

На правах рукописи



ПРУС МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РИСКОВ
В СОЦИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

1.2.2 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

Научный руководитель: **Надыкто Алексей Борисович**
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник кафедры прикладной математики ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Официальные оппоненты: **Сахарова Людмила Викторовна**
доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры фундаментальной и прикладной математики ФГБОУ ВО «Ростовский государственный экономический университет «РИНХ», г. Ростов-на-Дону

Тростянский Сергей Николаевич
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры техносферной и пожарной безопасности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Защита диссертации состоится «27» июня 2023 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.332.02 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127994, г. Москва, Вадковский пер., д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», www.stankin.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.332.02, к.т.н.

Тюрбеева Татьяна Борисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение безопасности социотехнических систем, в соответствии с концепцией риск-ориентированного управления, предполагает организацию процессов прогнозирования угроз различного характера на основе идентификации, анализа и оценки совокупности природных, техногенных и антропогенных рисков. Реализация концепции интеллектуального риск-ориентированного управления безопасностью требует преодоления противоречия между имеющимися научно-техническими и технологическими предпосылками, с одной стороны, и существующими процессами и методами обоснования решений и поддержки управления, с другой. Указанное противоречие проявляется, в частности, как наблюдаемое в различных сферах несоответствие существующих методов математического моделирования рисков, а также математического и информационно-аналитического обеспечения процедур принятия и исполнения решений уровню развития современных средств получения и технологий обработки мониторинговой информации.

Природные, техногенные и антропогенные риски являются объектами с достаточно сложной структурой, при моделировании которой необходимо учитывать закономерности развития кризисных ситуаций и функционирования систем обеспечения безопасности (СОБ), свойства объектов защиты (ОЗ) и влияние иных факторов. Применение скалярных форм представления структуры рисков становится неэффективным, например, при прогнозировании ущерба с качественно различающимися составляющими, когда необходимо рассматривать переменные, связанные с фактически несопоставимыми и неприводимыми к единому эквиваленту признаками. Использование методов векторной оптимизации предполагает установление функциональной связи между управляемыми параметрами СОБ и характеристиками последствий реализации угроз, корректный прогноз которых требует детального исследования закономерностей возникновения и развития кризисных ситуаций в рамках определенных детерминированных, либо стохастических моделей. Современные СОБ различных видов предполагают интеграцию сил, средств и ресурсов, в связи с чем формирование общих подходов при моделировании рисков становится весьма актуальным.

Развитие методов поддержки оперативного управления в условиях неполной информации представляет перспективное направление совершенствования информационно-аналитического обеспечения управления в СОБ. Генерация алгоритмов оперативного реагирования при различных инцидентах может быть основана на адаптивном моделировании аварийных и критических состояний с учетом данных текущего мониторинга, которое позволяет определять «окна возможностей» предотвращения неблагоприятных сценариев развития событий и дальнейшего снижения угроз вплоть до их полного устранения.

Актуальность тематики исследования обусловлена его общей направленностью на создание математического инструментария, предназначенного для исследования структуры рисков, а также моделирования развития кризисных состояний, который может быть реализован при генерации алгоритмов стратегического управления рисками и оперативного управления в кризисных ситуациях.

Степень разработанности темы. При решении задач информационно-аналитического обеспечения управления безопасностью используются различные методы моделирования и анализа рисков. Например, при обосновании мероприятий

по снижению рисков, классификации объектов и систем, прогнозировании последствий кризисных ситуаций могут применяться методы многокритериального анализа и векторной оптимизации (Ларичев О. И., Черешкин Д. С., Бритков В. Б., Цыгичко В. Н., Ройзензон Г. В.). Показана значительная эффективность при обосновании стратегий управления рисками методов имитационного моделирования и исследования статистических данных, использующих представление рисков композицией вероятности реализации угроз и условной вероятности последствий (Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Алехин Е. М.). При решении задач поддержки управления в условиях неполной информации применялось логико-вероятностные методы (Рыбаков А. В., Добров В. А.). В анализе техногенных рисков различных потенциально опасных объектов широко используются методы экспертной оценки и сценарный подход (Акимов В. А., Быков А. А., Белов П. Г., Владимиров В. А., Елохин Н. А.). Получили распространение методы определения показателей риска на основе моделирования поражающих факторов источников угроз (Овсяник А. И., Седнев В. А.). Дискретно-событийные методы моделирования техногенных аварий и природных катастроф применялись параллельно с описанием сценариев каскадных межсистемных аварий (Пантелеев В. А., Кириллов И. А., Шульц В. Л., Кульба В. В., Kaplan S., Haimes Y. Y., Garrick B. J.) и оценки стойкости сложных систем и сетевых структур различной природы (Wang S., Hong L., Chen X., Lu L., Wang X., Ouyang Y., Roningen J., Myers N., Calfas G., Ouyang M., Fang Y., Farsangi E. N., Takewaki I., Yang T., Astaneh-Asl A., Hickford A. J., Blainey S. P., Ortega A. H., Plant R., Buldyrev S. V., Parshani R., Pau G., Stanley H. E., Havlin S.).

Применение обсуждаемых методов для решения задач поддержки управления рисками в СОБ не позволяет, вместе с тем, в полной мере реализовать потенциальные возможности современных информационных технологий и методов имитационного моделирования. Математические модели и алгоритмы информационно-аналитической поддержки управления в СОБ должны обеспечивать проведение сравнительного анализа эффективности использования технических, финансовых и трудовых ресурсов. Решение подобных задач невозможно в рамках скалярных форм представления рисков из-за принципиальных ограничений, а эффективность применения методов векторной оптимизации невелика при отсутствии адекватных моделей, отражающих структуру взаимосвязей основных факторов рисков.

Модели и алгоритмы информационно-аналитической поддержки оперативного управления при реагировании на инциденты должны обеспечивать адекватность прогнозов развития опасных процессов и динамики критических состояний с учетом данных мониторинга текущего состояния ОЗ, а также показателей своевременности и эффективности целенаправленных действий и мероприятий.

Из вышесказанного следует вывод о перспективности развития методов стохастического моделирования многокомпонентных рисков с использованием векторно-матричных форм представления, а также дискретно-событийного описания динамики различных опасных процессов и явлений в социотехнических системах.

Объектом исследования является совокупность рисков, обусловленных угрозами природного, техногенного и антропогенного характера, а **предметом исследования** – математические методы анализа и стохастического моделирования многокомпонентных рисков в социотехнических системах.

Целью настоящей работы является повышение эффективности

информационно-аналитического обеспечения в сфере управления природными, техногенными и антропогенными рисками за счет формирования комплекса моделей, алгоритмов и программ, основанных на развитии математических методов исследования структуры и динамики многокомпонентных рисков в социотехнических системах.

Достижение цели предполагает решение следующей совокупности задач.

1. Развитие методов исследования структуры многокомпонентных рисков на основе: установления совокупности компонент матричного представления рисков, необходимой для прогнозирования возможных потерь при требуемой детализации состояний ОЗ и функционирования СОБ; разработки численного метода определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков на основе экспертных оценок; постановки задач МКО при управлении многокомпонентными рисками в социотехнических системах.

2. Развитие методов прогнозирования динамики кризисных ситуаций на основе стохастического моделирования опасных процессов и динамики критических состояний с учетом данных мониторинга и отражением вероятностных характеристик своевременности и эффективности оперативного реагирования при исследовании: вероятностных характеристик опасных отказов технических объектов (ТО) с учетом обобщенной наработки, выражаемой интегральным функционалом от основных эксплуатационных факторов; вероятностных характеристик развития опасных процессов и критических состояний по каскадным сценариям.

3. Реализация предлагаемых методов, построенных моделей и алгоритмов в комплексе проблемно-ориентированных программ численного анализа структуры и прогнозирования динамики многокомпонентных рисков, предназначенных для: определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков на основе экспертных оценок; прогнозирования потерь и анализа эффективности использования ресурсов, с учетом вероятностных оценок функционирования СОБ и состояний ОЗ; прогнозирования развития аварийных и критических состояний критических состояний по каскадным сценариям; алгоритмов риск-ориентированного управления и оперативного реагирования в кризисных ситуациях; применения методов моделирования многокомпонентных рисков для решения прикладных задач в отдельных предметных областях.

Научная новизна результатов исследования состоит в развитии математических методов стохастического моделирования структуры и динамики многокомпонентных рисков в социотехнических системах, при этом впервые:

- в предлагаемом методе моделирования структуры многокомпонентных рисков используется матричное представление стохастической связи композиции установленных вероятностных характеристик уязвимости и состояний ОЗ, параметров рассматриваемых источников угроз и вариантов функционирования СОБ с набором возможных последствий;

- в рамках моделирования процессов риск-ориентированного управления обоснованы численный метод определения вероятностных характеристик уязвимости ОЗ по экспертным оценкам, методика стохастического анализа функционирования СОБ, постановка задачи многокритериальной комбинаторной оптимизации;

- в рамках моделирования эксплуатационных многокомпонентных рисков установлена связь вероятностных характеристик опасных отказов ТО с параметрами

источников процессов деградации и обобщенной наработкой, представленной интегральным функционалом от основных эксплуатационных факторов;

- в рамках моделирования каскадных сценариев возникновения и развития кризисных ситуаций обоснован метод прогнозирования развития критических состояний и наборы аналитических решений локальных систем уравнений Колмогорова для нестационарных марковских процессов с ветвящейся структурой с учетом данных текущего мониторинга.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии математической теории рисков в области описания процессов возникновения и формирования структуры рисков, а также в создании математического аппарата моделирования процессов управления многокомпонентными рисками. Дальнейшее развитие данных моделей и методов представляет основу исследования и управления рисками в более сложных СОБ, например, в интегрированных СОБ.

Практическая значимость исследования состоит в расширении круга решаемых задач информационно-аналитической поддержки риск-ориентированного управления в социотехнических системах, в частности:

- предложенные численный метод определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков на основе экспертных оценок, а также модели и алгоритмы анализа эффективности распределения ресурсов в системах безопасности и прогнозирования динамики кризисных ситуаций реализованы в комплексе проблемно-ориентированных программ поддержки управления рисками;

- предложенные методы исследования многокомпонентных рисков применены для решения ряда прикладных задач при моделировании: процессов управления в системах обеспечения пожарной безопасности; влияния показателей качества потребляемой электроэнергии на динамику пожароопасных отказов электрооборудования; прогнозирования потребности привлечения ресурсов при масштабных кризисных ситуациях; точечной оценки и районирования территорий природно-технических систем по уровню локальных вероятностно-временных показателей геодинамического риска; процессов фильтрации в предлагаемом устройстве испытания фильтрующе-поглощающих элементов с предварительной нейтронной активацией токсичных примесей.

Методология и методы исследования. Решение поставленных задач основано на применении методов теории вероятностей, теории случайных процессов, алгебры логики, теории принятия решений, анализа иерархий, многокритериальной оптимизации.

Положения и результаты, выносимые на защиту. Выносятся в качестве защищаемых следующие результаты исследования:

- метод моделирования структуры многокомпонентных рисков с матричным представлением стохастической связи композиции вероятностных характеристик уязвимости и состояний ОЗ, параметров рассматриваемых источников угроз и вариантов функционирования СОБ с набором возможных последствий;

- модель процессов риск-ориентированного управления в социотехнических системах, основанная на постановке задач многокритериальной комбинаторной оптимизации использования ресурсов и сравнительном анализе эффективности мероприятий, направленных на обеспечение безопасности;

- стохастическая модель динамики опасных отказов технических объектов с

представлением обобщенной наработки интегральным функционалом от основных эксплуатационных факторов и совокупности наборов режимов отказов;

- каскадная стохастическая модель развития аварийных и критических состояний, с набором нестационарных решений локальных систем дифференциальных уравнений Колмогорова для прогнозирования динамики аварийных и критических состояний с учетом данных мониторинга текущего состояния;

- численный метод определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков на основе экспертных оценок, модели и алгоритмы информационно-аналитической поддержки риск-ориентированного управления, реализованные в комплексе проблемно-ориентированных программ.

Достоверность полученных результатов подтверждается последовательным применением апробированных математических методов анализа и синтеза, математическими доказательствами лемм, теорем и утверждений, результатами вычислительных экспериментов с применением предложенных моделей и методов и их программных реализаций, внутренней непротиворечивостью выводов и их согласованностью с результатами исследований других авторов.

Апробация результатов. Результаты исследований докладывались на: XXIV-й, XXV-й и XXVI-й Международной научно-технической конференции «Системы безопасности» (Москва, 2015, 2016, 2017); III-й школе-семинаре молодых ученых «Фундаментальные проблемы системной безопасности» (Елец, 2016); III-й и IV-й международной научно-практической конференции молодых ученых «Проблемы техносферной безопасности» (Москва, 2016, 2017); III-й Международной конференции «Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур» (Екатеринбург, 2017); IV-й Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (Иваново, 2017); Школе-семинаре молодых ученых «Фундаментальные проблемы системной безопасности» (Севастополь, 2017); IV-й Международной конференции и молодёжной школе «Информационные технологии и нанотехнологии» (Самара, 2018); Всероссийской научно-практической конференции «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (Воронеж, 2018); XI-й и XIII-й Международной конференции «Современные информационные технологии в образовании, науке и промышленности» (Москва, 2018, 2019); XXVII-й, XXIX-й и XXX-й Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (Москва, 2019, 2021, 2022); IV-й Международной научно-практической конференции «Информационная безопасность: вчера, сегодня, завтра» (Москва, 2021); Международной научно-практической конференции «Россия в XXI веке в условиях глобальных вызовов: современные проблемы управления рисками и обеспечения безопасности социально-экономических и социально-политических систем и природно-техногенных комплексов» (Москва, 2022).

Практическая реализация заключается в использовании результатов при:

- выполнении проекта «Разработка инновационных материалов и технологии создания нового класса трёхмерных нанокompозитных керамических изделий сложной пространственной конфигурации» в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект 0707-2020-0034);

- выполнении проекта «Разработка передовых технологий высокоскоростного многокоординатного фрезерования путем совершенствования кинематичес-

ких параметров фрез и применения новых схем формообразования» в рамках Соглашения № 22–79–10353 от 29.07.2022 с Российским научным фондом;

- проектировании систем информационно-аналитической поддержки управления оперативным реагированием на инциденты в Национальном центре управления в кризисных ситуациях МЧС России;

- выполнении НИР «Компьютерное имитационное моделирование системы массового обслуживания с переменным числом каналов» в Академии ГПС МЧС России (План научной работы Академии ГПС на 2017 г., п. 19).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 36 научных работ, из них 8 статей в журналах из перечня ВАК, 3 статьи в изданиях, включенных в библиографическую базу данных Scopus, получены патент на изобретение и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по: п. 1 – «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений (физико-математические науки)», п. 2 – «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (249 наименований) и 4 приложений, иллюстрирована 35 рисунками и 12 таблицами, содержит 227 страниц сквозной нумерации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации и степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, описаны методология и методы, представлены положения, выносимые на защиту, обоснована степень достоверности и приведены сведения об апробации результатов.

В первой главе «Исследование существующих подходов и методов моделирования процессов управления рисками в социотехнических системах» проводится критический анализ существующих подходов к моделированию опасных процессов в сложных социотехнических системах, теоретических представлений о природе и структуре техногенных, природных и антропогенных рисков, а также концепции риск-ориентированного управления безопасностью. Обсуждаются подходы к формированию математического инструментария решения задач оптимального управления рисками и прогнозирования динамики кризисных ситуаций, соответствующего современным технологиям сбора и обработки данных.

Обоснована целесообразность введения понятия многокомпонентного риска, представленного единой совокупностью количественных и качественных характеристик основных факторов риска. Перспективы совершенствования информационно-аналитического обеспечения управления в СОБ связаны с постановкой и решением задач многокритериальной оптимизации (МКО) с представлением многокомпонентных рисков в виде линейных многокомпонентных алгебраических объектов, заданных на векторных пространствах конечной размерности.

Показано, что структура природных, техногенных и антропогенных рисков требует существенной модификации формальной постановки задач МКО при

управлении в СОБ с учетом сложных функциональных \mathbf{SV} и/или неявных φ_i связей совокупности критериев управления, отражающих последствия \mathbf{D} возможных кризисных ситуаций, с управляемыми параметрами СОБ (\mathbf{X}_k) и ОЗ (\mathbf{C}^q), а также вероятностными характеристиками ($\mathbf{S}^q, \mathbf{V}^q$) уязвимости и подверженности ОЗ воздействию опасных факторов (ОФ):

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{D} : \mathbf{D} = \mathbf{S}(\mathbf{VC}) ; \mathbf{D}(\mathbf{X}) = (D_1, \dots, D_m, \dots, D_M)^T \in R_{M \times 1} ; \\ \forall m: D_m \rightarrow \min, \quad m \in \{1, \dots, M\} ; \\ \forall i: \varphi_i(\mathbf{X}) \leq b_i, \quad i = \overline{1, \dots, n} ; \\ \forall k: x_k \in \mathbf{X}_k, \quad k \in \{1, \dots, K\}, \quad x_{\bar{k}} \in \mathbf{X}_{\bar{k}}, \quad \bar{k} \in \{1, \dots, \bar{K}\}, \\ \mathbf{X} = \{\mathbf{X}_k \cup \mathbf{X}_{\bar{k}}\} = (x_1, \dots, x_k, \dots, x_K, x_{\bar{1}}, \dots, x_{\bar{k}}, \dots, x_{\bar{K}})^T \in R_{(K+\bar{K}) \times 1}, \\ \mathbf{s} = \bigcup_{q=1}^Q \mathbf{S}^q = \bigcup_{q=1}^Q (s_{il}^q), \quad \mathbf{V} = \bigcup_{q=1}^Q \mathbf{V}^q = \bigcup_{q=1}^Q (\delta_{lm} v_{lm}^q), \\ \mathbf{C} = \sum_{q=1}^Q \mathbf{C}^q = \sum_{q=1}^Q (c_1^q, \dots, c_l^q, \dots, c_L^q)^T \in R_{L \times 1}, \quad l \in \{1, \dots, L\}, \quad q \in \{1, \dots, Q\}. \end{array} \right. \quad (1.1)$$

Перспективным направлением развития информационно-аналитической поддержки риск-ориентированного управления в СОБ представляется построение математических моделей, описывающих динамику техногенных аварий и природных катастроф «каскадного» типа и позволяющих прогнозировать наиболее вероятные сценарии развития критических состояний с учетом мониторинговой информации, с генерацией на их основе алгоритмов превентивного оперативного реагирования.

Во второй главе «Разработка математических основ стохастического моделирования многокомпонентных рисков в системах обеспечения безопасности» представлен метод стохастического анализа многокомпонентных рисков на основе векторно-матричных и многоиндексных представлений результата взаимодействия составляющих – «мультипликатора» и «акселератора», связанных с группами элементов модели, отражающими, соответственно, возможности реализации угроз, а также степень уязвимости ОЗ при воздействии ОФ.

Определение 2.1. Конфигурация совокупности ОЗ связана с текущим распределением ОЗ:

$$A = \bigcup_{q=1}^Q \bigcup_{i=1}^I A_i^q, \quad i \in \{1, \dots, I\}, \quad q = \{1, \dots, Q\},$$

$$|A_i^q| = \alpha_i^q, \quad \sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^I \alpha_i^q = 1, \quad (2.1)$$

по принадлежности к группам риска (i) и отдельным состояниям (q).

При моделировании учитывается актуальная конфигурация ОЗ по подмножествам, соответствующим различным группам риска с учетом внутригруппового распределения ОЗ по текущим состояниям (2.1), влияющим на показатели риска на основе векторных представлений совокупности элементов «объекты защиты»:

$$\mathbf{C} = (c_1, \dots, c_i, \dots, c_I) = \left(\sum_{q=1}^Q c_1^q, \dots, \sum_{q=1}^Q c_i^q, \dots, \sum_{q=1}^Q c_I^q \right),$$

$$\Downarrow$$

$$\mathbf{C} = \sum_{q=1}^Q \mathbf{C}^q = \sum_{q=1}^Q (c_1^q, \dots, c_i^q, \dots, c_I^q), \quad (2.2)$$

$$\mathbf{C} \in R_{1 \times I}, \quad c_i^q = \alpha_i^q \cdot c_i.$$

Определение 2.2. Мультипликатор представляет общую вероятностно-временную характеристику многокомпонентного риска, однозначно связанную с совокупностью элементов диагональных матриц:

$$\mathbf{V}^q = \begin{pmatrix} \dot{v}_1^q & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & \dot{v}_i^q & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \dot{v}_I^q \end{pmatrix} \in R_{I \times I}, \quad (2.3)$$

являющимися вероятностно-временными характеристиками подверженности ОЗ воздействию ОФ. Компоненты \mathbf{V}^q (от лат. víctima – жертва) заданы производными по времени вероятностных характеристик v_i^q подверженности воздействию ОФ.

Определение 2.3. Акселератор представляет общую вероятностно-интенсивную характеристику риска, связанную с совокупностью элементов матриц, являющимися вероятностно-интенсивными характеристиками уязвимости ОЗ при воздействии ОФ:

$$\mathbf{S}^q = \begin{pmatrix} S_{1^q 1} & \dots & S_{1^q J} \\ \dots & \dots & \dots \\ \vdots & S_{i^q j} & \vdots \\ \dots & \dots & \dots \\ S_{I^q 1} & \dots & S_{I^q J} \end{pmatrix} \in R_{I \times J}, \quad i^q = \{1^q, \dots, I^q\}, \quad j = \{1, \dots, J\}, \quad (2.4)$$

Элементы матрицы \mathbf{S} (от англ. sensitivity – чувствительность) заданы условными вероятностями наступления последствий различных видов j в результате воздействия ОФ на ОЗ.

Совокупные ожидаемыми социально-экономические потери обусловлены воздействием рассматриваемых ОФ в течение определенного периода.

Определение 2.4. Вектор ожидаемых потерь представляет собой итоговую характеристику риска, определяемую совокупностью компонентов:

$$\mathbf{D} = (d_1, \dots, d_j, \dots, d_J) \in R_{1 \times J},$$

$$\mathbf{D} = \sum_{q=1}^Q \mathbf{D}^q, \quad \mathbf{D}^q = \mathbf{C}^q \mathbf{V}^q \mathbf{S}^q = (d_1^q, \dots, d_j^q, \dots, d_J^q). \quad (2.5)$$

Компоненты вектора (2.5) соответствуют составляющим ожидаемого ущерба по видам последствий для совокупности ОЗ (2.2).

При моделировании устанавливается связь (2.5) с фактическим выполнением функций защиты объектов (ФЗО) со стороны имеющейся совокупности сил и

средств СОБ. Для рассматриваемых ФЗО вводятся идентификаторы событий типа «наличие/отсутствие возможности выполнения», а также «фактическое выполнение/невыполнение», с булевыми переменными:

$$R_l = [1,0], \quad E_l = [1,0], \quad (l = \{1 \dots L\}).$$

Лемма 2.1. Идентификаторы R_l наличия либо отсутствия возможности выполнения ФЗО представляют детерминированные величины:

$$\begin{cases} R_l = 1 \text{ "наличие возможности"} \\ R_l = 0 \text{ "отсутствие возможности"} \end{cases} \quad (2.6)$$

Лемма 2.2. Идентификаторы E_l фактического выполнения / невыполнения ОФЗ представляют случайные величины:

$$\begin{cases} 0 \leq P(E_l = 1) \leq 1 \quad (P(E_l = 0) = 1 - P(E_l = 1)) \quad \text{при } R_l = 1, \\ P(E_l = 1) = 0 \quad (P(E_l = 0) = 1) \quad \text{при } R_l = 0. \end{cases} \quad (2.7)$$

Идентификаторы события фактического выполнения/невыполнение отдельной ФЗО выражаются произведением $(R_l^k \cdot E_l^k)$, а возможные варианты фактического выполнения совокупности ФЗО – упорядоченными наборами:

$$\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_l \cdot E_l) \dots (R_L \cdot E_L)\}, \quad l = \{1 \dots L\}. \quad (2.8)$$

Обозначение вероятности варианта выполнения совокупности ФЗО (2.9):

$$P(\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_l \cdot E_l) \dots (R_L \cdot E_L)\}), \quad l = \{1 \dots L\}. \quad (2.9)$$

Определение 2.5. Частные условные вероятности наступления последствий воздействия ОФ для представителей распределенных по состояниям ОЗ, относящиеся к заданным вариантам выполнения совокупности ФЗО:

$$S_{i^q j}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_l \cdot E_l) \dots (R_L \cdot E_L)\}}, \quad l = \{1 \dots L\} \quad (2.10)$$

представляют собой основные параметры модели, определяющие количественные характеристики ожидаемых потерь.

Предложен численный метод определения частных условных вероятностей (2.10), включающий процедуру преобразования значений ранговой шкалы экспертных оценок возможностей наступления различных исходов при воздействии ОФ на ОЗ в количественную шкалу отношений. В соответствии с принимаемой гипотезой о функциональной связи между субъективными и объективными вероятностями, описываемой психофизическим законом Стивенса, (2.10) определяются системой:

$$\begin{cases} \frac{S_{i^q k}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}}}{S_{i^q m}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}}} = \left(\frac{\prod_{j=1}^J d_{kj}}{\prod_{j=1}^J d_{mj}} \right)^{\frac{\theta}{J}}, \\ \sum_{j=1}^J S_{i^q j}^{\{(R_1 \cdot E_1) \dots (R_L \cdot E_L)\}} = 1 \end{cases} \quad (2.11)$$

где d_{**} – элементы матрицы парных сравнений, θ – численное значение степенной оценочной шкалы, согласованное с имеющимися статистическими данными.

Исследована структура распределения ОЗ с разбиением на подмножества, различающиеся по ряду значимых параметров (наличия и состояния сил и средств СОБ и пр.), с учетом вариантов возможного и фактического выполнения определенной совокупности ФЗО, соответственно обозначаемых идентификаторами $[R_1 \dots R_l \dots R_L]$ и $[E_1 \dots E_l \dots E_L]$.

Утверждение 2.1 Конфигурация распределения ОЗ по степени защищенности определяется распределением:

$$B = \bigcup_{q=1}^Q \bigcup_{i=1}^I \bigcup_{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} B_{i^q}^{[R_1 \dots R_l \dots R_L]}, \quad (2.12)$$

$$\beta_{i^q}^{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} = \left| B_{i^q}^{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} \right|, \quad \sum_{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} \beta_{i^q}^{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} = 1,$$

по принадлежности к группам риска и отдельным состояниям, а также по возможным вариантам выполнения совокупности ФЗО.

Теорема 2.1. Условные вероятности наступления последствий j -го вида в результате воздействия ОФ для заданного варианта возможного выполнения ФЗО определяются вероятностями вариантов фактического выполнения ФЗО:

$$\begin{aligned} \langle s_{i^q j} \rangle_{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} &= \\ &= \sum_{[E_1 \dots E_l \dots E_L]} s_{i^q j}^{\{(R_1 E_1) \dots (R_l E_l) \dots (R_L E_L)\}} P(\{(R_1 E_1) \dots (R_l E_l) \dots (R_L E_L)\}). \end{aligned} \quad (2.13)$$

Математические ожидания характеристик уязвимости ОЗ (2.4), с учетом распределения вариантов возможного выполнения совокупности ФЗО (2.12) и условных вероятностей (2.13), элементы (2.4) представляют условные вероятности наступления j -го вида последствий воздействия ОФ.

Теорема 2.2. Математические ожидания вероятностно-интенсивных характеристик уязвимости ОЗ определяются вероятностями вариантов фактического выполнения ФЗО, а также распределением ОЗ по степени защищенности:

$$\begin{aligned} \langle s_{i^q j} \rangle &= \sum_{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} \beta_{i^q}^{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} \cdot \langle s_{i^q j} \rangle_{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} = \\ &= \sum_{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} \beta_{i^q}^{[R_1 \dots R_l \dots R_L]} \times \\ &\times \sum_{[E_1 \dots E_l \dots E_L]} s_{i^q j}^{\{(R_1 E_1) \dots (R_l E_l) \dots (R_L E_L)\}} P(\{(R_1 E_1) \dots (R_l E_l) \dots (R_L E_L)\}) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Теорема 2.3. Составляющие вектора «ожидаемых потерь» (2.5) по состояниям ОЗ определяются математическими ожиданиями условных вероятностей наступления j -го вида последствий воздействия ОФ:

$$\begin{aligned} D^q &= (d_1^q, \dots, d_j^q, \dots, d_j^q) = C^q V^q S^q = \\ &= (c_1^q \dots c_i^q \dots c_l^q) \begin{pmatrix} v_1^q & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & v_i^q & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & v_j^q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \langle s_{1^q 1} \rangle & \dots & \langle s_{1^q j} \rangle \\ \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \langle s_{i^q j} \rangle & \vdots \\ \dots & \dots & \dots \\ \langle s_{l^q 1} \rangle & \dots & \langle s_{l^q j} \rangle \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Схема связей элементов модели (2.1–2.15) представлена на рисунке 1.

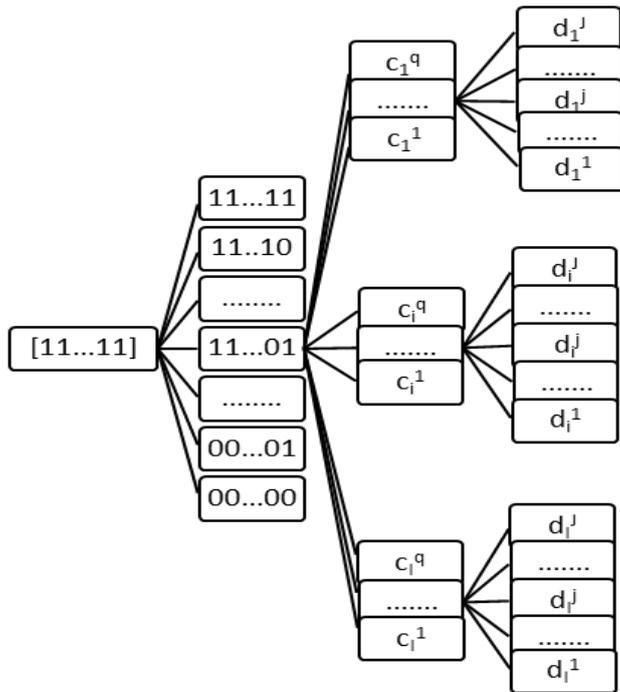


Рисунок 1 – Схема связей между элементами

$$\begin{aligned}
 & [R_1 \dots R_l \dots R_L] \\
 & \downarrow \\
 & [E_1 \dots E_l \dots E_L] \\
 & \downarrow \\
 & (c_1^q \dots c_i^q \dots c_l^q) \\
 & \downarrow \\
 & (d_1^q, \dots, d_j^q, \dots, d_l^q)
 \end{aligned}$$

модели многокомпонентных рисков

Эффективность различных вариантов управления, направленных на модернизацию сил и средств СОБ и улучшению состояний ОЗ, может оцениваться на основе решения задач МКО. При этом различные достижимые конфигурации распределения по степени защищенности и состояниям ОЗ могут выступать как в качестве переменных, так и в качестве параметров. Изменения структуры (2.12) и распределения ОЗ (2.1), должны приводить, в соответствии с (2.14, 2.15), к сокращению потерь. Вместо процедуры минимизации вектора «ожидаемых потерь» рассматривать эквивалентную процедуру максимизации вектора «предотвращенных потерь».

Определение 2.7. Вектор предотвращенных потерь сопряжен вектору ожидаемых потерь и представляет комплексную характеристику снижения риска:

$$\Delta \vec{D} = (\Delta d_1, \dots, \Delta d_j, \dots, \Delta d_J), \quad \Delta d_j = d_j(A, B) - d_j(A', B'). \quad (2.16)$$

Описываемая задача относится к классу МКО, предполагающих выполнение совокупности процедур перебора и сравнения (рисунок 2) в соответствии с некоторым алгоритмом, поэтому автор предлагает рассматривать ее как задачу многокритериальной комбинаторной оптимизации со следующей формулировкой.

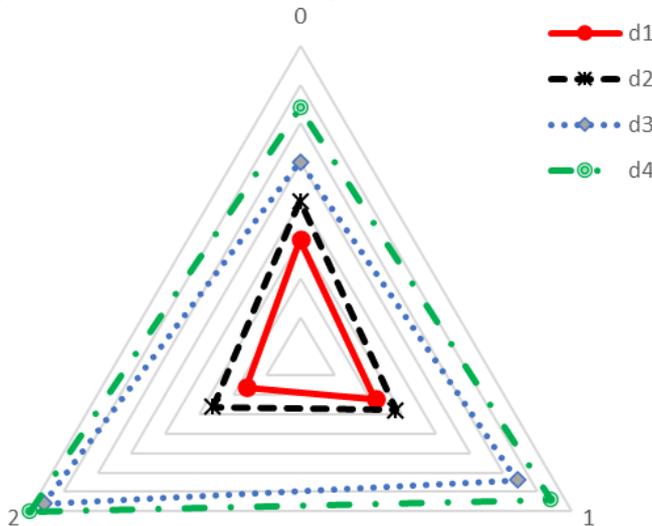


Рисунок 2 – Отдельные компоненты вектора «ожидаемых потерь» при различных вариантах (0,1,2) распределения затрат и ресурсов

Утверждение 2.2. Задача многокритериальной комбинаторной оптимизации состоит в максимизации компонент вектора «предотвращенных потерь» при

изменении конфигураций распределения ОЗ по состояниям и по степени защищенности

$$\max_{\substack{B \rightarrow B' \\ A \rightarrow A'}} \{\Delta d_1, \dots, \Delta d_j, \dots, \Delta d_J\}$$

при ограничениях на затраты Φ и ресурсы Ψ^k $k = \{1, \dots, K\}$

$$\Phi \leq \Phi_{max}, \quad \Psi^k \leq \Psi_{max}^k.$$

В третьей главе «Разработка метода моделирования эксплуатационных многокомпонентных рисков» представлены результаты моделирования многокомпонентных рисков, обусловленных возможными инцидентами при возникновении опасных отказов в процессе эксплуатации технических объектов (ТО) и систем.

Введение булевых индикаторов для опасных и неопасных режимов отказов позволяет перенумеровать все возможные режимы отказов ТО типа i :

$$l_i = l_i^f \cup l_i^{\bar{f}} = \{1^f, \dots, L_i^f\} \cup \{1^{\bar{f}}, \dots, L_i^{\bar{f}}\}, E_{l_i^f} = [1, 0], E_{l_i^{\bar{f}}} = [1, 0].$$

Далее проводится разбиение множеств, представляющего возможные наборы конкурирующих режимов отказов на подмножества, включающие опасные режимы, а также состоящие исключительно из неопасных режимов:

$$q_i = q_i^f \cup q_i^{\bar{f}} = \begin{cases} q_i^f \in Q_i = \{ \underbrace{0 \dots 1 \dots 0}_{L_i^f} \ \underbrace{0 \dots 1 \dots 0}_{L_i^{\bar{f}}} \} \\ q_i^{\bar{f}} \in Q_i = \{ \underbrace{0 \dots 0 \dots 0}_{L_i^f} \ \underbrace{0 \dots 1 \dots 0}_{L_i^{\bar{f}}} \} \end{cases} \quad (3.1)$$

На основе разбиения (3.1) и с учетом структуры распределения рассматриваемой совокупности ТО относительно типов и различных наборов конкурирующих режимов отказов, получено аналитическое решение задачи определения составляющей общей функции распределения отказов ТО типа i , соответствующей функции распределения опасных отказов:

$$F_i^f = \sum_{q_i^f \in Q_i} \vartheta(q_i^f) \cdot \frac{\left(1 - \Xi_{L_i^f}^{q_i^f} \cdot \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}\right) \cdot \left(1 - \Xi_{L_i^f}^{q_i^f}\right)}{2 - \Xi_{L_i^f}^{q_i^f} - \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}}, \quad (3.2)$$

где

$$\Xi_{L_i^f}^{q_i^f} = \prod_{l_i^f=1}^{L_i^f} \left(1 - E_{l_i^f}^{q_i^f} F_{l_i^f}\right), \quad \Xi_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f} = \prod_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} \left(1 - E_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^f} F_{l_i^{\bar{f}}}\right),$$

$F_{l_i^f}$, $F_{l_i^{\bar{f}}}$ – функции распределения отдельных опасных и неопасных отказов,

$\vartheta(q_i^f)$ – удельные коэффициенты распределения различных наборов конкурирующих режимов отказов.

В результате дискретно-событийного моделирования отказов в процессе, с применением предлагаемого автором представления обобщенной наработки интегральным функционалом от основных эксплуатационных факторов и отдельных режимов отказов трехпараметрическими распределениями Вейбулла, получено аналитическое решение для функции распределения (3.2):

$$F_i^f(\tau_2) - F_i^f(\tau_1) = \sum_{q_i^f \in Q_i} \alpha^{q_i^f} \times$$

$$\times \left[\frac{\left(1 - \exp\left(-\Theta_{L_i^f}^{q_i^f}(\tau_2) - \Theta_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}(\tau_2)\right)\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\Theta_{L_i^f}^{q_i^f}(\tau_2)\right)\right)}{\exp\left(-\Theta_{L_i^f}^{q_i^f}(\tau_2) - \Theta_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}(\tau_2)\right)} - \right. \quad (3.3)$$

$$\left. - \frac{\left(1 - \exp\left(-\Theta_{L_i^f}^{q_i^f}(\tau_1) - \Theta_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}(\tau_1)\right)\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\Theta_{L_i^f}^{q_i^f}(\tau_1)\right)\right)}{\exp\left(-\Theta_{L_i^f}^{q_i^f}(\tau_1) - \Theta_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}(\tau_1)\right)} \right].$$

где

$$\Theta_{L_i^f}^{q_i^f}(\tau_j) = \sum_{l_i^f=1}^{L_i^f} E_{l_i^f}^{q_i^f} \left(\frac{\tau_j - \theta_{l_i^f}}{\eta_{l_i^f}} \right)^{\beta_{l_i^f}}, \quad \Theta_{L_i^{\bar{f}}}^{q_i^f}(\tau_j) = \sum_{l_i^{\bar{f}}=1}^{L_i^{\bar{f}}} E_{l_i^{\bar{f}}}^{q_i^f} \left(\frac{\tau_j - \theta_{l_i^{\bar{f}}}}{\eta_{l_i^{\bar{f}}}} \right)^{\beta_{l_i^{\bar{f}}}}$$

При построении модели ТО представляются материальными носителями возникающих и развивающихся деградационных изменений, обусловленных некоторым набором источников процессов деградации (ИПД), порождающим соответствующий набор конкурирующих режимов отказов.

Представленная стохастическая модель каскадных сценариев развития кризисных ситуаций совместима с базовой моделью многокомпонентных рисков.

В четвертой главе «Разработка и моделирование каскадных сценариев возникновения и развития кризисных ситуаций» представлен способ моделирования динамики многокомпонентных рисков, применимый при решении задач информационно-аналитической поддержки управления реагированием на инциденты в условиях неполной информации. Построение стохастической модели, описывающей в рамках марковских процессов развитие аварий и катастроф по каскадным сценариям с ветвящейся структурой, предполагает выполнение гипотез:

- о каскадном характере развития событий, заключающемся в возможности реализации набора неблагоприятных сценариев вследствие возникновения инициирующего события (аварийной ситуации);

- о древовидной структуре последовательности событий с ветвлением при переходах на последующие уровни, отражаемых совокупностью переходов между состояниями системы «потенциально опасный объект – инцидент, авария, катастрофа» (ППП-ИАК), представленных вершинами стратифицированного графа (рисунок 3);

- о качественном изменении по мере развития аварийной ситуации динамики переходов между возможными состояниями системы, принадлежащими к смежным стратам.

Динамика систем ПОО-ИАК представлена в рамках нестационарных марковских процессов с ветвящейся структурой частными решениями систем уравнений Колмогорова:

адаптации построенных моделей к риск-ориентированному управлению отдельными видами безопасности, а также описание некоторых общих методик и алгоритмов, реализованных в комплексе прикладных программ (Приложения А–Г).

Предложены методика и алгоритм оценки эффективности вариантов распределения финансовых средств и трудовых затрат в СОБ, реализованные в едином программном комплексе. Адаптация модели к задачам риск-ориентированного управления пожарной безопасностью в жилом секторе позволила создать инструментарий сравнительного анализа эффективности мероприятий (рисунок 5) на основе определения наилучшего достижимого варианта по количественным и качественным параметрам сокращения потерь.

Предложены методика и алгоритм оценки эффективности вариантов распределения финансовых средств и трудовых затрат в СОБ, реализованные в едином программном комплексе. Адаптация модели к задачам риск-ориентированного управления пожарной безопасностью в жилом секторе позволила создать инструментарий сравнительного анализа эффективности мероприятий (рисунок 5) на основе определения наилучшего достижимого варианта по количественным и качественным параметрам сокращения потерь.

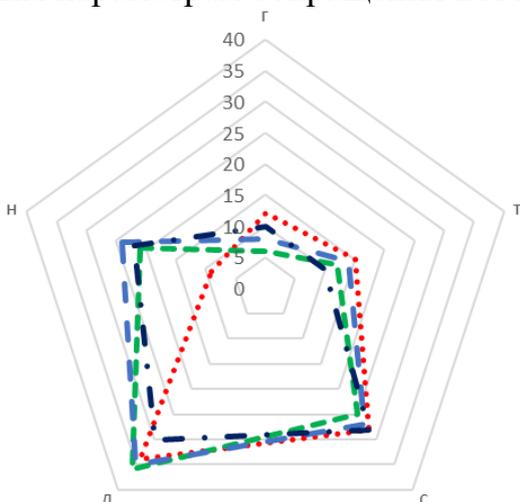


Рисунок 5 – Диаграмма ожидаемых потерь при различных вариантах использования ресурсов (г-гибель, травмы: т-тяжелые, с-средней тяжести, н- незначительные)

Создан программный комплекс для вычисления основных параметров модели многокомпонентных рисков:

- расчета вероятностных характеристик возможных вариантов фактического выполнения совокупности функций ПЗ (2.9);
- частных условных вероятностей (2.10) по результатам преобразования ранговых значений экспертных оценок с использованием логарифмической оценочной шкалы (2.11);
- условных вероятностей (2.13) по результатам расчета (2.9–2.11), вероятностей возможных вариантов фактического выполнения совокупности функций ПЗ;
- математических ожиданий (2.14) вероятностно-интенсивных характеристик уязвимости ОЗ и компонент вектора «ожидаемых потерь» (2.15).

Созданы алгоритмы и программный комплекс прогнозирования развития аварийных и критических состояний по каскадному сценарию в рамках входящей в информационную подсистему прогнозирования рисков транспортировки опасных грузов модели (рисунок 6) «транспортное средство-опасный груз» (ТС-ОГ) для определения:

- коэффициентов масштаба, формы и сдвига (4.2), определяющих

интенсивности переходов в системе ТС-ОГ по результатам экспертных оценок;

- прогнозирования динамики опасных процессов (рисунок 4) в системе ТС-ОГ на основе частных локальных решений (4.3–4.4);
- прогнозирования эффективности АСНР (рисунок 7) в соответствии с допустимой вероятностью перехода в критическое состояние системы ТС-ОГ.

Построена дискретно-событийная модель, а также разработаны алгоритм и программа имитационного моделирования функционирования СМО в условиях прогнозируемого нестационарного потока требований для оптимизации ресурсов, привлекаемых при управлении в масштабных кризисных ситуациях.

Построена модель, описывающая возникновение факторов пожарно-электрического вреда, обусловленных влиянием качества потребляемой электроэнергии на пожароопасные отказы электрооборудования, предназначенная для создания экспериментальных методик по определению сроков пожаробезопасной эксплуатации электрооборудования (рисунок 8) и оценки основных параметров ПЭВ.

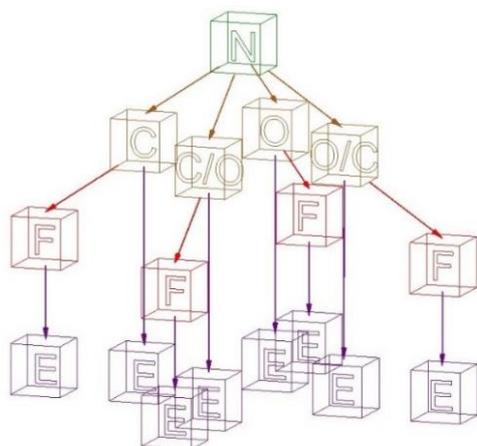


Рисунок 6 – Стратифицированный граф состояний системы ТС-ОГ (С-столкновение, О-опрокидывание, F-пожар, E-взрыв)

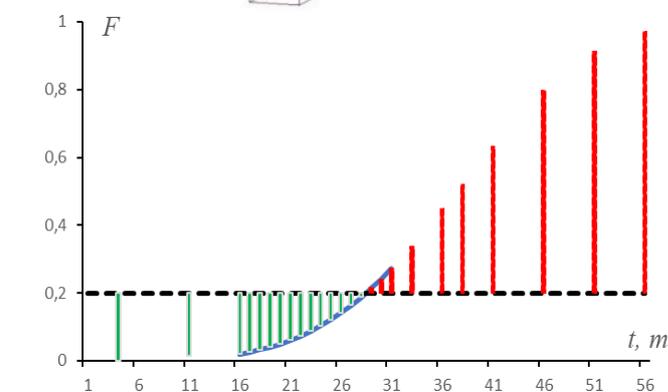


Рисунок 7 – Определение «окна возможностей» оперативного реагирования в соответствии с допустимой вероятностью перехода в критическое состояние системы ТС-ОГ

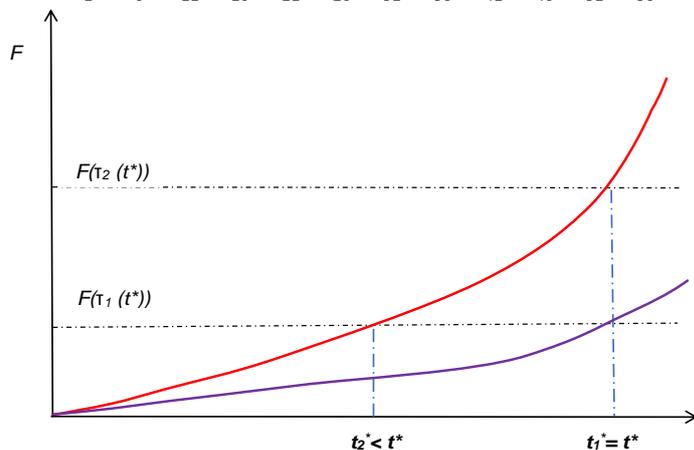


Рисунок 8 – Оценка влияния отклонений параметров качества электроэнергии на пожаробезопасный ресурс электрооборудования

Построена прикладная стохастическая модель точечно-площадной оценки и районирования территорий природно-технических систем по уровню вероятно-

стно-временных показателей геодинамического риска, основанная на представлении геологической среды в различных геодинамических состояниях и описании переходов между ними по результатам комплексной оценки энергетических параметров физических процессов с использованием наблюдательных данных.

Построена модель, описывающая динамику процессов фильтрации токсичных примесей, предназначенная для решения ряда задач информационно-аналитического обеспечения и автоматизации устройства испытаний, реализующего запатентованный автором способ нейтронно-активационного анализа (рисунки 9,10).

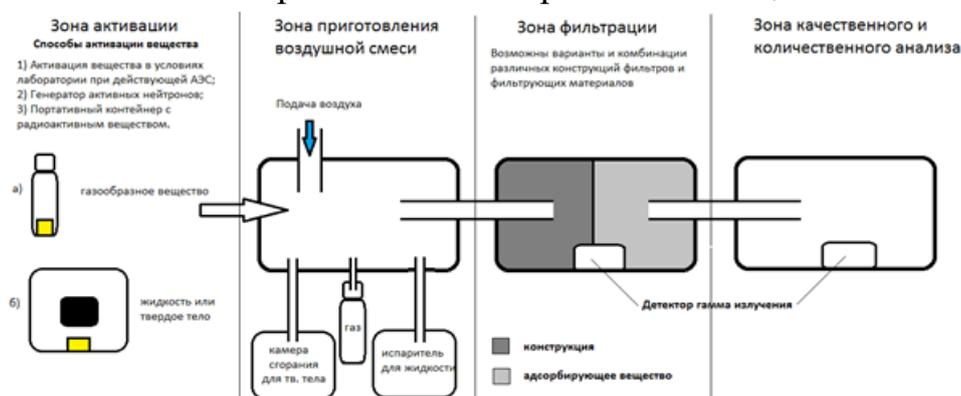


Рисунок 9 – Устройство стенда испытаний ФПЭ СИЗОД с предварительной нейтронной активацией тестируемых проб

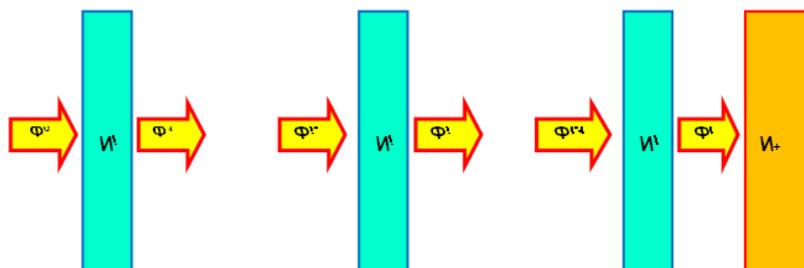


Рисунок 10 – Схема процесса фильтрации ФПЭ СИЗОД

Предлагаемые методики, алгоритмы и программные продукты могут применяться для информационно-аналитической поддержки риск-ориентированного управления в СОБ и оперативного реагирования в кризисных ситуациях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой решалась актуальная задача построения математических моделей и обоснования новых аналитических и численных методов исследования структуры и динамики многокомпонентных рисков в социотехнических системах. Решаемая задача имеет важное фундаментальное значение для развития таких отраслей знаний как математическая кибернетика и исследование операций, и прикладное значение, например, для информационно-аналитической поддержки риск-ориентированного управления в различных системах обеспечения безопасности.

В ходе исследования получены новые научно обоснованные решения ряда задач прогнозирования угроз и их последствий, представляющие интерес для исследования различных природных, техногенных и антропогенных рисков, а также построения математических моделей и алгоритмов риск-ориентированного управления и оперативного реагирования в кризисных ситуациях.

1. Предложен метод моделирования структуры многокомпонентных рисков, основанный на матричном представлении стохастической связи композиции установленных вероятностных характеристик уязвимости и состояний ОЗ, параметров рассматриваемых источников угроз и вариантов функционирования СОБ с

набором возможных последствий.

2. Предложен численный метод определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков, основанный на преобразовании значений ранговой шкалы экспертных оценок вероятностей возможных исходов при воздействии ОФ на ОЗ в количественную шкалу отношений в соответствии с положениями репрезентативной теории измерений.

3. Предложена общая методика определения вероятностных характеристик функционирования СОБ, основанная на дискретно-событийном моделировании срабатывания технических средств защиты от ОФ.

4. Построена общая модель процессов риск-ориентированного управления, основанная на постановке задач многокритериальной комбинаторной оптимизации использования ресурсов и сравнительном анализе эффективности мероприятий, направленных на обеспечение безопасности социотехнических систем.

5. Построена общая модель динамики опасных отказов технических объектов, основанная на представлении связи параметров наборов источников процессов деградации с обобщенной наработкой интегральным функционалом от значимых эксплуатационных факторов.

6. Предложен метод моделирования «каскадных» аварий и катастроф, а также построена стохастическая модель прогнозирования аварийных и критических состояний при локальных инцидентах, отражающая вероятностные характеристики своевременности и эффективности целенаправленных воздействий при оперативном реагировании.

7. Построены дискретно-событийная модель СМО с переменным числом каналов и алгоритм прогнозирования потребности привлечения ресурсов при масштабных кризисных ситуациях для оптимизации использования сил и средств.

8. Построена модель пожарно-электрического вреда, описывающая влияние показателей качества потребляемой электроэнергии на динамику пожароопасных отказов электрооборудования.

9. Построена модель точечной оценки и районирования территорий природно-технических систем по уровню вероятностно-временных показателей геодинамического риска, основанные на комплексной оценке физических параметров опасных геодинамических процессов по наблюдательным данным.

10. Построена модель динамики процессов фильтрации с учетом измеряемых уровней остаточной радиоактивности в предлагаемом устройстве испытания фильтрующе-поглощающих элементов с предварительной нейтронной активацией токсичных примесей.

11. Разработан комплекс проблемно-ориентированных программ и алгоритмов поддержки управления рисками в социотехнических системах, в котором реализованы предложенные численный метод определения вероятностных характеристик многокомпонентных рисков на основе экспертных оценок, а также модели и алгоритмы анализа эффективности распределения ресурсов в СОБ и прогнозирования динамики кризисных ситуаций.

12. Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать в области обеспечения различных видов безопасности для исследования, прогнозирования и управления природными, техногенными и антропогенными рисками, при проектировании информационно-аналитических систем и программно-аппаратных

средств поддержки риск-ориентированного управления и оперативного реагирования в кризисных ситуациях, а также реализации образовательных программ высшего образования по направлениям: «Прикладная математика и информатика», «Техносферная безопасность», «Информационная безопасность».

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ:

в научных изданиях, включенных в библиографическую базу данных Scopus:

1. Prus, Y. V. Method of Determining Expected Losses from Fires in the Residential Sector / Y. V. Prus, V. V. Tatarinov, **М. Ю. Прус**, A. A. Chistiakova // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2383. – Iss. 1. – P. 040020 (1–7).
2. Prus, Y. V. Relationship and Probabilistic Characteristics of Basic Fire Protection Functions / Y. V. Prus, V. V. Tatarinov, **М. Ю. Прус**, A. A. Chistiakova // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2383. – Iss. 1. – P. 040018 (1–8).
3. Prus, Y. V. Matrix representation of emergency risks / Y. V. Prus, V. V. Tatarinov, **М. Ю. Прус** // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2383. – Iss. 1. – P. 020005 (1–7).

в научных изданиях, рекомендованных ВАК России:

4. Гончаренко, В. И. Мониторинг распространения лесных пожаров группировкой беспилотных летательных аппаратов / В. И. Гончаренко, Лэ Луо, **М. Ю. Прус** // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – №4 (62). – С. 154–163.
5. Бутузов, С. Ю. Методика оценки показателей надёжности электрических аппаратов защиты электросети / С. Ю. Бутузов, Е. Н. Минеев, **М. Ю. Прус** // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 3(67). – С. 33–39.
6. Беленький, В. М. Оценка безопасности труда с использованием методов регрессионного анализа и нейронных сетей / В. М. Беленький, **М. Ю. Прус**, В. Г. Спиридонов // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 4(68). – С. 278–283.
7. Прус, М. Ю. Математические основы стохастического моделирования многокомпонентных рисков в системах обеспечения безопасности / **М. Ю. Прус** // Технологии техносферной безопасности. – 2021. – № 4(94). – С. 125–143.
8. Прус, М. Ю. Стохастическое моделирование каскадных сценариев возникновения и развития чрезвычайных ситуаций / **М. Ю. Прус** // Технологии техносферной безопасности. – 2022. – № 1(95). – С. 170–195.
9. Прус, М. Ю. Математические основы стохастического моделирования динамики эксплуатационных рисков в социотехнических системах / **М. Ю. Прус** // Технологии техносферной безопасности. – 2022. – № 2(96). – С. 161–179.
10. Прус, М. Ю. Моделирование пожароопасных отказов электрооборудования и оценка пожарно-электрического вреда / **М. Ю. Прус**, А. В. Периков // Технологии техносферной безопасности. – 2022. – № 3 (97). – С. 190–201.
11. Прус, М. Ю. Численный метод определения вероятностных характеристик индивидуальных многокомпонентных рисков / **М. Ю. Прус**, М. С. Жубанов, Ю. В. Прус // Технологии техносферной безопасности. – 2022. – № 4 (98). – С. 144–157.

в других изданиях:

12. Прус, М. Ю. Облачные сервисы в системе управления службами экстренного реагирования / **М. Ю. Прус**, Ю. И. Ходаренкова // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий ЧС. – 2015. – № 1–1(4). – С. 248–251.

13. Волков, П. В. Инфокоммуникационное обеспечение АПК «Безопасный город» на базе ЦУКС / П. В. Волков, **М. Ю. Прус**, А. Ю. Сарафонов, Т. И. Тангиев, Ю. И. Ходаренкова // Матер. XXIV-й межд. науч.-техн. конф. «Системы безопасности». – М.: АГПС, 2015. – С. 33–36.
14. Минеев, Е. Н. Об оценке показателей надёжности электрических аппаратов защиты электросети / Е. Н. Минеев, **М. Ю. Прус** // Матер. XXIV-й межд. науч.-техн. конф. «Системы безопасности». – М.: АГПС, 2015. – С. 296–300.
15. Прус, М. Ю. Панорамный радиометрический комплекс раннего обнаружения очага лесного пожара / **М. Ю. Прус**, А. В. Клыгин // Матер. V-й межд. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности». – М.: АГПС, 2016. – С. 198–200.
16. Прус, М. Ю. Инфокоммуникационное обеспечение в территориальных системах безопасности: проблемы и перспективы развития / **М. Ю. Прус** // Матер. III-й школы-сем. молодых ученых «Фундаментальные проблемы системной безопасности». – Ч 2. – Елец: ЕГУ, 2016. – С. 40–44.
17. Рожнов, А. В. Развитие виртуальной семантической среды интеграцией компонентов тренажёрных комплексов различного назначения / А. В. Рожнов, **М. Ю. Прус**, Нгуен Ба Туан // Мат. XXV-й межд. науч.-техн. конф. «Системы безопасности». – М.: АГПС, 2016. – С. 68–72.
18. Прус, М. Ю. Определение защитных свойств фильтрующе-поглощающих элементов методом нейтронной активации / **М. Ю. Прус** // Матер. IV-й школы-семина. молодых ученых «Фундаментальные проблемы системной безопасности». – Севастополь: СГУ, 2017. – С. 104–108.
19. Прус, М. Ю. Применение нейтронной активации для исследования защитных свойств ФПЭ СИЗОД / **М. Ю. Прус**, И. А. Егоров // Матер. VI-й межд. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности». – М.: АГПС, 2017. – С. 273–277.
20. Прус, М. Ю. Инфокоммуникационное обеспечение мониторинга и диагностики технического состояния потенциально опасных объектов на основе технологий иммерсивного телеприсутствия / **М. Ю. Прус**, А. Н. Попов, С. П. Мошкин // Матер. IV-й Всерос. науч.-практ. конф. «Акт. вопр. соверш. инженер. систем обеспеч. пожарной безопасности объектов». – Иваново: ИПСА ГПС, 2017. – С. 182–186.
21. Прус, М. Ю. Применение технологий иммерсивного телеприсутствия для мониторинга и диагностики технического состояния потенциально опасных объектов / **М. Ю. Прус**, А. Н. Попов // Матер. III-й межд. конф. «Пробл. безоп. строит. критичных инфраструктур (SAFETY 2017)». – Екатеринбург: УФУ, 2017. – С. 82–90.
22. Прус, М. Ю. Алгоритм выбора объекта закупки путём решения задачи многокритериальной оптимизации / **М. Ю. Прус**, А. В. Прокушин, А. А. Погонин // Матер. XXVI-й межд. научн.-техн. конф. «Системы безопасности». – М.: АГПС, 2017. – С. 92–94.
23. Melnikov, V. F. Multi-heuristic and game approaches in search problems of the graph theory / V. F. Melnikov, E. A. Melnikova, S.V. Pivneva, N. P. Churikova, V. A. Dudnikov, **M. Y. Prus** // Сб. тр. IV-й междунар. конф. и мол. школы «Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2018)». – Самара: «Новая техника», 2018. – С. 2884–2892.
24. Прус М. Ю. Имитационная модель СМО с переменным числом каналов / **М. Ю. Прус**, А. С. Мосолов // Матер. XI-й межд. конф. «Соврем. информ. технологии

- в образовании, науке и промышленности». – М.: РГСУ, 2018. – С. 161–164.
25. Прус, М. Ю. Матричное представление техногенных, природных и пожарных рисков / **М. Ю. Прус** // Матер. XXVI-й межд. конф. «Пробл. управл. безопасностью сложных систем». – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 237–242.
26. Кирсанов, А. А. Системы информирования об автомобильной аварии / А. А. Кирсанов, **М. Ю. Прус**, Д. С. Туниев // Матер. XXVI-й межд. конф. «Пробл. управл. безопасностью сложных систем». – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 372–377.
27. Кирсанов, А. А. Система поддержки управления безопасностью автомобильных перевозок опасных грузов / А. А. Кирсанов, **М. Ю. Прус**, Д. С. Туниев // Матер. XIII-й межд. конф. «Соврем. информ. технол. в образ., науке и промышл.». – М.: РГСУ, 2019. – С. 131–133.
28. Периков, А. В. Моделирование пожарно-электрического вреда в системе качества потребляемой электроэнергии / А. В. Периков, **М. Ю. Прус** // Матер. VII-й Всерос. науч.-практ. конф. «Акт. вопр. соверш. инженерн. систем обеспеч. пожарной безопасности объектов». – Иваново: ИПСА ГПС, 2020. – С. 319–323.
29. Прус, Ю. В. Исследование эффективности систем противопожарной защиты на основе матричного представления пожарных рисков / Ю. В. Прус, А. А. Чистякова, **М. Ю. Прус** // Техносферная безопасность. – 2020. – № 3(28). – С. 44–62.
30. Прус, М. Ю. Стохастическое моделирование каскадных аварий на потенциально опасных объектах / **М. Ю. Прус**, А. А. Кондратюк, Ю. В. Прус, В. С. Путин // Матер. IV-й межд. науч.-практ. конф. «Информационная безопасность: вчера, сегодня, завтра». – М.: РГГУ, 2021. – С. 55–61.
31. Попов, А. Н. Стохастическое моделирование геодинамической устойчивости территорий / А. Н. Попов, **М. Ю. Прус**, Л. В. Краснова // Технологии гражданской безопасности. – 2021. – № 2 (68). – С. 71–74.
32. Прус, М. Ю. Стохастическое моделирование каскадных сценариев развития аварий и катастроф / **М. Ю. Прус** // Матер. XXIX-й межд. конф. «Пробл. управл. безопасностью сложных систем». – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 411–420.
33. Прус, М. Ю. Приложения теории многокомпонентных рисков к задачам векторной оптимизации рискориентированного управления в системах обеспечения безопасности / **М. Ю. Прус**, М. С. Жубанов, И. А. Лобанов, Ю. В. Прус // Матер. Всерос. науч.-практ. конф. «Россия в XXI веке в условиях глобальных вызовов: проблемы управл. рисками и обеспеч. безопасности соц.-эконом. и соц.-политич. систем и природно-техногенных комплексов». – Т. 2. – М.: ГУУ, 2022. – С. 95–101.
34. Прус, М. Ю. Об объективизации экспертных оценок вероятностей редких событий / **М. Ю. Прус**, М. С. Жубанов, И. А. Лобанов., Ю. В. Прус // Матер. XXX-й межд. конф. «Пробл. управл. безопасн. сложных систем». – М.: ИПУ РАН, 2022. – С. 111–118.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и патенты:

35. Алехин, Е. М. Имитационное моделирование СМО с переменным числом каналов обслуживания / Е. М. Алехин, Ю. В. Прус, **М. Ю. Прус** // Свид. о рег. прогр. для ЭВМ RU 2017663686, 11.12.2017.
36. Егоров, И. А. Способ и устройство оценки эффективности защитного действия фильтрующих элементов и/или устройств / И. А. Егоров, **М. Ю. Прус**, Ю. В. Прус, Т. Ю. Еремина // Патент на изобретение RU 2646949 С2, 12.03.2018.