

УДК 629.735.067

## ВЛИЯНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Е.Д. ГЕРАСИМОВА<sup>1</sup>, Н.Н. СМИРНОВ<sup>1</sup>, Н. ОЙДОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия

Рассматривается механизм оценки влияния надежности функциональных систем на техническую эксплуатацию воздушных судов. Предлагаются результаты исследований, позволяющие оценить влияние надежности функциональных систем на эффективность процесса технической эксплуатации воздушных судов. Под эффективностью процесса технической эксплуатации воздушных судов понимается часть эксплуатации, включающая подготовку к полету, полет, техническое обслуживание, хранение.

Целью исследований являлось прогнозирование эффективности процесса технической эксплуатации воздушных судов с учетом надежности функциональных систем, при этом рассматривалось одно из свойств надежности – безотказность. Под безотказностью функциональных систем понималась способность выполнять требуемую функцию в заданном интервале времени при данных условиях.

Объекты эксплуатации – функциональные системы воздушных судов и их компоненты (комплектующие изделия) имеют высокую степень безотказности, заложенную при проектировании и поддерживаемую при эксплуатации парка ВС. Отказы и повреждения функциональных систем являются редкими событиями, что приводит к ограниченной статистической базе эксплуатационных наблюдений. Классические методы статистического анализа не обеспечивают достаточную достоверную вероятность оценки безотказности функциональных систем и не позволяют выявить ее влияние на эффективность процесса технической эксплуатации воздушных судов.

Для решения задачи предлагается использовать метод структурных схем и вероятностно-статистический метод оценки безотказности функциональных систем – статистическое моделирование (метод Монте-Карло). Метод структурных схем надежности позволил определить зависимость выборочной оценки безотказности функциональной системы от периодичности технического обслуживания. Исходной информацией рассматривались: принципиальная схема функциональной системы и описание ее работы; перечень основных изделий; выборочные статистические данные об отказах изделий функциональной системы. Использование статистического моделирования позволило получить зависимость надежности (безотказности) функциональной системы от периодичности технического обслуживания для расширенной статистической базы (нескольких реализаций процесса эксплуатации функциональной системы).

**Ключевые слова:** летательный аппарат, надежность, функциональная система, техническая эксплуатация.

### ВВЕДЕНИЕ

В условиях рыночной конкуренции предъявляются повышенные требования к эффективности процесса технической эксплуатации (ПТЭ) воздушных судов (ВС). В обеспечении этих требований заинтересованы как производители, так и эксплуатанты воздушных судов [1].

Предлагаются результаты исследований, позволяющие оценить влияние надежности функциональных систем (ФС) на эффективность ПТЭ ВС.

Техническая эксплуатация (ТЭ) ВС – часть эксплуатации, включающая подготовку к полету, полет, техническое обслуживание (ТО), хранение. Для количественной оценки эффективности ПТЭ ВС предусмотрена система показателей [1]. Исследовались показатели:  $K_n$ , ч/ч нал. – удельные суммарные простои на ТО;  $K_t$ , чел.-ч/ч нал. – удельная суммарная трудоемкость ТО как наиболее критичные к затратам времени и труда на восстановление ФС.

Целью исследований являлось прогнозирование эффективности ПТЭ ВС с учетом надежности ФС, при этом рассматривалось одно из свойств надежности – безотказность. Под безотказностью ФС, в соответствии с ГОСТ Р53480-2009, понималась способность выполнять требуемую функцию в заданном интервале времени при данных условиях. Оценивались показатели безотказности:  $P(t)$  – вероятность безотказной работы;  $\omega$  – параметр потока отказов.

Объекты эксплуатации – ФС ВС и их компоненты (комплектующие изделия) имеют высокую степень безотказности, заложенную при проектировании и поддерживаемую при эксплуатации парка ВС. Отказы и повреждения ФС являются редкими событиями, что приводит к ограниченной статистической базе эксплуатационных наблюдений. Классические методы статистического анализа [2] не обеспечивают достаточную достоверную вероятность оценки безотказности ФС и не позволяют выявить ее влияние на эффективность ПТЭ ВС.

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ПТЭ ВС

Для решения задачи был использован вероятностно-статистический метод оценки безотказности ФС – статистическое моделирование (метод Монте-Карло) [2–4].

Оценка эффективности ПТЭ ВС выполнялась при его моделировании на основе полумарковских случайных процессов [1, 2].

Блок-схема исследований представлена на рис. 1 и включает анализ опыта эксплуатации ФС, оценку и анализ надежности ФС, оценку эффективности ПТЭ ВС с учетом надежности ФС, оценку влияния надежности ФС на эффективность ПТЭ ВС [5–10].

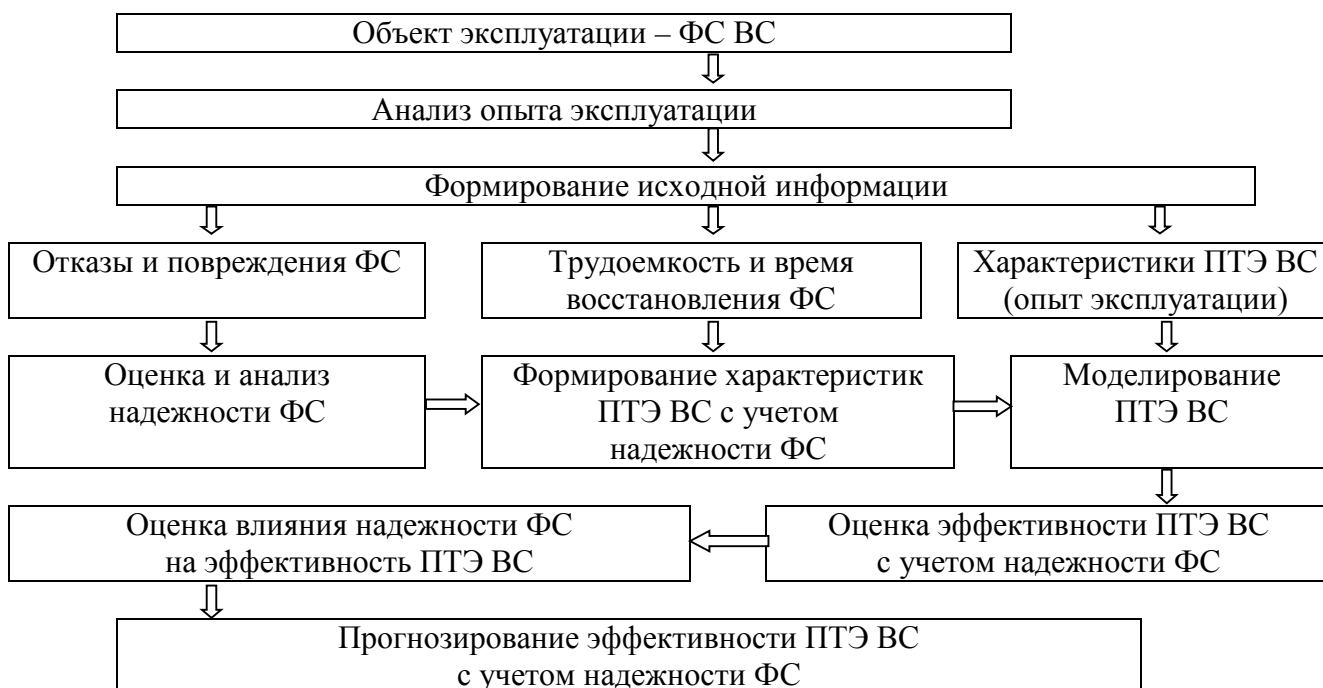


Рис. 1. Блок-схема исследований  
Fig. 1. Block-diagram of research

Предлагается следующая процедура оценки и анализа надежности (безотказности) ФС:

- 1) точечная выборочная оценка методом структурных схем;
- 2) интервальная оценка для заданной достоверной вероятности  $\gamma$ ;
- 3) статистическое моделирование на длительный период эксплуатации ФС.

Структурная схема надежности позволяет определить зависимость выборочной оценки  $P(t)$  ФС от периодичности ТО. Исходная информация при этом включает: принципиальную схему ФС и описание ее работы; перечень основных изделий; выборочные статистические данные об отказах изделий ФС.

Структурная схема надежности содержит последовательное (в случае влияния отказа изделия на отказ ФС) и параллельное (при наличии резервирования изделий) соединения элементов.

Расчетные формулы представлены из предположения стационарного потока возникновения отказов изделий ФС:

$P(t) = \sum_{j=1}^n P(t)_j$ ,  $P(t) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P(t)_j]$  – для последовательного и параллельного соединения элементов, соответственно;

где  $n, m$  – количество элементов;  
 $P(t)_j = e^{-\omega_j t}$  – вероятность безотказной работы  $j$ -го изделия ФС;  
 $P(t) = e^{-\omega t}$  – вероятность безотказной работы ФС;  
 $\omega_j, \omega$  – параметры потока отказов  $j$ -го изделия и ФС, соответственно;  
 $t = t_1, t_2, \dots, t_k$  – периодичность ТО ФС по регламенту ВС, ч нал.

Цель интервальной оценки – определение интервала, в котором может реализоваться безотказность ФС с заданной доверительной вероятностью  $\gamma$ . Определялся двусторонний доверительный интервал  $\omega_n \div \omega_b$ ;  $\omega_n = \omega/r_1$ ;  $\omega_b = \omega/r_3$ ;  $r_1, r_3$  – статистические коэффициенты для экспоненциального распределения (зависят от  $\gamma$  и количества выборочных наблюдений). Результат – зависимость интервальной оценки  $P(t)_n = e^{-\omega_b t} \div P(t)_b = e^{-\omega_n t}$  от периодичности ТО ФС. Полученный диапазон значений  $\omega_n \div \omega_b$  и, соответственно,  $P(t)_n \div P(t)_b$  предлагается использовать в виде граничных условий для моделирования  $R$  реализаций процесса эксплуатации ФС при статистическом моделировании.

Основа статистического моделирования – искусственное формирование расширенной статистической базы для прогнозирования безотказности ФС на длительный период эксплуатации парка ВС. Принцип метода определяется выражением

$$\Theta = \int_0^T y(t) \cdot F(t) dt, \quad (1)$$

где  $\Theta$  – оценка безотказности ФС;  
 $t$  – наработка до отказа ФС (случайная величина), ч нал.;  
 $F(t)$  – функция распределения  $t$ ;  
 $y(t)$  – функция, отражающая зависимость безотказности ФС от наработки.  
 Результат моделирования:

$$\tilde{\Theta} = \sum_{r=1}^R y(t)_r / R; \quad y(t)_r = P(t)_r = e^{-\omega_r t}; \quad \omega_r = \{\omega_{r=1}, \omega_{r=2}, \dots, \omega_{r=R}\};$$

$r = 1, 2, \dots, R$  – реализации процесса эксплуатации ФС;  
 $t = t_1, t_2, \dots, t_k$  – периодичность ТО ФС.

Использование статистического моделирования позволило получить зависимость надежности (безотказности) ФС от периодичности ТО для расширенной статистической базы ( $R$  реализаций процесса эксплуатации ФС).

Цель исследований была достигнута при моделировании ПТЭ ВС на основе полумарковских случайных процессов. ПТЭ ВС рассматривался как последовательная во времени смена состояний ТЭ ВС (П – полет, Е – обеспечение вылета, ТО – техническое обслуживание, ОТО – ожидание ТО, У – устранение неисправностей и др).

Исходная информация за период наблюдений составляла:  $N = 1, 2, \dots, i, j, \dots, n_i$  – перечень состояний ПТЭ;  $\Phi$  – календарный фонд времени парка ВС, ч;  $n_i$  – количество попаданий ВС в  $i$ -е состояние;  $t_i$  – время пребывания в  $i$ -м состоянии;  $T_i$  – трудозатраты в  $i$ -м состоянии.

Вероятностно-статистические характеристики модели:

$$\pi_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^N n_i} \text{ – относительная частота попадания в } i\text{-е состояние};$$

$$\mu_i = \frac{t_i}{n_i} \text{ – среднее время пребывания в } i\text{-м состоянии за одно попадание, ч};$$

$\tau_i = \frac{T_i}{n_i}$  – средние трудозатраты в  $i$ -м состоянии за одно попадание, чел.-ч.

Граничные условия моделирования –  $\sum_{i=1}^N \pi_i \cdot \mu_i = \Phi$ , для 1-го года наблюдений годовой фонд времени парка ВС составит –  $\sum_{i=1}^N \pi_i \cdot \mu_i = \Phi_T = 8760 \cdot N_{ВС}$ , где  $N_{ВС}$  – количество ВС в парке.

Исследовалась доля влияния безотказности ФС на эффективность ПТЭ ВС в части выполнения восстановительных работ с периодичностью  $t = t_1, t_2, \dots, t_k$ .

В результате моделирования ПТЭ ВС получена количественная оценка показателей  $K_{П}$  и  $K_{Т}$  с учетом  $R$  реализаций процесса эксплуатации ФС для ряда значений  $\omega_r = \{\omega_{r=1}, \omega_{r=2} \dots \omega_{r=R}\}$ .

Изменение значений  $\omega_r$  оказывает влияние на исходную информацию (время пребывания и трудозатраты в состоянии «У» ПТЭ ВС). Для ее формирования были использованы выражения:

$$t_y = t_{в\text{ ср}} \cdot \omega_r \cdot t; \quad T_y = T_{в\text{ ср}} \cdot \omega_r \cdot t,$$

где  $t_y, T_y$  – время пребывания (ч) и трудозатраты (чел.-ч) в состоянии «У» соответственно;  $t_{в\text{ ср}}, T_{в\text{ ср}}$  – среднее время и средние трудозатраты на восстановление ФС соответственно;  $\omega_r$  – параметр потока отказов  $r$ -й реализации процесса эксплуатации ФС;  $t = t_1, t_2, \dots, t_k$  – периодичность ТО ФС, ч нал.

Такой подход позволяет получить при моделировании ряд реализаций ПТЭ ВС, при этом количество реализаций ограничено величиной  $(k \cdot R)$ ;  $k$  – количество исследуемых форм ТО,  $R$  – количество реализаций при статистическом моделировании безотказности ФС.

Оценка показателей  $K_{П}$  и  $K_{Т}$  выполнялась по формулам, представленным в [1]:

$$K_{П}, \text{ ч/ч нал.} = \frac{\sum_j \pi_j \cdot \mu_j}{\pi_i \cdot \mu_i}, j \in \text{ОТО, ТО, У}; \quad i \in \text{П}; \quad K_{Т}, \text{ чел.-ч/ч нал.} = \frac{\sum_j \pi_j \cdot \tau_j}{\pi_i \cdot \mu_i}, j \in \text{Е, ТО, У}; \quad i \in \text{П}.$$

На основе моделирования ПТЭ ВС появляется возможность анализа влияния надежности ФС на эффективность ПТЭ ВС. Результаты моделирования рекомендуется использовать в виде номограмм, связывающих значения показателей  $K_{П}$  и  $K_{Т}$  с безотказностью ФС и периодичностью ТО.

Предложенный метод был апробирован на примере эксплуатации топливной системы (ТС) самолета А-320 в ОАО «S7 Airlines» за 2014 г. Наблюдалась эксплуатация 4-х бортовых номеров А-320; годовой налет составил  $\Phi_T = 8760 \cdot 4 = 35040$  ч; исследовалась периодичность ТО ФС, установленная регламентом ( $t_1 = 600$  ч нал.,  $t_2 = 1200$  ч нал.,  $t_3 = 1800$  ч нал.,  $t_4 = 3600$  ч нал.).

С использованием методов структурных схем и интервальных оценок получен график, отражающий зависимость безотказности ТС от периодичности ТО (рис. 2).

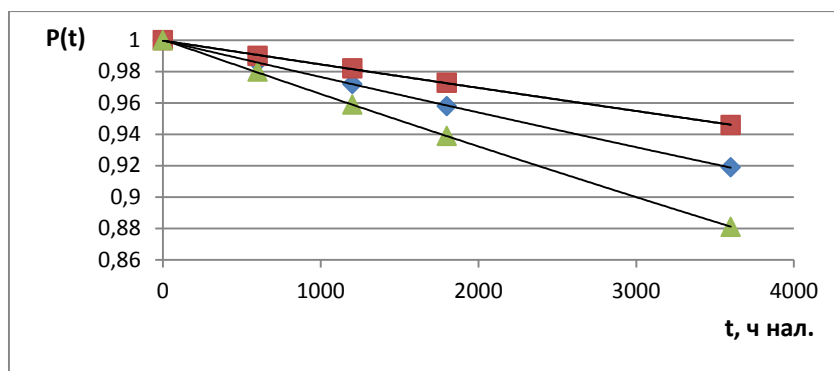


Рис. 2. Зависимость безотказности ТС самолета А-320 от периодичности ТО (выборочная и интервальная оценки);  $\blacksquare$  –  $P(t)_в$ ;  $\blacktriangle$  –  $P(t)_и$ ;  $\blacklozenge$  –  $P(t)_н$   
Fig. 2. Airbus-A320 fuel system dependence of reliability on maintenance periodicity (sample estimate and interval estimate)

Результаты статистического моделирования представлены на рис. 3.

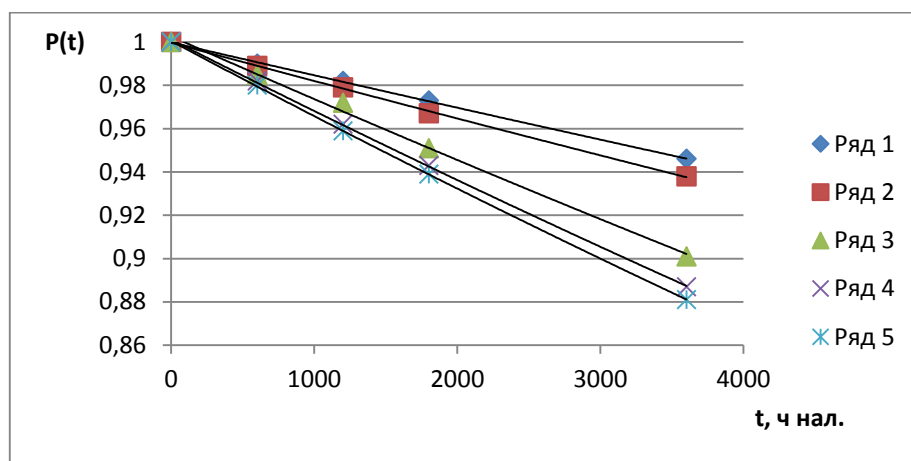


Рис. 3. Зависимость безотказности ТС самолета А-320 от периодичности ТО (статистическое моделирование): ряд 1 (r = 1); ряд 2 (r = 2); ряд 3 (r = 3); ряд 4 (r = 4); ряд 5 (r = 5)

Fig. 3. Airbus-A320 fuel system dependence of reliability on maintenance periodicity (statistical modeling): row 1 (r = 1); row 2 (r = 2); row 3 (r = 3); row 4 (r = 4); row 5 (r = 5)

Статистическое моделирование безотказности проводилось для R = 5 реализаций процесса эксплуатации ТС самолета А-320. Значения  $\omega_r$  были выбраны в диапазоне интервальной оценки и составили:

$$\begin{aligned} \omega_{r=1} &= 1,50 \cdot 10^{-5}; \\ \omega_{r=2} &= 1,98 \cdot 10^{-5}; \\ \omega_{r=3} &= 2,46 \cdot 10^{-5}; \\ \omega_{r=4} &= 2,94 \cdot 10^{-5}; \\ \omega_{r=5} &= 3,43 \cdot 10^{-5}. \end{aligned}$$

При моделировании ПТЭ самолета А-320 на основе полумарковских случайных процессов использовались результаты статистического моделирования. Количество реализаций ПТЭ самолета А-320 составило величину  $[(k = 4) \cdot (R = 5)] = 20$ . Результаты моделирования продемонстрированы в виде номограммы (рис. 4), отражающей взаимосвязь показателя эффективности ПТЭ –  $K_T$ , безотказности ТС –  $K_{1000}$  и периодичности ТО – t. Для удобства использования номограммы безотказность ТС оценивалась показателем  $K_{1000}$  (количество отказов на 1000 ч нал.), при этом  $K_{1000} = \omega \cdot 1000$ .

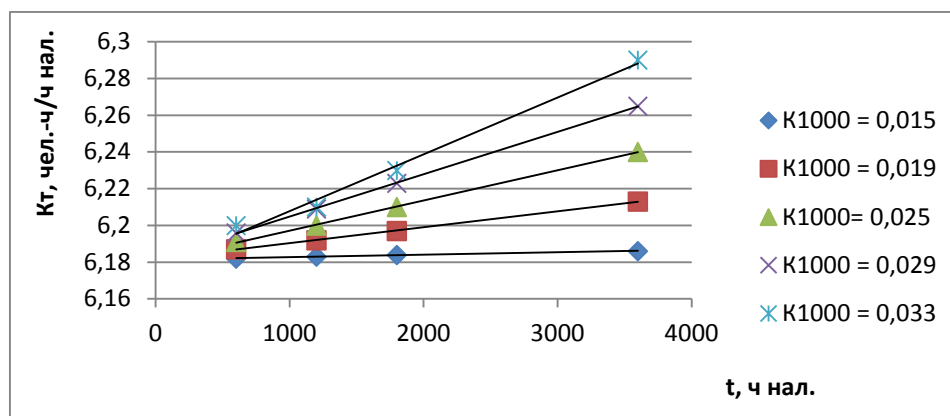


Рис. 4. Номограмма для прогнозирования  $K_T$  по значениям  $K_{1000}$  с учетом периодичности ТО t  
Fig. 4. Graphical chart for forecasting  $K_T$  on values  $K_{1000}$  to allow for periodicity of maintenance T

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен метод анализа влияния надежности (безотказности) ФС на эффективность ПТЭ ВС.
2. Представлена номограмма, отражающая зависимость удельной суммарной трудоемкости ТО от безотказности ФС и периодичности ТО, на примере эксплуатации топливной системы самолета А-320.
3. Результаты исследований позволяют:
  - производителю ВС – прогнозировать эффективность ПТЭ при разработке ФС для повышения конкурентоспособности вновь создаваемых ВС;
  - эксплуатанту ВС – планировать ожидаемые простои и трудоемкость ТО на основе фактической безотказности ФС, реализуемой в конкретных условиях эксплуатации.
4. Рассмотренный подход может быть использован при разработке рабочих Методик, как для производителя, так и для эксплуатанта ВС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смирнов Н.Н., Чинючин Ю.М.** Основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов: учебник. М.: МГТУ ГА, 2015.
2. **Ицкович А.А., Кабков П.К.** Вероятностно-статистические модели эксплуатации ЛА. М.: МГТУ ГА, 2009.
3. **Герасимова Е.Д., Полякова И.Ф.** Статистическое моделирование эксплуатационно-технических характеристик объектов АТ. М.: МГТУ ГА, 2014.
4. Определение потребного количества запасных ресурсных изделий летательных аппаратов с использованием статистической модели / Е.Д. Герасимова, И.Ф. Полякова, В.С. Кирдюшкин, Н. Ойдов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 219. С. 65–70.
5. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1989.
6. **Ицкович А.А.** Надежность летательных аппаратов и авиадвигателей. Часть II. М.: МГТУ ГА, 1995.
7. **Ицкович А.А., Файнбург И.А., Алексанян А.Р.** Анализ методов контроля надежности компонентов воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 160. С. 54–57.
8. **Мышкис А.Д.** Элементы теории математического моделирования. М.: Ком-книга, 2007.
9. **Смирнов Н.Н., Герасимова Е.Д., Полякова И.Ф.** Эксплуатационная надежность и режимы ТО ЛА и АД. М.: МГТУ ГА, 2002.
10. **Герасимова Е.Д., Смирнов Н.Н.** Техническое обслуживание зарубежных самолетов. М.: МГТУ ГА, 2011.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Герасимова Евгения Давидовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей МГТУ ГА, e.gerasimova@mstuca.aero.

**Смирнов Николай Николаевич**, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиадвигателей МГТУ ГА, n.smirnov@mstuca.aero.

**Ойдов Намбат**, соискатель МГТУ ГА, nambat.o@mcaa.aov.mn.

## THE EFFECT OF RELIABILITY OF FUNCTIONAL SYSTEMS ON THE EFFICIENCY OF THE TECHNICAL OPERATION OF THE AIRCRAFT

Evgeniya D. Gerasimova<sup>1</sup>, Nikolay N. Smirnov<sup>1</sup>, Nambat Oidov<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

### ABSTRACT

The article deals with the estimation algorithm for functional system reliability influence on the aircraft technical maintenance. The research results which allow to estimate the functional system reliability influence on the aircraft technical maintenance process are provided. The aircraft maintenance process effectiveness implies the maintenance procedures including pre-flight preparation, the flight itself, technical maintenance and storage.

The research was aimed at forecasting the aircraft technical maintenance process considering the functional system reliability, with special attention payed to failure-free operation. The term failure-free operation stands for the ability to execute a required function within a given time interval at given conditions.

The objects of maintenance -aircraft functional systems and their components have a great degree of failure-free operation, which has been a design requirement and is supported at aircraft maintenance and operation. Failures and malfunctions are seldom events. This fact leads to a limited statistic maintenance surveillance database. Classical methods of statistical analyses do not provide the sufficient fiducial probability for functional system failure-free operation estimation. Thus these methods do not allow to estimate its influence on the aircraft technical maintenance process effectiveness.

In order to solve this problem it is suggested to use the method of flow diagrams and random sample statistical method for failure-free operation estimation-statistical modeling (Monte-Carlo Method). Reliability flow diagram method allowed to determine the functional system failure-free operation random sample dependence on the technical maintenance frequency.

The initial data were: the functional system flow diagram, the list of the main equipment, functional system equipment failure random sample data. The use of statistical modeling allowed to estimate the dependence of functional system reliability (failure-free operation) on the technical maintenance frequency for expanded statistical database (a number of functional system maintenance and operation procedures).

**Key words:** aircraft, reliability, functional system, technical operation.

### REFERENCES

1. Smirnov N.N., Chinyuchin Yu.M. *Osnovyi teorii tehnikeskoy ekspluatatsii letatelnykh apparatov. Uchebnik* [The theoretical bases of technical operation of the flying apparatus. Textbook]. Moscow, MSTUCA, 2015. (in Russian)
2. Itskovich A.A., Kabkov P.K. *Veroyatnostno-statisticheskie modeli ekspluatatsii LA* [Probabilistic and statistical models of aircraft operation: a tutorial]. Moscow, MCTUCA, 2009. (in Russian)
3. Gerasimova E.D., Polyakova I.F. *Statisticheskoe modelirovanie ekspluatatsionno-tehnicheskikh harakteristik ob'ektov AT* [Statistical modeling of operational and technical characteristics of objects AT: A guide for practical training]. Moscow, MCTUCA, 2014. (in Russian)
4. Gerasimova E.D., Polyakova I.F., Kiryushkin V.S., Oydov N. *Opredelenie potrebnogo kolichestva zapasnykh resursnykh izdeliy letatelnykh apparatov s ispolzovaniem statisticheskoy modeli* [Determination of the needed amount of spare resource aircraft details using a statistical model]. The Scientific Bulletin of the MSTUCA, 2015, № 219, pp. 65–70. (in Russian)
5. GOST 27.002-89. *Nadezhnost v tehnike. Osnovnyie ponyatiya. Terminy i opredeleniya* [The reliability of the technique. Basic concepts. Terms and Definitions]. Moscow, Izdatelstvo standartov [Publishing Standards], 1989. (in Russian)
6. Itskovich A.A. *Nadezhnost letatelnykh apparatov i aviadvigately. Chast 2* [Reliability of aircraft and aircraft engines. Part II. Tutorial]. M., MCTUCA, 1995. (in Russian)

**7. Itskovich A.A., Faynburg I.A., Aleksanyan A.R.** *Analiz metodov kontrolya nadezhnosti komponentov vozdukhnykh sudov* [Analysis of methods to control reliability of aircraft components]. The Scientific Bulletin of the MSTUCA, 2010, № 160, pp. 54–57. (in Russian)

**8. Myishkis A.D.** *Elementy teorii matematicheskogo modelirovaniya* [Elements of mathematical modeling theory]. Moscow, Komkniga, 2007. (in Russian)

**9. Smirnov N.N., Gerasimova E.D., Polyakova I.F.** *Ekspluatatsionnaya nadezhnost i rezhimy TO LA i AD* [Operational reliability and modes of maintenance aircraft and airdrones: a tutorial]. Moscow, MSTUCA, 2002. (in Russian)

**10. Gerasimova E.D., Smirnov N.N.** *Tekhnicheskoe obsluzhivanie zarubezhnykh samoletov* [Maintenance of foreign aircraft: a tutorial.]. Moscow, MSTUCA, 2011. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Gerasimova Evgeniya Davidovna**, PhD, Associate Professor of Aircraft and Aircraft Engines Maintenance Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, e.gerasimova@mstuca.aero.

**Smirnov Nikolay Nikolayevich**, Professor, Doctor of Science, Full Professor of the Aircraft and Aircraft Engines Maintenance Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, n.smirnov@mstuca.aero.

**Nambat Oidov**, Externa PhD student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, nambat.o@mcaa.aov.mn.