

Application of Risk Tree to Assess the Reliability of Tethered High-Altitude Unmanned Platform

N. M. Ivanova¹, V. M. Vishnevsky¹

DOI: [10.18255/1818-1015-2026-2-230-255](https://doi.org/10.18255/1818-1015-2026-2-230-255)

¹V. A. Trapeznikov Institute of Control Science of RAS, Moscow, Russia

MSC2020: 90B25

Research article

Full text in Russian

Received October 31, 2025

Revised April 21, 2026

Accepted April 28, 2026

This paper addresses the problem of reliability assessment for a tethered high-altitude unmanned telecommunication platform using the risk tree analysis method. The aim of the study is to develop and test a methodology for the quantitative estimation of the probability of risk events and the associated material damage during long-term platform operation. A disruption in the provision of broadband wireless communication services by the platform is considered as the resulting risk event. A detailed technical description of the tethered platform “Albatros” is provided, which serves as the basis for identifying risk events. The general theory and methodology for constructing and analyzing a risk tree are presented, including the parameterization of the model with probabilistic and cost characteristics. Using the tethered high-altitude unmanned telecommunication platform as a case study, a comprehensive numerical investigation is carried out. Within this investigation, a sensitivity analysis of key output indicators — namely, the reliability function, quantiles, mean time to failure, and expected damage — is conducted with respect to the statistical properties of failure times, specifically the coefficient of variation and the distribution shape. The practical conclusions derived from the study demonstrate that the use of adequate probabilistic models (as opposed to simplified exponential ones) is critical for obtaining realistic forecasts. The most dangerous risk evolution scenarios are identified, and the contribution of factors influencing the occurrence of these events is quantitatively assessed. The proposed methodology is universal and can be applied to a wide range of complex technical systems, including other tethered platforms whose architectures allow decomposition into key components with established logical relationships between their failures. The obtained results can be used for the evidence-based design of such systems, the planning of scheduled maintenance, and the optimization of technical support strategies.

Keywords: tethered high-altitude unmanned platform; reliability; risk; probabilistic risk analysis; risk tree; failure probability; most dangerous path; sensitivity

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanova, Nika M. (corresponding author)	ORCID iD: 0000-0002-6593-5881 . E-mail: nm.ivanova@bk.ru PhD, Senior Researcher
Vishnevsky, Vladimir M.	ORCID iD: 0000-0001-7373-4847 . E-mail: vishn@inbox.ru Dr. Sc., Chief Researcher

For citation: N. M. Ivanova and V. M. Vishnevsky, “Application of risk tree to assess the reliability of tethered high-altitude unmanned platform”, *Modeling and Analysis of Information Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 230–255, 2026.

DOI: [10.18255/1818-1015-2026-2-230-255](https://doi.org/10.18255/1818-1015-2026-2-230-255).

Применение метода деревьев рисков для повышения надежности привязной высотной беспилотной платформы

Н. М. Иванова¹, В. М. Вишнеvский¹

DOI: [10.18255/1818-1015-2026-2-230-255](https://doi.org/10.18255/1818-1015-2026-2-230-255)

¹Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

УДК 519.87

Научная статья

Полный текст на русском языке

Получена 31 октября 2025 г.

После доработки 21 апреля 2026 г.

Принята к публикации 28 апреля 2026 г.

В статье рассматривается проблема оценки надёжности привязной высотной беспилотной телекоммуникационной платформы с использованием метода анализа дерева рисков. Целью работы является разработка и апробация методики, позволяющей количественно оценивать вероятность возникновения рисковvх ситуаций и связанных с ними материальныйvх ущерб при длительной эксплуатации платформы. В качестве резульvтирующего рискового события рассмотрен сбой в обеспечении широкополосной беспроводной связи, выполняемой платформой. Представлено подробное техническое описание привязной платформы «Альбатрос», послужившее основой для выделения рисковvх событий. Изложена общая теория и методология построения и анализа дерева рисков, включая оснащение модели вероятностными и стоимостными параметрами. На примере привязной высотной беспилотной телекоммуникационной платформы реализовано комплексное численное исследование, в рамках которого проведён анализ чувствительности ключевых выходных показателей (функции надёжности, квантилей, среднего времени до отказа, ожидаемого ущерба) к статистическим свойствам времени наступления отказов — коэффициенту вариации и типу распределения. Практические выводы, полученные по результатам исследования, показывают, что использование адекватных вероятностных моделей (в отличие от упрощённых экспоненциальных) критически важно для получения реалистичных прогнозов; выявлены наиболее опасные сценарии развития рисковvх ситуаций и количественно оценён вклад факторов, влияющих на наступление этих событий. Предложенная методология является универсальной и может быть применена к широкому кругу сложных технических систем, в том числе другим привязным платформам, архитектура которых допускает декомпозицию на ключевые компоненты с установлением логических связей между их отказами. Полученные результаты могут быть использованы для обоснованного проектирования таких систем, планирования регламентных работ и оптимизации стратегий технического обслуживания.

Ключевые слова: привязная высотная беспилотной платформа; надёжность; риск; вероятностный анализ рисков; дерево рисков; вероятность отказа; наиболее опасный путь; чувствительность

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванова, Ника Михайловна (автор для корреспонденции)	ORCID iD: 0000-0002-6593-5881 . E-mail: nm_ivanova@bk.ru Канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник
Вишнеvский, Владимир Миронович	ORCID iD: 0000-0001-7373-4847 . E-mail: vishn@inbox.ru Доктор техн. наук, главный научный сотрудник

Для цитирования: N. M. Ivanova and V. M. Vishnevsky, “Application of risk tree to assess the reliability of tethered high-altitude unmanned platform”, *Modeling and Analysis of Information Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 230–255, 2026.
DOI: [10.18255/1818-1015-2026-2-230-255](https://doi.org/10.18255/1818-1015-2026-2-230-255).

Введение

На протяжении последнего десятилетия наблюдается стремительное развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА, UAV), которые находят широкое применение в гражданской и военной сферах благодаря своим преимуществам перед традиционными техническими системами. Одними из ключевых показателей их эффективности является экономичность и простота развертывания.

Известно, что автономные БПЛА имеют существенные ограничения по времени функционирования из-за мощности двигателей, веса полезной нагрузки и других факторов. В связи с этим особое внимание уделяется разработке привязных платформ на базе БПЛА (tethered UAV, tUAV), обеспечивающих длительное функционирование за счет внешнего питания [1]. Такие системы применяются для решения широкого круга задач, включая охрану критически важных объектов, разведку, радиоэлектронную борьбу, пожаротушение [2], спасение людей в чрезвычайных ситуациях [3], организацию широкополосной беспроводной связи [4, 5], развертывание телекоммуникационной инфраструктуры [6], а также использование в сельском хозяйстве [7]. Обзор современных исследований, посвященных привязным высотным беспилотным платформам, представлен в работах [8–10]. В качестве компромиссного решения между автономностью и непрерывным питанием недавно были предложены прерывисто привязные БПЛА (intermittently tethered UAV, itUAV) [11], а также гибридные системы, сочетающие автономные и привязные аппараты [12].

Привязные платформы представляют собой БПЛА, соединенные кабель-тросом с наземной станцией, через который осуществляется передача энергии и данных. По сравнению с автономными БПЛА они обладают рядом особенностей:

- теоретически неограниченное время полета, определяемое лишь износом компонентов и внешними условиями;
- ограниченная дальность полета, зависящая от длины кабель-троса, но компенсируемая возможностью длительного функционирования;
- высокие надежность и скорость передачи данных благодаря проводному соединению;
- мобильность, обеспечиваемая размещением наземной станции на транспортных средствах.

В настоящее время разработкой привязных БПЛА занимаются такие компании, как Elistair (Франция, США), Ziyun (Китай), Drone Evolution (Великобритания), Logos Technology, Zenith Aerotech (обе — США) и др. В научной литературе рассматриваются различные аспекты их функционирования, включая автоматическое позиционирование без использования GPS [13], механические свойства кабель-троса [14, 15], алгоритмы взлета и посадки [16] и другие.

Отечественным примером подобной системы является привязная высотная беспилотная телекоммуникационная платформа «Альбатрос», разработанная ИПУ РАН. Ее характеристики соответствуют лучшим зарубежным аналогам [17], а математические модели и технические решения подробно описаны в многочисленных работах авторов данной статьи [17, 18].

Обеспечение высокой надежности привязных платформ требует комплексного подхода, сочетающего математическое моделирование и инженерные решения. В недавних исследованиях для анализа надежности использовались системы типа k -из- n [19] в качестве математических моделей БПЛА, а также оценивалась надежность всей платформы с помощью вероятностного подхода [20]. Традиционно для подобных задач применяется метод деревьев отказов [21, 22].

Целью данной работы является применение методологии, близкой к анализу деревьев отказов, но основанной на построении и исследовании дерева рисков. В рамках этого подхода риск рассматривается как случайная величина, заданная на вероятностном пространстве, с двумя ключевыми характеристиками: временем наступления рискованного события и величиной причиняемого ущерба [23]. Надежность системы определяется как вероятность невозникновения события, приводящего к сбою или прекращению выполнения задачи.

Понятие риска возникло в 1930-х годах в рамках страховой математики, где изучалась вероятность разорения в коллективной модели риска [24, 25]. Со временем эта концепция расширилась и стала включать и индивидуальные риски, а ее развитие привело к формированию современной математической теории риска [26, 27]. В последние годы концепция риска приобрела значительную популярность благодаря своей значимости при анализе рисков в различных областях человеческой деятельности.

С точки зрения математического формализма риск подразумевает неопределенность [28], включая вероятность потери, нанесения ущерба и стохастический характер реализации угроз. В данной статье используется вероятностный подход, основанный на построении дерева рисков, которое позволяет лицу, принимающему решения (ЛПР), управлять рисками, зная структуру и параметры рассматриваемой системы [29]. В этом подходе вероятностное пространство, связанное с любым событием риска, специализировано с использованием построенного дерева рисков. Методология позволяет не только оценить вероятность и последствия рисков событий, но и выявить наиболее критические сценарии развития рисков ситуаций [30].

Для реализации подхода в качестве исходных параметров рассматривается среднее время до наступления рисков событий, а также среднее значение причиняемого ущерба, выраженного в денежном эквиваленте. При этом в отличие от ряда исследований, где для упрощения моделирования зачастую применяется экспоненциальное распределение времени наступления отказов (см., например, [31, 32]), в данной работе предлагается подход, позволяющий рассматривать более широкий класс распределений, более точно отвечающий практическим задачам и соответствующих реальным процессам износа в технических системах [33]. Таким образом, ключевой задачей становится анализ чувствительности [34], направленный на оценку того, насколько существенно может измениться прогноз надежности и ожидаемого ущерба в зависимости от выбора закона распределения и его коэффициента вариации исходных параметров. Такой анализ позволяет количественно оценить «цену» ошибки, возникающей при использовании некорректных упрощенных моделей, и обосновать необходимость тщательного сбора статистики и выбора адекватных вероятностных описаний отказов на этапе проектирования и оценки рисков. Под чувствительностью здесь понимается степень влияния изменения исходных параметров модели на результирующие показатели надежности.

Ранее авторы применяли данный подход для анализа надежности летного модуля привязной платформы [35]. В настоящей работе эта методология расширена на всю систему, при этом для численного анализа используются данные исходных характеристик (средние значения), соответствующие техническим характеристикам, или оценочные, близкие к реальным параметрам привязной высотной беспилотной телекоммуникационной платформы «Альбатрос» [20].

Статья организована следующим образом. В разделе 1 описываются архитектура привязной высотной беспилотной телекоммуникационной платформы «Альбатрос» и ее основные компоненты. Раздел 2 посвящен основным понятиям применяемой математической теории рисков, используемым обозначениям и вероятностно-временным характеристикам рисков. Раздел 3 содержит общую методологию построения дерева рисков, которая проиллюстрирована на примере привязной высотной беспилотной телекоммуникационной платформы «Альбатрос» из раздела 1. Численные результаты анализа представлены в разделе 4. В заключении приведены основные выводы и направления дальнейших исследований.

1. Привязная высотная беспилотная телекоммуникационная платформа «Альбатрос»

Привязная высотная беспилотная телекоммуникационная платформа «Альбатрос» (рис. 1) представляет собой сложную техническую систему, состоящую из следующих основных компонентов:



Fig. 1. Tethered high-altitude telecommunication platform "Albatros"

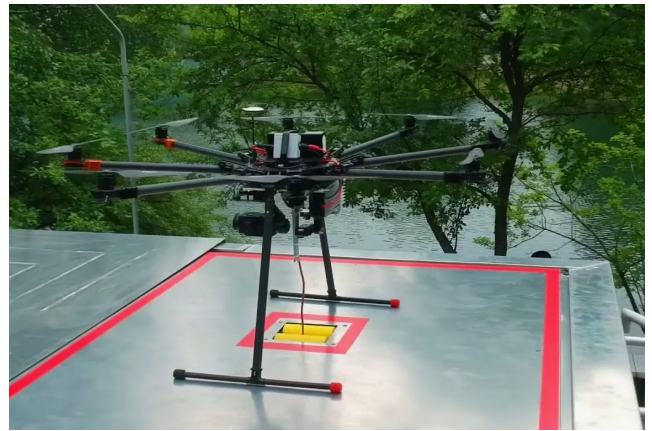


Рис. 1. Привязная высотная беспилотная платформа «Альбатрос»

- беспилотный мультироторный летный модуль на базе БПЛА, включающий двигательные установки, систему управления, навигационно-посадочное устройство, систему связи и др.;
- наземный модуль, содержащий подсистему интеллектуального подъемного механизма, подсистему питания, систему связи и систему передачи энергии земля-борт большой мощности;
- кабель-трос на кевларовой основе, в состав которого входят медные провода для передачи высоковольтных сигналов и оптическое волокно для передачи цифровых данных;
- резервная система навигации, обеспечивающая стабильное функционирование платформы при ослаблении/глушении сигналов GPS/ГЛОНАСС;
- бортовая аппаратура полезной нагрузки, размещенная на летном модуле и включающая специализированное оборудование для выполнения целевых задач, например, телекоммуникационное оборудование, видеокамеру и др.

Далее рассмотрим функциональные особенности, назначение и взаимосвязи компонентов платформы.

1.1. Беспилотный модуль

Беспилотный летательный модуль представляет собой ключевой компонент привязной высотной телекоммуникационной платформы. Конструктивно модуль выполнен в виде октокоптера с соосным расположением двигателей, способного осуществлять подъем и удержание в течение продолжительного времени на высоте до 100–150 метров полезной нагрузки массой от 10 до 15 кг. В качестве полезной нагрузки может выступать телекоммуникационное оборудование, аппаратура видеонаблюдения или другие устройства в зависимости от поставленной задачи и применения привязной платформы.

Основными компонентами подсистемы беспилотного модуля являются система питания, контроллер полета, система электродвигателей, навигационно-посадочное устройство и система связи. Электропитание двигательных установок и оборудования полезной нагрузки осуществляется с земли по кабель-тросу, что обеспечивает возможность длительного функционирования платформы [36].

В целях обеспечения безопасности функционирования при кратковременных нарушениях подачи энергии от внешнего источника или возникновении неисправностей в цепях передачи энергии, на борту установлен резервный источник питания на основе аккумуляторной батареи [15, 37]. Данное техническое решение позволяет избежать риска падения дрона и обеспечивает возможность безопасного проведения экстренной посадки для устранения неисправностей в течение 8 минут. Переход на питание от резервной батареи происходит автоматически при возникновении аварийной

ситуации. Винтомоторная группа и аппаратура полезной нагрузки в основном режиме получают питание от бортового преобразователя напряжения, переключаясь на резервную батарею только в аварийных ситуациях.

Система связи беспилотного модуля включает Ethernet-коммутатор, оптоволоконный трансивер и оптический кабель, обеспечивая надежное взаимодействие между воздушным и наземным сегментами платформы. Реализован также резервный канал передачи информации на основе технологии PLS со скоростью передачи информации до 1 Гбит/с.

1.2. Наземный модуль

Наземный модуль привязной высотной платформы представляет собой комплекс технических средств, размещенных на грузовом автомобиле, который обеспечивает функционирование всей системы. Основное назначение модуля заключается в организации электропитания беспилотного летательного аппарата и полезной нагрузки через кабель-трос, а также в обеспечении мобильности всей системы.

Энергосистема наземного модуля включает дизельный генератор, систему преобразования напряжения и резервный блок аккумуляторных батарей. Детальный анализ энергопотребления платформы в зависимости от длины кабель-троса, массы полезной нагрузки и ветровых условий приведен в работе [36].

Важным компонентом наземного модуля является интеллектуальный подъемный механизм, состоящий из лебедки с микропроцессорным управлением, системы подачи и натяжения троса и системы контроля параметров. Система связи наземного модуля, аналогичная установленной на беспилотном аппарате, включает Ethernet-коммутатор и оптоволоконный трансивер, что обеспечивает надежный обмен данными между всеми компонентами платформы [38].

Конструкция наземного модуля позволяет оперативно разворачивать систему в различных внешних условиях и обеспечивать длительную работу привязной платформы. Размещение оборудования на грузовом автомобиле обеспечивает необходимую мобильность системы для потенциального применения в полевых условиях.

1.3. Кабель-трос

Кабель-трос служит критически важным элементом привязной высотной платформы, обеспечивая комплексное соединение между наземным и воздушным модулями. Его многофункциональная конструкция объединяет три ключевых компонента: медные проводники для передачи электроэнергии, оптоволоконные линии для обмена данными и кевларовые нити, обеспечивающие механическую прочность всей системы. Такая интеграция позволяет одновременно решать задачи электроснабжения, информационного обмена и механического удержания беспилотного модуля [39].

Аэродинамические характеристики кабель-троса существенно влияют на динамику всей платформы: при ветровых нагрузках возникают возмущающие воздействия, передающиеся через трос на беспилотный модуль. Экспериментальные исследования подтвердили, что предложенная конструкция кабель-троса привязной высотной платформы «Альбатрос» обеспечивает стабильную работу системы в различных погодных условиях, включая значительные ветровые нагрузки. Оценка характеристик надежности кабель-троса представлена в работе [20]. Энергоэффективность системы определяется максимальной передаваемой мощностью (земля-борт) и величиной потерь мощности на единицу длины кабеля; эти параметры служат основой для оценки производительности системы и выбора оптимальных режимов эксплуатации [40].

1.4. Система управления

Система управления привязной высотной платформой представляет собой сложный комплекс аппаратных и программных средств, обеспечивающих стабильное функционирование всей системы. Архитектура системы управления включает два основных компонента: блок управления беспилотным летательным аппаратом и блок управления посадочной платформой, которые работают в тесной взаимосвязи.

Система управления беспилотного модуля основана на полетном контроллере PixHawk 2.1 Cube с открытым программным обеспечением, который использует данные от акселерометра, барометра и GPS-приемника для определения положения и высоты. Для повышения точности измерений высоты применяется лазерный высотомер LightWare SF11/C Lidar. Особое внимание уделено проблеме навигации: основным средством позиционирования служит GPS/ГЛОНАСС-приемник, а для обеспечения надежности в условиях ухудшения или отсутствия спутникового сигнала предусмотрена резервная локальная навигационная система, что особенно важно при возможных перебоях в основном электропитании через кабель-трос.

1.5. Резервные компоненты

Современные привязные платформы требуют обеспечения высокой надежности как отдельных компонентов, так и системы в целом. Основная сложность при проектировании таких платформ заключается в ограничениях по поднимаемому весу, который включает массу беспилотного модуля, полезной нагрузки, кабель-троса и других элементов. Эти ограничения не позволяют реализовать полное дублирование основных систем, так как это привело бы к недопустимому увеличению общей массы конструкции. Однако для обеспечения длительной и бесперебойной работы платформы были разработаны специальные технические решения, повышающие ее надежность.

- В системе передачи энергии земля-борт применены высоконадежные электронные компоненты с дублированием критически важных узлов, включая преобразователи напряжения как в наземном, так и в бортовом оборудовании [15].
- Для обеспечения безопасности в нештатных ситуациях реализована система аварийного питания на базе резервной бортовой батареи, что позволяет выполнить безопасную посадку коптера с сохранением оборудования и полезной нагрузки [15, 37].
- В условиях ухудшения или потери сигналов GPS/ГЛОНАСС, что характерно для горной местности или районов с высокой плотной застройкой, платформа переходит на резервную локальную систему навигации [18, 41, 42].
- Надежность беспилотного модуля достигается за счет использования двигательных установок с повышенным ресурсом работы, частичного резервирования элементов системы управления и применения мультироторной архитектуры, обеспечивающей отказоустойчивость при выходе из строя отдельных двигателей.

Описанная архитектура привязной высотной беспилотной платформы служит основой для построения дерева рисков, которое будет рассмотрено в разделе 3.

2. Риск: понятие, обозначения, дерево рисков

2.1. Понятие риска

Риск неразрывно связан с некоторым случайным событием, которое назовем рисковым событием, временем наступления этого события, а также последствиями, в том числе материальными, которые это событие повлечет. Понятие риска имеет разные трактовки в зависимости от области, в которой оно рассматривается. В настоящей работе подразумевается следующее.

Определение 1. Под риском понимается вероятностная модель, заданная на вероятностном пространстве (Ω, \mathcal{F}, P) и описываемая двумерной случайной величиной (T, X) , характеризующей

рисковое событие A из \mathcal{F} , где T – время до наступления рискового события $A \in \mathcal{F}$, а X – приносимый сопутствующий ущерб.

Поскольку двумерная случайная величина (T, X) является формальным описанием риска, то его основной мерой считаем его распределение. Предположим, что время T наступления рискового события и величина приносимого им ущерба X являются независимыми случайными величинами с соответствующими функциями распределения, $F_T(t) = \mathbf{P}\{T < t\}$, $t \geq 0$, $F_X(x) = \mathbf{P}\{X < x\}$, $x \geq 0$. Обозначим также среднее время до наступления рискового события $\mu_T = \mathbf{M}[T]$ и среднее значение связанного с ним ущерба $\mu_X = \mathbf{M}[X]$. В данной статье именно эти характеристики принимаются за исходные.

В контексте моделирования рисков событий, важно отметить, что исходные характеристики риска на практике нечасто бывают известны непосредственно, особенно на стадии проектирования системы. Это создает задачу оценки этих параметров, которая осложняется двумя ключевыми особенностями рисков событий. Во-первых, малой вероятностью их наступления, что делает прямое статистическое наблюдение затруднительным, и, во-вторых, их сложной, каскадной природой, когда событие высокого уровня является следствием множества более простых событий. Последнее с вероятностной точки зрения соответствует процедуре построения вероятностного пространства, описывающего всю рисковую ситуацию. С практической же стороны такая декомпозиция может быть реализована с помощью построения дерева рисков.

2.2. Дерево рисков: понятие, обозначения, построение

Дерево рисков концептуально аналогично деревьям событий, отказов или жизни, однако имеет важное отличие: в качестве исходной информации помимо вероятностно-временных характеристик, события такого дерева несут информацию о величине ущерба, связанного с их наступлением.

Определение 2. Деревом рисков является размеченный граф, представляющий структуру вероятностной модели риска, в котором:

- вершины соответствуют рисковым событиям:
 - корневая вершина представляет результирующее (конечное) рисковое событие;
 - листовые вершины соответствуют элементарным (исходным) событиям, исходные характеристики которых считаются известными или подлежащими оценке;
 - промежуточные вершины соответствуют событиям, которые являются следствием событий более низкого уровня и причиной событий более высокого уровня;
- ребра представляют причинно-следственные или логические связи между событиями;
- логические шлюзы определяют тип связи между событиями-предшественниками и событием-последствием (например, И, ИЛИ, РЕЗЕРВ).

На практике используется перевернутое представление дерева рисков с двумя альтернативными подходами к его построению: прямой метод – от элементарных событий к результирующему или обратный метод – от корневого события к элементарным. Оба метода позволяют сформировать иерархическую модель последовательности событий, приводящих к реализации основного риска. При этом каждый последующий уровень дерева детализирует условия и предпосылки для возникновения событий более высокого уровня.

Для описания иерархии событий в дереве рисков введем следующие обозначения:

- $\mathbf{i} = (i_0, i_1, i_2, \dots, i_r)$ – вектора номеров событий от результирующего до элементарного, i_0 – индекс результирующего рискового события, i_k , $k = 1, r$ – номер события k -го уровня, которое может быть одной из причин наступления события с номером i_{k-1} предыдущего уровня;
- $\mathbf{i}_k = [i_0, i_k]$ – усеченные вектора, которые представляют собой индикаторы соответствующего события k -го уровня;
- $j(\mathbf{i}_k)$ – j -е событие k -го уровня \mathbf{i}_k , которое может стать причиной наступления события более высокого уровня;

Table 1. Events symbols

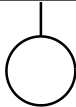


№	Символ	Имя	Описание
1		Круг	Элементарное событие с достаточной исходной информацией
2		Прямоугольник	Промежуточное или результирующее событие, представленное некоторым шлюзом
3		Дом	Событие, о котором нет достаточной информации (может произойти или нет)

Таблица 1. Символы событий

Table 2. Gates symbols

№	Символ	Имя	Структурная функция $\varphi(x)$	Описание
1		ИЛИ	$1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i)$	Произойдет хотя бы одно входное событие
2		РЕЗЕРВ	$P\{B \leq t, A = u\}$	Произойдет дополнительное событие В после наступления основного события А

Таблица 2. Символы шлюзов

- $n_{(i_k)}$ – количество событий в векторе i_k ;
- $A_{(i_k)}$ и $A_{[i_k]}$ – элементарное и промежуточное рисковое событие с номером i_k соответственно;
- x_{i_k} – структурная переменная события $A_{[i_k]}$, являющаяся индикаторной функцией соответствующего события,

$$x_{i_k} = \begin{cases} 1, & \text{если событие } A_{[i_k]} \text{ произошло,} \\ 0, & \text{в других случаях,} \end{cases}$$

Для построения дерева рисков используются специальные обозначения событий и логических связей (шлюзов), представленные в таблицах 1 и 2. Данный набор символов адаптирован из общепринятых нотаций анализа рисков [43] и включает только те элементы, которые необходимы для моделирования рассматриваемой в статье системы.

Как показано в таблице 2, каждый тип логического шлюза имеет соответствующую структурную функцию $\varphi(x)$, позволяющую аналитически описывать взаимосвязи между событиями в дереве рисков. Структурная функция для промежуточного события k -го уровня с последним событием $n(i_k)$ имеет вид

$$\varphi_{i_k}(x_{(i_k, 1)}, \dots, x_{(i_k, n(i_k))}) = x_{i_{k-1}}.$$

В зависимости от постановки задачи и типа исходных данных, используемых для расчетов (индикатор событий, функция распределения или надежности), структурные переменные x_i заменяются соответствующими величинами. Например, если переменные x_i заменяются на вероятности наступления событий p_i , то структурная функция шлюза ИЛИ имеет значение вероятности наступления события и принимает вид $\varphi_{i_k} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i)$. Конкретный вид структурной функции для шлюза РЕЗЕРВ зависит от количества дополнительных событий и их исходных характеристик; пример ее вычисления будет представлен в следующем разделе.

2.3. Характеристики риска

Если в качестве исходной информации о наступлении элементарных рисков событий заданы распределения $F_T(t)$ случайной величины T то с помощью структурных функций можно получить основные характеристики риска, а именно:

- функцию распределения $F_{[i_k]}(t) = \varphi_{i_k}(F_{(i_{k-1}, 1)}(t), \dots, F_{(i_{k-1}, n(i_{k-1}))}(t))$ ¹ времени $T_{[i_k]}$ до наступления события $A_{[i_k]}$;
- функцию надежности события $A_{[i_k]}$

$$R_{[i_k]}(t) = 1 - F_{[i_k]}(t); \quad (1)$$

- квантили надежности

$$Q_Y = R_{[i_k]}^{-1}(y); \quad (2)$$

- среднее время $m_T^{[i_k]}$, дисперсию $(\sigma_T^{[i_k]})^2$ и коэффициент вариации $v_T^{[i_k]}$ до наступления рискованного события $A_{[i_k]}$

$$m_T^{[i_k]} = \int_0^\infty (1 - F_{[i_k]}(t))dt, \quad (\sigma_T^{[i_k]})^2 = \int_0^\infty (t - m_T^{[i_k]})^2 dF_{[i_k]}(t), \quad v_T^{[i_k]} = \frac{\sigma_T^{[i_k]}}{m_T^{[i_k]}}; \quad (3)$$

- вероятность $q_{[i_k]}(j)$ наступления события $A_{[i_k]}$ из-за отказа его j -ого компонента

$$q_{[i_k]}(j) = P\left\{ \min_{1 \leq i_k \leq n_k} T_{[i_{k-1}, i_k]} = T_{[i_{k-1}, j]} \right\} = \int_0^\infty \left[\prod_{i_k=1, i_k \neq j}^{n_k} R_{[i_{k-1}, i_k]}(u) \right] dF_{[i_{k-1}, j]}(u); \quad (4)$$

- среднюю величину ущерба $m_X^{[i_{k-1}]}$ в связи с наступлением события $A_{[i_k]}$

$$m_X^{[i_{k-1}]} = \sum_{1 \leq j \leq n(i_k)} q_{[i_k]}(j) m_X^{j(i_k)}; \quad (5)$$

- наиболее опасный путь развития рискованной ситуации с точки зрения наибольшей вероятности наступления рискованных событий,

$$\vec{i}_k^*(q) = (j_q^*(i_k^*), j_q^*(i_{k+1}^*), \dots, j_q^*(i_{r-1}^*)), \quad (6)$$

где $j_q^*(i_k^*) = \operatorname{argmax}_{1 \leq j \leq n(i_k)} q_{i_k}(j)$ – номер подсистемы с максимальной вероятностью $q_{i_k}^* = \max_{1 \leq j \leq n(i_k)} q_{i_k}(j)$.

В данной статье в качестве исходной информации о рискованных событиях задаются среднее время μ_T до наступления события и среднее значение ущерба μ_X , связанного с этим событием. Поскольку точный вид распределений случайных величин T, X неизвестен, возникает необходимость делать предположения о характере этих распределений.

В разделе 4 для функции распределения $F_T(t)$ выдвинуты предположения и взяты некоторые известные распределения, наиболее часто используемые в теории надежности и отвечающие практическим постановкам задач [33]. При этом для корректности анализа в случае двухпараметрических распределений их параметры будут вычислены с помощью исходных значений μ_T , а также значения коэффициента вариации $v = \sigma_T / \mu_T$, где σ_T – стандартное отклонение случайной величины T .

¹Здесь индексы (i_{k-1}, j) функции распределения соответствуют событию с аналогичным индексом.

Выбор значения v должен быть обусловлен практической интерпретацией поставленной задачи. Низкий коэффициент вариации, $0 \leq v < 1$, указывает на «старение» компонентов системы и предсказываемый износ, т. е. увеличение частоты отказов. Высокий показатель характерен для систем с ранними отказами, что может возникать из-за скрытых дефектов. Таким образом, важным компонентом численного анализа характеристик риска является анализ чувствительности, который покажет, насколько выходные показатели системы зависят от исходных данных, а именно вида функции распределения и коэффициента вариации.

3. Построение дерева рисков и его оснащение

3.1. Методология построения дерева рисков

Несмотря на большое разнообразие рискованных ситуаций и кажущуюся простоту общей теории, представленной в разделе 2, сущность теории риска и возможности ее практического применения заключаются в изучении тонкостей и особенностей каждого конкретного явления. Разработка моделей всегда зависит от специфики рассматриваемых рисков и анализируемой системы.

В общем случае процедура построения и анализа дерева рисков включает в себя три этапа:

1. Определение результирующего рискованного события. Идентификация элементарных рискованных событий и построение цепочек событий, приводящих к результирующему событию, на основе чего формируется структура дерева рисков.
2. Оснащение дерева исходными данными: каждому элементарному событию присваиваются значения среднего времени до его наступления μ_T (на основе паспортных данных оборудования/экспертной оценки) и величины ущерба μ_X (например, стоимость компонента).
3. Численный анализ и исследование чувствительности: задаются распределения времени наступления событий, вычисляются структурные функции, а затем определяются ключевые характеристики — функция надежности, квантили, среднее время до наступления событий, наиболее опасные пути развития ситуации и ожидаемый ущерб.

Ниже данная методология будет применена к рассматриваемой в статье технической системе.

3.2. Дерево рисков для привязной высотной платформы

Рассмотрим ситуацию применения привязной высотной беспилотной телекоммуникационной платформы для обеспечения непрерывной широкополосной беспроводной связи стандарта LTE. Установленная на БПЛА базовая станция (БС) обеспечивает покрытие определенной зоны, параметры которой определяются техническими характеристиками оборудования. Невозможность обеспечения такой связи определим как результирующее рискованное событие.

Согласно описанию привязной платформы в разделе 1 длительная эксплуатация платформы возможна благодаря непрерывному электропитанию летного модуля и телекоммуникационного оборудования от наземных источников. Однако устойчивость работы этих и других подсистем могут быть нарушены вследствие различных факторов, включая последовательные отказы компонентов подсистем разного уровня или внешние воздействия, такие как неблагоприятные погодные условия.

На основании детального анализа компонентов системы, представленного в разделе 1, были идентифицированы элементарные и промежуточные рискованные события и построены возможные сценарии развития рискованной ситуации. Архитектура платформы, описанная в разделе 1, непосредственно определяет структуру дерева рисков: отказ любой из трех основных подсистем (беспилотного модуля, телекоммуникационного оборудования или наземного модуля) непосредственно ведет к наступлению результирующего рискованного события. Каждая из этих подсистем имеет свою внутреннюю структуру, изложенную в разделе 1, которая, в свою очередь, задает дальнейшую детализацию рискованных событий. Таким образом, результирующее рискованное событие может реализоваться

через три основных сценария: 1) отказ беспилотного модуля; 2) неисправность телекоммуникационного оборудования; 3) выход из строя наземного модуля. В соответствии со структурой каждой подсистемы, отказ или сбой в работе ее компонентов определяет соответствующую рисковую ситуацию.

В частности, отказ БПЛА может быть вызван аварийной или штатной посадкой, сбоями в системах связи, управления и навигации или отказом полетного контроллера. Неисправность телекоммуникационного оборудования чаще всего связана с техническим сбоем БС или с внешним глушением сигнала. Для наземного модуля основными рисками являются отказ подъемного механизма, неисправность системы питания или нарушение работы системы связи.

Таким образом, полная иерархия рискованных событий представлена в таблице 3. Здесь элементарные (листовые) события обозначены круглыми скобками, промежуточные — квадратными, а событие с символом «Дом» представлено в угловых скобках. Для каждого элементарного события указаны ключевые параметры: среднее время до наступления рискованного события $m_T^{j(i_k)}$, а также причиняемый ущерб $m_X^{j(i_k)}$.

Значения среднего времени до наступления рискованных событий $m_T^{j(i_k)}$ определяются различными способами в зависимости от типа события. Для аппаратных компонентов системы используются данные о наработке на отказ, указанные в технических паспортах соответствующего оборудования или его аналогов [20]. В случае событий, связанных с глушением сигналов GPS/ГЛОНАСС или БС, среднее время до наступления определяется особенностями территории развертывания платформы и принимается на основе экспертных оценок. Для событий, связанных с последовательным отказом нескольких одинаковых компонентов (например, отказ двигателей), среднее время до наступления события оценивается как сумма средних времен до отказа каждого компонента, исходя из предположения об их независимости. Более детальное моделирование отказов двигателей с учетом их взаимного влияния и конфигурации является отдельной исследовательской задачей и в данной работе не рассматривается.

Отдельного рассмотрения требуют события, отмеченные в таблице символом ★. Их временные характеристики существенно зависят от географических и климатических условий места эксплуатации платформы, включая частоту возникновения сильных ветров и грозных штормов, а также тип местности (лесной массив, горная местность, равнинная территория или городская застройка). Источниками этих характеристик могут служить, например, открытые статистические данные о погодных условиях². Для проведения численного анализа и демонстрации методики в последующем разделе будут использованы модельные значения этих параметров, характерные для ряда возможных сценариев эксплуатации. Эти значения не привязаны к конкретной географической зоне, а выбраны для иллюстрации влияния внешних факторов на показатели надежности в рамках сравнительного анализа.

Наряду с временными характеристиками важной составляющей модели является оценка потенциального ущерба, выражаемого в денежном эквиваленте. Под ущербом понимается стоимость замены соответствующего компонента системы, выраженная в рублях.

На основании установленной иерархии событий и с использованием обозначений из таблиц 1 и 2 строится дерево рисков, визуализирующее возможные сценарии развития рискованной ситуации (рис. 2).

Полученная модель служит основой для проведения численного анализа, направленного на исследование зависимостей характеристик риска от вариации исходных параметров системы. В следующем разделе представлены конкретные результаты такого анализа.

²Например, измерения метеостанций https://rp5.ru/Weather_in_the_world или данные Global Wind Atlas <https://globalwindatlas.info/>.

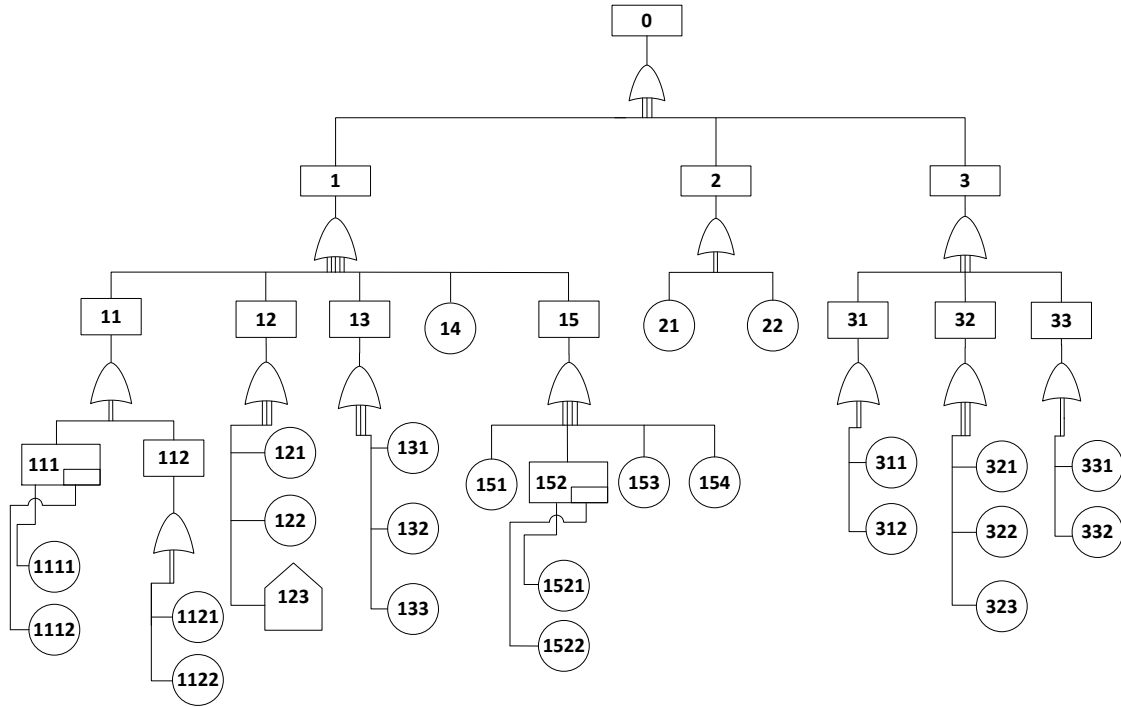


Fig. 2. Risk tree for the tethered high-altitude telecommunication platform

Рис. 2. Дерево рисков для привязной высотной беспилотной телекоммуникационной платформы

4. Численный анализ характеристик риска

Проведем анализ характеристик риска на основе предложенного дерева рисков с использованием исходных данных из таблицы 3 и методологии, изложенной в [23]. Поскольку большинство рассматриваемых рисков событий связано с отказами компонентов системы, в расчетах будем использовать функцию надежности случайной величины T в качестве структурной, а не соответствующую функцию распределения. Это требует замены структурных переменных и функций на их двойственные аналоги,

- для шлюза ИЛИ: $R_{[i_k]}(t) = \prod_{j=1}^{n(i_k)} R_{(i_j)}(t)$,
- для шлюза РЕЗЕРВ: $R_{[i_k]}(t) = 1 - \int_0^t f_{(i_1)}(u)F_{(i_2)}(t-u)du$.

При этом предполагается, что времена наступления элементарных событий и соответствующие приращения для промежуточных событий имеют абсолютно непрерывное распределение с конечными первым и вторым моментами. Для промежуточных событий предполагается отсутствие задержек в развитии рисков ситуации, поэтому их средние времена до наступления принимаются равными нулю.

Анализ дерева рисков для привязной высотной платформы требует учета влияния внешних факторов, зависящих от зоны развертывания. Рассмотрим два принципиально разных случая:

1. Учитывается влияние неблагоприятных погодных условий (события $A_{(1,2,1)}$ и $A_{(1,2,2)}$) на надежность платформы. Эти факторы моделируются как относительно частые события, для которых принято модельное значение $m_T^{j(i_k)} = 1000$ часов (случай 1).
2. Анализ ограничивается только внутренними факторами риска, связанными с самой платформой, без учета внешних воздействий. Соответственно, ветка событий $A_{[12]}$, описывающая влияние погодных условий, исключается из рассмотрения. Такой подход позволяет оценить вклад внутренних факторов в общий риск системы (случай 2).

Table 3. Events description and initial information

Таблица 3. Описание событий и исходная информация

Событие	Описание события	$m_T^{j(i_k)}$, часы	$m_X^{j(i_k)}$, тыс. руб.
$A_{[0]}$	результатирующее событие – сбой обеспечения широкополосной беспроводной связи	-	2000
$A_{[1]}$	выход из строя БПЛА	-	566
$A_{[1,1]}$	безаварийная посадка модуля	-	-
$A_{[1,1,1]}$	сбой системы питания бортового блока	-	-
$A_{(1,1,1,1)}$	отказ системы преобразования мощности	13290	379
$A_{(1,1,1,2)}$	переключение на резервную бортовую батарею	0.13	5
$A_{[1,1,2]}$	отказ системы электродвигателя	-	-
$A_{(1,1,2,1)}$	отказ двух рядом стоящих двигателей (из восьми)	$1200 \cdot 2$	$200 \cdot 2$
$A_{(1,1,2,2)}$	отказ любых трех двигателей (из восьми)	$1200 \cdot 3$	$200 \cdot 3$
$A_{[1,2]}$	экстренная посадка модуля	-	-
$A_{(1,2,1)}$	сильный ветер (свыше 15 м/с)	★	-
$A_{(1,2,2)}$	грозовой шторм	★	-
$A_{<1,2,3>}$	угроза от внешних источников	★	-
$A_{[1,3]}$	отказ системы связи	-	-
$A_{(1,3,1)}$	сбой в работе Ethernet-коммутатора	144890	20
$A_{(1,3,2)}$	сбой в работе оптоволоконного трансивера	445890	50
$A_{(1,3,3)}$	сбой в работе оптического кабеля	$2.2272 \cdot 10^6$	50
$A_{(1,4)}$	отказ контроллера полета	$1.1157 \cdot 10^6$	160
$A_{[1,5]}$	отказ системы управления и навигации	-	-
$A_{(1,5,1)}$	отказ навигационно-посадочного устройства	68610	100
$A_{[1,5,2]}$	потеря навигации	-	-
$A_{(1,5,2,1)}$	ослабление/глушение сигнала GPS/ГЛОНАСС	1000	5
$A_{(1,5,2,2)}$	переключение на локальную навигационную систему	1000	50
$A_{(1,5,3)}$	сбой питания от аккумуляторной батареи	14640	103
$A_{(1,5,4)}$	сбой системы управления БПЛА	362020	21
$A_{[2]}$	неисправность телекоммуникационного оборудования	-	1000
$A_{(2,1)}$	сбой в работе БС	4800	500
$A_{(2,2)}$	глушение сигнала	1000	-
$A_{[3]}$	выход из строя наземного модуля	-	536
$A_{[3,1]}$	отказ системы интеллектуального подъемного механизма	-	21
$A_{(3,1,1)}$	отказ системы подачи и натяжения троса	2250	59
$A_{(3,1,2)}$	поломка интеллектуальной системы крепления	17290	49
$A_{[3,2]}$	сбой системы питания	-	-
$A_{(3,2,1)}$	отказ системы преобразования мощности	13290	379
$A_{(3,2,2)}$	сбой в блоке аккумуляторных батарей	14640	103
$A_{(3,2,3)}$	поломка электрогенератора	5000	500
$A_{[3,3]}$	отказ системы связи	-	-
$A_{(3,3,1)}$	сбой в работе Ethernet-коммутатора	144890	20
$A_{(3,3,2)}$	сбой в работе оптоволоконного трансивера	445890	50

4.1. Подготовка к экспериментам и предположения

Для численного анализа характеристик риска примем следующие предположения о распределениях временных параметров. Времена наступления элементарных событий и соответствующие приращения для промежуточных событий моделируются либо распределением Гнеденко–Вей-

Table 4. Distributions and their characteristics**Таблица 4.** Распределения и их характеристики

Характеристика	$GW(\alpha, \beta)$	$\Gamma(\alpha, \beta)$
функция распределения	$F(t) = 1 - e^{-(t/\beta)^\alpha}$	$F(t) = 1 - \frac{\Gamma(\alpha, t\beta)}{\alpha}$
плотность распределения	$f(t) = \frac{\alpha e^{-(t/\beta)^\alpha} (t/\beta)^{\alpha-1}}{\beta}, t > 0$	$f(t) = \frac{\beta^\alpha e^{-t/\beta} t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)}, t > 0$
функция надежности	$R(t) = e^{-(t/\beta)^\alpha}$	$R(t) = \frac{\Gamma(\alpha, t\beta)}{\alpha}$
математическое ожидание	$\mu_T = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$	$\mu_T = \frac{\alpha}{\beta}$
дисперсия	$\sigma_T^2 = \beta^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \mu_T^2$	$\sigma_T^2 = \frac{\alpha}{\beta^2}$
коэффициент вариации	$v = \frac{\sigma_T}{\mu_T}$	$v = \frac{\sqrt{\alpha}}{\alpha}$

булла $GW(\alpha, \beta)$, либо гамма-распределением $\Gamma(\alpha, \beta)$. Конкретные параметры этих распределений приведены в таблице 4, где α представляет параметр формы, а β – параметр масштаба.

Исследование включает анализ влияния следующих исходных параметров модели: типа распределения времени до наступления событий и значений коэффициента вариации. В соответствии с рекомендациями раздела 2.3 по выбору коэффициента вариации в работе внимание уделено случаям, при которых параметр формы α выбранных распределений удовлетворяет условию $\alpha \geq 1$. Тогда в обоих случаях имеем $0 \leq v \leq 1$.

Пусть для распределения GW $\alpha = 2$, тогда коэффициент вариации составляет $v \approx 0.52$, тогда как для Γ $\alpha = 4$, для которого имеем $v = 0.5$. Параметры масштаба β можно выписать в терминах заданных значений α и среднего времени до наступления событий $m_T^{j(i_k)}$ по соответствующим формулам:

$$\beta = \frac{m_T^{j(i_k)}}{\Gamma(1 + \alpha^{-1})} \quad \text{для } GW \quad \text{и} \quad \beta = \frac{\alpha}{m_T^{j(i_k)}} \quad \text{для } \Gamma.$$

Дополнительно рассматривается предельный случай – экспоненциальное распределение Exp при $\alpha = 1$ и $v = 1$.

Все расчеты проводятся при фиксированных значениях математического ожидания $m_T^{j(i_k)}$, соответствующих данным из таблицы 3. Это обеспечивает сопоставимость результатов для разных типов распределений.

4.2. Функция надежности и квантили

Функция надежности системы, определяющая вероятность ненаступления результирующего события $A_{[0]}$ в течение заданного временного интервала, рассчитывается через функции надежности промежуточных событий с учетом типа логических связей. Например,

$$\begin{aligned} \text{для шлюза РЕЗЕРВ: } R_{[1,1,1]}(t) &= 1 - F_{[1,1,1]}(t) = 1 - \int_0^t f_{(1,1,1,1)}(u) F_{(1,1,1,2)}(t-u) du, \\ \text{для шлюза ИЛИ: } R_{[1,1,2]}(t) &= R_{(1,1,2,1)}(t) \cdot R_{(1,1,2,2)}(t). \end{aligned}$$

График функции надежности $R_{sys}(t)$ (рис. 3) демонстрирует, насколько критически характеристики надежности зависят от коэффициента вариации v и типа распределения времени наступления

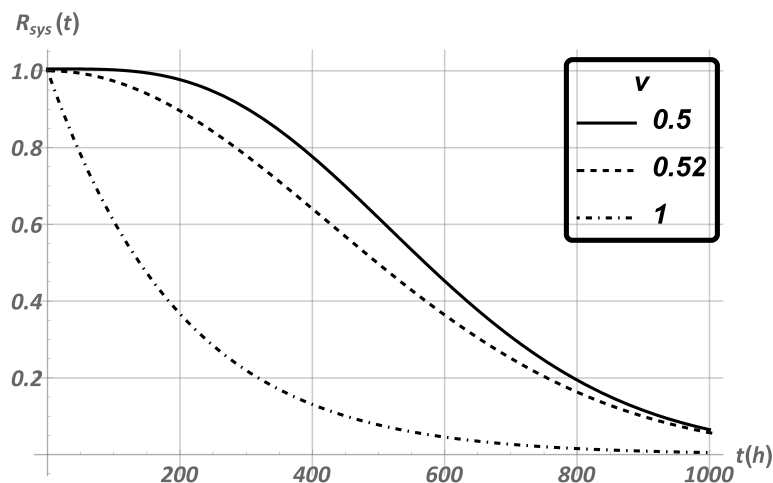


Fig. 3. System reliability function — case 1

Рис. 3. Функция надежности системы — случай 1

рисковых событий. При $v = 1$ (*Exp*) надежность быстро снижается — уже при $t > 300$ часов вероятность падает ниже 0.2. Моделирование с меньшей вариабельностью ($v = 0.5$) приводит к более высоким расчетным показателям надежности. Сравнение результатов при схожих коэффициентах вариации показывает, что модель на основе распределения Γ ($v = 0.5$) дает более высокие (оптимистичные) оценки надежности по сравнению с моделью на основе распределения GW ($v = 0.52$). Этот результат не означает возможности выбора закона распределения времени наступления рискованных событий, а указывает на то, что точность прогноза надежности критически зависит от адекватности статистической модели, выбранной для описания времени наступления реальных отказов.

Вычисление и исследование квантилей позволяет определить гарантированные с высокой доверительной вероятностью сроки безотказной работы системы, что является критически важным для планирования регламентного обслуживания, формирования гарантийных обязательств и оценки способности системы выполнять длительные целевые задачи.

Квантильный анализ (таблица 5) выявляет значительную разницу: при переходе от $v = 1$ (*Exp*) к $v = 0.5$ (Γ) квантиль $Q_{0.999}$ увеличивается в 27 раз, а $Q_{0.99}$ — в 7.5 раз. Оптимальные показатели демонстрирует случай $v = 0.5$, обеспечивая работу системы в течение 300 часов (около двух недель) с вероятностью 0.9 и 79 часов (более трех суток) с вероятностью 0.999. Полученные данные показывают, что при одинаковом исходном μ_T снижение коэффициента вариации v в 2 раза радикально повышает показатели надежности. Использование экспоненциального распределения для времени наступления рискованных событий приводит к расчетным показателям, согласно которым вероятность наступления результирующего события достигает 0.999 уже через 3 часа функционирования системы. Сравнение результатов при Γ - и GW -распределений при близком v демонстрирует также заметное влияние формы закона распределения.

Проведенные в мае 2025 года натурные испытания привязной высотной платформы «Альбатрос» показали ее непрерывную работу в течение 24 часов без регистрации рискованных событий. Этот результат, с одной стороны, подтверждает, что оценки, полученные по экспоненциальной модели, являются заниженными и не отражают реальный потенциал системы. С другой стороны, он согласуется с более реалистичными прогнозами, полученными на основе моделей с низким коэффициентом вариации, которые оценивали квантили в сотни часов. Эти выводы подчеркивают, что для адекватного прогнозирования надежности критически важно учитывать не только средние характеристики компонентов, но и статистику их вариабельности, стремясь к использованию наиболее точных вероятностных моделей.

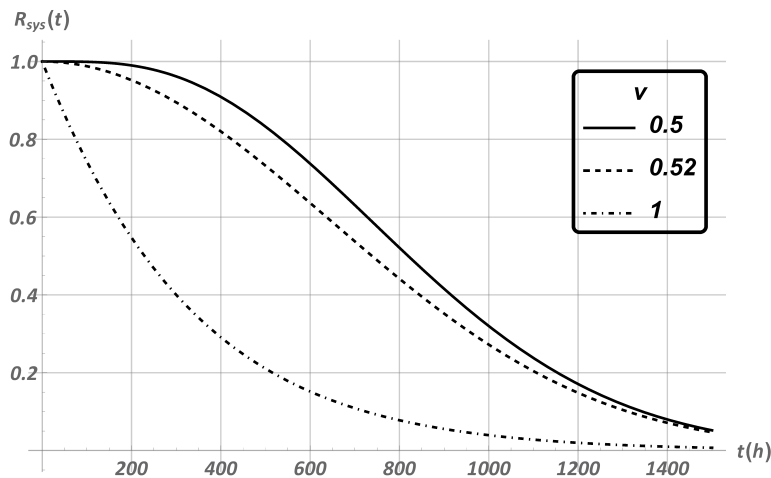
Table 5. Reliability quantiles (hours) — case 1

Квантиль	Γ	GW	Exp
$Q_{0.999}$	79	20	3
$Q_{0.99}$	148	60	20
$Q_{0.9}$	300	195	22

Таблица 5. Квантили надежности (часы) — случай 1

Как и следовало ожидать, исключение внешних факторов (случай 2, рис. 4) приводит к повышению расчетной надежности системы. Квантили увеличиваются примерно в 1.5 раза (таблица 6) по сравнению со случаем 1. Эта количественная оценка позволяет оценить порядок вклада внешних угроз в общий риск. Однако как видно из полученных результатов для экспоненциального распределения значения $Q_{0.999}$ и $Q_{0.99}$ остаются одинаковыми в обоих случаях (ср. с таблицей 5). Это указывает на то, что при экспоненциальной модели вклад внешних факторов (события $A_{(1,2,1)}$ и $A_{(1,2,2)}$) с выбранной интенсивностью ($m_T = 1000$ ч) в вероятность наступления редких рисков событий пренебрежимо мал по сравнению с суммарным вкладом внутренних отказов системы. Данный результат, однако, является специфическим для принятых параметров и экспоненциального закона.

Полученные результаты показывают, что прогноз надежности системы критически зависит от статистических свойств времени наступления отказов — коэффициента вариации и типа распределения. Расчетные показатели оказываются значительно выше, если реальные отказы характеризуются низкой вариабельностью (малым v) и описываются, например, Γ распределением, по сравнению с экспоненциальной моделью (при $v = 1$). Применение экспоненциального закона к среднему времени до наступления рисков событий ведет к заниженным оценкам, не соответствующим реальным сценариям функционирования платформы.

**Fig. 4.** System reliability function — case 2**Рис. 4.** Функция надежности системы — случай 2**Table 6.** Reliability quantiles (hours) — case 2

Квантиль	Γ	GW	Exp
$Q_{0.999}$	105	30	3
$Q_{0.99}$	200	90	20
$Q_{0.9}$	415	290	36

Таблица 6. Квантили надежности (часы) — случай 2

Table 7. Mean time and coefficient of variation of risk events — case 1**Таблица 7.** Среднее время и коэффициент вариации рискованных событий — случай 1

	$v = 0.5$ (Γ)		$v = 0.52$ (GW)		$v = 1$ (Exp)	
оценки	$\hat{m}_T^{[i_k]}$	$\hat{\sigma}_T^{[i_k]}$	$\hat{m}_T^{[i_k]}$	$\hat{\sigma}_T^{[i_k]}$	$\hat{m}_T^{[i_k]}$	$\hat{\sigma}_T^{[i_k]}$
$A_{[1,1,1]}$	13039.500	0.51	13290.700	0.52	13290.100	0.99
$A_{[1,1,2]}$	2051.020	0.46	1996.840	0.52	1440.000	1.00
$A_{[1,5,2]}$	2000.000	0.35	1999.330	0.37	2000.000	0.71
$A_{[1,1]}$	2043.530	0.45	1974.690	0.52	1299.240	0.99
$A_{[1,2]}$	726.560	0.45	706.869	0.52	500.000	1.00
$A_{[1,3]}$	140540.000	0.48	137535.000	0.52	104237.000	1.00
$A_{[1,5]}$	1997.550	0.50	1984.820	0.37	1769.600	0.73
$A_{[3,1]}$	2245.640	0.50	2231.310	0.52	1990.920	1.00
$A_{[3,2]}$	4648.830	0.46	4457.600	0.52	2910.780	1.00
$A_{[3,3]}$	140559.000	0.48	137798.000	0.52	109355.000	1.00
$A_{[1]}$	700.180	0.43	653.800	0.51	325.594	0.96
$A_{[2]}$	991.390	0.50	978.663	0.52	827.600	1.00
$A_{[3]}$	2087.930	0.47	1995.090	0.52	1169.600	1.00
A_{sys}	591.658	0.41	526.101	0.52	197.100	0.98

Table 8. Mean time and coefficient of variation of risk events — case 2**Таблица 8.** Среднее время и коэффициент вариации рискованных событий — случай 2

	$v = 0.5$ (Γ)		$v = 0.52$ (GW)		$v = 1$ (Exp)	
оценки	$\hat{m}_T^{[i_k]}$	$\hat{\sigma}_T^{[i_k]}$	$\hat{m}_T^{[i_k]}$	$\hat{\sigma}_T^{[i_k]}$	$\hat{m}_T^{[i_k]}$	$\hat{\sigma}_T^{[i_k]}$
$A_{[1]}$	1563.250	0.47	1474.830	0.44	823.217	0.87
A_{sys}	855.601	0.42	777.421	0.51	319.288	0.96

4.3. Среднее время до наступления рискованных событий

Анализ среднего времени наступления рискованных событий показывает существенную количественную зависимость результатов от коэффициента вариации и типа распределения, что подтверждает сформулированные ранее выводы. Согласно данным таблиц 7 и 8, снижение вариальности исходных данных приводит к значительному увеличению среднего времени наступления рискованных событий. В случае 1, когда учитываются внешние факторы, при Γ распределении ($v = 0.5$) среднее время составляет 592 часа (около трех недель), тогда как для Exp распределения ($v = 1$) этот показатель снижается до 197 часов (до восьми дней).

При исключении внешних факторов (случай 2) среднее время наступления результирующего события ожидаемо увеличивается. Для Γ распределения оно превышает один месяц (855 часов), а для Exp составляет примерно две недели (319 часов). Коэффициенты вариации $\hat{\sigma}_T^{[i_k]}$ промежуточных событий остаются близкими к исходному значению v в обоих случаях, с наибольшими отклонениями для событий, связанных через шлюз РЕЗЕРВ.

Table 9. The probabilities of occurrence of events of the second and third levels (case 1)**Таблица 9.** Вероятности наступления событий второго и третьего уровня (случай 1)

	$v = 0.5$	$v = 0.52$	$v = 1$
$q_{112}(1)$	0.7102	0.6923	0.6000
$q_{112}(2)$	0.2898	0.3077	0.4000
$q_{11}(1)$	0.0092	0.0221	0.0977
$q_{11}(2)$	0.9908	0.9779	0.9023
$q_{12}(1)$	0.5000	0.5000	0.5000
$q_{12}(2)$	0.5000	0.5000	0.5000
$q_{13}(1)$	0.9334	0.9011	0.7194
$q_{13}(2)$	0.0662	0.0951	0.2338
$q_{13}(3)$	0.0004	0.0038	0.0468
$q_{15}(1)$	10^{-5}	0.0007	0.0258
$q_{15}(2)$	0.9962	0.9828	0.8484
$q_{15}(3)$	0.0038	0.0164	0.1209
$q_{15}(4)$	10^{-8}	10^{-5}	0.0049
$q_{31}(1)$	0.9954	0.9833	0.8849
$q_{31}(2)$	0.0046	0.0167	0.1151
$q_{32}(1)$	0.0855	0.1125	0.2190
$q_{32}(2)$	0.0656	0.0927	0.1988
$q_{32}(3)$	0.8489	0.7948	0.5822
$q_{33}(1)$	0.9337	0.9045	0.7547
$q_{33}(2)$	0.0663	0.0955	0.2453

Сравнительный анализ показывает, что учет внешних факторов сокращает среднее время наступления критических событий в 1.45 раза для $v = 0.5$ и в 1.62 раза для $v = 1$.

Полученные данные подтверждают, что для повышения точности прогноза надежности недостаточно оперировать только средними значениями наработки на отказ компонентов. Ключевую роль играет вариабельность времени отказов (коэффициент вариации v): система, состоящая из компонентов с более предсказуемым временем отказа (низкий v), демонстрирует значительно более высокие расчетные показатели долговечности даже при одинаковых средних характеристиках.

4.4. Анализ наиболее опасных путей развития рисков

Для оценки вероятностей наступления промежуточных и результирующих событий используется метод восходящего расчета по дереву рисков. Вероятности $q_{ik}(j)$ вычисляются по формуле (4), начиная с элементарных событий до корневого. Например, вероятность наступления $A_{[1,1,2]}$ из-за наступления $A_{[1,1,2,1]}$ рассчитывается как:

$$q_{112}(1) = \int_0^{\infty} R_{(1,1,2,2)}(t) \cdot f_{(1,1,2,1)}(t) dt.$$

Результаты расчетов представлены в таблицах 9 и 10 для случая 1 (с учетом внешних факторов). Анализ показывает, например, что наибольшая вероятность отказа системы связи связана с отка-

Table 10. The probabilities of occurrence of events of the zero and first levels (case 1)**Таблица 10.** Вероятности наступления событий нулевого и первого уровня (случай 1)

	$v = 0.5$	$v = 0.52$	$v = 1$
$q_1(1)$	0.0632	0.1087	0.2506
$q_1(2)$	0.9068	0.8483	0.6512
$q_1(3)$	10^{-8}	10^{-5}	0.0031
$q_1(4)$	10^{-12}	10^{-7}	0.0003
$q_1(5)$	0.0200	0.0430	0.0948
$q_2(1)$	0.0199	0.0416	0.1724
$q_2(2)$	0.9801	0.9584	0.8276
$q_3(1)$	0.8497	0.7995	0.5875
$q_3(2)$	0.1503	0.2003	0.4018
$q_3(3)$	10^{-6}	0.0002	0.0107
$q_{sys}(1)$	0.6561	0.6430	0.5933
$q_{sys}(2)$	0.3063	0.2878	0.2382
$q_{sys}(3)$	0.0376	0.0692	0.1685

зом Ethernet-коммутатора ($\max\{q_{13}(1), q_{13}(2), q_{13}(3)\} = q_{13}(1) = 0.93$ при $v = 0.5$ и $\max\{q_{13}(1), q_{13}(2), q_{13}(3)\} = q_{13}(1) = 0.72$ при $v = 1$). При этом наземный модуль демонстрирует наибольшую надежность по сравнению с другими системами первого уровня, поскольку вероятность его отказа минимальна. Наиболее опасный сценарий развивается через отказ беспилотного модуля ($q_{sys}(1) \approx 0.6$), вызванный экстренной посадкой ($A_{[1,2]}$), которая в равной степени может быть обусловлена событиями $A_{[1,2,1]}$ и $A_{[1,2,2]}$. Таким образом, наиболее опасным путем развития рисков ситуации является путь $A_{[sys]} \rightarrow A_{[1]} \rightarrow A_{[1,2]} \rightarrow A_{[1,2,1]}/A_{[1,2,2]}$. При этом вероятности наступления соответствующих событий будут отличаться в зависимости от значения коэффициента вариации v .

Очевидно, исключение внешних факторов существенно изменяет структуру рисков, смещая акцент на внутренние проблемы системы. Таблица 11 содержит только те значения вероятностей наступления рисков событий, которые отличны от случая 1. Для случая 2 (без учета внешних факторов) выявлены следующие особенности. При $v \approx 0.5$ основной риск связан с отказом телекоммуникационного оборудования ($A_{[2]}$), особенно с проблемами спутниковой связи. То есть, наиболее опасным путем развития рисков ситуации является путь $A_{[sys]} \rightarrow A_{[2]} \rightarrow A_{[2,2]}$. При $v = 1$ опасность равномерно распределяется между отказами оборудования и летного модуля. В этом случае имеется альтернативный опасный путь развития рисков ситуации, $A_{[sys]} \rightarrow A_{[1]} \rightarrow A_{[1,1]} \rightarrow A_{[1,1,2]} \rightarrow A_{[1,1,2,1]}$.

Наиболее критичные пути развития рисков ситуаций требуют особого внимания при проектировании системы мониторинга и обслуживания платформы. Полученные результаты демонстрируют, что выявленная в рамках модели иерархия наиболее вероятных сценариев отказа существенно зависит от коэффициента вариации времени до отказа, используемого при моделировании.

4.5. Оценка причиняемого ущерба

Для оценки среднего ущерба используется вероятностный подход, учитывающий условные вероятности $q_{i_k}(j)$. Расчеты проводятся по рекуррентным формулам, например, для промежуточных

Table 11. The probabilities of events (case 2)**Таблица 11.** Вероятности наступления событий (случай 2)

	$v = 0.5$	$v = 0.52$	$v = 1$
$q_1(1)$	0.5012	0.5225	0.6336
$q_1(3)$	10^{-7}	0.0001	0079
$q_1(4)$	10^{-11}	0.000002	0.0007
$q_1(5)$	0.4988	0.4774	0.3578
$q_{sys}(1)$	0.1798	0.2280	0.3412
$q_{sys}(2)$	0.7091	0.6223	0.3858
$q_{sys}(3)$	0.1111	0.1497	0.2730

Table 12. Mean damage (thousand roubles), case 1**Таблица 12.** Средний ущерб (тыс.руб.), случай 1

	$v = 0.5$	$v = 0.52$	$v = 1$
$\hat{m}_X^{[1,1,2]}$	542.04	539	480
$\hat{m}_X^{[1,1]}$	541	535	471
$\hat{m}_X^{[1,2]}$	0	0	0
$\hat{m}_X^{[1,3]}$	22	23	29
$\hat{m}_X^{[1,5]}$	55	56	62
$\hat{m}_X^{[3,1]}$	59	59	60
$\hat{m}_X^{[3,2]}$	464	450	395
$\hat{m}_X^{[3,3]}$	22	23	28
$\hat{m}_X^{[1]}$	36	61	124
$\hat{m}_X^{[2]}$	10	21	87
$\hat{m}_X^{[3]}$	120	137	194
\hat{m}_X^{sys}	31	55	127

событий:

$$\hat{m}_X^{[1,1,2]} = q_{[112]}(1) \cdot m_X^{(1,1,2,1)} + q_{[112]}(2) \cdot m_X^{(1,1,2,2)},$$

для событий более высокого уровня

$$\hat{m}_X^{[1,1]} = q_{[11]}(1) \cdot (m_X^{(1,1,2,1)} + m_X^{(1,1,2,2)}) + q_{[11]}(2) \cdot \hat{m}_X^{[1,1,2]}.$$

Результаты для случая 1 (таблица 12) показывают существенную зависимость ущерба от принятого в моделировании коэффициента вариации. Так, при уменьшении v с 1 до 0.5 оценка ущерба снижается в 4 раза. При этом наибольший ущерб связан с отказами подсистем беспилотного модуля ($\hat{m}_X^{[1]}$ до 124 тыс. руб.) и наземного оборудования ($\hat{m}_X^{[3]}$ до 194 тыс. руб.)

В таблице 13 представлены значения оценки среднего причиняемого ущерба для случая 2. Столь сильное изменение полученных оценок вызвано изменением условных вероятностей $q_{i_k}(j)$. Для случая 2 (таблица 13) наблюдается увеличение ущерба от отказа БПЛА ($\hat{m}_X^{[1]}$) до 321 тыс. руб. и сохраняется зависимость характеристики от коэффициента вариации.

Table 13. Mean damage (thousand roubles), case 2**Таблица 13.** Средний ущерб (тыс.руб.), случай 2

	$v = 0.5$	$v = 0.52$	$v = 1$
$\hat{m}_{[1]}$	299	307	321
\hat{m}_{sys}	74	104	196

Данные результаты указывают на то, что прогноз финансовых потерь вследствие отказов системы также, как и другие характеристики, чувствителен к статистическим свойствам времени наступления отказов. Модель показывает, что при прочих равных условиях система, состоящая из компонентов с более предсказуемым временем отказа (низкий v), характеризуется не только более высокой надежностью, но и существенно меньшими расчетными ожидаемыми финансовыми рисками. Это подчеркивает экономическую обоснованность инвестиций в компоненты со стабильными характеристиками надежности.

Заключение

В данной работе представлен комплексный анализ надежности привязной высотной беспилотной платформы с использованием методологии оценки рисков. Применяемый подход основан на построении дерева рисков, учитывающего каскадный характер развития рисков ситуаций и связанный с ними материальный ущерб. Основное внимание уделено анализу чувствительности показателей надежности системы к свойствам времени наступления отказов, а именно к распределению и коэффициенту вариации. Проведенное исследование не только демонстрирует работоспособность подхода на примере привязной беспилотной платформы, но и выявляет ключевую зависимость прогнозных показателей надежности и ожидаемого ущерба от адекватности используемых вероятностных моделей.

Результаты численного анализа демонстрируют, что прогноз надежности системы крайне чувствителен к предполагаемому коэффициенту вариации. Использование модели с экспоненциальным распределением времени отказов ($v = 1$) приводит к заниженным оценкам, не соответствующим реальному поведению платформы, что подтверждено ее натурными испытаниями. Моделирование с меньшей вариабельностью ($v = 0.5$) дает значительно более оптимистичные прогнозы: например, средний срок безотказной работы привязной высотной платформы в модели с учетом погодных условий увеличивается почти до 600 часов, а квантили повышаются в десятки раз. Этот контраст не означает возможности влияния на законы распределения реальных отказов, а указывает на важность выбора адекватной вероятностной модели и учета второго момента (дисперсии) наравне со средним значением, основанных на статистических данных или глубоком анализе физики отказов, для получения реалистичных оценок надежности и обоснования инженерных решений.

Анализ наиболее опасных сценариев развития рисков ситуаций выявил, что основной риск связан с отказом беспилотного модуля или телекоммуникационного оборудования. Проведенная оценка потенциального ущерба демонстрирует, что прогнозируемая величина материального ущерба также существенно зависит от статистической модели, используемой для описания времени отказов. В частности, снижение вариабельности в 2 раза приводит к уменьшению ожидаемого материального ущерба в четыре раза.

Полученные количественные оценки вклада различных факторов в общий риск, а также идентификация наиболее опасных сценариев имеют важное практическое значение для обоснования инженерных решений, в том числе при проектировании систем мониторинга, планировании регламентных работ и оптимизации стратегий технического обслуживания.

Предложенная методология построения и анализа дерева рисков является универсальной и применима не только к привязным беспилотным платформам, но и к широкому кругу сложных технических систем на различных этапах их жизненного цикла. На стадии проектирования она позволяет

проводить сравнительный анализ различных архитектурных и компонентных решений, количественно оценивая их вклад в общий риск и ожидаемый ущерб, что обосновывает выбор более надежных компонентов и эффективных схем резервирования. На стадии эксплуатации методология служит для актуализации модели на основе накопленных данных об отказах, что дает возможность корректировать планы регламентного обслуживания, оптимизировать стратегии мониторинга и перераспределять ресурсы на наиболее критические, с точки зрения риска, направления.

В рамках исследования надежности привязной высотной беспилотной платформы перспективными направлениями дальнейших исследований могут стать учет корреляций между отказами компонентов, разработка адаптивных моделей для различных условий эксплуатации и интеграция предложенного подхода в системы поддержки принятия решений.

References

- [1] M. Tognon and A. Franchi, *Theory and Applications for Control of Aerial Robots in Physical Interaction Through Tethers* (Springer Tracts in Advanced Robotics). 2021, 210 pp. DOI: [10.1007/978-3-030-48659-4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48659-4)
- [2] C. Viegas, B. Chehreh, J. Andrade, and J. Lourenço, “Tethered UAV with combined multi-rotor and water jet propulsion for forest fire fighting”, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 104, no. 2, p. 21, 2022. DOI: [10.1007/s10846-021-01532-w](https://doi.org/10.1007/s10846-021-01532-w)
- [3] Y. Rong, R. Gutierrez, K. V. Mishra, and D. W. Bliss, “Noncontact vital sign detection with UAV-borne radars: An overview of recent advances”, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 16, no. 3, pp. 118–128, 2021. DOI: [10.1109/MVT.2021.3086442](https://doi.org/10.1109/MVT.2021.3086442)
- [4] M. Kishk, A. Bader, and M.-S. Alouini, “Aerial base station deployment in 6G cellular networks using tethered drones: The mobility and endurance tradeoff”, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15, no. 4, pp. 103–111, 2020. DOI: [10.1109/MVT.2020.3017885](https://doi.org/10.1109/MVT.2020.3017885)
- [5] V. M. Vishnevsky, Y. A. Avramenko, V. H. Nguyen, and N. S. Kalmykov, “Assessment of the performance characteristics of a wireless network based on tethered UAVs”, *Problems of Informatics*, no. 1 (66), pp. 60–77, 2025, in Russian. DOI: [10.24412/2073-0667-2025-1-60-77](https://doi.org/10.24412/2073-0667-2025-1-60-77)
- [6] B. Kirubakaran, E. Younesian, J. Sæe, and J. Hosek, “Optimized UAV-based connectivity solutions for urban iot networks”, in *Proceedings of the 15th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2023, pp. 1–6. DOI: [10.1109/ICUMT61075.2023.10333303](https://doi.org/10.1109/ICUMT61075.2023.10333303)
- [7] J. Trethowan, Z. Wang, and K. C. Wong, “The viability of a grid of autonomous ground-tethered UAV platforms in agricultural pest bird control”, *Machines*, vol. 11, no. 377, p. 15, 2023. DOI: [10.3390/machines11030377](https://doi.org/10.3390/machines11030377)
- [8] M. N. Marques, S. A. Magalhães, F. N. Dos Santos, and H. S. Mendonça, “Tethered unmanned aerial vehicles – a systematic review”, *Robotics*, vol. 12, no. 117, p. 25, 2023. DOI: [10.3390/robotics12040117](https://doi.org/10.3390/robotics12040117)
- [9] F. Fattori and S. Cocuzza, “Tethered drones: A comprehensive review of technologies, challenges, and applications”, *Drones*, vol. 9, no. 425, 2025. DOI: [10.3390/drones9060425](https://doi.org/10.3390/drones9060425)
- [10] D. Handrick, M. Eckenrode, and J. Lee, “Review of tethered unmanned aerial vehicles: Building versatile and robust tethered multirotor UAV system”, *Dynamics*, vol. 5, no. 17, 2025. DOI: [10.3390/dynamics5020017](https://doi.org/10.3390/dynamics5020017)
- [11] N. Cherif, W. Jaafar, E. Vinogradov, H. Yanikomeroğlu, S. Pollin, and A. Yongacoglu, “iTUAVs: Intermittently tethered UAVs for future wireless networks”, *IEEE Wireless Communications*, vol. 30, no. 4, pp. 124–130, 2023. DOI: [10.1109/MWC.018.2100720](https://doi.org/10.1109/MWC.018.2100720)

- [12] S. Khemiri, M. A. Kishk, and M.-S. Alouini, “Exploiting tethered and untethered UAVs: A hybrid aerial communication system”, *Scientific Reports*, vol. 15, no. 15882, p. 12, 2025. DOI: [10.1038/s41598-025-99761-8](https://doi.org/10.1038/s41598-025-99761-8)
- [13] A. Al-Radaideh and L. Sun, “Self-localization of tethered drones without a cable force sensor in GPS-denied environments”, *Drones*, vol. 5, no. 135, p. 15, 2021. DOI: [10.3390/drones5040135](https://doi.org/10.3390/drones5040135)
- [14] T. Ye, X. XiangYu, and D. Jiayi, “Dangerous area of tethered UAV due to impact”, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 121 152–121 158, 2022. DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3222820](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3222820)
- [15] V. M. Vishnevsky, A. V. Voroncov, Y. V. Celikin, and S. M. Mamedov, “Sistema elektropitaniya privyaznogo bespilotnogo letatel'nogo apparata”, *Elektricheskoe pitanie*, no. 2(03), pp. 7–12, 2020, in Russian.
- [16] C. Kownacki et al., “Precision landing tests of tethered multicopter and VTOL UAV on moving landing pad on a lake”, *Sensors*, vol. 23, no. 2016, p. 20, 2023. DOI: [10.3390/s23042016](https://doi.org/10.3390/s23042016)
- [17] V. M. Vishnevsky, D. V. Efrosinin, and A. Krishnamoorthy, “Principles of construction of mobile and stationary tethered high-altitude unmanned telecommunication platforms of long-term operation”, in *Communications in Computer and Information Science*, vol. 919, 2018, pp. 480–495. DOI: [10.1007/978-3-319-99447-5_48](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99447-5_48)
- [18] K. Vytovtov, E. Barabanova, V. Vishnevsky, G. Vytovtov, and E. Lesiv, “Local radar navigation system for tethered high-altitude platforms”, in *Proceedings of 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT 2023)*, IEEE, 2023. DOI: [10.1109/ICCT58878.2023.10347062](https://doi.org/10.1109/ICCT58878.2023.10347062)
- [19] V. M. Vishnevsky, V. V. Rykov, D. V. Kozyrev, and N. M. Ivanova, *Modelirovanie nadyozhnosti privyaznyh vysotnyh bespilotnyh telekommunikacionnyh platform*. Moscow: RIC Tekhnosfera, 2022, 194 pp., in Russian.
- [20] V. M. Vishnevsky, E. A. Barabanova, K. A. Vytovtov, and G. K. Vytovtov, “Analysis of tethered unmanned high-altitude platform reliability”, in *Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications*, 2024, pp. 105–116. DOI: [10.1007/978-3-031-50482-2_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-50482-2_9)
- [21] B. J. D. O. M. Franco and L. C. S. Góes, “Failure analysis methods in unmanned aerial vehicle (UAV) applications”, in *19th International Congress of Mechanical Engineering*, vol. 11, 2007, p. 10.
- [22] K. Imani, A. Gholami, and M. B. Dehaghi, “Reliability calculation with error tree analysis and breakdown effect analysis for a quadcopter power distribution system”, *Maintenance, Reliability and Condition monitoring*, vol. 2, no. 2, pp. 45–57, 2022. DOI: [10.21595/marc.2022.23054](https://doi.org/10.21595/marc.2022.23054)
- [23] V. V. Rykov and V. Y. Itkin, *Nadyozhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyj risk*. Moscow: Infra-M, 2015, 192 pp., in Russian.
- [24] H. Cramér, “On the mathematical theory of risk”, in *Försäkringsaktiebolaget Skandias Festskrift*, 1930, pp. 7–84.
- [25] H. Cramér, *Collective risk theory: A survey of the theory from the point of view of the theory of stochastic processes*. Stockholm: Nordiska bokhandeln, 1955, 210 pp.
- [26] H. Bühlmann, *Mathematical Methods in Risk Theory*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1970, 210 pp. DOI: [10.1007/978-3-540-30711-2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30711-2)

- [27] V. Y. Korolev, V. E. Bening, and S. Y. Shorgin, *Matematicheskie osnovy teorii riska*. Moscow: FIZMATLIT, 2011, 512 pp., in Russian.
- [28] E. Zio, “System reliability and risk analysis”, in *The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis*. Springer London, 2013, pp. 7–17. DOI: [10.1007/978-1-4471-4588-2_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4588-2_2)
- [29] J. Lathrop and B. Ezell, “A systems approach to risk analysis validation for risk management”, *Safety Science*, vol. 99, pp. 187–195, 2017. DOI: [10.1016/j.ssci.2017.04.006](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.04.006)
- [30] V. Rykov, O. Kochueva, M. Farkhadov, E. Zaripova, and A. Zhaglova, “Sensitivity analysis of risk characteristics of complex engineering systems: An application to a subsea pipeline monitoring system”, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 352, p. 15, 2023. DOI: [10.3390/jmse11020352](https://doi.org/10.3390/jmse11020352)
- [31] Q. Wang, J. Mao, and H.-y. Wei, “Reliability analysis of multi-rotor UAV based on fault tree and monte carlo simulation”, in *Advances in Mechanical Design*, vol. 55, 2018, pp. 1001–1010. DOI: [10.1007/978-981-10-6553-8_100](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6553-8_100)
- [32] S. Byun, M. Papaalias, F. P. G. Márquez, and D. Lee, “Fault-tree-analysis-based health monitoring for autonomous underwater vehicle”, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, no. 1855, p. 20, 2022. DOI: [10.3390/jmse10121855](https://doi.org/10.3390/jmse10121855)
- [33] V. A. Kashtanov and A. I. Medvedev, *Teoriya nadezhnosti slozhnyh sistem*, 3rd ed. Lenand, 2023, 640 pp., in Russian.
- [34] A. Saltelli, K. Chan, and E. Scott, *Sensitivity Analysis*. John Wiley & Sons, 2000, 475 pp.
- [35] V. Rykov, N. Ivanova, and D. Kozyrev, “Risk tree as an assistant tool for the decision-maker”, in *Proceedings of the 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops*, 2021, pp. 109–114. DOI: [10.1109/ICUMT54235.2021.9631604](https://doi.org/10.1109/ICUMT54235.2021.9631604)
- [36] V. M. Vishnevsky, A. M. Shirvanyan, and N. N. Bryahko, “Calculation of the required power for the operation of a tethered unmanned platform in a turbulent atmosphere”, *Journal of Information Technologies and Computing Systems*, no. 3, pp. 71–84, 2020, in Russian. DOI: [10.14357/20718632200307](https://doi.org/10.14357/20718632200307)
- [37] V. M. Vishnevsky, E. A. Barabanova, K. A. Vytovtov, and N. S. Kalmykov, “System of synchronous movement of high-altitude unmanned platform and ground vehicle”, in *Proceedings of 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT 2023)*, 2023, p. 6. DOI: [10.1109/ICCT57981.2023.10347109](https://doi.org/10.1109/ICCT57981.2023.10347109)
- [38] V. M. Vishnevsky, A. N. Gor’kov, and G. N. Ahobadze, “Avtomaticeskaya sistema podachi silovogo kabelya na privyaznoj bespilotnyj letatel’nyj apparat”, *Inzhenernaya fizika*, no. 3, pp. 15–23, 2024, in Russian.
- [39] V. Vishnevsky, B. Tereschenko, D. Tumchenok, and A. Shirvanyan, “Optimal method for uplink transfer of power and the design of high-voltage cable for tethered high-altitude unmanned telecommunication platforms”, in *Distributed Computer and Communication Networks*, in Russian, vol. 700, 2017, pp. 240–247. DOI: [10.1007/978-3-319-66836-9_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66836-9_20)
- [40] V. M. Vishnevsky, E. A. Mikhailov, D. A. Tumchenok, and A. M. Shirvanyan, “Mathematical model of the operation of a tethered unmanned platform in the case of wind influence”, *Matematicheskoe modelirovanie*, vol. 31, no. 11, pp. 61–78, 2019, in Russian. DOI: [10.1134/S0234087919110054](https://doi.org/10.1134/S0234087919110054)

- [41] V. M. Vishnevsky, E. A. Mikhailov, and N. D. Phuong, “Reserve navigation system of tether powered unmanned aerial platform in conditions of turbulent atmosphere”, in *Distributed Computer and Communication Networks*, vol. 1337, 2020, pp. 120–134. DOI: [10.1007/978-3-030-66242-4_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-66242-4_10)
- [42] V. M. Vishnevsky et al., “Physical foundation of hybrid navigation system for tethered high-altitude unmanned platforms”, in *Proceedings of 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, IEEE, 2022. DOI: [10.1109/ICCT56057.2022.9976848](https://doi.org/10.1109/ICCT56057.2022.9976848)
- [43] E. Ruijters and M. Stoelinga, “Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools”, *Computer Science Review*, vol. 15, pp. 29–62, 2014. DOI: [10.1016/j.cosrev.2015.03.001](https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2015.03.001)