УДК: 519.873

МЕХАНИЗМЫ ВЫБОРА КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Е.В. Юркевич
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: yurkevitch.evgenij@yandex.ru

Л.Н. Крюкова
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: Lidkryukova@yandex.ru

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты; выбор конструкторских решений; малые испытания; структурная схема надежности; математическая модель; критерий Байеса; неантагонистическая игра; лицо, принимающее решения; внешняя среда; критерий Вальда.

Аннотация: Рассмотрена задача выбора конструкторских решений в условиях малых и/или незавершенных испытаний беспилотных летательных аппаратов. Предлагается механизм поддержки выбора структурной схемы надежности, определяемой факторами, обеспечивающими безотказность таких аппаратов при частичной априорной информации об условиях их работы. С помощью математической модели описан механизм расчета вероятности успешности испытаний по критерию Байеса согласно схеме биномиальных испытаний на основе критерия максимума ожидаемого среднего выигрыша или минимума ожидаемого среднего риска. Для выбора конструкторских решений обеспечения надежности беспилотных летательных аппаратов предложена технология неантагонистической игры лица, принимающего решения, с внешней средой. Важной особенностью такой игры является неопределенность динамики внешних воздействий. В связи с отсутствием информации о внешних условиях и требованием минимизации риска выигрыш предлагается оценивать по критерию Вальда. Сопоставление расчетов игры относительно критерия успешности результатов и критерия рисков показало эквивалентность стратегии по обоим критериям.

1. Введение

Согласно положениям Государственных нормативных документов, определяющих требования к показателям надежности беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в конструкторскую документацию вводятся методики проведения теоретических расчетов вероятности безотказной работы (ВБР) БПЛА, а также требования к оценкам показателей по результатам летных испытаний (ЛИ) и эксплуатации.

В связи с высокой стоимостью БПЛА количество образцов, подвергаемых испытаниям, недостаточно для получения практически значимых статистических данных. Такое положение существенно ограничивает возможности применения известных способов оценки нормативно требуемых показателей. Становится актуальной задача разработки методического аппарата для выбора конструкторских решений в условиях малых и/или незавершенных испытаний. В данной работе предлагается механизм поддержки выбора структурной схемы надежности (ССН), определяемой факторами, обеспечивающими безотказность БПЛА при частичной априорной информации об условиях его работы.

2. Механизм максимизации надежности работы БПЛА при ограничениях, определенных полетным заданием

Для выбора конструкторских решений БПЛА рассмотрим механизм оценки вероятности его безотказной работы (ВБР) при выполнении полетного задания. В соответствии с положениями ГОСТ РО 1410-001 функциональная надежность БПЛА оценивается на основе расчета нижних односторонних доверительных границ (НДГ) ВБР с заданным уровнем доверия [1].

Механизм выбора искомой структурной схемы предлагается формировать на основе сочетания технологии, построенной на цифровом формате представления работы БПЛА, и экспертных решений в организации выполнения полетного задания. В связи с многовариантностью возможностей корректировки работы БПЛА, задача обеспечения устойчивости его работы является принципиально некорректной. Применение математических моделей в системах поддержки принятия решений позволяет алгоритмизировать выбор корректировки управления с минимумом рисков отказов и сбоев БПЛА [2].

Метод расчета вероятности отказа базируется на объединении проектной оценки P_0, полученной на этапе разработки конструкторской документации, с результатами испытаний, полученных во время ЛИ и эксплуатации. В этом случае в качестве исходных данных примем: количество испытаний (n); количество отказов (d); проектную оценку (P_0); уровень доверия (γ).

Ввиду того, что P_0 заранее известна, становится возможным зависимость результата испытаний от времени $\left(p(t)\right)$ рассматривать как условную вероятность успешного завершения испытания для конкретного БПЛА и получать ее значения для любого произвольного момента времени:

$$p(t) = \begin{cases} 1 & \text{– если испытания БПЛА завершены успешно,} \\ f(T,t) & \text{– в процессе испытания БПЛА,} \\ P_0 & \text{– до начала испытаний БПЛА,} \end{cases} \quad (1)$$

где $f(T,t)$ – функция значения ВБР БПЛА, зависящая от его текущего состояния ССН (t) и нормативного срока активного существования (САС) (T).

В общем виде $f(T,t)$ зависит не только от типа изделия, но и от выбора его ССН. Простейшую ССН некоторого функционального блока БПЛА представим на рис. 1 и 2.

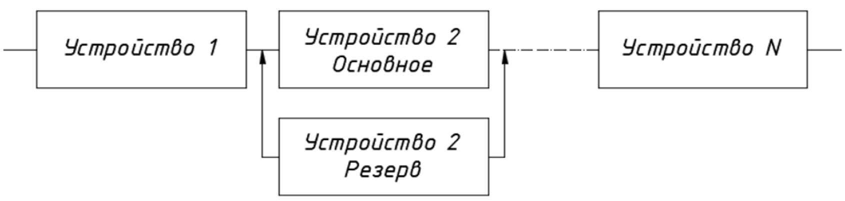

Рис. 1. ССН до отказа основного устройства 2.

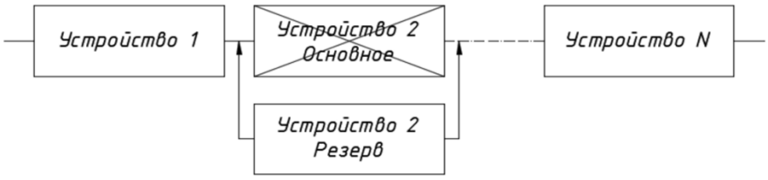

Рис. 2. ССН после отказа основного устройства 2.

В соответствии с (1) обозначим момент отказа основного устройства в процессе испытания БПЛА (τ). В этом случае модели ССН при экспоненциальном законе распределения отказов имеют вид [3]:

(2) $$f(T,t) = e^{\left(-\lambda_1\cdot(T-t)\right)} \cdot \left(e^{\left(-\lambda_2\cdot(T-t)\right)} \cdot \left(1 + \lambda_2 \cdot (T-t)\right)\right) \cdots e^{\left(-\lambda_N\cdot(T-t)\right)}$$

при $0 \le t < \tau$;

(3) $$f(T,t) = e^{\left(-\lambda_1\cdot(T-t)\right)} \cdot e^{\left(-\lambda_2\cdot(T-t)\right)} \ldots e^{\left(-\lambda_N\cdot(T-t)\right)}$$ при $\tau \le t \le T$;

(4) $$f(T,t) = 1$$ при $T < t$.

Ставится задача с помощью моделей (2,3,4) предложить механизм выбора наилучшей ССН, определяющей конструкторские решения БПЛА при заданных ограничениях. Для решения такой задачи предлагается использовать технологию неантагонистической игры лица, принимающего решения (ЛПР) (первый игрок), с внешней средой (второй игрок), где БПЛА выполняет полетное задание. Важной особенностью такой игры является неопределенность стратегии второго игрока вследствие непредсказуемости динамики внешних воздействий. Такая неопределенность является фактором, зависящим от недостатка информации у ЛПР о внешней среде, при влияниях которой будет приниматься решение.

3. Подход к расчету вероятности получения успешных результатов испытаний БПЛА по критерию Байеса

Традиционно результаты испытаний БПЛА принято оценивать: «успех» или «отказ». Согласно проектным данным, полученным до начала испытаний, известно теоретическое значение ВБР рассматриваемого типа изделия. В этом случае успешность испытаний целесообразно оценивать на основе критерия максимума ожидаемого среднего успеха или минимума ожидаемого среднего риска. В данной работе при расчетах вероятностей получения результатов испытаний предлагается использовать метод байесовского оценивания при частичной априорной определенности по схеме биномиальных испытаний с учетом воздействия факторов внешней среды [4].

При проектной оценке надежности БПЛА традиционно делается допущение, что распределение отказов элементов электронной компонентной базы из состава бортовой аппаратуры подчиняется экспоненциальному закону. Однако фактический закон распределения может отличаться от принятого. В этом случае до проведения испытаний априорное распределение отказов предлагается принимать в виде бета-распределения, плотность вероятности которого в общем виде:

$$h(p) = \frac{p^{\alpha-1}\cdot(1-p)^{\beta-1}}{B(\alpha;\beta)},\ \alpha \ge 0;\ \beta \ge 0; 1 \ge p \ge 0,$$

где $B(\alpha;\beta)$ – бета-функция: $B(\alpha;\beta) = \frac{\Gamma(\alpha)\cdot\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha+\beta)}$,

где $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция: $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty u^{\alpha-1}\cdot e^{-u}du$.

Физический смысл параметров α и β заключается в эквивалентном числе успешных и неуспешных испытаний соответственно с учетом расширения их значений не только на целое, но и на вещественное множество чисел. Таким образом, с целью введения необходимых коррекций в расчетах, после проведения испытаний рассматривается апостериорное бета-распределение, плотность вероятности которого имеет вид:

$$\ddot{h}(p) = \frac{p^{\alpha+n-d-1} \cdot (1-p)^{\beta+d-1}}{\mathrm{B}(\alpha+n-d;\beta+d)}, \alpha \geq 0; \beta \geq 0; 1 \geq p \geq 0.$$

В целом, задача оценки ВБР по результатам испытаний сводится к поиску такого наихудшего априорного распределения, которое приводит к оценкам надежности с наиболее высокими показателями риска.

На практике применение данного метода для БПЛА «в чистом виде» не представляется возможным, поскольку при разработке конструкторской документации испытания могут быть не завершены. Кроме того, испытания на воздействия различных факторов могут проводиться не синхронно. Поэтому в данном подходе требуется учитывать возможность проведения оценок не только после завершения испытаний, но и в любой произвольный момент времени до их завершения.

Модели (2,3,4) предполагают использование не одной оценки, а вектора ее значений. При этом координатами такого вектора байесовских оценок будут являться все теоретически возможные количества отказов для рассматриваемого БПЛА (n):

(5) $$\underline{\boldsymbol{P}}_{\gamma}{}^{\text{Байес}} = \left[\underline{P}_{\gamma}{}^{\text{Байес}}{}_{0} \quad \underline{P}_{\gamma}{}^{\text{Байес}}{}_{1} \quad \cdots \quad \underline{P}_{\gamma}{}^{\text{Байес}}{}_{n}\right],$$

где $\underline{P}_{\gamma}{}^{\text{Байес}}{}_{0}$ – значение НДГ ВБР для $d = 0$; $\underline{P}_{\gamma}{}^{\text{Байес}}{}_{1}$ – значение НДГ ВБР для $d = 1$; $\underline{P}_{\gamma}{}^{\text{Байес}}{}_{n}$ – значение НДГ ВБР для $d = n$.

Примечание: значения P_0, n и γ остаются фиксированными при получении численных значений координат вектора.

4. Механизм выбора ССН, обеспечивающей *max* вероятности успешного выполнения полетного задания БПЛА

В рассматриваемой игре ЛПР с внешней средой решение о выборе ССН принимается в ситуации, характеризуемой вектором байесовских оценок (5). В связи с тем, что информация о внешних воздействиях отсутствует, но имеется требованием минимизации риска, ССН предлагается выбирать по критерию Вальда [5, 6]. Он обеспечивает выявление максимума из минимального количества успешных испытаний, которое может быть получено при реализации каждого из вариантов ССН. Этот критерий ориентирует ЛПР на осторожную линию поведения, направленную на получение успешных результатов и минимизацию возможных рисков одновременно. Он гарантировано позволяет выбрать наибольший элемент матрицы успешности испытаний из ее минимально возможных элементов.

Например, для нашего рассмотрения имеется альтернатива выбора одного из четырех типов ССН: $A \in \{A_i, i = 1,2,3,4\}$. Для данного БПЛА полетное задание определяет длительную работу. Погода постоянно меняется. Для ее оценки выделим четыре типа стратегий: B_1– солнце. B_2 – дождь, B_3 – ураган, B_4 – снег, обледенение. В таких условиях выбор стратегии A_i, т.е. максимизация надежности работы БПЛА согласно (5), сводится к нахождению оптимального варианта ССН БПЛА. В этом случае показатель успешности стратегии A_i относительно выигрышей обозначим $D_i \in \{d_{ij}, j = 1,2,3,4\}$:

$$D_i = \sum \underline{P}_{\gamma_n}{}^{\text{Байес}} \cdot B_j \in \{b_{ij}, j = 1,2,3,4\}, \forall i = 1,2,3,4.$$

Будем полагать, что согласно (5) показатель D_i стратегии A_i равен вероятности успешных испытаний рассматриваемого БПЛА. С учетом математического ожидания возможных состояний внешней среды (B_j) цену такой игры (D) определим:

$$D = max D_i, 1 \leq i \leq 4.$$

Следовательно, среди чистых стратегий в качестве оптимальной примем стратегию A_i с максимальным показателем успешности: $D_i = D$.

Игру такого типа представим в виде матрицы коэффициентов d_{ij} результатов испытаний, которая агрегирует информацию о возможной успешности вариантов стратегии при различных сценариях развития ситуации, представленной на таблице 1.

Таблица. Оценка успешности использования результатов испытаний БПЛА (d_{ij}).

	B_1	B_2	B_3	B_4
A_1	10	8	4	11
A_2	9	9	5	10
A_3	8	10	3	14
A_4	7	7	8	12

В практических расчетах возможна потеря контроля над ситуацией и, поэтому, предлагается исключить все потенциальные риски и выбрать наименьший элемент матрицы успешности испытаний из ее минимально возможных элементов. Значит по каждой строке матрицы успешности выделяется *min* значение:

$$D(A_1) = 4; D(A_2) = 5; D(A_3) = 3; D(A_4) = 7.$$

$D_{opt} = max\{D(A_i)\}$. Лучшей является стратегия A_4.

5. Заключение

Использование критерия Вальда при выборе стратегии формирования конструкторских решений для БПЛА показывает достаточную для практического применения адекватность использования Байесовских оценок вероятности получения минимальных значений средних рисков при известной априорной вероятности возможного количества отказов для рассматриваемого БПЛА. Сопоставление расчетов относительно получения успешных результатов испытаний и относительно рисков отказов показало, что согласно критерию Вальда, они эквивалентны, то есть по обоим критериям оптимальной будет одна и та же стратегия.

Список литературы

1. Автамонов П.Н., Бахмут А.Д., Крылов А.В., Охтилев М.Ю., Охтилев П.А., Соколов Б.В. Применение технологии поддержки принятия решений на различных этапах жизненного цикла космических средств в составе системы информации о техническом состоянии и надежности // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т.XVI, № 3. С. 173-184.
2. Кривопалов Д.М., Юркевич Е.В. Матричная форма функций вероятностей безотказной работы систем с ненагруженным резервированием // Надежность. 2018. Том XVIII, № 1. С. 20-25.
3. Юркевич Е.В., Кривопалов Д.М., Крюкова Л.Н. Алгоритмические особенности надежностного проектирования бортовых систем космических аппаратов // Вестник Южно-Сибирского государственного университета. 2019. № 2. С. 18-27.
4. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшее образование. 2005. 368 с.
5. Вальд А. Статистические функции принятия решений, которые минимизируют максимальный риск // Анналы математики. 1945. № 46 (2). С. 265-280.

6. Сниедович М. Взгляд с высоты птичьего полета на теорию принятия решений с информационным разрывом // Журнал рискового финансирования. 2010. № 11 (3). С. 268-283.