 случаях, когда модуль состоял из 5 мультиверсий, и в 2 случаях, когда модуль состоял из 7 мультиверсий. Остальные значения были равны единице, т.е. в остальных случаях были выбраны верные ответы.

В ходе проведения расчётов были получены следующие результаты: $W_{M5} = 0.157$, $W_{M7} = 0.025$, где W_{M5} – значение вероятности критерия Уилкоксона для модуля, состоящего из 5 мультиверсий (немодифицированный алгоритм допустил ошибки в 5 случаях из 10000), W_{M7} – значение вероятности критерия Уилкоксона для модуля, состоящего из 7 мультиверсий (немодифицированный алгоритм допустил ошибки в 2 случаях из 10000). При пороговом значении в 5%, необходимом для принятия гипотезы, что модифицированный алгоритм голосования согласованным большинством более надёжен, в случае наличия 5 ситуаций неопределённости различия в выборках статистически значимы, в отличие от выборки с 2 ситуациями неопределённости.

Однако полученные после модификации алгоритма голосования согласованным большинством результаты являются значимыми, поскольку ИУС с мультиверсионным ПО применяются в таких сферах науки и техники, где негативный эффект от единственной ошибки, сбоя или отказа превышает полезный эффект от работы программного обеспечения за всё время использования. К таким негативным эффектам относятся гибель людей и значительные экономические потери. Поэтому повышение вероятности выбора верного ответа даже в одном или двух случаях из многотысячной выборки является значимым результатом.

Важно отметить, что эффективность модифицированного алгоритма голосования снижается по мере сокращения количества версий в модуле. Это видно на примере модуля из трёх мультиверсий, когда модифицированный алгоритм производит выбор верного результата аналогично классическому алгоритму. В случае неопределённости образуется 3 равномоощных множества, содержащих по одному уникальному ответу. В связи с чем применение метрики диверсифицированности теряет смысл, т.к. не предоставляет дополнительных

критериев для сравнения мультиверсий. Таким образом, для повышения эффективности выбора верного ответа модифицированному алгоритму голосования согласованным большинством необходимо не менее четырёх версий.

Таким образом, проведённый эксперимент подтверждает эффективность алгоритма голосования согласованным большинством, модифицированного с помощью методики, основанной на применении комбинированной модели представления мультиверсий.

В четвёртой главе приведены результаты применения модифицированного алгоритма голосования согласованным большинством, подтверждающие его эффективность. Алгоритм голосования был реализован в лабораторной информационной управляющей системе ОАО «Красцветмет». Представленные результаты исследований применялись в процессе рентгенофлуоресцентного анализа образцов ювелирных сплавов на основе золота вторичного сырья.

Программно-алгоритмическая часть системы анализа образцов является компонентом лабораторной ИУС, при этом возможность внесения правок в исходный код проприетарной платформы отсутствует. Поэтому мультиверсионный модуль был реализован в виде надстройки, без изменения исходного кода проприетарной платформы. Модуль включал в себя 4 мультиверсии, реализующие различные алгоритмы на следующих языках программирования: LIMS Basic (версия 1), T-SQL (версия 2), C# (версия 3), Python (версия 4).

Поскольку метрика диверсифицированности на уровне алгоритмов изменяется после каждого запуска, целесообразно привести лишь её диапазон: от 0,323529 до 0,999995 – для всех перечисленных версий. Для определения метрики диверсифицированности на уровне языков программирования использовались следующие свойства языков: парадигма, типизация, механизмы управления памятью, механизмы управления потоком вычислений. В итоге, после сравнения значений указанных свойств с «идеальным» языком программирования были получены метрики диверсифицированности для каждой из версий: D_L (версия 1) = 0,57831; D_L (версия 2) = 0,75993; D_L (версия 3) = 0,32353; D_L (версия 4) = 0,51176. Благодаря этим расчётам для каждой мультиверсии после её запуска определялись координаты в двумерном метрическом пространстве. Следовательно, появлялась возможность найти Евклидово расстояние между ними для определения меры разнообразия.

Модифицированный алгоритм голосования согласованным большинством в случае возникновения ситуации неопределённости, когда появлялись 2 ответа, за каждый из которых проголосовало по 2 мультиверсии, в качестве дополнительного критерия использовалась мера различия каждой из пар мультиверсий для определения верного ответа всего модуля.

В итоге модифицированный алгоритм голосования согласованным большинством показал свою эффективность, что подтверждается актом об использовании результатов диссертации. Число проб ювелирных сплавов на основе золота, переданных на рентгеноспектральный анализ, увеличилось с 68,2% до 89,3% от общего числа проб данной номенклатуры. Сравнение производственных показателей, изменившихся после внедрения модифицированного алгоритма, приведено в таблице 2.

Таблица 2. Производственные показатели, изменившиеся после внедрения модифицированного алгоритма голосования

Производственный показатель	Вид улучшения	Значение
Стоимость выполнения одного анализа	Снижена на	430 Р
Срок анализа вторичного сырья	Сократился в сравнении с пробирным анализом в	5 раз
Количество ручных операций	Сокращено на	~80%
Время расчёта с поставщиками	Сокращено до	1 сутки

Как видно из результатов в таблице 2, мультиверсионный подход в совокупности с представленными результатами диссертационного исследования позволил достичь значимых экономических результатов для организации.

Таким образом, был применён модифицированный алгоритм голосования в реальной информационной управляющей системе для подтверждения на практике полученных теоретических результатов.

Заключение

В ходе выполнения диссертационного исследования, в соответствии с поставленными задачами, цель исследования была достигнута, и получены следующие основные результаты.

Проведен анализ существующих подходов к выбору верного результата в ИУС, который показал отсутствие формального аппарата для оценки меры различия версий. В результате выполнения этой и следующей задач разработана новая комбинированная модель формального представления мультиверсий на основе метрики диверсифицированности. Данная модель позволяет перевести понятие «различия версий» из качественного в количественное, что обеспечивает основу для объективного принятия решений в мультиверсионных ИУС.

Предложена новая графовая модель представления мультиверсионного программного модуля, в которой вершинами графа являются версии, а взвешенными ребрами – связи прямые отрезки, которые их соединяют в метрическом пространстве. Особенностью модели является возможность формального сравнения групп версий через анализ изоморфизма графов, что позволяет определять наличие «клонов» в модуле и оценивать структуру его разнообразия как единого объекта.

Разработан и описан алгоритм оценки диверсифицированности для блоков принятия решений. Он обеспечивает автоматизированный выбор групп наиболее различных версий из общего пула, используя Евклидовы расстояния в многомерном пространстве метрик. Это позволяет блоку голосования с большей вероятностью выбрать действительно верный ответ в случае неопределённости.

Предложена методика модификации алгоритмов голосования на основе комбинированной модели представления мультиверсий для решения задач голосования в условиях неопределенности.

На основе предложенной методики модифицирован алгоритм голосования согласованным большинством, который в случаях равенства голосов использует уровень различия версий как дополнительный критерий для принятия решения, предотвращая случайный выбор и повышая вероятность получения действительно верного ответа.

Модифицированный алгоритм реализован в реальной ИУС ОАО «Красцветмет» для рентгеноспектрального анализа золота. Внедрение показало рост доли корректно обработанных анализов, что дало полезный эффект в виде роста экономической эффективности и сокращения трудозатрат в производственном цикле.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Результаты исследования рекомендуются к применению в задачах оценки качества мультиверсионного программного обеспечения, формирования его оптимального состава с учётом меры разнообразия, а также в задачах поддержки принятия решений.

Дальнейшая разработка темы будет направлена на модификацию известных алгоритмов голосования и их практическую реализацию. В качестве развития результатов продолжится введение в модель мультиверсии новых частных метрик диверсифицированности, а также применение более широкого круга методов из теории графов, направленных на более глубокое и многостороннее определение степени разнообразия групп мультиверсий.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Грузенкин Д.В., Ковалев И.В., Ковалев Д.И., Черных Н.С. Исследование эффективности различных подходов к выбору альтернатив для реализации мультиверсионного программного обеспечения // Авиакосмическое приборостроение. -2025. – №6. – С. 39-47. (К2)
2. Грузенкин Д. В., Михалев А. С. Общая метрика диверсифицированности мультиверсий // Приборы. – 2023. – №4 (274). – С. 30-40 (К2)
3. Грузенкин Д.В., Едреев В.В., Пантелеев Д.А. $t / (n - 1)$ -вариантное программирование //Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18. – №. 6. – С. 46-56. (К2)
4. Грузенкин Д. В., Кузнецов А. С., Селезнев И. В. Оценка меры различия алгоритмов в многовариантной системе составления производственных планов //Системы анализа и обработки данных. – 2020. – №. 4 (80). – С. 65-80. (К2)
5. Грузенкин Д. В., Михалев А. С. Определение метрики диверсифицированности мультиверсионного программного обеспечения на уровне языков программирования //Программная инженерия. – 2019. – Т. 10. – №. 9-10. – С. 384-390. (К1)
6. Хабеев И.А., Царенко В.А., Хабеев С.И., Чехмарев В.С., Грузенкин Д.В. Разработка и внедрение методики рентгенофлуоресцентного определения золота в ювелирных сплавах в аналитическом центре ОАО «Красцветмет» //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2020. – Т. 86. – №. 6. – С. 14-23. (К1)
7. Грузенкин Д. В. и др. Определение метрики диверсифицированности мультиверсионного программного обеспечения на уровне алгоритмов //Фундаментальные исследования. – 2017. – №. 6. – С. 36-40. (К1)

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах:

8. Gruzenkin D. V. et al. Algorithm diversity metric for N-version software //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1333. – №. 3. – С. 032086. (Scopus)

9. Gruzenkin D. V. et al. Algorithm source codes generation for ensuring N-version software diversity //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1333. – №. 3. – С. 032026. (Scopus)
 10. Грузенкин Д. В., Шаварин Д. О. Метод блоков восстановления для повышения надежности программного обеспечения: сравнение с мультиверсионным программированием //Современные инновации, системы и технологии. – 2022. – Т. 2. – №. 3. – С. 0127-0138. (WoS)
 11. Грузенкин Д. В. Алгоритм формирования методик регрессионного анализа концентрации основного компонента в минеральном сырье рентгенофлуоресцентным методом // Информатика. Экономика. Управление. – 2023. – Т. 2. – №. 4. – С. 0209-0217. (WoS)
- Публикации в других изданиях:**
12. Грузенкин Д. В., Новиков О. С., Суханова А. В. Мультиверсионное ПО и блоки восстановления—два способа защиты от ошибок //Новая наука: От идеи к результату. – 2016. – №. 11-2. – С. 72-75.
 13. Грузенкин Д.В., Черниговский А.С., Царёв Р.Ю. Requirements for N-version Software Modules Design and Development // Сборник докладов конференции Международная конференция «Математические и информационные технологии, МИТ-2016» – 2016.
 14. Грузенкин Д. В. Повышение надёжности систем управления БПЛА экологического мониторинга путём применения общей метрики диверсифицированности для модификации алгоритма голосования согласованным большинством // Наука, технологии, общество: экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий. – 2022. – С. 458-469.
 15. Грузенкин Д. В. Поиск клонов среди автоматически сгенерированных учебных планов с применением метрики диверсифицированности программного обеспечения на уровне алгоритмов //Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании. – 2022. – С. 31-35.