УДК 629.7.083.03

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОГО КОЛИЧЕСТВА ЗАПАСНЫХ РЕСУРСНЫХ ИЗДЕЛИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Е.Д. ГЕРАСИМОВА, И.Ф. ПОЛЯКОВА, В.С. КИРДЮШКИН, Н. ОЙДОВ

Предлагается метод статистического моделирования для формирования потребного количества запасных ресурсных изделий по критерию обеспечения работоспособности функциональных систем летательных аппаратов на длительный период эксплуатации. Приведена расчетная часть и представлены результаты статистического моделирования.

Ключевые слова: летательный аппарат, функциональная система, запасные изделия, статистическая модель, моделирование.

В процессе эксплуатации функциональных систем (ФС) летательных аппаратов (ЛА) возникают отказы и неисправности комплектующих изделий. Для своевременного восстановления работоспособности ФС в рамках планового технического обслуживания (ТО) авиапредприятие должно иметь в наличии необходимое количество запасных изделий на период межремонтного ресурса ЛА. Приобретение комплекта запасных изделий на весь период в начале эксплуатации парка ЛА является достаточно затратным. Наиболее рациональным для авиапредприятия будет приобретение запасных комплектующих изделий по потребности, в зависимости от количества возникающих отказов, что непосредственно связано с налетом парка ЛА. В такой постановке появляется задача прогнозирования потребного количества запасных изделий ФС на период межремонтного ресурса ЛА с учетом налета парка.

Для решения задачи целесообразно использовать статистическую модель, принимая во внимание следующее:

- реальные условия эксплуатации ФС и их изделий достаточно сложны и применение аналитических моделей не всегда возможно;
- комплектующие изделия ФС являются высоконадежными изделиями, что приводит к ограниченным статистическим данным по отказам и неисправностям; в такой ситуации использование методов статистического анализа дает большую погрешность;
- статистическая модель позволяет имитировать процесс эксплуатации изделий ФС на любой, наперед заданный период эксплуатации, в том числе и на период межремонтного ресурса;
- статистическая модель имеет преимущество на этапах создания АТ и начальной стадии эксплуатации и позволяет определять количество потребных запасных изделий с учетом периодичности выполнения запланированных форм ТО.

Общий принцип статистического моделирования может быть отражен выражением

$$\Theta = \int_0^{\mathrm{T}} [y(t)\mathrm{x}p(t)]dt,$$

где Θ – оцениваемая характеристика безотказности изделий;

t – случайная величина, возникающая с вероятностью p(t), характеризующей закон распределения случайной величины t;

y(t) – функция случайной величины t (зависимость безотказности от случайной величины t).

Результатом моделирования является оценка $\tilde{\Theta}$, которая определяется как математическое ожидание функции y(t)

$$\tilde{\Theta} = \frac{1}{R}\sum_{r=1}^{R} y(\mathrm{t}\,r),$$

где R – количество испытаний (опытов) реализации случайной величины t.

В каждом опыте разыгрывается реализация искусственно сформированной случайной величины $\{t_r\}$. После того, как рассмотрено R опытов, вычисляется итоговая оценка $\tilde{\Theta}$.

В рассматриваемом случае в качестве объекта эксплуатации выбраны ресурсные изделия ФС, ТО которых выполняется в соответствии со стратегией ТОНАР (изделиям установлен ресурс, по истечении которого они заменяются на новые, при этом возможно проявление отказов до истечения ресурса изделия). На рис. 1 представлен процесс эксплуатации одного из таких изделий в пределах межремонтного ресурса ЛА – $T_{рес}$.

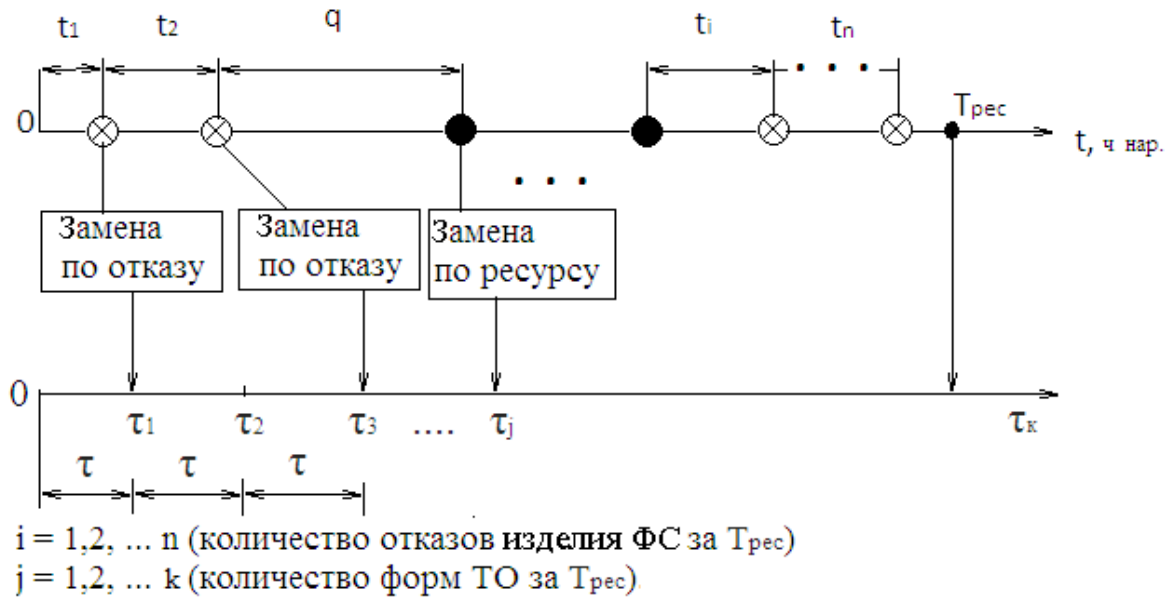

Рис. 1. Схема процесса эксплуатации изделия ФС: t – ось наработки изделия при его использовании по назначению (полет); $t_1, t_2,\ldots t_n$ – значения наработки до отказа изделия; q – ресурс изделия; $T_{рес}$ – межремонтный ресурс ЛА; τ – интервал наработки до очередного ТО ЛА; τ_1 , τ_2 , … τ_k – периодичность выполнения ТО ЛА в соответствии с регламентом

При выполнении ТО проводятся замены изделия по истечении ресурса (замена по ресурсу), а также замены отказавшего изделия (замена в случае отказа). Время восстановления (замены) изделия не учитывается.

Значения $t_1, t_2,\ldots t_n$ являются результатом статистических наблюдений и представляют реализацию непрерывной случайной величины в реальном процессе эксплуатации ФС.

Для определения потребного количества запасных изделий ФС с использованием статистической модели последовательно решаются две задачи:

1) прогнозирование вероятности безотказной работы изделия P(T) на последующие периоды эксплуатации;

2) определение среднего количества отказов изделия $N_{ср}(T)$ на последующие периоды эксплуатации.

В процессе решения данных задач исследовались дискретные случайные величины: d – количество замен изделий по ресурсу; $n_{ср}$ – количество замен изделий в случае отказа.

Необходимое количество потребных запасных изделий на период межремонтного ресурса ЛА для парка определяется по формуле

$$N_{ср}\,(T_{рес}) = d + n_{ср}\,.$$

В качестве исходных данных для моделирования принимаются: наименование изделия; ресурс изделия – q; количество однотипных изделий на ЛА – a; искусственно сформированные значения средней наработки до отказа изделия – $\{t_{ср}\}$.

Для прогноза вероятности безотказной работы изделия на период межремонтного ресурса ЛА ($T_{рес}$) используют прогнозные значения средней наработки изделия до отказа $\{t_{ср}\}$. В соответствии со схемой, представленной на рис. 1,

$$t_{\text{ср}} = \frac{1}{n}\Sigma_{i=1}^{n} t_i,$$

где n - количество наблюдений наработки до отказа; t_i – наработка изделия в реальном процессе эксплуатации.

Реальные наблюдения соответствуют одной реализации случайного процесса. При моделировании появляется возможность исследовать R реализаций процесса, при этом r = 1 … R (r – порядковый номер реализации R).

Далее используется искусственно сформированная статистика по значениям $t_{ср\,r}$.

Процедура расчета представлена в табл. 1.

Таблица 1

Процедура расчета замен изделия по отказу

Замена изделия конкретного типа	Условия определения количества замен	$n_{ср}$	Примечания
l - количество замен изделия	$l_{rj} =$ $\begin{cases} 0, \text{ при } t_{cpr} > \tau_j \text{ (нет замены)} \\ 1, \text{ при } t_{cpr} \le \tau_j \text{ (замена)} \end{cases}$		$t_{ср\,r}$ – средняя наработка до отказа r = 1…R; j = 1,2…k; **a** – количество изделий на ЛА; $N_{ЛА}$ - количество ЛА в парке; $Q_{ср}$ – вероятность отказа изделия; $Q_{ср} = 1\text{-}P_{ср}$; $P_{ср}$ - вероятность безотказной работы изделия
	$l_{cpj} =$ $\begin{cases} 0, \text{ при отсутствии 1 в столбце } \tau_j \\ 1, \text{ при наличии любого числа "1" в столбце } \tau_j \end{cases}$		
m - количество замен изделия на ЛА	$m_{cpj} = l_{cpj} \bullet a$		
n - количество замен изделия на парке ЛА	$n_{cpj} = m_{cpj} \bullet N_{ЛА} \bullet Q_{ср}$	$n_{ср} = \Sigma_{j=1}^{k} n_{cpj}$	

Вероятность безотказной работы изделия определяется в соответствии с законом распределения наработки до появления отказа (экспоненциальным, нормальным, Вейбулла и т.д.).

Количество замен изделия по ресурсу определяется для каждого τ_j ; после каждой замены по ресурсу отсчет величины q ведется заново. Процедура расчета представлена в табл. 2, при этом определяются: b - количество замен изделия; c – количество замен изделий на ЛА; d – количество замен изделия на парке ЛА.

Заключительным этапом определения потребного количества запасных изделий по результатам статистического моделирования является определение $N_{ср}$ ($T_{рес}$) для эксплуатируемого парка ЛА по формуле

$$N_{ср}\ (T_{рес}) = d + n_{ср}\ .$$

Результаты статистического моделирования позволяют авиапредприятию регулировать приобретение запасных изделий для обеспечения выполнения форм ТО ФС с заданной периодичностью.

Таблица 2

Процедура расчета замен изделия по ресурсу

Замена изделия конкретного типа	Условия определения количества замен	d	Примечания
b – количество замен изделия	$b_j = \begin{cases} 0, \text{ при } q > \tau_j \text{ (нет замен)} \\ 1, \text{ при } q = \tau_j \text{ (замена)} \end{cases}$		
c – количество замен изделия на ЛА	$c_j = b_j \bullet a$		a – количество изделий на ЛА
d – количество замен изделия на парке ЛА	$d_j = c_j \bullet N_{ЛА}$	$d = \Sigma_{j=1}^{k} d_j$	$N_{ЛА}$ – количество ЛА в парке j = 1, 2 … k

Реализация метода показана на примере обратного клапана гидросистемы самолета Boeing-747 ($N_{ЛА} = 10$). Моделировалось R = 5 реализаций процесса эксплуатации обратного клапана. Рассматривался вид ТО гидросистемы, выполняемого по форме «A check» (периодичность ТО - τ = 1000 ч нал.). Были искусственно сформированы значения средней наработки до отказа изделия для 5-ти реализаций процесса эксплуатации ($t_{ср1}$ = 1000 ч нал.; $t_{ср2}$ = 2500 ч нал.; $t_{ср3}$ = 3000 ч нал.; $t_{ср4}$ = 3500 ч нал.; $t_{ср5}$ = 4000 ч нал.) на основании накопленной статистической базы по изделиям – аналогам. Ресурс обратного клапана q = 4200 ч нал. Для расчета вероятности безотказной работы клапана использовалось экспоненциальное распределение наработки до отказа:

$$P_r(\tau) = P_{rj} = e^{-\omega_r \tau_j}; \omega_r = \frac{1}{t_{ср\,r} N_{ЛА} a}, P_{ср\,j} = \frac{\Sigma_{r=1}^{5} P_r(\tau)}{5},$$

где ω_r - параметр потока отказов r-й реализации процесса;

τ_j - периодичность j-й формы ТО, ч нал.;

a – количество изделий на ЛА (принято a = 6).

Результаты моделирования представлены на рис. 2.

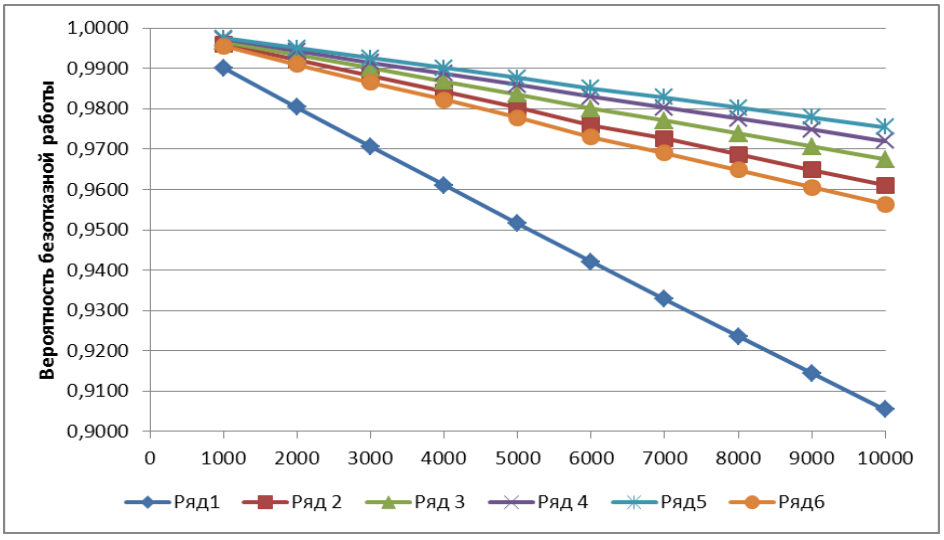

Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы обратного клапана от наработки:
ряд 1 ($t_{ср}$=1000); ряд 2 ($t_{ср}$=2500); ряд 3 ($t_{ср}$=3000); ряд 4 ($t_{ср}$=3500);
ряд 5 ($t_{ср}$=4000); ряд 6 (среднее значение вероятности безотказной работы $P_{срj}$)

По результатам моделирования была определена вероятность безотказной работы обратного клапана гидросистемы Boeing-747 на период эксплуатации Т = 10000 ч нал.

$$P(T) = P_{ср}(T = 10000 \text{ ч нал.}) = 0{,}9563.$$

Получено:

1) $n_{ср} = 20$ изделий;

2) d = 120 изделий;

3) зависимость потребного количества запасных изделий от периодичности форм ТО гидросистемы (табл. 3).

Таблица 3

Исходные данные для исследования зависимости потребного количества изделий от периодичности форм ТО гидросистемы

τ, ч нал.	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
d	0	0	0	60	0	0	0	60	0	0
$n_{ср}(\tau)$	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
$Ncp = d(\tau)+n_{ср}$	1	1	1	62	2	2	2	63	3	3

Количество потребных запасных обратных клапанов гидросистемы Boeing-747 на период эксплуатации 10000 ч для парка 10 самолетов составит

$$Ncp(T) = d + n_{ср} = 120 + 20 = 140 \text{ изделий}.$$

Реализация предлагаемого метода на примере эксплуатации обратного клапана гидросистемы Boeing-747 позволяет сделать следующие выводы:

1. Вероятность безотказной работы изделия – «клапан обратный» гидравлической системы Boeing-747 за период эксплуатации (Т = 10000 ч нал.) составила P(T) = 0,9563.

2. Для обеспечения процесса эксплуатации парка Boeing-747 в количестве 10 бортовых номеров на период 10000 ч нал. (наработки) потребуется 140 «клапанов обратных» гидравлической системы.

3. Поставка запасных клапанов может быть организована с учетом проведения форм ТО:

- 62 изделия к ТО при τ = 4000 ч нал.;
- 63 изделия к ТО при τ = 8000 ч нал.

4. Для замены изделий на остальных формах ТО потребуется:

- 1 изделие – к ТО при τ = 1000, 2000, 3000 ч нал.;
- 2 изделия – к ТО при τ =5000, 6000, 7000 ч нал.;
- 3 изделия – к ТО при τ =9000, 10000 ч нал.

ESTIMATION OF REQUIRED NUMBER OF AIRCRAFT RESOURCE SPARE PARTS BASED ON STATISTICAL MODELLING

Gerasimova E.D., Polykova I.F., Kirdyushkin V.S., Oidov N.

The article describes a method of statistical modelling form the required amount of spare resource by the criterion of performance assurance of aircraft functionale systems for a long term operation. The calculations and the results of the statistical modelling are given.

Keywords: aircraft, Functional system, spare parts, statistical model, modelling.

Сведения об авторах

Герасимова Евгения Давидовна, окончила МАИ (1966), кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей МГТУ ГА, автор 57 научных работ, область научных интересов – поддержание эксплуатационной надежности изделий авиационной техники при ТОиР.

Полякова Инна Федоровна, окончила МАИ (1969), кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей МГТУ ГА, автор 56 научных работ, область научных интересов – поддержание эксплуатационной надежности изделий авиационной техники при ТОиР.

Кирдюшкин Владимир Сергеевич, 1983 г.р., окончил МГТУ ГА (2006), старший инженер отдела 173 ЦАТБ ГосНИИ ГА, автор 25 научных работ, область научных интересов – ресурсное поддержание летной годности воздушных судов.

Ойдов Намбат, 1963 г.р., окончил ОЛАГА (2002), аспирант МГТУ ГА, автор 2 научных работ, область научных интересов – нормативно-правовое обеспечение поддержания летной годности воздушных судов и обеспечения безопасности полетов.