

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА/PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. ORGANIZATION OF
PRODUCTION**

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2025.8.1>

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ К НАДЕЖНОСТИ БЛА ПО СТОИМОСТНОМУ КРИТЕРИЮ

Научная статья

Блануца М.Г.^{1,*}

¹ ПАО «Долгопрудненское научно-производственное предприятие», Долгопрудный, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ntc-m[at]mail.ru)

Аннотация

В работе рассмотрен подход к вопросам задания требований к надежности БЛА (беспилотного летательного аппарата) на его КИ (комплектующие изделия). Эта задача связана с целесообразным распределением средств между комплектующими изделиями БЛА. Решать данный вопрос предлагается на этапе жизненного цикла «Проектирование». Представлен математический аппарат, с помощью которого можно оптимально распределять требования между основными комплектующими изделиями БЛА, лимитирующими его надежность. Суть предложенного подхода заключается в том, чтобы распределить требования к надежности системы (БЛА) между его комплектующими изделиями таким образом, чтобы затраты на обеспечение надежности системы (БЛА) были минимальными.

Ключевые слова: надежность БЛА, обеспечение надежности БЛА, распределение требований, методы выбора.

OPTIMISATION OF UAV RELIABILITY REQUIREMENTS BY COST CRITERION

Research article

Blanutsa M.G.^{1,*}

¹ PJSC "Dolgoprudny Scientific and Production Enterprise", Dolgoprudny, Russian Federation

* Corresponding author (ntc-m[at]mail.ru)

Abstract

The work examines the approach to assigning reliability requirements to unmanned aerial vehicles (UAVs) based on their components. This task involves the rational allocation of resources among UAV components. It is suggested that this issue be addressed at the 'Design' stage of the life cycle. A mathematical apparatus is presented that can be used to optimally distribute requirements among the main components of the UAV that limit its reliability. The essence of the proposed approach is to allocate the reliability requirements of the system (UAV) among its components in such a way that the costs of ensuring the reliability of the system (UAV) are minimised.

Keywords: UAV reliability, ensuring UAV reliability, allocation of requirements, selection methods.

Введение

«Одним из самых важных вопросов, требующих применения математических методов на этапе предварительного проектирования, является вопрос задания требований по надежности на отдельные составные части системы. Эта задача связана с целесообразным распределением средств между составными частями системы, эта задача может и должна решаться на этапе проектирования» [1].

В настоящее время задача оптимального распределения требований к надежности системы между ее комплектующими изделиями (блокам или элементам) в основном решалась применительно к сложным аппаратурным системам, с учетом специфики их проектирования, производства и эксплуатации. Аппаратурные системы обычно создаются на базе уже существующих радиоэлектронных блоков или электрорадиоэлементов (ЭРЭ), у которых известна или может быть определена зависимость стоимости от надежности.

Основные результаты

Задача распределения требований к надежности системы между комплектующими изделиями решается целым рядом оптимизационных методов, в том числе, методом неопределенных множителей Лагранжа [2], градиентным методом [3], методом направленного перебора [4], методом динамического программирования, методом уравнивания чувствительности системы по отдельным элементам [5]. Суть этих методов заключается в том, чтобы распределить требования к надежности системы между ее комплектующими изделиями таким образом, чтобы затраты на обеспечение надежности системы были минимальными. Применительно к БЛА постановка задачи имеет вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N C(K_{ЭНi}) = \min; \\ \prod_{i=1}^N K_{ЭНi} \geq K_{ЭН}, \end{cases} \quad (1)$$

где $C(K_{ЭНi})$ – стоимость i -го комплектующего изделия с коэффициентом эксплуатационной надежности $K_{ЭНi}$;

$K_{ЭН} = K_{ЭН}^{opt}$ – оптимальное значение обобщенного показателя надежности БЛА;

N – количество комплектующих изделий БЛА ($i = \overline{1, N}$).

Учитывая то, что $K_{ЭН} \geq 0,85$ нелинейное ограничение в постановке задачи без ущерба для точности решения можно заменить линейным, что в большинстве случаев и делается на практике, тогда получим:

$$\sum_{i=1}^N (1 - K_{ЭНi}) \leq (1 - K_{ЭН}). \quad (2)$$

Существенную трудность при решении задачи (1) представляет нахождение функциональных связей между стоимостью и надежностью для каждого комплектующего изделия. Установить такую зависимость для всех комплектующих изделий практически невозможно. Поэтому необходимо найти зависимость «стоимость – надежность» хотя бы для тех изделий, стоимость которых соизмерима со стоимостью БЛА. Такими комплектующими изделиями для БЛА являются аппаратурные блоки. Стоимость их составляет 60–70% от общей стоимости БЛА, а связь между стоимостью и надежностью получена в работе [6] и имеет вид:

$$C(K_{ЭНi}) = C_{Кoi} \left[1 + \ln \frac{1 - K_{ЭНoi}}{1 - K_{ЭН}} \right], \quad (3)$$

где $C_{Кoi}$ – стоимость комплектующего изделия с надежностью $K_{ЭНoi}$.

Так как стоимость и надежность каждого из оставшихся комплектующих изделий не являются определяющими для БЛА, то при оптимизации можно допустить, что и для них справедлива вышеуказанная зависимость (3). С учетом формул (2) и (3) постановка задачи (1) принимает вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N C_{Кoi} \left[1 + \ln \frac{1 - K_{ЭНoi}}{1 - K_{ЭН}} \right] = \min; \\ \sum_{i=1}^N (1 - K_{ЭНi}) \leq (1 - K_{ЭН}) \end{cases} \quad (4)$$

Оптимальные значения надежности $K_{ЭНi}$ можно определить методом неопределенных множителей Лагранжа. Функцию Лагранжа записывают следующим образом:

$$\begin{aligned} L = \sum_{i=1}^N C_{Кoi} \left[1 + \ln \frac{1 - K_{ЭНoi}}{1 - K_{ЭН}} \right] + \\ + \theta \left[\sum_{i=1}^N (1 - K_{ЭНi}) - (1 - K_{ЭН}) \right] = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где θ – неопределенный множитель Лагранжа.

Необходимые условия экстремума функции (5) имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial K_{ЭНi}} = 0, (i = \overline{1, N}); \\ \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

После дифференцирования по $K_{ЭНi}$ и θ получаем систему из $(N+1)$ алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \frac{C_{Кoi}}{1 - K_{ЭНi}} - \theta = 0 & (i = \overline{1, N}) \\ \sum_{i=1}^N (1 - K_{ЭНi}) - (1 - K_{ЭН}) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Решение системы уравнений (7) позволяет найти аналитическое выражение для оптимальных значений $K_{ЭНi}$. Поскольку из уравнений (7):

$$\sum_{i=1}^N K_{ЭНi} = -1 + K_{ЭН} + N, \quad (8)$$

а

$$K_{ЭНi} = 1 - \frac{C_{Кoi}}{\theta}, \quad (9)$$

Суммируя левую и правую части (9) по $(i = \overline{1, N})$ получим:

$$\sum_{i=1}^N K_{ЭНi} = N - \frac{1}{\theta} \sum_{i=1}^N C_{Кoi}. \quad (10)$$

Приравнявая правые части выражений (8) и (10) получим выражение для неопределенного множителя:

$$\Theta = \frac{\sum_{i=1}^N C_{Кoi}}{1 - K_{ЭН}}. \quad (11)$$

Подставляя зависимость (11) в (9), найдем аналитическое выражение для ряда оптимальных значений показателей надежности (ПН) комплектующих изделий БЛА:

$$K_{ЭНi}^{\text{opt}} = 1 - \frac{C_{Кoi}}{\sum_{i=1}^N C_{Кoi}} (1 - K_{ЭН}). \quad (12)$$

Выражение (12) позволяет сделать следующие выводы:

– доля отказов комплектующего изделия в составе БЛА прямо пропорциональна относительной стоимости его в БЛА, что дополнительно подтверждается статистическими данными по БЛА представленными в работе [7];

– при фиксированной оптимальной надежности всего БЛА необходимо иметь высокую надежность тех комплектующих изделий, проектирование, отработка, производство и эксплуатация которых обходится дешевле.

В таблице 1 приводится расчет $K_{ЭНi}$ по формуле (12) и с учетом унифицированного ряда чисел, для основных КИ (КИ1...КИ6) лимитирующих надежность изделия в целом (БЛА).

Таблица 1 - Расчет надежности БЛА и его основных КИ

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2025.8.1.1>

БЛА	КИ1	КИ2	КИ3	КИ4	КИ5	КИ6	Планер	Обтекатель
0,90	0,960	0,985	0,990	0,995	0,975	0,9985	0,992	0,997
0,92	0,970	0,990	0,994	0,996	0,980	0,999	0,994	0,998
0,94	0,975	0,990	0,995	0,9975	0,985	0,9992	0,995	0,998
0,95	0,980	0,992	0,996	0,998	0,990	0,992	0,996	0,999
0,96	0,985	0,994	0,997	0,998	0,990	0,995	0,997	0,999
0,97	0,990	0,995	0,9975	0,9985	0,992	0,9995	0,9975	0,9992

Предложенный метод отличается от ранее разработанных методов [8], [9] незначительным количеством исходных данных, имеющихся у каждого разработчика БЛА, при этом точность расчета практически не меняется.

Проиллюстрируем преимущество метода на примере.

Для распределения требований к надежности БЛА между комплектующими изделиями используют следующие формулы:

$$K_{ЭН}^{opt} = \exp \left\{ - \left[\frac{Lopt \alpha_i C_{Кoi} (\ln 1/K_{ЭН})}{K_{ЭН}} \right]^{\frac{1}{\alpha_i+1}} \right\} \quad (13)$$

для $K_{ЭНoi} = K_{ЭН}$ и $\alpha_i = 0,5$ имеем

$$b_i = \frac{K_{ЭН}}{\alpha_i [\ln(1/K_{ЭН})]^{\alpha_i} C_{Кoi}}, \quad (14)$$

$$Lopt = \left\{ \frac{(\ln 1/K_{ЭН})}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{b_i} \right)^{\frac{1}{\alpha_i+1}}} \right\}^{\alpha_i+1}, \quad (15)$$

где α_i – эмпирические коэффициенты характеризующие изменение стоимости от надежности для i -го комплектующего изделия.

Результаты расчета для $K_{ЭН} = 0,78$ приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Распределение требований надежности БЛА и его основных КИ

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2025.8.1.2>

Комплектующие изделия	$C_{Кoi}$ (тысяч руб.)	b_i	$Lopt \cdot 10^{-6}$	$K_{ЭНи}^{opt}$ (по формуле 13)	$K_{ЭН}^{opt}$ (по формуле 12)
КИ1	6000	3,191	0,521	0,9625	0,9686
КИ2	8000	3,191	0,400	0,9585	0,9581
КИ3	10000	3,191	0,314	0,9520	0,9476
КИ4	3000	3,191	1,16	0,9792	0,9843
КИ5	10000	3,191	3,14	0,9520	0,9476
Корпус	5000	3,191	0,625	0,9702	0,9738

Максимальное расхождение в расчетах составляет 0,52%.

Заключение

Использование данного метода не исключает другие подходы к распределению требований к надежности системы между комплектующими изделиями, в частности статистические методы [10]. Для БЛА и его комплектующих изделий можно использовать результаты статистического анализа, проведенного в работе [7].

При распределении требований к надежности комплектующих изделий, контролируемых по этапам эксплуатации, можно использовать методы оптимизации приведенные в [11], если известны статистические данные по

интенсивностям отказов в элементарных режимах эксплуатации или весовые коэффициенты вероятностей отказов по этапам эксплуатации.

Для аппаратурных комплектующих изделий БЛА, при расчете $K_{ТГi}$, $K_{БГi}$, $K_{БРi}$ (основные коэффициенты надежности БЛА- технической готовности, боевой готовности и боевой работы соответственно), необходимо применять следующие формулы:

$$K_{ТГi} = 1 - v_{1i}(1 - K_{ТГ}); \quad (16)$$

$$K_{БГi} = 1 - v_{2i}(1 - K_{БГ}); \quad (17)$$

$$K_{БРi} = 1 - \frac{C_{oi}}{\sum_{i=1}^N C_{oi}}(1 - K_{БР}), \quad (18)$$

где $K_{ТГ}$, $K_{БГ}$, $K_{БР}$ – ПН БЛА;

v_{1i} , v_{2i} – доля отказов БЛА, приходящаяся на i -ое комплектующее изделие при проведении регламентной проверки и предстартовой (предполетной) подготовки и определяются из выражений:

$$v_{1i} = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^{N_1} \lambda_i} \approx \frac{m_i}{\sum_{i=1}^{N_1} m_i} \approx \frac{q_i}{\sum_{i=1}^{N_1} q_i} \approx \frac{n_i}{\sum_{i=1}^{N_1} n_i} \approx \frac{C_{oi}}{\sum_{i=1}^{N_1} C_{oi}}; \quad (19)$$

$$v_{2i} = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^{N_2} \lambda_i} \approx \frac{m_i}{\sum_{i=1}^{N_2} m_i} \approx \frac{q_i}{\sum_{i=1}^{N_2} q_i} \approx \frac{n_i}{\sum_{i=1}^{N_2} n_i} \approx \frac{C_{oi}}{\sum_{i=1}^{N_2} C_{oi}}; \quad (20)$$

где λ_i , m_i , q_i , n_i , C_{oi} – интенсивность отказов, количество отказов, вероятность отказа, количество ЭРЭ и стоимость i -го комплектующего изделия, соответственно;

N_1 , N_2 , N – количество контролируемых комплектующих изделий при регламентной проверке, предстартовой (предполетной) подготовке и общее количество комплектующих изделий, соответственно.

При расчетах по формулам (19) и (20) выбирается то из соотношений, которое можно определить с достаточной точностью. Отметим, что формулы можно использовать и для других классов БЛА. Однако более точные оценки v_{1i} и v_{2i} дают соотношение в формулах (19) и (20), стоящие левее.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

- Гнеденко Б.В. О роли и месте теории надежности в вопросе создания сложных систем / Б.В. Гнеденко, Б.А. Козлов, И.А. Ушаков // Теория надежности и массовое обслуживание. — Москва : Наука, 1969. — С. 4–32.
- Левин Б.Р. Теория надежности радиотехнических систем (математические основы) / Б.Р. Левин. — Москва : Советское радио, 1978. — 264 с.
- Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. — Москва : Мир, 1985.
- Рябинин И.Л. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем / И.Л. Рябинин, Г.П. Черкесов. — Москва : Радио и связь, 1981. — 216 с.
- Решетов Д.С. Надежность машин : учебное пособие / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев; под ред. Д.Н. Решетова. — Москва : Высшая школа, 1988. — 238 с.
- Блануца М.Г. Математические модели роста надежности в процессе опытной отработки / М.Г. Блануца, С.В. Юдин // Естественные и Технические науки. — 2024. — № 10 (197). — С. 194–198.
- Акимов В.Н. Исследование надежности БЛА в производстве и эксплуатации, выявление закономерностей и рекомендации / В.Н. Акимов, М.Г. Блануца // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики: Серия «Естественные и Технические науки». — 2024. — № 9 (196). — С. 136–141.
- Кузьмин Ф.И. Задачи и методы оптимизации показателей надежности / Ф.И. Кузьмин. — Москва : Советское радио, 1972. — 224 с.
- ГОСТ 27.003-2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надёжности: национальный стандарт Российской Федерации. — Введ. 2017-09-01. — Москва : Стандартинформ, 2017. — 18 с.
- Федорова Н.Ю. Сравнительная оценка методов анализа надежности сложных технических систем / Н.Ю. Федорова // Моделирование и анализ сложных технических и технологических систем : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Таганрог, 29 ноября 2021 года. — Стерлитамак : АМИ, 2021. — 26 с.
- ГОСТ 1 02797-2012. Надежность изделий авиационной техники. Методы оптимизации распределения требований безотказности изделия по его составным частям: отраслевой стандарт Российской Федерации. — Введ. 2013-07-01. — Москва, 2013. — 43 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Gnedenko B.V. O roli i meste teorii nadezhnosti v voprose sozdaniya slozhnyh sistem [On the role and place of reliability theory in the creation of complex systems] / B.V. Gnedenko, B.A. Kozlov, I.A. Ushakov // Teorija nadezhnosti i massovoe obsluzhivanie [Reliability Theory and Queuing Theory]. — Moscow : Nauka, 1969. — P. 4–32. [in Russian]
2. Levin B.R. Teorija nadezhnosti radiotekhnicheskikh sistem (matematicheskie osnovy) [Theory of reliability of radio engineering systems (mathematical foundations)] / B.R. Levin. — Moscow : Sovetskoe radio, 1978. — 264 p. [in Russian]
3. Gill F. Prakticheskaja optimizacija [Practical optimisation] / F. Gill, W. Murray, M. Wright. — Moscow : Mir, 1985. [in Russian]
4. Rjabinin I.L. Logiko-verojatnostnye metody issledovanija nadezhnosti strukturno-slozhnyh sistem [Logical-probabilistic methods for studying the reliability of structurally complex systems] / I.L. Rjabinin, G.P. Cherkosov. — Moscow : Radio and Communications, 1981. — 216 p. [in Russian]
5. Reshetov D.S. Nadezhnost' mashin [Machine Reliability] : training manual / D.N. Reshetov, A.S. Ivanov, V.Z. Fadeev; edited by D.N. Reshetov. — Moscow: Vysshaya shkola, 1988. — 238 p. [in Russian]
6. Blauca M.G. Matematicheskie modeli rosta nadezhnosti v processe opytnoj otrabotki [Mathematical models of increasing UAV reliability during the process of experimental testing] / M.G. Blauca, S.V. Judin // Estestvennye i Tehnicheskie nauki [Natural and Technical Sciences]. — 2024. — № 10 (197). — P. 194–198. [in Russian]
7. Akimov V.N. Issledovanie nadezhnosti BLA v proizvodstve i jekspluatacii, vyjavlenie zakonomernostej i rekomendacii [Research into the reliability of UAVs in production and operation, identification of patterns and recommendations] / V.N. Akimov, M.G. Blauca // Sovremennaja nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki: Serija "Estestvennye i Tehnicheskie nauki" [Modern Science: Current Issues in Theory and Practice: Series "Natural and Technical Sciences"]. — 2024. — № 9 (196). — P. 136–141. [in Russian]
8. Kuz'min F.I. Zadachi i metody optimizacii pokazatelej nadezhnosti [Tasks and methods for optimising reliability indicators] / F.I. Kuz'min. — Moscow : Sovetskoe radio, 1972. — 224 p. [in Russian]
9. GOST 27.003-2016. Nadezhnost' v tehnike. Sostav i obshhie pravila zadaniya trebovanij po nadjozhnosti: nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii [Reliability in technology. Composition and general rules for setting reliability requirements: national standard of the Russian Federation]. — Introd. 2017-09-01. — Moscow : Standartinform, 2017. — 18 p. [in Russian]
10. Fedorova N.Ju. Sravnitel'naja ocenka metodov analiza nadezhnosti slozhnyh tehniceskikh sistem [Comparative assessment of methods for analysing the reliability of complex technical systems] / N.Ju. Fedorova // Modelirovanie i analiz slozhnyh tehniceskikh i tehnologicheskikh sistem [Modelling and analysis of complex technical and technological systems] : collection of articles based on the results of the International Scientific and Practical Conference, Taganrog, 29 November 2021. — Sterlitamak : AMI, 2021. — 26 p. [in Russian]
11. GOST 1 02797-2012. Nadezhnost' izdelij aviacionnoj tehniki. Metody optimizacii raspredelenija trebovanij bezotkaznosti izdelija po ego sostavnym chastjam: otraslevoj standart Rossijskoj Federacii [Reliability of aviation equipment. Methods for optimising the distribution of product reliability requirements among its components: industry standard of the Russian Federation]. — Introd. 2013-07-01. — Moscow, 2013. — 43 p. [in Russian]