

УДК 519.718

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПРИВЯЗНОЙ ВЫСОТНОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕРЕВА РИСКОВ

Н. М. Иванова

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: nm_ivanova@bk.ru

В. М. Вишневский

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: vishn@inbox.ru

Ключевые слова: привязная высотная телекоммуникационная платформа, надежность, дерево рисков, вероятность отказа системы.

Аннотация: В настоящем докладе представлено исследование надежности привязной высотной телекоммуникационной платформы с помощью анализа дерева рисков. В рамках исследования вероятности наступления рискового события рассматривается применение привязной высотной платформы для обеспечения телекоммуникационного покрытия. Для этого применены известные методика и процедура построения дерева рисков для расчета соответствующих характеристик: распределения времени наступления промежуточных и основных событий риска и связанных с ними убытков. Методика предполагает выявление наиболее опасного пути развития рисков ситуации по различным критериям, а также анализ чувствительности характеристик риска к исходной информации.

1. Введение

На протяжении последнего десятилетия стремительно развивается область разработки различных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Они применяются для выполнения широкого круга задач как в гражданской, так и военной областях, поскольку обладают значительными преимуществами по сравнению с другими техническими системами. Среди них наиболее важными являются относительная дешевизна, простота развертывания и эксплуатации в рамках выполнения конкретной задачи. Одним из наиболее критических показателей эффективности таких систем является их надежность, то есть способность сохранять свою работоспособность в течение длительного времени.

Очевидно, что автономные БПЛА имеют ограничения по времени

функционирования, а также не могут обеспечить высокий уровень надежности, поскольку имеют ограничения по мощности двигателей, весу полезной нагрузки и другим показателям. В связи с этим исследователи по всему миру уделяют особое внимание разработке привязных платформ на базе БПЛА для обеспечения непрерывного функционирования дрона в течение длительного времени [1]. Привязные БПЛА предназначены для выполнения широкого круга задач, например, задачи рекогносцировки, наблюдения, радиоэлектронной борьбы, пожаротушения, обеспечения дальней широкополосной беспроводной связи, развертывания современной телекоммуникационной инфраструктуры в чрезвычайных ситуациях и т.д. Привязная высотная телекоммуникационная платформа «Альбатрос», созданная в лаборатории 69 ИПУ РАН, является одним из примеров отечественной разработки в данной области, характеристики которой соответствуют лучшим зарубежным образцам [2]. Исследованию различных аспектов функционирования и проблемы обеспечения надежности этой платформы посвящен ряд работ, обзор которых представлен в монографии [3].

Настоящий доклад посвящен проблеме исследования надежности привязной высотной телекоммуникационной платформы с точки зрения риска как случайной величины, определенной на некотором вероятностном пространстве, характеристиками которой являются время наступления рискованного события и величина приносимого им ущерба. Таким образом, надежность системы вычисляется как вероятность наступления некоторого рискованного события, влекущего за собой сбой в работе системы или прекращение выполнения конкретной задачи. Рассматриваемый подход основан на процедуре построения дерева рисков, который позволяет лицу, принимающему решения (ЛПР), управлять рисками, зная структуру и параметры рассматриваемой системы. В этом подходе вероятностное пространство для любого явления риска специализировано с помощью построенного дерева рисков. Анализ этого дерева рисков позволяет не только рассчитать основные показатели качества обслуживания рискованной ситуации на основе информации о параметрах соответствующих элементарных событий, но и найти наиболее опасные пути ее развития по различным критериям. Совместно с анализом чувствительности параметров качества обслуживания риска к исходной информации эти результаты могут служить рекомендацией для ЛПР. Описанная процедура исследования подробно представлена в [4]. В работе [5] представлен анализ надежности БПЛА привязной высотной телекоммуникационной платформы с помощью построения и анализа дерева рисков. Текущая работа является продолжением этого исследования и посвящена анализу надежности всей платформы на основе построения дерева рисков для всех компонентов этой системы. При этом исходная информация о компонентах привязной высотной платформы является оценочными данными, близкими к реальным, представленными в работе [6].

2. Описание системы и ее компонентов

Рассматриваемая система представляет собой телекоммуникационную высотную платформу на базе привязного БПЛА. Основные компоненты ее архитектуры – это:

- беспилотный мультироторный летный модуль, который включает двигательные установки, системы управления и связи и навигационно-посадочное устройство;

- наземный модуль, в том числе подсистема интеллектуального подъемного механизма, подсистема питания, системы связи и передачи энергии земля-борт большой мощности. Подсистема интеллектуального подъемного механизма в свою очередь состоит из лебедки с микропроцессором, а также системы управления подачи и натяжения троса, в то время как система передачи энергии включает систему преобразования напряжения, блока аккумуляторных батарей, а также электрогенератора;
- кабель-трос на кевларовой основе, включающий медные провода для передачи высоковольтных сигналов и оптическое волокно для передачи цифровых данных со скоростью до 1 Гбит/с;
- резервная система навигации с использованием наземных маяков, обеспечивающая стабильное функционирование платформы в условиях ослабления/глушения сигнала GPS/ГЛОНАСС;
- бортовая аппаратура полезной нагрузки, расположенная на летном модуле, включающая компоненты, необходимые для выполнения платформой конкретной задачи.

Приведенное выше описание архитектуры привязной высотной телекоммуникационной платформы служит основой для построения дерева рисков, его оснащения и анализа рискового события с точки зрения вероятности его наступления.

3. Определение риска и его характеристик

В настоящей работе под риском понимается случайное явление на вероятностном пространстве $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$, на котором определяется двумерная случайная величина (с.в.) (T, X) , где T – время до наступления рискового события $A \in \mathcal{F}$, а X – приносимый ущерб. Таким образом, как и для любой с.в. ее основной характеристикой является функция распределения,

$$F(t, x) = \mathbf{P}\{T \leq t, X \leq x\}, \quad t \geq 0, \quad x \geq 0.$$

В наиболее реальных ситуациях информация о совместном распределении этих с.в. недоступна и приходится ограничиваться одномерными распределениями времен до рискового события и величины ущерба.

$$F_T(t) = \mathbf{P}\{T \leq t\} = F(t, \infty), \quad F_X(x) = \mathbf{P}\{X \leq x\} = F(\infty, x).$$

Для численных расчетов используются следующие характеристики рисков: среднее время наступления рискового события $\mu_T = \mathbf{M}[T]$, средняя стоимость причиненного им ущерба $\mu_X = \mathbf{M}[X]$, дисперсии соответствующих характеристик σ_T^2 и σ_X^2 , а также вероятность q того, что рисковое событие произойдет в течение фиксированного времени t_0 ,

$$q = \mathbf{P}\{T \leq t_0\} = \mathbf{M}[1_{\{T \leq t_0\}}].$$

4. Построение и анализ дерева рисков

Рассмотрим в качестве сценария функционирования привязанной высотной телекоммуникационной платформы ее использование в рамках обеспечения беспроводной широкополосной связи в течение длительного времени. Сбой обеспечения связи произойдет в случае последовательных отказов от элементарного компонента подсистемы до системы более высокого уровня. Более того, внешние факторы такие как погодные условия также влияют на работу платформы и должны быть учтены в анализе рисков. Таким образом, на основе приведенного выше описания компонентов системы были определены цепочки развития рисков ситуации, которые послужили основой для построения дерева рисков.

Анализ дерева рисков основывается на исходной информации о времени до наступления рисков события μ_T (оценка среднего времени до первого отказа компонента системы) и причиняемом ущербе μ_X (оценочная стоимость этого компонента на 2021 год), представленные в работе [6]. Событиями в дереве рисков являются отказы компонентов, подсистем и системы в целом. Соответствующие индикаторы состояний представляют собой структурные переменные отказов для компонентов,

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

а соответствующие структурные переменные функции описывают состояния отказов подсистем и системы в целом,

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

Таким образом, построение дерева рисков сопровождается расчетом его структурной функции с использованием связей различных шлюзов с соответствующими структурными функциями. В качестве структурной функции рассматривается функция надежности каждого компонента.

Предположим, что времена наступления элементарных событий, а также соответствующие приращения для промежуточных событий имеют распределение Гнеденко-Вейбулла ($GW(\alpha, \beta)$), для которого функция надежности $R(t) = e^{-(t/\beta)^\alpha}$, математическое ожидание $\mu_T = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$, дисперсия $\sigma_T^2 = \beta^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \mu_T^2$.

Предполагаем также, что коэффициент вариации $v = \frac{\sigma_T}{\mu_T} = 0.52, 1$.

Обозначим $R_{[1]}$ подсистему летного модуля, $R_{[2]}$ – телекоммуникационное оборудование, $R_{[3]}$ – подсистему наземного модуля, а R_{sys} – весь комплекс. Таким образом, в таблице 1 представлены значения среднего времени до отказа каждой из подсистем и среднее время до наступления результирующего события m_T , а также соответствующие оценки коэффициента вариации \hat{v} . В таблице 2 представлены оценки вероятностей наступления результирующего события $q_{sys}(i)$ из-за отказа i -ой подсистемы ($i = 1, 2, 3$). Таблицы демонстрируют очевидную зависимость искомых характеристик от значений коэффициента вариации времени до наступления рисков события. Более того, согласно приведенным результатам наименее надежной подсистемой относительно других является летный модуль.

Таблица 1. Оценочные меры риска

оценки	$v = 0.52$		$v = 1$	
	m_T	\hat{v}	m_T	\hat{v}
$R_{[1]}$	451.826	0.52	262.3	0.97
$R_{[2]}$	978.663	0.52	827.6	1
$R_{[3]}$	1995.09	0.52	1169.6	1
R_{sys}	402.064	0.52	171.6	0.98

Таблица 2. Оценки вероятностей наступления событий

	$v = 0.52$	$v = 1$
$q_{sys}(1)$	0.79	0.64
$q_{sys}(2)$	0.17	0.21
$q_{sys}(3)$	0.04	0.15

5. Заключение

В работе обсуждается проблема надежности привязанной высотной телекоммуникационной платформы и оценки сопутствующих рисков. В качестве результирующего рискового события рассматривается сбой обеспечения широкополосной связи. Последовательные отказы от элементарных компонентов до более крупных подсистем могут привести к рассматриваемой рисковому ситуации. Предполагается, что время наступления элементарных и промежуточных событий подчиняется произвольному распределению. Описанная методология анализа рисков позволяет моделировать время до наступления рискового события и связанный с ним ущерб. Вычисление наиболее опасного пути развития рисковому ситуации с точки зрения наибольшей вероятности ее наступления позволяет ЛПР управлять развитием этой ситуации.

Построение и исследование дерева рисков, численные результаты, а также анализ чувствительности характеристик надежности к виду исходной информации будут представлены в докладе и полной версии статьи.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-49-02023, <https://rscf.ru/project/22-49-02023/>.

Список литературы

1. Tognon M., Franchi A. Theory and Applications for Control of Aerial Robots in Physical Interaction Through Tethers // Springer Tracts in Advanced Robotics. 2021.
2. Vishnevsky V.M., Efrosinin D.V., Krishnamoorthy A. Principles of Construction of Mobile and Stationary Tethered High-Altitude Unmanned Telecommunication Platforms of Long-Term Operation // Communications in Computer and Information Science. 2018. Vol. 919. Cham: Springer.
3. Вишнеvский В.М., Рыков В.В., Козырев Д.В., Иванова Н.М. Моделирование надежности привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ. М.: РИЦ Техносфера, 2022. 194 с.
4. Рыков В.В., Иткин В.Ю. Надежность технических систем и техногенный риск. М.: Инфра-М, 2015. 192 с.
5. Rykov V.V., Ivanova N.M., Kozyrev D.V. Risk tree as an assistant tool for the decision-maker // Proceedings of the 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. Brno, Czech Republic, 2021. IEEE, 2021. P. 109–114.
6. Vishnevsky V.M., Barabanova E.A., Vytovtov K.A., Vytovtov G. K. Analysis of tethered unmanned high-altitude platform reliability // Lecture Notes in Computer Science. 2023. In print.