

На правах рукописи



Подоплелова Елизавета Сергеевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРИНЯТИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ
РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ**

2.3.8. Информатика и информационные процессы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Таганрог – 2026

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» на кафедре информационно-аналитических систем безопасности имени профессора Берштейна Леонида Самойловича

Научный руководитель: **Целых Александр Николаевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Кобак Валерий Григорьевич,**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет», профессор кафедры
программного обеспечения вычислительной
техники и автоматизированных систем;

Суханов Андрей Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент
Научно-исследовательский и проектно-
конструкторский институт информатизации,
автоматизации и связи на железнодорожном
транспорте (АО «НИИАС»), главный эксперт.

Защита состоится «24» сентября 2026 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета ЮФУ801.02.13 при ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» по адресу: 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ауд. Д-406.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» по адресу 344000, Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21, ж и на сайте www.sfedu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Кандидат технических наук



Кучеров С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Снижение количества негативных событий и повышение безопасности на предприятиях и в организациях является актуальной проблемой. Системы поддержки принятия решений (далее СППР) являются одним из примеров использования современных технологий в оценке и управлении рисками. Подходы к созданию таких систем различны, от «чатов-помощников», до крупных рекомендательных систем, базирующихся на обработке огромных объемов гетерогенной информации, имеющих блок извлечения знаний, преобразующихся в обоснованные рекомендации для лица, принимающего решение (ЛПР). Использование таких систем повышает качество принимаемых решений за счет обработки большого количества информации, инструментов визуализации зависимостей в предметной области, а также использования имитационных моделей. Одним из главных преимуществ СППР, одновременно, как и ключевым критерием качества, является интерпретируемость результатов.

Задача управления рисками также имеет важное значение во множестве процессов, от производственных, до социальных. Оценка рисков позволяет заблаговременно определить аспекты, которые в последствии могут нанести ущерб различного характера, тем самым снижая потери и негативные события в процессе жизнедеятельности предприятия. Существует два основных класса методов оценки рисков: качественные и количественные. Количественные являются более сложными, громоздкими и работают, как ясно из названия, с количественными показателями: выручка, стоимость инвестиций, количество проданных товаров и т.п. Я ограничиваюсь рассмотрением качественных методов, построенных, прежде всего на экспертных оценках. Все они нацелены на оценку по двум критериям: оценки вероятности возникновения риска и оценка тяжести последствий от его реализации. Затем, рассматриваются задачи обеспечения безопасности на предприятиях, связанных с работой оборудования, не учитывая внешние факторы: социальные, экономические, политические и прочее, за исключением случаев, когда они выделены отдельным риском в списке.

Как и другие области, риск-менеджмент претерпевает модернизацию в связи со стремительным развитием информационных технологий. Большие базы данных позволяют хранить огромное количество информации о случаях, связанных с рисками, частотой их возникновения и тяжестью последствий. На основании этой информации возможно спрогнозировать неблагоприятные случаи, отказы оборудования, а также сценарии работы при различных настройках, избегая реальной нагрузки на оборудование.

Проблема принятия управленческих решений в области управления рисками в контексте, описанном выше, заключается в качественной оценке процессов, влияющих на реализацию негативных событий – их прогнозирование. Под качественной оценкой в данной работе понимаются следующие критерии: объективность, которая достигается при помощи использования математических методов принятия решений для обработки оценок и проверенные методы оценки рисков, а также прогнозирование событий при помощи методов искусственного интеллекта. Существующие способы решают эти проблемы по отдельности,

однако для достижения наилучшего результата необходимо обеспечить одновременное выполнение этих критериев. Ниже подробно описаны существующие решения с их достоинствами и недостатками.

Любая СППР имеет жестко ограниченный круг задач, для которых ее разрабатывают. В области оценки и управления рисками, даже без определения конкретной сферы существует ряд недостатков, из которых вытекает перечень проблем. Во-первых, в качестве интеллектуального механизма используется либо нейросеть, либо логический вывод. Нейросетевой подход работает по типу «черного ящика», а значит критерий интерпретируемости результатов не выполняется. Имеются только входные данные, модель и результат. Как он был получен проследить невозможно. Логический вывод напротив, легко интерпретируется, но сильно зависим от заложенных правил и имеет жесткие ограничения по функциональности. Другие решения используют математические модели: регрессионный, дисперсионный анализ, многомерный, дискриминантный анализ, прогноз временных рядов. Такие модели представляют ЛПР (лицо, принимающее решение) результаты математического анализа на основе исходных данных, они зависят от их качества, количества, а также требуют от пользователя глубоких знаний для интерпретации результата, что не всегда целесообразно в рамках реальных задач.

Получения прогнозов не всегда достаточно для принятия решений, так как существуют ситуации с множеством альтернатив, оценивающихся по определенным критериям. Для разрешения таких ситуаций существуют методы многокритериального принятия решений. Использование специальных математических методов позволит ЛПР провести более качественную и систематизированную оценку альтернатив, однако исследование показало, что их использование в обособленном виде очень чувствительно к экспертной оценке.

Разработка СППР для оценки рисков позволит учитывать факторы и прогнозировать исходы на основе как статистических, так и динамических данных при помощи методов машинного обучения. Разработка качественной системы принятия решений при наличии множества факторов позволит принимать ЛПР решения более взвешенно. Также, помимо экспертных знаний при разработке данной системы применяются алгоритмы машинного обучения в качестве инструмента для прогнозирования вероятности возникновения риска на основе исторических данных. За основу взят подход, описанный в методологии FMEA (failure mode and effect analysis), позволяющий оценивать риски как любых систем, так и процессов по трем критериям: вероятность возникновения, тяжесть последствий и сложность обнаружения. Обращу внимание, что в различных источниках используются термины «метод», «методология», а иногда и «процедура анализа». Это связано с иностранным происхождением, а также уровнем абстракции рассмотрения FMEA. Например, в СТБ (Национальная система стандартизации) это называется методологией, но в ГОСТ Р 51814.2-2001 «Системы качества в автомобилестроении» – метод, потому что используется и адаптирован к конкретной задаче анализа рисков и последствий отказов в автомобилестроении. В своей работе я предлагаю метод оценки рисков, реализованный в виде системы поддержки принятия решений.

Состояние проблемы. Изучение и анализ предметной области выявляет обширное количество исследований в разработке систем принятия решений и оценки и управления рисками. Однако, значительная часть исследований направлена на оценку рисков в финансовом секторе, например, прогнозирование доходности пакетов акций, скоринговые системы для оценки заемщиков, также оценка экономических рисков и функционирования предприятия. Отдельной категорией выделяются медицинские системы поддержки принятия решений, имеющие свою специфику. Риски в производственной, промышленной сфере касательно безопасности не так популярны. Среди российских авторов оценку рисков, связанных с безопасностью рассматривали Кантюков Р. Р., Бутусов О.Б., Филинков Л. И. Методы многокритериального принятия решений изучались, разрабатывались в работах Саати Т. Л., Hwang, C.L., Yoon, K., Opricović, S. Среди российских авторов можно выделить Лотова А.В., Поспелову И.И.

В области интеллектуальных систем поддержки принятия решений внесли серьезный вклад такие авторы как Грибова В.В., Бутакова М.А., Курейчик В.В., Болотова Л.С., Борисов В.В.

Таким образом, существует множество СППР для разных целей, использующих различные методы. Однако, большая часть среди описанных является либо концепцией, не имеющей реализации, либо реализуют иные методы. Касательно самого подхода к качественной оценке рисков в рамках описанной задачи, были рассмотрены экспертные методы, а также методы, описанные в стандартах. Например, в ГОСТ Р 51814.2-2001 «Системы качества в автомобилестроении» описан метод анализа видов и последствий отказов, так же известный как FMEA. Большое количество работ посвящено его использованию и модификациям. Среди российских авторов это вопрос рассматривали Годлевский В. Е., Дмитриев А. Я., Юнак Г. Л. Применяются различные математические методы и подходы к его модернизации, адаптированные к конкретным задачам предметной области.

Однако, рассмотренные методы экспертной оценки, в том числе и FMEA представляют собой последовательность шагов, включающих обработку экспертной оценки путем их перемножения. Этого недостаточно, чтобы учесть особенности поставленной задачи, а также обеспечить максимальную объективность полученных результатов, которую можно получить, используя исторические данные о работе оборудования или статистические данные о реализации негативных событий.

В итоге, было выявлено, что отсутствует такой метод оценки рисков на предприятии, который способен обеспечить как объективную оценку рисков, так и прогнозирование событий, сочетая в себе опыт экспертов и вычислительную мощность и объективность моделей прогнозирования по средствам машинного обучения.

Цель диссертационного исследования заключается в снижении рисков, связанных с отказом оборудования и возникновением пожаров на производственных объектах за счет повышения качества принятия управленческих решений.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие основные задачи:

1. Разработать гибридный подход к оценке рисков в виде объединения методов многокритериального принятия решений и методов машинного обучения.
2. Реализовать разработанный гибридный подход в виде алгоритма.
3. Разработать модель СППР на основе предложенного гибридного подхода.

Объектом исследования является информационная технология управления рисками, реализующая имитационные модели прогнозирования событий.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы принятия многокритериальных решений, а также методы машинного обучения.

Теоретическая значимость заключается в развитии методов создания систем поддержки принятия решений оценки рисков на основе модифицированной методики оценки рисков, реализующей гибридный подход.

Практическая значимость заключается в том, что предложенный подход, реализованный в виде СППР, позволил сократить время на принятие решений с нескольких недель до 2 часов, а так же достигнуть точности прогнозирования негативного события в 84-86% .

Результаты исследования были использованы при разработке Единого комплекса по управлению деятельности компании в области защиты окружающей среды, пожарной и промышленной безопасности. Акт о внедрении приведен в приложении к диссертации.

Методология и методы исследования. В качестве методов использовались методы многокритериального принятия решений (АНР, TOPSIS), методология FMEA (оценки рисков и последствий отказов), методы машинного обучения (AdaBoost, SVM, Случайный лес, K-means)

Экспериментальные исследования выполнены с помощью языка программирования Python и дополнительных библиотек для анализа данных и машинного обучения. Программа разработана в среде PyCharm Community Edition 2022.3.2.

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

- предложен подход к оценке рисков, отличающийся от имеющихся объединением методов многокритериального принятия решений и машинного обучения, что позволяет одновременно повысить объективность оценки и спрогнозировать вероятность возникновения риска на основе как экспертных знаний, так и статистической информации;
- предложен новый метод расчета приоритетного числа риска, отличающийся от имеющихся использованием методов многокритериального принятия решений, что позволяет учесть предпочтения ЛПР путем задания весов критериев и разных опыт экспертов в экспертной группе;
- предложен новый метод оценки вероятности возникновения риска, отличающийся использованием модели прогнозирования вместо экспертной оценки, что позволит получить вероятность возникновения риска не только на основе экспертного опыта, но и на зафиксированных данных о возникновениях рисков (статистической информации или режимах работы, приводящих к отказу);

- предложен новый метод формирования итоговой оценки рисков, отличающийся от известных формированием уровней опасности при наличии более 10 видов, а также выделением факторов, влияющих на вероятность возникновения риска, что позволит повысить интерпретируемость результатов;

- разработан программный комплекс, реализующий предложенный подход к оценке рисков, имеющий возможность использовать историческую информацию для оценки и прогнозирования видов отказов, отличающийся от имеющихся комплексным подходом к оценке, позволяющий визуализировать результаты анализа в виде уровней опасности, сформированных методом кластеризации, выделять ключевые факторы, осуществлять прогнозирование на новых данных, расширяя знания ЛПР о ситуации, дополняя расчётными показателями в совокупности с уже имеющейся экспертной оценкой.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Гибридный подход к оценке рисков, объединяющий методы многокритериального принятия решений и методы машинного обучения;

2. Метод расчета приоритетного числа риска, заключающийся в объединении методов многокритериального принятия решений, который позволяет учесть предпочтения ЛПР путем задания весов критериев и разных опыт экспертов в экспертной группе;

3. Метод оценки вероятности возникновения риска, основанный на модели прогнозирования с использованием зафиксированных данных о возникновении рисков (статистической информации или режимах работы, приводящих к отказу);

4. Метод формирования итоговой оценки рисков, включающий построение уровней опасности при наличии более 10 видов, а также выделение факторов, влияющих на вероятность возникновения риска.

5. Система поддержки принятия решений, реализующая имитационные модели прогнозирования событий и гибридный подход к оценке рисков.

Соответствие специальности. Тематика работы соответствует паспорту специальности 2.3.8. «Информатика и информационные процессы»:

п.8. Разработка систем принятия решения на основе баз данных и знаний, реализующих имитационные модели прогнозирования изменения материальных процессов и событий.

Степень достоверности и апробация. Основные результаты докладывались на 15 конференциях, в том числе на IX Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности», г. Таганрог, 2023 г., X Всероссийская научно-техническая конференция " Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности", Таганрог, 2024 г.

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 научных работах, в том числе 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ К2 и 1 работа – в изданиях, индексируемых Scopus, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 136 страницы

машинописного текста. Включает 31 рисунок, 27 таблиц и 6 приложений. Список литературы содержит 101 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Во введении показана актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, приведены полученные научные результаты, обоснована их достоверность, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе проведен анализ методов оценки рисков и систем поддержки принятия решений, которые их реализуют, исследованы методы многокритериального принятия решений. В результате анализа обнаружены проблемы, для решения которых были сформулированы задачи данного исследования.

Исследование методов оценки рисков, описанное в главе показало, что в существующих подходах присутствует ряд недостатков:

- сильная зависимость от квалификации эксперта, что порождает субъективность;
- простой и «негибкий» математический аппарат, не способный отразить предпочтения ЛПР, и, соответственно, более детально учесть требования к задаче;
- нет возможности выявить влияющие факторы или неявные причины риска.

Следовательно, требуется метод, повышающий объективность качественных оценок и гибкость математического аппарата, сохраняющий экспертные знания и дополненный прогнозированием событий для расширения информационной базы ЛПР. В результате были поставлены следующие ключевые задачи, описанные во введении.

Разработка гибридного подхода предполагает, что гибридность позволит достичь лучших результатов за счет взаимодействия методов многокритериального принятия решений, которые расширяют возможности математического аппарата, и методов машинного обучения, способны прогнозировать вероятность возникновения риска, а также выявлять факторы, влияющие на появление негативного события (реализацию риска).

Создание такого подхода учитывает необходимые аспекты поставленной задачи за счет использования дополнительных средств оценки и расчёта итоговой опасности.

Анализ MCDM показал, что для поставленных задач будет оптимально использовать сочетание методов TOPSIS и AHP.

В качестве методов машинного обучения были проанализированы алгоритмы классификации, в том числе и многоклассовой.

В ходе исследования была выявлена проблема автоматизации готовых методик: они используются «вручную», что повышает время на принятие решений. Также, в большинстве случаев системы прогнозирования реализованы отдельно или как часть интеллектуальных систем диагностики или мониторинга.

Имеющиеся решения в области оценки рисков реализуют различный подход к оценке и управлению рисками. Однако, в первой главе представлено сравнение, которые показывает, что комбинации этих пунктов до сих пор не реализовали.

Использование формализованной методологии (форма ГОСТ) снижается время, затраченное на оформление документации.

Методы многокритериального принятия решений реализуют мощный математический аппарат, позволяющий более гибко оценивать, в том числе за счет использования весов: критериев, экспертов, и обработки групповой оценки. Это поможет повысить объективность, учитывая особенности поставленной задачи (например, относительная важность критериев), также различный опыт экспертов при наличии экспертной группы.

Подробно был рассмотрен отбор и сравнение MCDM на экспериментах с разным количеством альтернатив и критериев. Также, для более глубокого анализа методов они были протестированы на устойчивость к изменению весов. В итоге были сделаны следующие выводы:

- а) высокое влияние веса критерия;
- б) несогласованность результатов при сильном дисбалансе количества альтернатив и критериев;
- в) большое количество альтернатив может требовать дополнительной обработки.

В результате обобщения методов многокритериального принятия решений, был предложен интегральный метод оценки рисков по заданным критериям, а также сформулированы требования, позволяющие устранить недостатки, выявленные в существующих методах:

- объективность оценки;
- гибкость в оценке и итоговом расчёте опасности;
- улучшение интерпретируемости результатов;
- результат, максимально приближенный по форме к стандартной отчетности;
- надежный и универсальный метод оценки рисков, применимый для комплексной оценки безопасности как процессов, так и оборудования;
- точность прогнозирования не менее 80% по стандартным метрикам (F-мера);
- автоматизация процесса оценки с выдачей рекомендаций.

Также были определены ограничения для разрабатываемой системы, реализующей предлагаемый подход:

- ограниченная функциональность;
- необходимость экспертной оценки;
- высокая зависимость точности прогнозирования от дисбаланса классов.

На рисунке 1 приведены достоинства и недостатки существующих решений в области оценки рисков по заданным в рамках работы критериям.

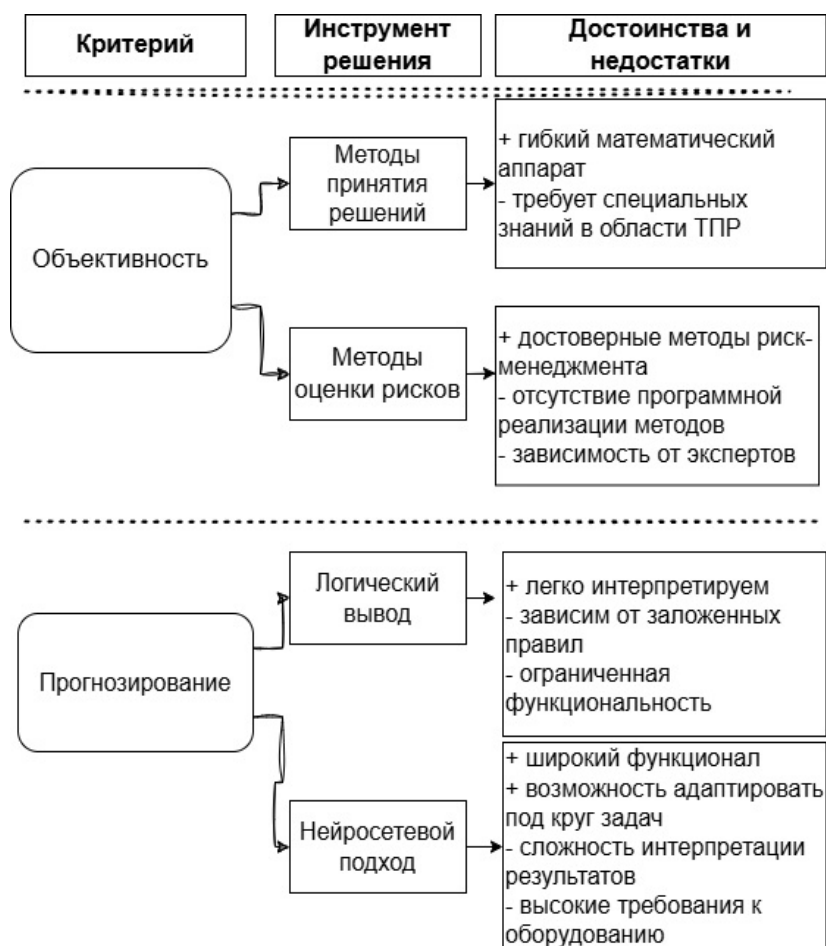


Рис. 1 – Достоинства и недостатки методов, использующихся в оценке рисков

Во второй главе описана идея предлагаемого подхода, разработан метод оценки рисков и алгоритм его работы.

Основная идея разработанного подхода представлена на рисунке 2. Упор делается на новые комбинации методов относительно заявленных критериев. Предлагается объединить «сильные», но обособленные методы в один гибридный подход с целью повысить показатели по заявленным критериям. Объективность повышается за счет апробированных методов многокритериального принятия решений: за основу подхода взят известный метод оценки рисков анализа ошибок и последствий отказов (FMEA), и добавлена возможность прогнозирования вероятности возникновения риска.



Рис. 2 – Идея предложенного подхода со стороны заявленных критериев.

Так, имеется метод оценки рисков существующим FMEA, который состоит из 8 различных шагов, представленных на рисунке 3 (кратко).

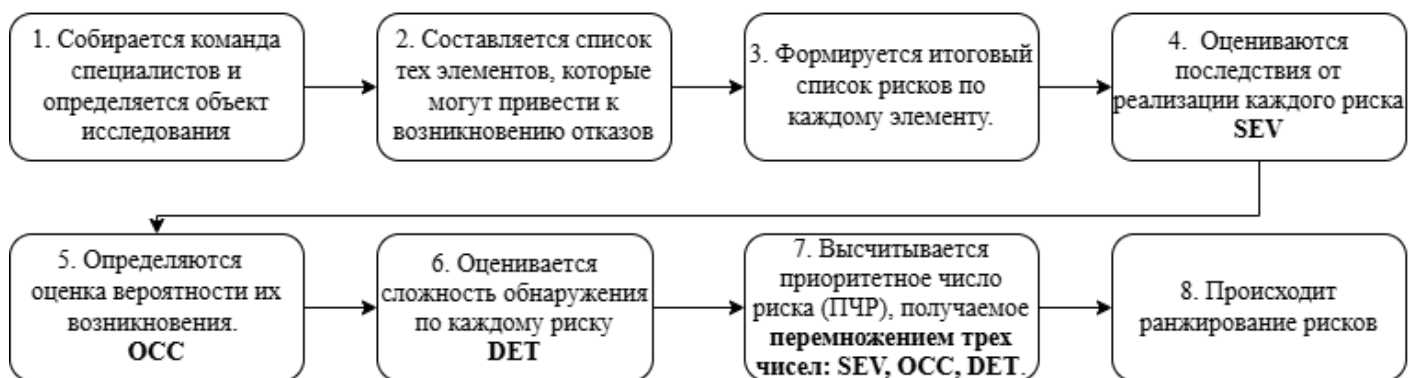


Рис. 3 – Ключевые шаги FMEA.

В своей работе я предлагаю объединить пункты 2 и 3, получая шаг «формирование рисков/отказов».

Пункт 5 дополняется возможностью получить оценку вероятности возникновения отказа на основе статистических данных.

Пункт 7 заменяется на использование метода многокритериального принятия решений в качестве способа расчёта приоритетного числа риска (ПЧР) вместо имеющегося произведения оценок по каждому критерию. Получаем метод из 8 шагов.

1. Формируется список рисков.
2. Каждый выделенный риск оценивается экспертами по трем критериям.
 - 2.1 Возможно заменить экспертную оценку по критерию «вероятность возникновения» оценкой, полученной в результате расчета на основе имеющихся статистических данных о рисках.
3. Задается вес критериев в соответствии с предпочтением эксперта при помощи метода анализа иерархий.
4. Заполняются данные об экспертах: уровень образования и стаж работы в исследуемой области.
5. Рассчитывается вес каждого эксперта методом TOPSIS.
6. Проводится ранжирование рисков методом TOPSIS с учетом весов критериев и экспертов.
7. При большом количестве рисков (более 10) происходит формирование уровней опасности путем кластеризации.
8. Построение модели прогнозирования отказа (вида отказа) при наличии исходных данных.

На рисунке 4 отражено сравнение предложенного метода, относительно уже апробированного FMEA, изложенного в ГОСТ Р 51814.2-2001 по шагам.

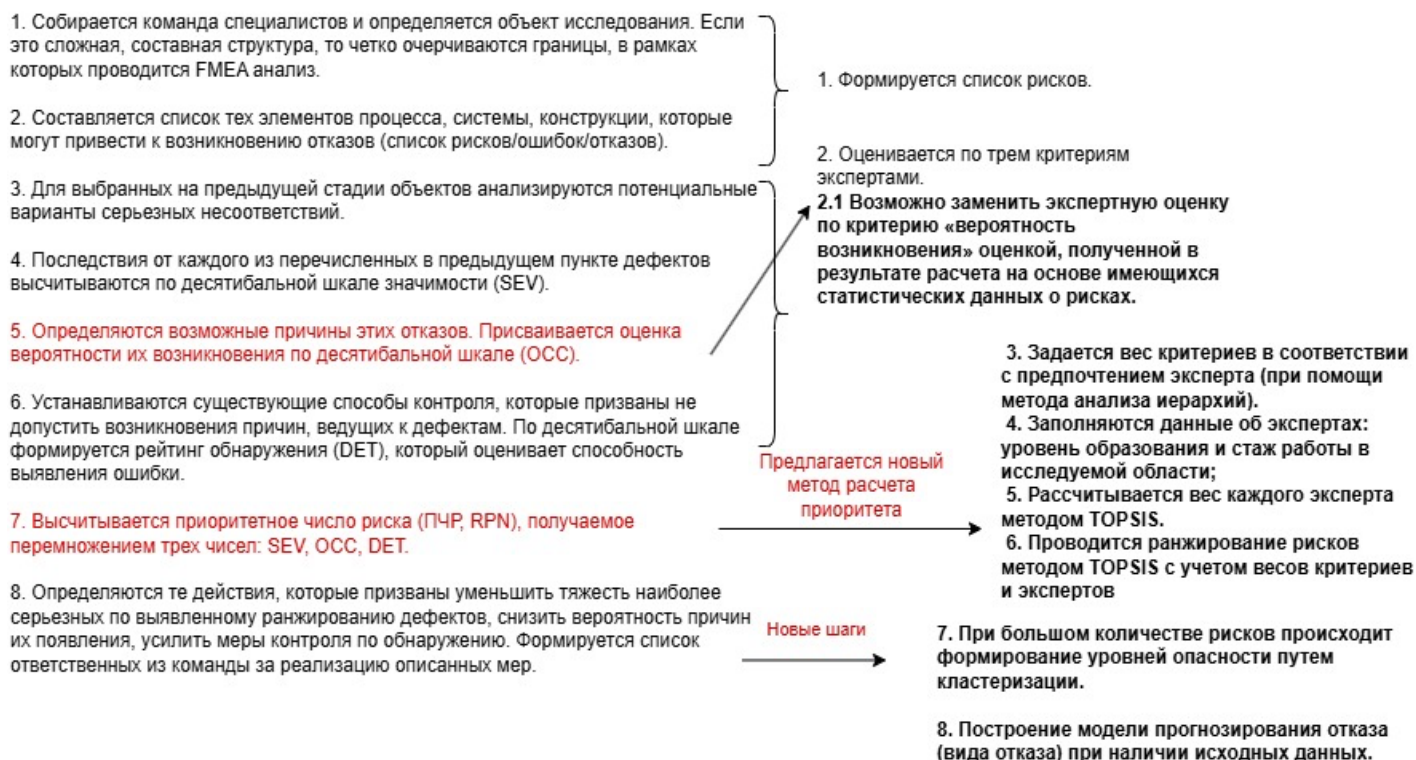


Рис. 4 - Сравнение предложенного метода с FMEA.

Суммируем описанное выше в новый гибридный подход – рисунок 5.

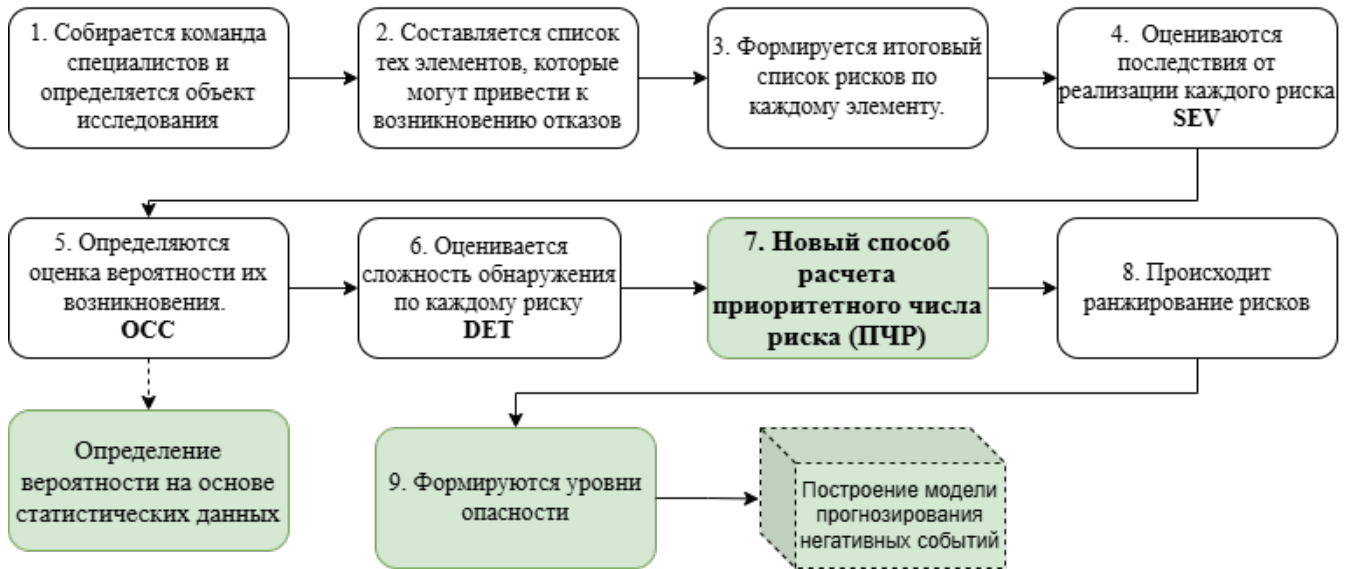


Рис. 5 – Разработанный гибридный подход к оценке рисков.

Далее представлен метод расчета ПЧР рассчитывается по формуле:

$$F = S \times O \times D \quad (1)$$

где F – функция расчета, S – оценка тяжести последствий, D – оценка сложности обнаружения, O – оценка вероятности возникновения.

Мною предложена модель, реализующая метод ранжирования рисков. В этой модели обозначим новый способ ПЧР как F^* и представим в виде:

$$F^* = \{M^*, F_1, F_2, F_3\} \quad (2)$$

где M^* – матрица обработанных оценок, F_1 – функция перехода, реализующая метод анализа иерархий, для формирования предпочтений относительно критериев и задать им веса.

$$F_1 \xrightarrow{АНР} \omega. \quad (3)$$

На выходе получим кортеж $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ из весов критериев.

$F_2(M_{\text{экс}})$ – функция перехода, реализующая метод TOPSIS. $M_{\text{экс}}$ – матрица, включающая стаж работы эксперта в данной области в годах и уровень образования, где 1 – уровень студент-бакалавр, 2 – степень бакалавра, 3 – степень магистра, 4 – кандидат наук, 5 – доктор наук.

$$F_2 \xrightarrow{TOPSIS} \omega_{\text{экс}} \quad (4)$$

На выходе получим кортеж $\omega_{\text{экс}} = (\omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_n)$, где n – количество экспертов, ω'_n – вес n -ого эксперта.

F_3 - функция расчета средневзвешенной оценки.

Матрица M^* будет включать уже преобразованные оценки на основании весов экспертов.

$$M^* = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} \end{pmatrix}$$

где m – количество рисков, а каждый элемент a_{ij} рассчитывается как сумма произведений оценок на вес каждого эксперта по каждому критерию и риску. Определяется по формуле:

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{ij} \omega^k \quad (5)$$

где $i = 1, 2, 3$; $j = 1, 2 \dots m$; x_{ij} – оценка k -ого эксперта из его матрицы оценок M , ω^k – вес k -ого эксперта из вектора $\omega_{\text{ЭК}}$. Сумма весов экспертов должна быть равна 1:

$$\sum_{k=1}^n \omega^k = 1$$

Выполнив все этапы преобразований, переходим к итоговому расчету приоритетного числа риска методом TOPSIS.

$$F^* \xrightarrow{\text{TOPSIS}} r, \quad (6)$$

где r – кортеж, включающий последовательность полученных рангов.

$$F^* = F(M^*, \omega, \omega_{\text{ЭК}}) \quad (7)$$

где F – функция расчета приоритетного числа риска методом TOPSIS; ω – веса критериев; $\omega_{\text{ЭК}}$ – веса экспертов; M^* – матрица обработанных оценок.

Как было указано выше, предложенный метод использует в качестве критерия «О – вероятность возникновения» как оценку эксперта, так и оценку, полученную на основе статистических данных.

В случаях просчета статистики необходима шкала, переводящая процент возникновения каждого риска в балл. Я задействовала шкалу, предложенную в ГОСТе, упомянутом выше.

Методы анализа иерархий и TOPSIS рассчитываются стандартно.

Третья глава посвящена моделированию и описанию особенностей разработанной СППР, а также разработке алгоритма работы.

Разрабатываемая система решает задачу ранжирования множества альтернатив по нескольким критериям. Ключевые возможности системы:

- учет групповой экспертной оценки при выборе альтернатив;
- автоматический расчет весов экспертов в соответствии с их образованием и опытом работы;
- возможность пересчитать веса критериев;
- формирование кластеров по уровням опасности (актуально при большом количестве рисков).

СППР может использоваться как экспертами, так и пользователем, не имеющим определенных знаний и навыков, поддерживает два сценария: с экспертной группой и без нее.

На рисунке 6 представлена блок-схема алгоритма работы системы.

Модель прогнозирования требует предварительной настройки, ввиду зависимости от данных. Но, после настройки, добавление новых записей в утвержденном формате может быть произведено пользователем системы для обновления рекомендаций, что и отражено на схеме.

В четвертой главе реализован предлагаемый подход, модель прогнозирования на примере данных об отказе оборудования и описано использование предлагаемой системы для реальных задач в области железнодорожного транспорта.

Помимо ранжирования ошибок, система дополнена возможностью прогнозировать возникновение и вид ошибок при наличии исторических данных, а также предоставлять пользователю наиболее значимые факторы, повлиявшие на результат.

В первом разделе рассматривается пример применения этого подхода для оценки рисков производственного оборудования и прогнозирования вида отказа. Итогом является:

- таблица с информацией о ранжировании ошибок модифицированным FMEA с учетом весов критериев. Критерий «Вероятность возникновения» рассчитан автоматически на основе тех же исторических данных;
- обученная модель прогнозирования ошибок, протестированная на тестовом наборе данных, что позволит обновлять информацию об ошибках и их вероятности;
- список признаков и их степень влияния на появление отказов.

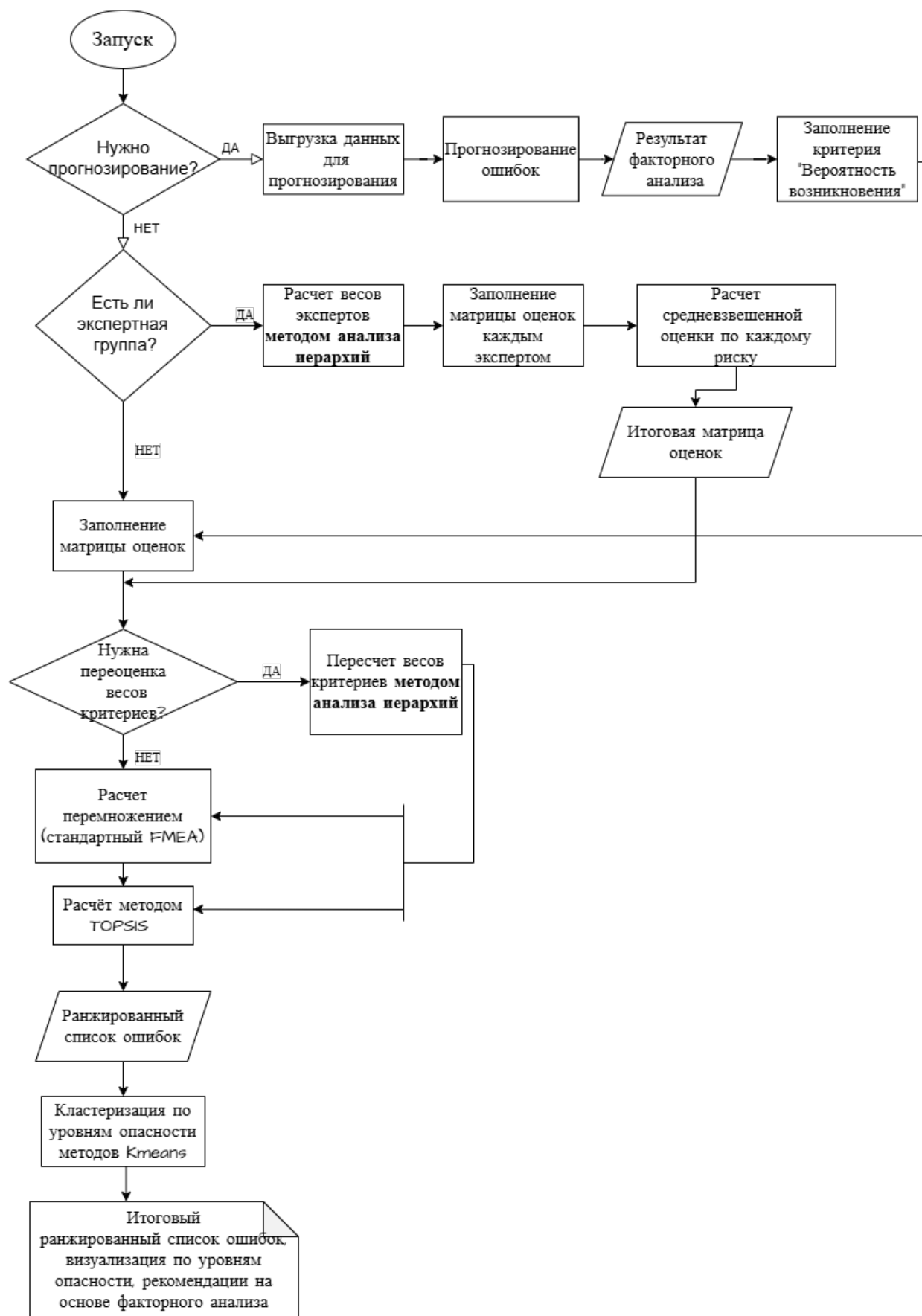


Рис. 6 – Блок-схема алгоритма работы системы

Вся информация сведена в итоговую таблицу 1 для удобства ЛПП. Полные расчёты и количественные результаты факторного анализа приведены в диссертационной работе.

Таблица 1. Итоговая рекомендация для ЛПП

Вид ошибки	Расшифровка	Ранг на экспертной оценке	Ранг с использованием исторических данных	Разработанный метод
OSF	Отказ из-за перегрузки	1	2	1
PWF	Сбой мощности	2	3	3
RNF	Случайные сбои	3	1	5
HDF	Нарушение отвода тепла	4	5	2
TWF	Отказ из-за износа	5	4	4
Степень влияния признаков	Наиболее влиятельными признаками являются скорость вращения и крутящий момент , наименее – <i>степень износа</i> .			

Так же видим из таблицы 2 точность прогнозирования разными методами по двум метрикам. К тому же, в таблице можно увидеть разницу в точности до и после сокращения размерности и устранения дисбаланса классов.

Таблица 2. Результаты прогнозирования

	LinearSVC	RandomForestClassifier	AdaBoost
Accuracy	0.962	0.98175	0.973
F1_weighted	0.98	0.986	0.982
Accuracy	0.53	0.88	0.84
F1_weighted_сокращенный	0.67	0.86	0.86

Метод случайного леса показал наилучший результат.

Далее описано два эксперимента, раскрывающих все возможности и заявленный функционал СППР.

Первый демонстрирует оценку и ранжирование 20-ти рисков, выделенных из публичного отчета РЖД. Он показывает возможность ранжировать большое количество рисков и их кластеризацию. Эксперимент проведен с привлечением экспертов в предметной области с различными исходными опытом и уровнем образования для демонстрации получения компромиссной оценки.

На рисунке 7 показана итоговая разница в ранжировании.

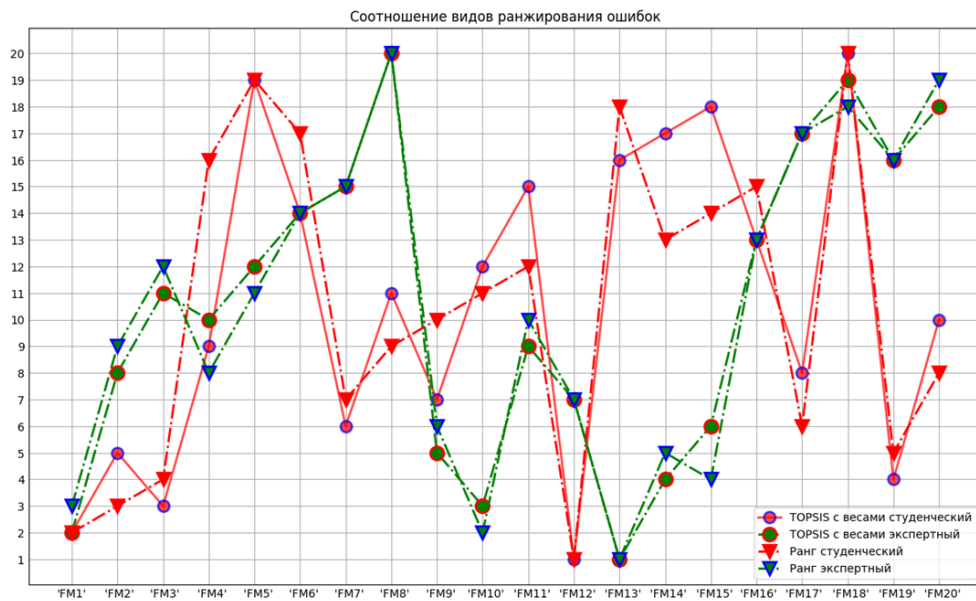


Рис. 7 – Соотношение итоговых рангов, полученных прямым расчётом и предложенным методом.

Как видим, экспертный и расчетный экспертный графики практически идентичны, но, по студенческой оценке, наблюдается значимое различие в рангах ошибки FM14 и FM15, и большая по FM4, в остальном веса не сильно повлияли на ранжирование. Для этого была получена компромиссная оценка, использованная в итоговом расчете ПЧР. Ввиду большого размера таблицы ниже представлен фрагмент (Таблица 3), включающий ранги, полученные разработанным методом на основе оценок по отдельности эксперта и студентов, также ранги в соответствии с предоставленным отчетом. Последнее ранжирование будем считать эталонным, так как оно опубликовано в годовом отчете компанией.

Таблица 3. Фрагмент таблицы ранжирования на основе экспертных оценок

Код ошибки	Предложенный метод на основе оценки студенческий	Предложенный метод на основе экспертной оценки	Предложенный метод со средневзвешенной оценкой	Ранжирование согласно отчету
FM1	2	2	1	1
FM2	5	8	8	8
FM3	3	11	6	6
...				
FM19	4	16	13	13
FM20	10	18	17	16

Коэффициент ранговой корреляции Спирмена	0.42	0.9	0,99	1,0
Коэффициент Кендалла	0.32	0,74	0,96	1,0

Чтобы сравнить и интерпретировать результаты были использованы коэффициенты ранговой корреляции Спирмена и Кендалла. Они показывают, насколько полученные ранжирования близки к эталонному. Высокие показатели доказывают, что система выдает результат, максимально приближенный к решению от высококвалифицированного эксперта. Из таблицы видно, что самый высокий показатель корреляции у предложенного метода с использованием средневзвешенной оценки.

Следующий пример посвящен оценке пожарного риска постов ЭЦ, ДЦ, ГАЦ. Для анализа были взяты данные по стационарным объектам СКЖД за последние 3 года. Данные включают количество зафиксированных рисков на ряде стационарных объектов, а также их суммарное количество за последние 3 года 2022–2024.

Помимо оценки были использованы записи о нарушениях и пожарах, где одна строка является записью об объекте и был ли пожар при зафиксированных рисках. Фрагмент данных приведен в приложении В.

Для улучшения показателей прогнозирования гиперпараметр количество деревьев в методе «Случайный лес» и разбиение на тестовую и тренировочные выборки происходит автоматически, и система показывает наилучший результат, т.к. при большом количестве записей модель может хорошо обучиться на 65-70% данных, а при маленьком, как в данном примере, нужно больше. В результате была получена следующая информация для ЛПР на основе файла с экспертной оценкой: ранжирование традиционным методом ПЧР со статистическими данными и без, и предложенным методом соответственно.

Из таблицы 4 видно, пользователю доступно четыре результата ранжирования, пятый столбец – ранжирование другим экспертом, оценки которого ранее не использовались. Для того, чтобы оценить ранжирование этот столбец взят за эталон (самый высококвалифицированный). Как видим, наивысшие коэффициенты корреляции у разработанного метода, что подтверждает, что система способна сбалансировать экспертные знания и статистическую информацию, объединив их в обоснованные рекомендации.

Таблица 4. Итоговое ранжирование

	Ранжирован ие согласно ПЧР на основе оценок	Ранжирование модифицированн ым методом с учетом весов на основании оценки	Ранжирование модифицированн ым методом с учетом весов на основании расчёта вероятности возникновения	Ранжирование согласно ПЧР на основании расчета вероятности возникновения	Ранжирование другим экспертом
FM1	6	6	5	5	5
FM2	3	4	3	2	3
FM3	11	11	10	11	10
FM4	7	7	9	7	8
FM5	1	1	1	1	1
FM6	10	10	11	10	11
FM7	2	2	7	6	7
FM8	5	5	4	4	4
FM9	4	3	2	3	2
FM10	8	9	8	9	9
FM11	9	8	6	8	6
Коэффициент корреляции Спирмена	0.8	0.84	0.98	0.95	1
Коэффициент корреляции Кенделла	0.67	0.75	0.93	0.85	1
Степень влияния признаков	Самое сильное влияние оказывает « Попадание тягового тока на устройства СЦБ и связи по металлическим конструкциям и устройствам » и « Отсутствие селективности защит в низковольтных цепях постоянного и переменного тока »				

Максимальная точность прогнозирования достигла **82%** после устранения дисбаланса (1 к 3). Такой результат обусловлен слишком маленькой выборкой 504 записи после генерации.

На рисунке 8 представлено выделение по уровням опасности. Кластеризация выявила их оптимальное количество при помощи метода «локтя».

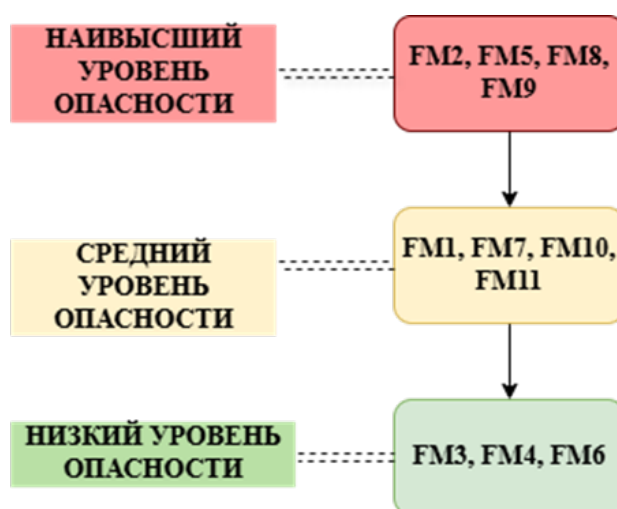


Рис. 8 – Распределение по уровням опасности

На основе второго файла с записями об инцидентах были получены:

1. Обученная модель прогнозирования с точностью по метрике F1 равная 74% до устранения дисбаланса, 82% - после.
2. Выделенные факторы, влияющие на результат.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Для оценки эффективности внедрения этой системы было проведено сравнение по следующим факторам:

- оценка качества ранжирования по близости к ранжированию высококвалифицированным экспертом, ранее не учувствовавшим в оценке (таблицы 5-6);
- количество времени, затраченное на оценку факторов и дальнейшее ранжирование по уровням опасности, использование альтернативных методов расчет приоритета, методы машинного обучения, обработка групповых решений (таблица 8).

Таблица 5. Ранговая корреляция для сравнения стандартного метода ПЧР и разработанного

	Ранжирование согласно ПЧР на основе оценок	Ранжирование модифицированным методом с учетом весов на основании оценки	Ранжирование модифицированным методом с учетом весов на основании расчёта вероятности возникновения	Ранжирование согласно ПЧР на основании расчета вероятности возникновения
Коэффициент корреляции Спирмена	0.8	0.84	0.98	0.95
Коэффициент корреляции Кенделла	0.67	0.75	0.93	0.85

Таблица 6. Ранговая корреляция после применения компромиссной оценки

	Предложенный метод на основе оценки студенческий	Предложенный метод на основе экспертной оценки	Предложенный метод со средневзвешенной оценкой
Коэффициент корреляции Спирмена	0.42	0.9	0,99
Коэффициент корреляции Кенделла	0.32	0,74	0,96

Помимо этого, в таблице 7 отражено зафиксированное количество пожаров в 2023, 2024 и 2025 годах. Внедрена система в марте 2024. Данные представлены в качестве наблюдения, из-за слишком маленького периода и иных мер по борьбе с пожарами на организации нельзя считать их полноценным доказательством, но

можно пронаблюдать положительную динамику в виде сокращения пожаров на объектах.

Таблица 7. Результаты наблюдения за пожарами на объектах

Количество пожаров на стационарных объектах												
Номер месяца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2023	7	10	15	9	12	11	14	8	10	6	9	8
2024	6	9	2	3	4	2	3	2	1	0	1	3
2025	3	1										
Итог после внедрения	Сокращение пожаров минимум в 2 раза, максимум в 9 раз в сравнении с 2023 годом											

Сравнении с другими решениями в области принятия решений по оценке рисков представлено в таблице 8.

Таблица 8. Сравнение разработанной СППР с известными методами

	Время на принятие решений	Использование альтернативных методов расчёта приоритета	Использование методов машинного обучения для прогнозирования	Поддержка обработки групповой оценки
Существующий подход ГОСТ	140-160 часов	-	-	-
Методика 1. [3,54,57-60]	5-6 часов	+	-	-
Методика 2. [56,14-16, 60]	3-4 часа	-	+	-
Предлагаемая методика	1-2 часа	+	+	+

Таким образом, реализация гибридного подхода позволила повысить эффективность оценки риска через:

- **сокращение времени** принятия решений (минимум в **2 раза** относительно методики 2 из таблицы 4),

- **прогнозирование** негативных событий с **86%** точностью на задаче с размером обработанной выборки в 800 наблюдений и **82%** с выборкой в 300 значений.

- коэффициенты ранговой корреляции близости к эталонному по Спирмену и Кендаллу в сравнении с методом из ГОСТ равны **0,98** и **0,93 соответственно**.

- коэффициенты ранговой корреляции сравнения оценок по отдельности и с использованием компромиссной равны **0,99** и **0,96** по Спирмену и Кендаллу соответственно.

В приложениях приведены оценочные бланки от эксперта и студентов по 20-ти рискам, фрагмент данных для эксперимента, описанного в главе 4, а также итоговая таблица с численными показателями при расчёте рангов по задаче из четвертой главы. В конце представлены акт о внедрении результатов исследования и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения исследования в соответствии с поставленными задачами, автором получены следующие научные результаты, которые могут эффективно использоваться как в отдельности, так и в совокупности:

- разработан гибридный подход к оценке рисков, базирующийся на интеграции методов многокритериального принятия решений и машинного обучения, что обеспечивает синергию экспертных знаний и статистических данных, повышая объективность и прогностическую способность оценки.
- предложен оригинальный метод расчёта приоритетного числа риска, учитывающий весовые коэффициенты критериев и дифференцированный уровень компетентности членов экспертной группы.
- разработан метод вероятностной оценки рисков, в котором традиционная экспертная оценка замещена прогнозной моделью, позволяющей рассчитывать вероятность наступления рискового события на основе ретроспективных данных и эксплуатационных параметров.
- разработан метод итогового ранжирования рисков, обеспечивающий построение дифференцированных уровней опасности для широкой номенклатуры (свыше 10 видов) и декомпозицию ключевых факторов влияния, что существенно повышает интерпретируемость заключений.
- реализован программный комплекс, воплощающий предложенную методологию; его отличительной особенностью является комплексная аналитика, включающая кластеризацию уровней опасности, факторный анализ и прогнозирование на новых данных, что расширяет информационную базу ЛПР за счёт синтеза расчётных показателей и экспертных оценок.

Результаты данной работы протестированы на нескольких прикладных задачах, в том числе разработанный подход был использован при оценке пожарного риска в РЖД, что подтверждено актом о внедрении.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. Подоплелова, Е. С. Прогнозирование отказов с использованием методов факторного анализа / Е. С. Подоплелова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. – № 3(245). – С. 213-223. – DOI 10.18522/2311-3103-2025-3-213-223. – EDN RLAXHN. (K2).
2. Подоплелова, Е. С. Модификация метода FMEA при помощи алгоритмов машинного обучения / Е. С. Подоплелова, И. И. Князев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 6(236). – С. 88-95. – DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-88-95. – EDN HTQKOJ. (K2)
3. Подоплелова, Е. С. Анализ методов многокритериального принятия решений на примере задачи ранжирования / Е. С. Подоплелова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 3(233). – С. 118-125. – DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-118-125. – EDN QWZEBE. (K2)

Статьи в научных изданиях, входящих в Scopus, Web of Science, RSCI

4. Knowledge-oriented methodologies for causal inference relations using fuzzy cognitive maps: A systematic review / A. Sharma, A. Tselykh, E. Podoplelova, A. Tselykh // *Computers & Industrial Engineering*. – 2022. – Vol. 171. – P. 108500. – DOI 10.1016/j.cie.2022.108500. – EDN URKMJW. (Q1)

Публикации в сборниках трудов конференций

5. Музраев, Т. А. Сравнение методов многокритериального принятия решений на примере задачи ранжирования / Т. А. Музраев, Е. С. Подоппелова // *Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности : сборник статей IX Всероссийской научно-технической конференции, Таганрог, 10–15 апреля 2023 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет". – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2023. – С. 225-227. – EDN OGFYJM.*

6. Graph Neural Network-Based Anomaly Detection in Blockchain Network / A. Sharma, P. K. Singh, E. S. Podoplelova [et al.] // *Lecture Notes in Networks and Systems : Proceedings of Fourth International Conference on Computing, Communications, and Cyber-Security, IC4S 2022, Delhi, India, 21-22 October 2022 : Conference proceedings / Tanwar S., Wierzchon S. T., Singh P. K., Ganzha M., Epiphaniou G. (eds). – Springer, Singapore, 2023. – Vol. 664. – P. 909-925. – DOI 10.1007/978-981-99-1479-1_67.*

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686914 Российская Федерация. Программа для ранжирования альтернатив по множеству критериев методом TOPSIS : № 2023686049 : заявл. 30.11.2023 : опубл. 11.12.2023, Бюл. № 12 / Е. С. Подоппелова ; правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет». – EDN IPPAWP.

Иные публикации

8. Подоппелова, Е. С. Анализ методов искусственного интеллекта, применяемых для решения задач психиатрии / Е. С. Подоппелова // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 2(226). – С. 180-189. – DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-180-189. – EDN IMHTOV. (K2)

Личный вклад автора в опубликованных трудах:

- [2] – разработана модификация метода FMEA;
- [4, 6] – предложены методы, основанные на интеграции многокритериального подхода и машинного обучения для совмещения экспертных знаний и статистических данных.
- [5] – проведен критический анализ методов многокритериального принятия решений.