

Снижение вероятности аварий беспилотных авиационных систем с учетом сложности маршрутов

A.A. Косицын¹, A.C. Богомолов^{1,2}, B.A. Кушников^{1,2}

¹«Саратовский научный центр Российской Академии Наук», Саратов, Россия

²«Саратовский национальный исследовательский государственный университет», Саратов, Россия

Аннотация: В работе исследуется задача снижения вероятности развития аварийных ситуаций с участием беспилотных авиационных систем. Аварии рассматриваются как результат сочетания относительно неопасных по отдельности событий. Причинно-следственные связи описываются деревьями отказов, где корневой вершиной является авария, а листьями — базовые события, промежуточные узлы отражают их комбинации. Сценарии аварий соответствуют минимальным сечениям дерева отказов. Для определения способов предупреждения аварий рассматриваются пути успешного функционирования. Каждый такой путь представляет собой множество вершин, имеющее непустые пересечения со всеми минимальными сечениями. Предполагаем, что предотвращение всех событий, входящих в путь успешного функционирования, делает невозможным развитие аварийных сценариев. В работе учитывается, что одно и то же полетное задание может выполняться по маршрутам различной сложности. Сложность маршрута влияет на оценки затрат при проведении мероприятий по предупреждению событий, составляющие аварийные комбинации. В модельном примере описывается оценка сложности двух маршрутов, приводится таблица затрат на парирование базовых событий и выбор целесообразного варианта пути успешного функционирования для предупреждения аварии. Предложенная методика направлена на снижение вероятности реализации аварийных комбинаций событий до допустимого значения при соблюдении эксплуатационных ограничений и целевых условий полетного задания.

Ключевые слова: беспилотная авиационная система, аварийная комбинация событий, дерево отказов, сложность маршрутов, логико-вероятностный анализ безопасности.

Введение

В настоящее время в мировой практике стремительно расширяется применение беспилотных авиационных систем (БАС) гражданского назначения [1]. Согласно данным европейского агентства безопасности полетов (easa.europa.eu/en), число зарегистрированных операторов БАС стабильно растет год от года. Однако с ростом спектра и сложности решаемых задач растет и количество потенциальных аварий, инцидентов, связанных с БАС [2, 3], а регистрируемое количество таких происшествий не показывает устойчивой тенденции к снижению.

В этой связи является актуальным совершенствование математического обеспечения [4] для оценки текущей вероятности развития аварийных комбинаций событий и рекомендации мер по ее снижению. Решению такой задачи для авиационных систем посвящен ряд исследований, из которых отметим работы Н.Н. Макарова и В.М. Солдаткина, в которых проводится оценка близости авиационных систем к аварии [5]. В этих работах уровень опасности оценивался по приближению определенных параметров к критическим значениям. Однако данные параметры оценивались по отдельности и не учитывалось их возможное взаимодействие друг с другом. Значимость взаимодействия событий во времени учитывается в концепции аварийных комбинаций (критических сочетаний), которая была впервые предложена в [6] и разрабатывалась под руководством Г.В. Новожилова и А.Ф. Резчикова в дальнейшем. Согласно данной концепции, авария – это следствие сочетания небольших инцидентов различного происхождения. Такими инцидентами могут быть некритичные отказы программного обеспечения, влияние окружающей среды, а также человеческий фактор. Учесть и предотвратить все эти небольшие потенциально неблагоприятные события не представляется возможным, однако разрабатываемые математические модели и алгоритмы позволяют проводить выборочную работу с целью предупреждения развития наиболее вероятных аварийных комбинаций. При этом для предупреждения аварий беспилотных систем требуется специфицировать данный подход и развить математические модели, алгоритмы именно с учетом актуальных реалий работы БАС.

При утверждении полетного задания для БАС в числе других важных факторов рассматривается маршрут движения беспилотного летательного аппарата. Как правило, полетное задание может быть выполнено по нескольким вариантам маршрута, каждый из которых характеризуется определенной сложностью. Оценить эту сложность можно, например,

методом, который рассматривается в [7]. Сложность маршрута влияет на затраты, которые сопровождают обслуживание и подготовку системы к полетам. В то числе, на затраты по предупреждению отдельных потенциально неблагоприятных событий. С учетом этого фактора сформулируем рассматриваемую в статье задачу.

Формально, задача исследования заключается в следующем. Пусть E – некоторое множество событий, происходящих в процессе функционирования БАС на временном отрезке T , $A = (A_1, \dots, A_n)$ – рассматриваемое множество аварийных комбинаций этих событий, $p_i(t)$ – вероятность развития аварийной комбинации i , $i = 1, \dots, n$, на отрезке T . Для каждого события из $e \subseteq E$ известны мероприятия, выполнение которых позволяет предупредить появление e на отрезке T , то есть, сделать вероятность появления этого события меньше заданного числа ε . Множество таких мероприятий для всех событий E обозначим через $Q(E)$. Выполнение каждого мероприятия $\sigma \subseteq Q(E)$ связано с затратами времени $R(\sigma, \xi)$, где ξ – оценка сложности полетных заданий для БАС.

Требуется определить комплекс мероприятий из $Q(E)$, при реализации которых будет выполнено неравенство

$$p_i(t) < \varepsilon \quad (1)$$

для $i = 1, \dots, n$, на отрезке времени T при условии достижения целей и условий функционирования БАС

$$C_h(s(t_h), x(t_h), u(t_h), t_h) = 0, \quad (2)$$

$$C_k(s(t_k), x(t_k), u(t_k), t_k) = 0, \quad (3)$$

где $C_h(s(t_h), x(t_h), u(t_h), t_h)$, $C_k(s(t_k), x(t_k), u(t_k), t_k)$ – заданные функции, и ограничения

$$D_1(t) \square D(s(t), x(t), u(t), t) \square D_2(t), \quad (4)$$

связанные с целями и нормативами функционирования БАС, где $s(t)$, $x(t)$ – состояние БАС и ее внешней среды, $u(t)$ – управляющие воздействия на БАС, включающие искомые мероприятия из $Q(E)$, $D(s(t), x(t), u(t), t)$, $D_1(t)$, $D_2(t)$ – заданные на T функции и условия ограничения времени на реализацию мероприятий по предотвращению событий e_1, \dots, e_k

$$\sum_{i=1}^k R(e_i, \xi) \leq R, \quad (5)$$

где ξ – сложность задания, $R(e_i, \xi)$ – заданная функция затрат времени реализации воздействий из $Q(E)$ и R – заданное ограничение этих затрат.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи использовались следующие основные математические модели: деревья отказов [8, 9], аппарат для оценки сложности последовательностей [10], и модель для оценки затрат на реализацию мероприятий по предупреждению аварийных комбинаций событий.

Деревья отказов. В качестве основных причинно-следственных структур для представления и качественного анализа аварийных комбинаций событий используются деревья отказов – иерархические структуры, отражающие причинно-следственные зависимости между событиями, возникающими при развитии «аварии» (корень дерева). Для качественного представления аварийных комбинаций событий у дерева отказов определяются минимальные сечения. Каждое из них представляет собой минимальное по мощности множество концевых вершин, реализация которых приводит к реализации корневой вершины.

Для определения мероприятий из $Q(E)$ по предотвращению развития аварийных комбинаций событий предлагается использовать множество минимальных путей успешного функционирования $M(T)$ деревьев отказов, а

также их усеченного вида на различных отрезках времени, в том числе - в процессе функционирования системы. Каждый минимальный путь успешного функционирования (ПУФ) представляет собой такое минимальное множество \square , что если все события, соответствующие вершинам \square , не реализуются, то не реализуется и корневая вершина T .

Физический смысл минимальных ПУФ заключается в том, что предупреждение событий, входящих в такие пути, позволяет разрушать цепочки причинно-следственных связей, приводящие к реализации минимальных сечений.

Аппарат для оценки сложности последовательностей использует спектр динамических характеристик последовательности действий, предписанных оператору согласно заданию на полет. Для каждой такой последовательности определяется число смен рекуррентных форм и этот показатель представляется как один из вариантов оценки сложности маршрута.

Для оценки затрат на реализацию мероприятий по предупреждению аварийных комбинаций событий в работе использовалась линейная модель, согласно которой затраты на предупреждение нескольких событий складываются из затрат на предупреждение их по отдельности, однако при этом также учитывалась сложность полетного задания для БАС.

Затраты на мероприятия, проводимых по исключению рассматриваемых событий на заданном отрезке времени определялись как

$$\sum_{e \in List(D_0)} \alpha(e) R(e, \xi) \quad (6)$$

где $List(D_0)$ – множество концевых вершин D_0 , $R(e, \xi)$ – затраты на мероприятие по исключению события e на заданном отрезке времени с учетом сложности ξ задания БАС. Индикатор $\alpha(e)$ принимает значение 1, если мероприятия по событию проводились и 0, если нет. Эта модель используется в случае, когда имеется несколько путей предупреждения

аварийных комбинаций событий из рассматриваемого множества и мы можем выбрать наименее затратный путь.

Результаты

Анализ отчетов организаций [11], которые занимаются расследований аварий с участием беспилотных летательных аппаратов позволил выделить основные типы критических сочетаний событий, реализация которых приводила к авариям. В таблице 1 приведены данные типы, а также частота с которой они встречались в рассматриваемых отчетах.

Таблица № 1

Причины аварий, как критические сочетания событий

Причина аварии	Частота аварии
Ошибка пилота при заходе на посадку	15 %
Ошибка планирования полетного задания	5 %
Нарушение регламента зарядки батареи	5 %
Ошибка при переходе на ручной режим управления	10 %
Ошибка пилота при управлении	25 %
Отказ энергетической установки	10 %
Неблагоприятные погодные условия	15 %
Нарушение правил приоритета воздушного движения	13 %
Нарушение целостности конструкции	2 %

Детальное изучение приведенных основных типов критических сочетаний событий, отчеты о происшествиях, нормативная документации [12], а также опыт экспертов в области проектирования и применения беспилотных авиационных систем [13] позволил декомпозировать часть причин аварий, приведенных в таблице 1 и построить деревья отказов с базовыми событиями, расположенными на листьях построенного дерева. На рисунке 1 приведен фрагмент такого дерева, где названия вершин: A_0 – корневая вершина (основное критическое событие), A_1 и A_2 – возможные причины аварий описанные в таблице 1, a_i – вершины высокого порядка, группирующие базовые события на логические группы, e_i – идентификаторы базовых событий из E .

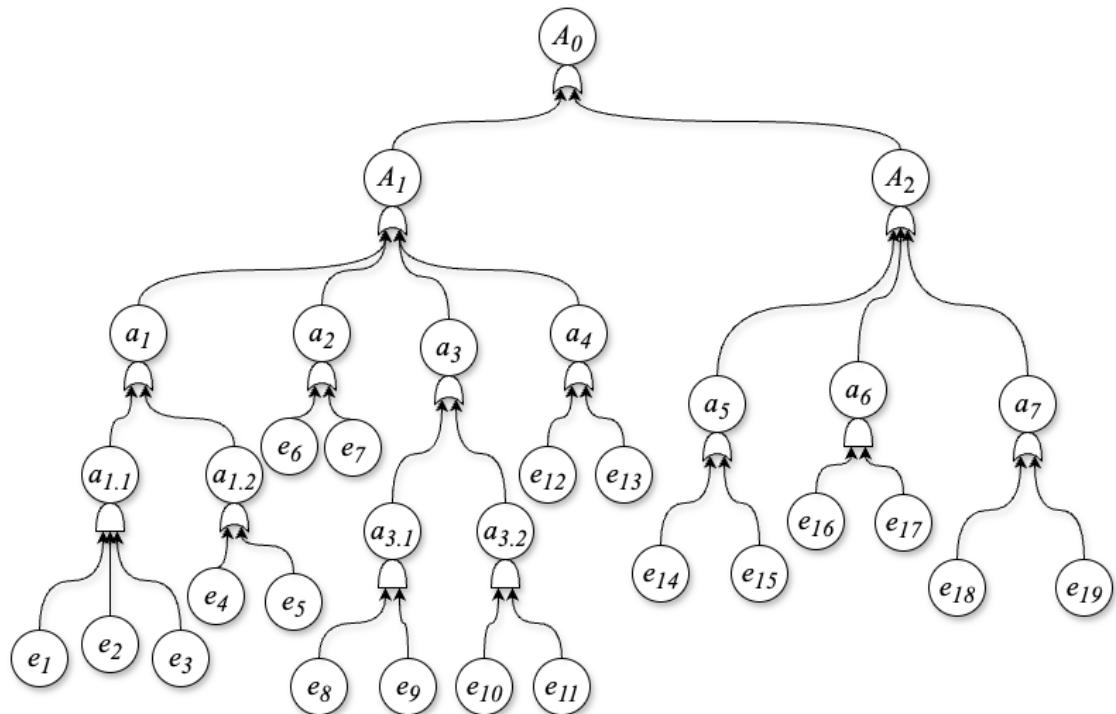


Рисунок 1 – Фрагмент дерева отказов.

Смоделируем ситуацию, когда требуется выполнить облет территории для мониторинга промышленных объектов. При подготовке полетного задания поступила информация, что для его выполнения подходят два маршрута. Полетное задание представляет собой структурированный пакет данных и инструкций, который содержит в себе исчерпывающую информацию для полета беспилотного воздушного судна в автоматическом или полуавтоматическом режиме. В задании учитываются: последовательность и типы точек маршрута, профиль полета, погодные условия, возможные аварийные сценарии, старт и завершение полета.

Сравним сложности маршрутов M_1 и M_2 по номерам команд, требуемых для полета беспилотного воздушного судна в полуавтоматическом режиме. Для этого проанализируем спектры динамических характеристик последовательностей $\Omega_j(\alpha_i)$.



$$\begin{aligned}\Omega_0(\alpha_2^{(2)}) &= 6; \\ \Omega_1(\alpha_2^{(2)}) &= \langle 4, 4, 4, 11, 36, 50 \rangle; \\ \Omega_2(\alpha_2^{(2)}) &= \langle 13, 6, 5, 3, 1, 0 \rangle; \\ \Omega_3(\alpha_2^{(2)}) &= \langle \Omega_3^1(\alpha_2^{(2)}), \Omega_3^2(\alpha_2^{(2)}), \dots, \Omega_3^6(\alpha_2^{(2)}) \rangle; \\ \Omega_3^1(\alpha_2^{(2)}) &= \langle 4, 3, 6, 3, 2, 6, 3, 3, 6, 9, 4, 8, 3, 3 \rangle; \\ \Omega_3^2(\alpha_2^{(2)}) &= \langle 4, 7, 4, 6, 8, 17, 16 \rangle; \\ \Omega_3^3(\alpha_2^{(2)}) &= \langle 4, 9, 4, 7, 24, 17 \rangle; \\ \Omega_3^4(\alpha_2^{(2)}) &= \langle 11, 27, 6, 18 \rangle; \\ \Omega_3^5(\alpha_2^{(2)}) &= \langle 36, 19 \rangle; \\ \Omega_3^6(\alpha_2^{(2)}) &= \langle 50 \rangle.\end{aligned}$$

Анализ приведенных спектров \square и \square , показывает, что для определения последовательности \square требуется рекуррентная форма порядка 6, тогда как для определения последовательности \square достаточно рекуррентной формы 3-го порядка.

Эксперт, который принимает решения о выборе маршрута по полученной информации о сложности каждого из маршрутов и наличию свободных ресурсов на полет должен выбрать один из них. От сложности маршрута зависит стоимость мероприятий по парированию отдельных потенциально опасных событий.

В таблице 2 приведено описание базовых вершин $e_1 - e_{19}$ для дерева отказов на рисунке 1 с оценками стоимости затрат на их предупреждение или парирование, определённые экспертами в зависимости от выбранного маршрута M_1 и M_2 (Q_1 и Q_2 соответственно).

Таблица № 2
Оценка затрат на парирование базовых событий

	Описание вершины	Затраты $Q_1(e_i)$	Затраты $Q_2(e_i)$
e_1	Частичная разрядка АКБ (25 – 40%)	1,2	1,5
e_2	Низкая температура АКБ (0 – 10 °C)	1,6	2,3
e_3	Умеренный дисбаланс элементов	2,0	2,6
e_4	Жесткий лимит тока BMS	2,4	2,8

1	2	3	4
$e5$	Ограничение тока ESC	2,0	2,6
$e6$	Окисление контактов	1,6	1,7
$e7$	Слабая масса/заземление	1,7	2,0
$e8$	Высокая окружающая температура	1,2	1,4
$e9$	Слабая вентиляция батарейного отсека	2,4	2,8
$e10$	Запыление воздуховодов	1,2	1,4
$e11$	Длительная высокая нагрузка ESC	1,2	1,4
$e12$	Завышенные отсечки по напряжению	2,0	2,6
$e13$	Лаг или потеря телеметрии	2,4	2,8
$e14$	Заряд без присмотра	1,2	1,2
$e15$	Игнорирование индикации или тайминга завершения	1,2	1,2
$e16$	Заряд батареи при высоких температурах	2,0	2,0
$e17$	Превышения тока или напряжения	1,6	1,6
$e18$	Неоригинальное зарядное устройство	2,4	2,4
$e19$	Плохой контакт в зарядной цепи	1,2	1,2

У дерева на рисунке 1 насчитывается 28 минимальных сечений, каждое из которых лежит в основе, вообще говоря, нескольких вариантов сценария развития аварии (отличающихся, например, порядком событий). В то же время, у данного дерева насчитывается 35 путей успешного функционирования. Мы основываемся на предположении, что предотвращение всех событий из каждого такого пути позволяет сделать вероятность развития любой аварийной комбинаций равной не более ε [4].

Основываясь на оценке стоимости мероприятий по предупреждению базовых событий в таблице 2, эксперт выбирает целесообразный путь успешного функционирования, а также маршрут полета. Минимальную суммарную стоимость затрат имеет путь успешного функционирования с вершинами $\{e8, e10, e17\}$ для маршрута M_1 . Зная об имеющихся ресурсах для выполнения конкретного задания, эксперт выбирает именно эту комбинацию маршрута и ПУФ. Стоит отметить, что при наличии достаточного количества ресурса возможен выбор и другого, более затратного маршрута.

После выбора одного пути успешного функционирования проводятся соответствующие ему мероприятия, включая случаи, если одно или несколько базовых событий уже наступили – тогда мероприятия касаются устранения их последствий. Мероприятия, разработанные для вершин $e8$, $e10$, $e17$, приведены в таблице 3.

Таблица № 3

Мероприятия по предупреждению событий $e8$, $e10$, $e17$

Событие	Мероприятия по предупреждению
$e8$	Оценить температуру воздуха на высоте профиля. Ограничить максимальную горизонтальную скорости и вертикальный набор при увеличении температуры воздуха выше 35 °C.
$e10$	Убедиться, что пылевой фильтр чист и заменить, если это требуется по регламенту или текущему состоянию. Провести профилактику чистоты воздуховодов. Не использовать растворители. Продуть элементы сжатым воздухом при наличии технической возможности.
$e17$	Использовать сертифицированные устройства для заряда АКБ. Убедится в отсутствии недопустимых пиковых напряжений при зарядке батареи. Проверить отсутствие признаков перегрева силовых кабелей и при необходимости заменить.

В случае наличия критичных неисправностей узлов аппарата они с большой вероятностью будут замечены техниками экипажа и восстановлены, или аппарат не будет допущен до полета. При этом задание не будет выполнено, но аппарат будет гарантировано сохранен. Если же полет был начат ввиду пропуска неисправности на этапе предполетного контроля, то вероятность развития аварийной комбинации событий может превысить критические и привести к нежелательным последствиям.

Обсуждение

На основании открытых данных об аварийных ситуациях с гражданскими БАС в странах Европейского союза [14] и выделенных в работе типов аварийных ситуаций сделана оценка возможного снижения

количества таких ситуаций в случае своевременного внедрения и применения результатов представленной работы. На рисунке 2 столбцы с маркером 1 отражают количество зафиксированных инцидентов и аварий БАС, столбцы с маркером 2 – прогнозируемое количество аварий при использовании подхода, описанного в настоящей работе. Полученные результаты показывают, что при внедрении предлагаемых моделей и алгоритмов уровень аварийности в 2020–2024 гг. мог быть в среднем на 15% ниже.



Рисунок 2 – Моделирование эффекта внедрения результатов
Отметим, что при расширении предлагаемых моделей на другие выделенные типы аварий процент снижения будет существенно выше.

Заключение

В работе предлагается подход к снижению вероятности развития аварийных комбинаций событий с беспилотными авиационными системами гражданского назначения. Целенаправленный выбор мероприятий для этого основан на анализе деревьев отказов, включающих внешние события и поведение персонала, и сложности полетных заданий для беспилотных аппаратов. Согласно результатам моделирования, внедрение предложенных математических моделей в контуры управления БАС могут позволить снизить количество аварий БАС более чем на 15 %.

Литература

1. Kim A., Wampler B., Goppert J., et al. Cyber attack vulnerabilities analysis for unmanned aerial vehicles // AIAA Aerospace Research Central. 2012. No. 2438. DOI: 10.2514/6.2012-24381.
2. Zeng Y., Zhang R., Lim T. J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54. P. 36–42. DOI: 10.1109/MCOM.2016.74709331.
3. Soria P. R., Bevec R., Arrue B. C., et al. Extracting objects for aerial manipulation on UAVs using low-cost stereo sensors // Sensors. 2016. Vol. 16. Art. 700. DOI: 10.3390/s160507001.
4. Косицын А. А., Богомолов А. С., Кушников В. А. Задача снижения вероятности развития аварийных комбинаций событий в беспилотных авиационных системах // Прикладная информатика. 2024. Т. 19, № 4. С. 18–34.
5. Макаров Н. Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса: теория, проектирование, применение / под ред. В. М. Солдаткина. М.: Машиностроение, 2009. 760 с.
6. Богомолов А. С., Резчиков А. Ф. Критические сочетания событий — причины аварий в человеко-машинных системах // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2015): материалы восьмой международной конференции. М.: ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, 2015. С. 130–135.
7. Kositlyn A. A., et al. Mathematical modeling, analysis and evaluation of the complexity of flight paths of groups of unmanned aerial vehicles in aviation and transport systems // Mathematics. 2021. Vol. 9. Art. 2171.

8. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Политехника, 2000. 247 с.
9. Диллон Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем. М.: Мир, 1984. 318 с.
10. Резчиков А. Ф., Твердохлебов В. А. Метод рекуррентного и Z-рекуррентного управления функционированием сложной системы // Проблемы управления. 2018. № 3. С. 56–64.
11. National Transportation Safety Board. NTSB homepage. URL: ntsb.gov/Pages/home.aspx (дата обращения: 24.11.2025).
12. EUROCAE; SAE. ARP4761. Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment. URL: eurocae.net (дата обращения: 24.11.2025).
13. ПАО «ФСК ЕЭС». Методические указания по применению беспилотных летательных аппаратов для обследования воздушных линий электропередачи и энергетических объектов. 2016. URL: fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.200.10.235-2016.pdf (дата обращения: 24.11.2025).
14. European Union Aviation Safety Agency (EASA). URL: easa.europa.eu/en/downloads/142402/en (дата обращения: 24.11.2025).

References

1. Kim A., Wampler B., Goppert J., et al. Cyber attack vulnerabilities analysis for unmanned aerial vehicles. AIAA Aerospace Research Central. 2012; 2438. doi:10.2514/6.2012-24381.
2. Zeng Y., Zhang R., Lim T. J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges. IEEE Communications Magazine. 2016; 54:36-42. doi:10.1109/MCOM.2016.74709331.

3. Soria P. R., Bevec R., Arrue B. C., et al. Extracting objects for aerial manipulation on UAVs using low cost stereo sensors. *Sensors*. 2016; 16:700. doi:10.3390/s160507001.
 4. Kositsyn A. A., Bogomolov A. S., Kushnikov V. A. Zadacha snizheniya veroyatnosti razvitiya avariinykh kombinatsii sobytii v bespilotnykh aviationsionnykh sistemakh [Reduction of the probability of developing accident event combinations in unmanned aerial systems]. *Prikladnaya Informatika*. 2024; 19(4):18-34.
 5. Makarov N. N. Sistemy obespecheniya bezopasnosti funktsionirovaniya bortovogo ergaticheskogo kompleksa: teoriya, proektirovanie, primenie [Safety Support Systems for the Operation of On-Board Ergatic Complexes: Theory, Design, Application]. Moskva: Mashinostroenie; 2009. 760 p.
 6. Bogomolov A. S., Rezchikov A. F. Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2015): materialy vos'moi mezhdunarodnoi konferentsii. Moskva: IPU im. V. A. Trapeznikova RAN; 2015. pp. 130-135.
 7. Kositzyn A. A., et al. Mathematical modeling, analysis and evaluation of the complexity of flight paths of groups of unmanned aerial vehicles in aviation and transport systems. *Mathematics*. 2021; 9:2171.
 8. Ryabinin I. A. Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno slozhnykh system [Reliability and safety of structurally complex systems]. Saint Petersburg: Politekhnika; 2000. 247 p.
 9. Dillon B. Inzhenernye metody obespecheniya nadezhnosti system [Engineering methods for ensuring system reliability]. Moskva: Mir; 1984. 318 p.
 10. Rezchikov A. F., Tverdokhlebov V. A. Metod rekurentnogo i Z rekurentnogo upravleniya funktsionirovaniem slozhnoi sistemy. *Problemy Upravleniya* [The Method of Recurrent and Z-Recurrent Control of the Functioning of a Complex System]. 2018;(3):56-64.
-



11. National Transportation Safety Board. NTSB homepage. URL: ntsb.gov/Pages/home.aspx
12. EUROCAE; SAE. ARP4761. Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment.
13. PAO "FSK EES". Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya obsledovaniya vozdushnykh liniy elektroperedachi i energeticheskikh ob'ektov [Methodological Guidelines for the Use of Unmanned Aerial Vehicles for Inspection of Overhead Power Lines and Energy Facilities]. 2016. URL: fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.200.10.235-2016.pdf
14. European Union Aviation Safety Agency (EASA). Downloads. URL: easa.europa.eu/en/downloads/142402/en

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 14.11.2025

Дата публикации: 26.12.2025