

УДК 623.546:621.3

С.Н. Власик, С.В. Герасимов, А.А. Журавльов

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРОКОВ ПРОВЕРКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В статье показано влияние надежности (отсутствие отказов) бортового оборудования беспилотного летательного аппарата на эффективность его применения. Сформулирована методика определения сроков проверки технического состояния бортового оборудования управляемого беспилотного летательного аппарата. Разработаны алгоритмы статистического анализа результатов проверки технического состояния бортового оборудования беспилотного летательного аппарата в период его эксплуатации, показано влияние дрейфа параметров измерения и контроля аппарата на сроки проведения проверки технического состояния бортового оборудования. Сделаны предложения по использованию предложенной методики.

**Ключевые слова:** техническое состояние, бортовое оборудование, беспилотный летательный аппарат, параметры контроля, методика.

### Введение

**Постановка проблемы.** Составляющие беспилотных летательных аппаратов (БпЛА) – наземное, бортовое навигационно-пилотажное и целевое оборудование – являются весьма сложными электромеханическими и радиотехническими системами и поэтому, несмотря на все меры предварительного контроля, при их использовании могут возникать отказы как на старте так и в полете [1 – 3]. Анализ результатов применения БпЛА в последних вооруженных конфликтах показал, что некоторые аппараты не выполнили поставленную задачу, были потеряны или потерпели аварии из-за неисправности бортового оборудования (БО) [2].

При этом отметим, что в условиях финансовых ограничений и отсутствия закупки новых БпЛА актуальной задачей есть обоснование сроков продления ресурсов используемым аппаратам (особенно БО). В этих условиях важное значение приобретает учет надежности БО БпЛА и своевременности определения отказа при оценке его технического состояния (что напрямую зависит от периодичности сроков проведения проверки) при подготовке их к боевому применению.

Исследование влияния времени эксплуатации  $t$  на коэффициент готовности  $K_r(t)$  БпЛА и достоверность  $D(t)$  исправного состояния БО БпЛА позволило получить зависимость  $F(t) = a_1 K_r(t) + a_2 D(t)$ , где  $a_1, a_2$  – коэффициенты согласования, (рис. 1). Адекватность полученной зависимости подтверждается физическим смыслом протекающего процесса. Так, при увеличении периодичности проведения проверки  $t_{np}$  значение  $K_r(t)$  на временном интервале  $[t_1, t_{np}]$  увеличивается (за счет уменьшения времени простоя при проведении

проверки), но при этом уменьшается значение  $D$  на временном интервале  $[t_{np}, t_2]$  (без проведения контроля нельзя сказать об исправности или неисправности БО БпЛА). Поэтому оптимальным сроком проведения проверки технического состояния БО БпЛА является  $t_{np}$ , при котором достигается максимум значения функции  $F(t)$ .

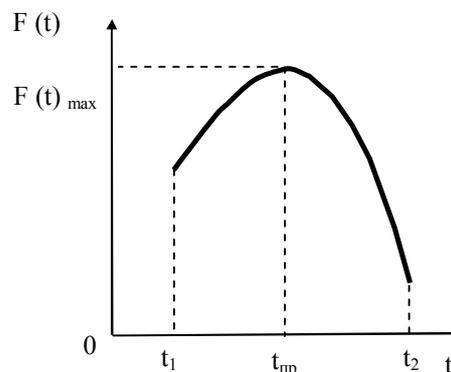


Рис. 1. Зависимость коэффициента готовности и достоверности контроля параметров от времени эксплуатации

Кроме того, при переходе на систему эксплуатации вооружения, в том числе и БпЛА, по техническому состоянию, актуальным является задача определения сроков проведения проверки технического состояния БО БпЛА.

**Анализ литературы.** Проведенный анализ работ [1 – 5], направленных на решение проблем применения БпЛА, показал, что в основном работы направлены на обоснование задач и технического построения аппаратов. Вопросам организации определения предполетного технического состояния БО БпЛА не уделяется должного внимания, хотя, как показано выше, от технического состояния БпЛА

зависит результат его применения по назначению.

Поэтому целью данной статьи является разработка методики определения сроков проверки технического состояния БО БПЛА с целью своевременного определения возможных отказов в БО.

### Основная часть

Структурная организация и характеристики БО определяются требованиями каждого конкретного предназначения БПЛА и поэтому отличаются большим разнообразием вариантов. При рассмотрении БО целесообразно говорить не о конкретных реализациях, а об основных концепциях их построения [1, 3]:

- многоуровневость организации структуры, соответствующей иерархическому характеру решаемых функциональных задач;

- программируемость структуры с обеспечением возможности организации динамического перераспределения задач по ресурсам системы;

- унифицированность каналов обмена информацией между уровнями иерархии;

- модульность структуры и конструкции как элементов БО, так и системы в целом, наличие развитых средств контроля, диагностирования и восстановления функционирования.

Многоуровневая иерархическая организация БО БПЛА определяется необходимостью разделения задач по уровням обработки информации, каждый из которых характеризуется степенью ее обобщения. Так задачи могут быть разделены по таким уровням:

- задачи, решаемые на основе информации только одного датчика;

- задачи обработки информации ряда (функционально близких) датчиков;

- задачи общекомплексного характера – основные задачи, обобщающие (в процессе принятия) информацию от нескольких функциональных подсистем;

- задачи контроля, индикации и управления, решаемые на основе обобщения всей поступившей информации.

Иерархия этих классов задач, обуславливает целесообразность организации многоуровневой обработки информации типовой структурой БО.

В современных и перспективных БПЛА применяются (предполагается применение) следующие основные типы БО для проведения обработки информации на борту аппарата:

- дистанционного зондирования;
- ретрансляции данных;
- защиты информации;
- навигации, ориентации, наведения.

Анализ задач БО, показывает, что их решение сводится к реализации процессов обработки и анализа сигналов и изображений [1].

В зависимости от применения БО показателем эффективности может быть вектор  $\vec{K}_s(t)$  [6]:

$$\vec{K}_s(t) = \langle K_s^I(t), K_s^{II}(t) \rangle$$

или скаляр  $K_s(t)$ :

$$K_s(t) = K_s^I(t) | K_s^{II}(t) \geq K_s^I(t);$$

$$K_s(t) = K_s^{II}(t) | K_s^I(t) \geq K_s^{II}(t);$$

$$K_s(t) = \alpha K_s^I(t) + (1 - \alpha) K_s^{II}(t),$$

где  $K_s^I(t)$  – показатель, характеризующий вероятность нахождения БО в работоспособном состоянии;  $K_s^{II}(t)$  – показатель, характеризующий вероятность нахождения блока управления (БУ) БО в работоспособном состоянии;  $\alpha$  – уровень значимости показателей  $K_s^I(t)$ ,  $K_s^{II}(t)$  при оценке  $K_s(t)$ ,  $\alpha \in (0, 1)$ .

Попеременное нахождение БО на активных временных интервалах длительностью  $t_a$  и пассивных временных интервалах длительностью  $t_n$  требует уточнения понятия отказа. Отказ БО наступает в следующих случаях:

- в течении временного интервала  $\Delta t_a$  в БУ программно не могут быть устранены последствия отказов (сбоев)  $V_a$ , возникающих на активном временном интервале, из общего числа отказов  $V_i$ , причем  $V_i \in V_a(t_a) \cup V_n(t_n)$ ;

- на активном интервале функционирования БО не обеспечивается значение  $K_s(t)$ , удовлетворяющее неравенству:

$$K_s(t) \geq K_{s_r}(t), \forall t \in (t_{a0}, t_{n0}),$$

где  $t_{a0}, t_{n0}$  – начало активного и пассивного временных интервалов эксплуатации БО;

- на пассивных временных интервалах функционирования БО не обеспечивается значение  $K_s^I(t)$ , удовлетворяющее неравенству:

$$K_s^I(t) \geq K_{s_r}(t);$$

- на активном временном интервале  $\forall t \in (t_{a0}, t_{n0})$  не обеспечивается выполнения равенства:  $K_s(t) = \text{const}$ .

Обозначим через  $P_{\text{БО}}(t)$  – вероятность безотказной работы БО в момент времени  $t$ ;  $P_{\text{БО}}^{\text{тп}}(t)$  – требуемое (установленное) значение вероятности безотказной работы БО в момент времени  $t$ ;  $L(t_a)$  – число отказов (сбоев) на активном временном интервале,  $\tau_p$  – среднее время, затрачиваемое на самовосстановление программных средств при отказе (сбое).

Условие безотказного функционирования БО определим в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} L(t_a) \tau_p \leq \Delta t_a; \\ K_S(t_a) \rightarrow \max; \\ P_{\text{БО}}(t) \geq P_{\text{БО}}^{\text{TP}}(t), t \in (t_{a0}, t_{n0}); \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L(t_a) \tau_p \leq \Delta t_a; \\ K_S(t_a) \geq K_S^{\text{TP}}; \\ P_{\text{БО}}(t) \rightarrow \max, t \in (t_{a0}, t_{n0}). \end{cases} \quad (2)$$

Решение системы (1) определяет условия обеспечения максимальной вероятности нахождения БО в работоспособном состоянии при заданном уровне отказоустойчивости. Наоборот, решение системы (2) определяет условия максимизации отказоустойчивости БО с заданной вероятностью нахождения БО в работоспособном состоянии.

Предполагается, что в системах (1) и (2) обеспечение замены (маскирования) отсутствующих (сбойных) модулей каналов БО проводится за время, не превышающее  $\Delta t_a$ .

Для применения БО длительного использования характерны:

- превышение интенсивности потока сбоев  $\lambda_c$  над интенсивностью  $\lambda_o$  потока отказов ( $\lambda_c = \beta \lambda_o$ ,  $\beta = 10 \div 100$ );
- кластеризация (группирование) отказов и сбоев;
- параллельное функционирование БУ и других элементов БО на активных интервалах и простой на пассивных участках.

В составе БО есть элементы, у которых значения параметров (напряжение автономного блока питания, электрического сопротивления, емкости, индуктивности и т.д.) в следствие воздействия различных физических факторов (старения, периодические перепады температур, электромагнитные излучения и др.) изменяются и могут существенно повлиять на работоспособность БО. При выходе значений этих параметров за допустимый диапазон могут возникать случайные сбой и отказы.

Для своевременности определения отказавших элементов (каналов) БО при обеспечении заданного уровня отказоустойчивости (2) предлагается методика определения сроков проведения проверки технического состояния БО БпЛА по результатам предыдущих и текущих измерений помощью специальных средств значений контролируемых параметров путем их статистического анализа.

**Методика** содержит постановку задачи статистического анализа данных и алгоритм статистического анализа для определения значений вероятностных коэффициентов.

1. Постановка задачи определения сроков проведения проверки технического состояния БО БпЛА.

Исходные данные для расчета:

– периодической проверке подлежат  $N$  приборов данного типа, значения  $y(t)$  – результаты контроля значений параметров БО БпЛА, каждый из которых определяется в момент  $t$  времени эксплуатации (согласно нормативно-технической документации).

Каждый образец из  $N$  проверен  $i$ -е количество раз,  $i = 1, \dots, M$  за время эксплуатации (данные из эксплуатационной документации).

На каждый параметр задан двусторонний допуск:  $y_n \leq y(t) \leq y_b$ , где  $y_n$ ,  $y_b$  – нижняя и верхняя границы допустимых изменений значений параметра соответственно.

Результаты проверки каждого параметра образуют временные ряды реализации:

$$\hat{Y} = \{y_{ij}(t_{ij}), i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N\}, \quad (3)$$

где  $N$ ,  $M$  – количество приборов данного типа и число измерений значений данного параметра  $i$  каждого прибора соответственно.

В частном случае допускается  $M = 1$ . Тогда для применения методики одиночная реализация параметра разбивается на  $S$  реализаций по временному интервалу и формируются модели  $y_n^m(t)$  и  $y_b^m(t)$  допустимых границ, в пределах которых находятся значения контролируемого параметра БО БпЛА с заданной доверительной вероятностью.

Экстраполяция параметров моделей осуществляется до нарушения условия:

$$y_n \leq y_n^m(t); y_b^m(t) \leq y_b. \quad (4)$$

Момент времени  $t_{\text{пр}}$ , при котором происходит нарушение условия (4), определит срок проведения очередной проверки технического состояния БО БпЛА данного типа.

Определение последующих сроков проведения очередной проверки БО БпЛА осуществляется повторением процедуры построения прогнозирующих моделей  $y_n^m(t)$  и  $y_b^m(t)$ , их анализа и решением задачи (4) для достижения заданной границы дрейфа значений контролируемых параметров БО БпЛА.

2. Алгоритм статистического анализа результатов проверки технического состояния БО БпЛА.

2.1. Рассчитываются моменты  $\nu_1, \mu_2, \beta_1, \beta_2$ , характеризующие плотность распределения дрейфа измеряемого параметра  $Y^r(t)$ ,  $r = 1, \dots, Q$ , из общего количества параметров контроля технического состояния БО БпЛА  $Q$  для всех приборов  $N$  данного типа  $j$ -е количество раз в сечениях времени  $t, \nu_1, \mu_2, \beta_1, \beta_2$ , где  $\nu_1, \mu_2$  – первый и второй центральный момент соответственно;  $\beta_1, \beta_2$  – третий и четвертый центральный приведенный момент соответственно.

2.2. Статические оценки моментов рассчитываются по следующим соотношениям:

$$v_1 = \sum_{j=1}^N Y_j / M; \quad \mu_2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (Y_j - v_1)^2, \quad (5)$$

$$\beta_1 = \mu_3 / \mu_2^{3/2}; \beta_2 = \mu_4 / \mu_2^2 - 3,$$

где  $\mu_3 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (Y_j - v_1)^3$ ;  $\mu_4 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (Y_j - v_1)^4$ .

2.3. В качестве модели случайного процесса дрейфа параметра БО БПЛА выбирается S полиномов вида:

$$m^S(t) = \varphi(k) \sum_{k=1}^{qS} C_k^{(S)}; \quad S = 1, \dots, 4, \quad (6)$$

где  $\varphi(k)$  – полиномы Чебышева, удовлетворяющие условию ортогональности;  $C_k^{(s)}$  – коэффициенты полинома s-ой моментной функции; q – степень полинома; s – номера моментных функций ( $s = \overline{1..4}$ ).

2.4. Формируется ортогональный базис полиномов Чебышева [6]:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \varphi_1(t_1), \varphi_2(t_2), \dots, \varphi_q(t_1) \\ \dots \\ \varphi_1(t_{np}), \varphi_2(t_{np}), \dots, \varphi_q(t_{np}) \end{pmatrix} \quad (7)$$

при начальных условиях:

$$\varphi_1(t) = 1; \varphi_2(t) = t - C_{21} \varphi_1(t); \quad (8)$$

где  $C_{21} = \frac{\sum_{i=1}^M t_i}{M}$ .

Формируется  $\varphi_3(t)$ :

$$\varphi_3(t) = t^2 - C_{32} \varphi_2(t) - C_{31}, \quad (9)$$

где  $C_{31} = \frac{\sum_{i=1}^M t_i^2}{M}$ ;  $C_{32} = \frac{\sum_{i=1}^M t_i^2 \varphi_2(t_i)}{\sum_{i=1}^M \varphi_2(t_i)^2}$ .

Формируется  $\varphi_4(t)$ :

$$\varphi_4(t) = t^3 - C_{43} \varphi_3(t) - C_{42} \varphi_2(t) - C_{41}, \quad (10)$$

где  $C_{41} = \frac{\sum_{i=1}^M t_i^3}{M}$ ;  $C_{42} = \frac{\sum_{i=1}^M t_i^3 \varphi_2(t_i)}{\sum_{i=1}^M \varphi_2(t_i)^2}$ ;  $C_{43} = \frac{\sum_{i=1}^M t_i^3 \varphi_3(t_i)}{\sum_{i=1}^M \varphi_3(t_i)^2}$ .

2.5. Формируются полиномиальные функции  $m_1^1(t), m_2^1(t), m_3^1(t), m_4^1(t)$  для первого начального момента плотности распределения дрейфа параметра БО БПЛА  $v_1(t)$ :

$$m_1^1(t) = C_1; \quad m_2^1(t) = C_1 + C_2 \varphi_2(t);$$

$$m_3^1(t) = C_1 + C_2 \varphi_2(t) + C_3 \varphi_3(t); \quad (11)$$

$$m_4^1(t) = C_1 + C_2 \varphi_2(t) + C_3 \varphi_3(t) + C_4 \varphi_4(t),$$

где  $C_1 = \frac{\sum_{i=1}^M v_1(t_i)}{M}$ ;  $C_2 = \frac{\sum_{i=1}^M \varphi_2(t_i) v_1(t_i)}{\sum_{i=1}^M \varphi_2(t_i)^2}$ ;

$$C_3 = \frac{\sum_{i=1}^M \varphi_3(t_i) v_1(t_i)}{\sum_{i=1}^M \varphi_3(t_i)^2}; \quad C_4 = \frac{\sum_{i=1}^M \varphi_4(t_i) v_1(t_i)}{\sum_{i=1}^M \varphi_4(t_i)^2}.$$

Формируются полиномиальные функции  $m_1^2(t), m_2^2(t), m_3^2(t), m_4^2(t)$  для второго центрального момента  $\mu_2(t)$ .

Формируются полиномиальные функции  $m_1^3(t), m_2^3(t), m_3^3(t), m_4^3(t)$  для третьего центрального приведенного момента  $\beta_1(t)$ .

Формируются полиномиальные функции  $m_1^4(t), m_2^4(t), m_3^4(t), m_4^4(t)$  для четвертого центрального приведенного момента  $\beta_2(t)$ .

2.6. Путем анализа сформированных полиномиальных функций строится модель случайного процесса дрейфа контролируемого параметра БО БПЛА, обладающая наилучшими прогностическими свойствами.

Исследуемая выборка, состоящая из M временных сечений, разбивается на две подвыборки: четную  $J_2$  и нечетную  $J_1$ .

Моментные функции  $v_1, \mu_2, \beta_1, \beta_2$ , соответствующие нечетной выборке  $J_1$ , аппроксимируются полиномиальными функциями согласно алгоритмам (3) – (11).

Рассчитывается  $\sigma_{j_1 j_2}^2$ :

$$\sigma_{j_1 j_2}^2 = \frac{1}{M_j} \sum_{i=1}^{M_j} [m^{(j)}(t_i) - m^{(j)}(t_i)]^2, \quad j = 1, 2,$$

где  $m^{(j)}(t_i)$  – среднее значение полиномиальной функции, рассчитывается по формуле (6).

Строится график зависимостей  $\sigma_{j_1 j_2}^2$  от степени q аппроксимирующей полиномиальной функции.

2.7. Для построения модели случайного процесса дрейфа параметра БО БПЛА выбираются полиномиальные функции  $m^{(l)}(t)$  со степенью q, обеспечивающей  $\min \sigma_{j_1 j_2}^2$ .

Рассчитываются значения  $v_1, \mu_2, \beta_1, \beta_2$  для произвольного момента времени.

Формируются функции,  $y_n^m(t)$  и  $y_b^m(t)$  характеризующие допустимые границы, в пределах которых гарантируются значения параметра БО БПЛА с заданной вероятностью  $P_d$ :

$$y_n^m(t) = v_1(t) - \sqrt{U_1^2(t)\mu_2(t)};$$

$$y_b^m(t) = v_1(t) + \sqrt{U_2^2(t)\mu_2(t)},$$

где  $U_1(t), U_2(t)$  – коэффициенты плотности распределения случайных процессов дрейфа параметра БО БПЛА, значения которых определяются согласно функций:

$$U_1(t) = f[\beta_1(t), P_d]; \quad U_2(t) = f[\beta_2(t), P_d].$$

2.8. Определяются значения  $y_n, y_b$  на момент прогноза  $t_{пр}$ .

2.9. Сравниваются оценки  $y_n^m(t_{пр})$  и  $y_b^m(t_{пр})$  с двусторонним допуском (4), установленным на параметр БО БПЛА.

2.10. Значение времени  $t_{пр}$ , при котором выполняется условие (4) согласно п.п. 2.9, будет являться оптимальным для проведения проверки технического состояния БО БПЛА данного типа.

## Выводы

Таким образом, в данной методике в качестве модели для аппроксимации моментных функций случайного процесса дрейфа контролируемых параметров БО БПЛА предлагается применение оригинальных структурированных полиномов с вложенными полиномами Чебышева, удовлетворяющих известным условиям ортогональности. Использование предложенной модели позволит выполнить ряд существенных требований, предъявляемых к такого рода задачам, в том числе:

– обеспечение наилучших прогностических

свойств по известным критериям;

– адекватное отображение реального процесса дрейфа параметра БО БПЛА;

– не критичное отношение к виду и возможной деформации законов распределения дрейфа значений параметров БО БПЛА во времени.

Выполнение данных требований обеспечит достоверное определение прогнозируемого срока проведения очередной проверки БО БПЛА для определения его технического состояния.

В дальнейшем возможна реализация предложенных в методике алгоритмов в виде номограмм, а также разработка соответствующего программного обеспечения. Это позволит использовать предложенной методики специалистами, обслуживающими БПЛА, а также при проведении расчетов для обоснования продления ресурсов не только БО БПЛА, но и наземного, в том числе пускового, оборудования.

## Список литературы

1. Павлушенко М. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза / М. Павлушенко, Г. Евстафьев, И. Макаренко. – М.: Изд-во "Права человека", 2005. – 611 с.
2. Дрожжин А. Воздушные войны в Ираке и Югославии / А. Дрожжин, Е. Алтухов. – М.: Техника молодежи, 2008. – 80 с.
3. Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов Сухопутных войск / под ред. В.Л. Солунина. – М.: Изд-во МГТУ, 2001. – 328 с.
4. Оценка эффективности огневого поражения ударами ракет и огнем артиллерии / под общ. ред. А.А. Бобрикова. – СПб.: "Галлея Принт", 2006. – 424 с.
5. Средства поражения и боеприпасы / под общ. ред. В.В. Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ, 2008. – 984 с.
6. Месаревич М.И. Общая теория систем: математические основы / М.И. Месаревич, Я. Такахара. – М: Мир. – 1978. – 312 с.

Поступила в редколлегию 7.02.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. А.М. Сотников, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІНІВ ПЕРЕВІРКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛЕТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

С.М. Власик, С.В. Герасимов, О.О. Журавльов

*У статті показано вплив надійності (відсутність відмов) бортового обладнання безпілотного літального апарату на ефективність його застосування. Сформульована методика визначення термінів перевірки технічного стану бортового обладнання керованого безпілотного летального апарату. Розроблені алгоритми статистичного аналізу результатів перевірки технічного стану бортового обладнання безпілотного апарату в період його експлуатації, показаний вплив дрейфу параметрів вимірювання та контролю апарату на терміни проведення перевірки технічного стану бортового обладнання. Зроблені пропозиції по використанню запропонованої методики.*

**Ключові слова:** технічний стан, бортове обладнання, безпілотний літальний апарат, параметри контролю, методика.

## METHOD OF DETERMINATION OF TERMS OF VERIFICATION TECHNICAL STATE OF NOT PILOTED AIR VEHICLES

S.N. Vlasik, S.V. Gerasimov, A.A. Zhuravlev

*In the article influence of reliability (absence of refuses) of side equipment of not piloted aircraft is rotined on efficiency of his application. The method of determination of terms of verification of the technical state of the guided not piloted vehicle is formulated. The algorithms of statistical analysis of results of verification of the technical state of not piloted vehicle are developed in the period of his exploitation, influence of drift of parameters of measuring and control of vehicle is rotined on the terms of lead through of verification of the technical state of side equipment. Done suggestion on the use of the offered method.*

**Keywords:** technical state, side equipment, not piloted aircraft, control parameters, method.