

**АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

УДК 629.7.05

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-6-89-98

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
НЕОБСЛУЖИВАЕМОЙ В МЕЖСЕРВИСНЫЙ ПЕРИОД  
БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА**

**А.М. БРОННИКОВ<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>АО «Московский научно-производственный комплекс «Авионика», г. Москва, Россия*

Концепция авионики необслуживаемого бортового оборудования подразумевает отсутствие необходимости обслуживания бортовых систем в межсервисные периоды с сохранением требуемых эксплуатационно-технических характеристик, что должно обеспечиваться автоматическим диагностированием технического состояния, а также использованием активных средств обеспечения отказобезопасности, позволяющих в случае отказов изменять структуру системы для сохранения ее функций. Предполагается, что такое оборудование позволит в значительной степени сократить, а в пределе и полностью исключить традиционное обслуживание воздушных судов между плановым сервисным обслуживанием, обеспечивая максимальную готовность к применению вместе с повышением безопасности полетов. В статье предлагается методика оценки эффективности эксплуатации необслуживаемой в межрегламентный период избыточной бортовой системы воздушного судна с однородным резервированием. За счет избыточности резервированных элементов бортовая система в течение межсервисного периода накапливает отказы, которые устраняются при проведении сервисных работ. Если количество отказов какого-либо резерва приближается к критическому значению, то восстановление бортовой системы (устранение всех отказов) осуществляется в межсервисный период за счет проведения аварийно-восстановительных работ. Считается, что сервисные работы приводят к устранению всех отказов и полностью обновляют бортовую систему. Процесс изменения технического состояния бортовой системы описывается дискретно-непрерывной моделью в полетном времени. В качестве комплексных показателей эффективности эксплуатации системы используются средние потери в самолетовылетах и средние затраты на эксплуатацию. На примере оценки эффективности эксплуатации формализованной бортовой системы с однородным резервированием демонстрируется работоспособность предложенной методики и возможность ее использования при проведении анализа эффективности эксплуатации необслуживаемого в межрегламентный период оборудования. Также для примера проведен сравнительный анализ эффективности эксплуатации необслуживаемой бортовой системы с избыточным резервированием и бортовой системы с рациональным резервированием, обслуживаемой по стратегии «до отказа».

**Ключевые слова:** необслуживаемая авионика, техническое состояние, избыточность, резервирование, методы технического обслуживания, моделирование.

**ВВЕДЕНИЕ**

Эксплуатация традиционного бортового радиоэлектронного оборудования воздушных судов (ВС) сопряжена с необходимостью решения таких проблем, как задержки вылетов и незапланированные посадки из-за отказов, необходимость содержать на используемых аэродромах технический персонал, средства обслуживания и текущего ремонта, фонд запасных частей. Концепция авионики необслуживаемого бортового оборудования (АНБО) подразумевает отсутствие необходимости обслуживания бортовых систем в межсервисные периоды с сохранением требуемых эксплуатационно-технических характеристик, что должно обеспечиваться автоматическим диагностированием технического состояния, а также использованием активных средств обеспечения отказобезопасности, позволяющих в случае отказов изменять структуру системы для сохранения ее функций [1, 2]. В настоящее время бортовые комплексы строятся на принципах интегрированной модульной авионики (ИМА) [3]. Но использование одной лишь концепции ИМА при построении бортовых комплексов не позволяет избежать указанных выше проблем с их эксплуатацией. По-видимому, перспективные бортовые системы и комплексы должны проектироваться с одновременным учетом концепций ИМА и АНБО.

Необслуживаемое бортовое оборудование при эксплуатации накапливает отказы с сохранением своих функций с уровнем надежности не ниже заданного. Устранение таких отказов осуществляется при проведении сервисного обслуживания. Если же в бортовом оборудовании возникает отказ (совокупность отказов), который приводит к нарушению решаемых функций или снижению ниже заданного уровня надежности, то летная эксплуатация приостанавливается и проводятся аварийно-восстановительные работы (АВР) [1].

Проблемам оценки эффективности эксплуатации бортового оборудования и выбора рациональной стратегии его технического обслуживания посвящено значительное количество работ, публикуемых как в России [4–7], так за рубежом [8, 9]. Вместе с тем автору неизвестны работы, которые затрагивали бы оценку эффективности эксплуатации необслуживаемого оборудования. Это объясняется, по-видимому, новизной рассматриваемой концепции. В статье предлагается методика оценки эффективности эксплуатации необслуживаемой в межрегламентный период избыточной бортовой системы (БС) ВС с однородным резервированием. За счет избыточности резервированных элементов БС в течение межсервисного периода накапливает отказы, которые устраняются при проведении сервисных работ. Если количество отказов какого-либо резерва приближается к критическому значению, то восстановление БС (устранение всех отказов) осуществляется в межсервисный период за счет проведения АВР. Считается, что сервисные работы приводят к устранению всех отказов и полностью обновляют БС.

Процесс изменения технического состояния БС описывается дискретно-непрерывной моделью в полетном времени, рассмотренной в [10]. В качестве комплексных показателей эффективности эксплуатации системы используются средние потери в самолетовылетах [11, 12] и средние затраты на эксплуатацию. На примере оценки эффективности эксплуатации формализованной БС с однородным резервированием демонстрируется работоспособность предложенной методики и возможность ее использования при проведении анализа эффективности эксплуатации необслуживаемого в межрегламентный период оборудования. Также для примера проведен сравнительный анализ эффективности эксплуатации необслуживаемой бортовой системы с избыточным резервированием и бортовой системы с рациональным резервированием, обслуживаемой по стратегии «до отказа».

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Считается, что БС состоит из  $n$  в общем случае разнотипных блоков (устройств, элементов). В схему надежности все  $n$  блоков входят последовательно. Под количеством резервов  $k_q$  блока понимается количество однотипных элементов, входящих в схему надежности параллельно. В состояние отказа БС переходит при критическом количестве отказов хотя бы одного резервированного блока. Под критическим количеством отказов резервированного блока будем понимать количество отказов его резервов, при котором теряется работоспособность блока, а значит и БС в целом [10]. Критическое количество отказов будем обозначать  $k_{крq}$ , где  $q$  – номер резервированного блока. Также введем определение предельного количества отказов резервированного блока  $k_{прq}$  – это такое количество отказов резервов, при котором сохраняется работоспособность только до отказа любого следующего резерва, т. е. можно записать, что  $k_{крq} = k_{прq} + 1$ .

Будем считать, что необслуживаемая в межрегламентный период БС эксплуатируется в течение всего межсервисного периода с накоплением отказов резервированных элементов. Если до окончания межсервисного периода хотя бы в одном из резервированных блоков возникло предельное количество отказов  $k_{прq}$ , то летная эксплуатация ВС прекращается и проводятся АВР, при которых устраняются все накопившиеся отказы.

Система может находиться в одном из трех состояний [10]:

- $S_0$  – работоспособное состояние, в котором в каждой группе резервированных элементов исправны не менее  $k_{прq} + 1$  резервов;
- $S_1$  – предельное состояние, при котором хотя бы один из резервированных блоков содержит предельное количество отказов  $k_{прq}$ ;
- $S_2$  – состояние отказа БС, при котором хотя бы в одном из резервированных блоков возникло критическое количество отказов или больше.

Рассматривается конечный интервал эксплуатации  $T$ . Среднее время полета составляет  $T_{п}$ . В течение интервала эксплуатации совершается  $m$  полетов ( $m = [T/T_{п}]$ , где  $[\cdot]$  – обозначение целой части числа). С периодичностью  $\tau_{мс}$  или  $m_{мс} = [\tau_{мс}/m]$  (количество полетов в межсервисном периоде) на БС проводятся работы по техническому обслуживанию (ТО). Считается, что работы по ТО полностью обновляют БС. Это соответствует в полетном времени скачкообразному переходу всех интенсивностей отказов в значение, соответствующее начальному значению. Система имеет встроенные средства автоматического контроля, которые с вероятностью  $1 - \beta_1$  распознают состояние  $S_1$  и с вероятностью  $1 - \beta_2$  распознают состояние  $S_2$  ( $\beta_1$  и  $\beta_2$  – вероятности необнаружения (пропуска) состояний  $S_1$  и  $S_2$ ). При переходе БС в состояния  $S_1$  и  $S_2$  проводятся АВР<sub>1</sub> и АВР<sub>2</sub> которые также полностью обновляют БС и имеют в общем случае различное время проведения и различную стоимость. Известны интенсивности отказов  $\lambda_i$  всех блоков БС, которые в общем случае могут быть функциями времени. Также известны:

- средняя продолжительность ТО  $T_{то}$  и средняя продолжительность АВР<sub>1</sub>  $T_{a1}$  и АВР<sub>2</sub>  $T_{a2}$ ;
- средние потери стоимости при срыве выполнения полетного задания  $C_1$ , средняя стоимость проведения работ по ТО  $C_2$ , средняя стоимость проведения АВР<sub>1</sub>  $C_{a1}$  и АВР<sub>2</sub>  $C_{a2}$ ;
- среднеплановая интенсивность полетов  $\nu$ , вычисляемая как отношение суммарного полетного времени к общему интервалу времени.

Рассматривается система с уровнем критичности не выше  $C$  (см. уровни критичности проектирования [13]), отказ которой вызывает сложную ситуацию в полете и не приводит к катастрофической или аварийной ситуации. Считается, что срыв выполнения полетного задания происходит при переходе системы в состояние  $S_2$ .

Необходимо разработать методику оценки эффективности эксплуатации необслуживаемой БС по показателям средних потерь в самолетовылетах  $W(m, m_{мс})$  и средних затрат на эксплуатацию  $C(m, m_{мс})$ .

## МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ

Методика вычисления средних потерь в самолетовылетах  $W(m, m_{мс})$  и средних затрат на эксплуатацию  $C(m, m_{мс})$  необслуживаемой в межсервисный период БС сводится к следующему.

1. По заданным количествам элементов БС, их интенсивностям отказов, значениям предельных  $k_{прq}$  и критических  $k_{крq}$  количествах отказов резервов вычисляются интенсивности переходов из состояния  $S_0$  в состояние  $S_1 - \lambda_{01}$ , из состояния  $S_0$  в состояние  $S_2 - \lambda_{02}$ , из состояния  $S_1$  в состояние  $S_2 - \lambda_{12}$ . Формулы расчета интенсивностей переходов приведены в [10].

2. Определяются вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии  $P_i(S_0)$ , в предельном состоянии  $P_i(S_1)$ , в состоянии отказа  $P_i(S_2)$  в каждом из  $m$  полетов ( $i = \overline{1..m}$ ) на рассматриваемом интервале эксплуатации  $T$ . Так как проведение сервисных работ полностью обновляет систему, то расчет вероятностей состояний достаточно проводить только для  $m_{MC}$  полетов. Формульные выражения для расчета вероятностей состояний приведены в [10].

3. На основе вероятностей  $P_i(S_1)$  и  $P_i(S_2)$  рассчитываются математические ожидания:

1) числа срыва выполнения полетных заданий  $N_{СП}(m, m_{MC})$  из-за наступления предельного состояния  $S_2$  в полете:

$$M[N_{СП}(m, m_{MC})] = \delta \sum_{i=1}^{m_{MC}} P_i(S_2) + \sum_{i=1}^{m-\delta m_{MC}} P_i(S_2), \quad (1)$$

где  $\delta = [T/\tau_{MC}] = [m/m_{MC}]$  - количество работ по ТО на интервале эксплуатации  $T$ ;

2) числа АБР<sub>1</sub>  $N_1(m, m_{MC})$ :

$$M[N_1(m, m_{MC})] = (1 - \beta_1) \left( \delta \sum_{i=1}^{m_{MC}} P_i(S_1) + \sum_{i=1}^{m-\delta m_{MC}} P_i(S_1) \right); \quad (2)$$

3) числа АБР<sub>2</sub>  $N_2(m, m_{MC})$ :

$$M[N_2(m, m_{MC})] = (1 - \beta_2) \left( \delta \sum_{i=1}^{m_{MC}} P_i(S_2) + \sum_{i=1}^{m-\delta m_{MC}} P_i(S_2) \right). \quad (3)$$

4. Вычисляются средние потери в самолетовылетах  $W(m, m_{MC})$  и средние затраты на эксплуатацию  $C(m, m_{MC})$  по формулам

$$W(m, m_{MC}) = \underbrace{M[N_{СП}(m, m_{MC})]}_{W_{СП}} + \underbrace{\nu(T_{a1}M[N_1(m, m_{MC})] + T_{a2}M[N_2(m, m_{MC})])}_{W_{авр}} + \underbrace{\nu T_{ТО} \delta}_{W_{ТО}}, \quad (4)$$

$$C(m, m_{MC}) = \underbrace{C_1 M[N_{СП}(m, m_{MC})]}_{C_{СП}} + \underbrace{C_{a1} M[N_1(m, m_{MC})] + C_{a2} M[N_2(m, m_{MC})]}_{C_a} + \underbrace{C_2 \delta}_{C_{ТО}}. \quad (5)$$

В показателе (4) первый член  $W_{СП}$  характеризует вероятностные потери в самолетовылетах из-за срыва полетных заданий, а второй  $W_{авр}$  и третий  $W_{ТО}$  члены характеризуют вероятные потери в самолетовылетах из-за простоев на земле по устранению отказов и проведению работ по ТО. В показателе (5) первое слагаемое  $C_{СП}$  отражает потери из-за срыва выполнения полетных заданий. Второе слагаемое  $C_a$  – средние затраты, связанные с проведением АБР. Третье слагаемое  $C_{ТО}$  – средние затраты, связанные с проведением ТО.

## РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

Рассматривается гипотетическая БС с уровнем критичности проектирования  $C$  [13], состоящая из 9 блоков (элементов): Э1, Э2, ..., Э9. При уровне критичности  $C$  вероятность отказа системы за час полета не должна превышать значения  $10^{-5}$  [13]. Для проведения сравнительного анализа рассмотрим два варианта построения системы:

- традиционную обслуживаемую систему с рациональным резервированием, обеспечивающим вероятность отказа за час полета не более  $10^{-5}$ ;
- необслуживаемую систему с избыточным резервированием.

Зададимся интенсивностями отказов блоков БС, приведенными в табл. 1. При рациональном резервировании для обеспечения требования вероятности отказа за час полета не более  $10^{-5}$  требуется трехкратное резервирование каждого блока системы. Для необслуживаемой системы требование вероятности отказа не более  $10^{-5}$  должно распространяться не на час полета, а на межсервисный период. Зададимся межсервисным периодом 500 ч. Тогда потребное количество резервов составляет 5. Пусть отказы резервов определяются на основе мажоритарной логики [14]. Тогда работоспособность системы обеспечивается при двух исправных блоках в каждом сечении. На основе этого определяются предельные и критические количества отказов, которые приведены в табл. 1.

**Таблица 1**  
**Table 1**

№ п.п.	Наименование блока	Интенсивность отказов, 1/ч	Необслуживаемая БС			Обслуживаемая БС		
			$k_q$	$k_{кр}$	$k_{пр}$	$k_q$	$k_{кр}$	$k_{пр}$
1	Э1	$2,0 \cdot 10^{-4}$	5	4	3	3	2	1
2	Э2	$1,5 \cdot 10^{-4}$	5	4	3	3	2	1
3	Э3	$1,2 \cdot 10^{-4}$	5	4	3	3	2	1
4	Э4	$2,3 \cdot 10^{-6}$	5	4	3	3	2	1
5	Э5	$5,5 \cdot 10^{-5}$	5	4	3	3	2	1
6	Э6...Э9	$2,5 \cdot 10^{-5}$	5	4	3	3	2	1

Пусть период эксплуатации  $T = 10\,000$  ч, средняя продолжительность полета  $T_{п} = 4$  ч, вероятности пропуска отказа  $\beta_1 = 0,05$ ,  $\beta_2 = 0,01$ , среднеплановая интенсивность полетов  $\nu = 0,5$  (соответствует 12-часовому налету в сутки). В табл. 2 приведены остальные значения временных и стоимостных параметров, используемых при проведении исследований.

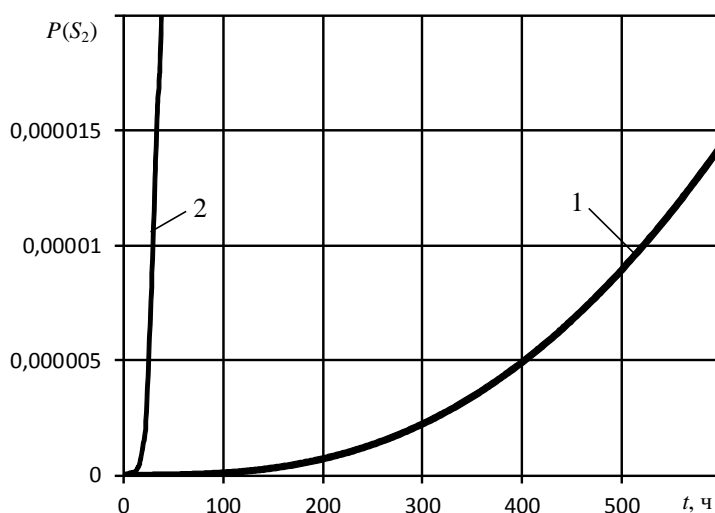
**Таблица 2**  
**Table 2**

№ п.п.	Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Значение	
				Необслуживаемая БС	Обслуживаемая БС
1	Средняя продолжительность ТО	$T_{то}$	ч	2	1
2	Средняя продолжительность АВР <sub>1</sub>	$T_{a1}$	ч	20	2
3	Средняя продолжительность АВР <sub>2</sub>	$T_{a2}$	ч	25	25
4	Средняя стоимость проведения ТО	$C_2$	у.е.	200	100
5	Средняя стоимость проведения АВР <sub>1</sub>	$C_{a1}$	у.е.	3000	200
6	Средняя стоимость проведения АВР <sub>2</sub>	$C_{a1}$	у.е.	3500	3000
7	Потери при срыве полетного задания	$C_1$	у.е.	10 000	10 000

Прокомментируем некоторые данные табл. 2. Под ТО понимается углубленный наземный контроль системы с устранением обнаруженных отказов. ТО выполняется планоно, поэтому его стоимость и продолжительность незначительны. При наступлении состояния  $S_1$  проводятся АВР<sub>1</sub>. Для обслуживаемой БС это устранение отказов осуществляется на плановом аэродроме, на котором имеется подготовленный технический персонал и фонд запасных частей. Для необслуживаемой системы такие АВР являются внеплановыми, считается, что персонал на аэродроме отсутствует, запасных частей нет. Отсюда столь существенные значения

длительности и стоимости АВР. Для обеих систем АВР<sub>2</sub> являются внеплановыми, поэтому время их выполнения и стоимости сопоставимы. Срыв полетного задания приводит к задержкам с вылетом, возможной посадкой на запасной аэродром и связанным с этим значительным издержкам.

На рис. 1 приведены графики изменения вероятностей состояний  $P(S_2)$  для необслуживаемой и обслуживаемой БС. Состояние  $S_2$  – это отказ системы. Как видно из графиков, вероятность полного отказа БС  $P(S_2)$  для необслуживаемой системы с избыточным резервированием достигает критического уровня  $10^{-5}$  более чем через 500 ч, а для обслуживаемой БС – уже через 32 часа (8 полетов). Поэтому для обслуживаемой системы для выполнения требований по безопасности [13] проводится проведение ТО не реже чем через 32 ч. Для необслуживаемой системы – через 500 ч.



**Рис. 1.** Вероятности состояний  $P(S_2)$  для необслуживаемой 1 и обслуживаемой 2 БС  
**Fig. 1.** Probabilities of  $P(S_2)$  conditions for maintenance-free 1 and maintained 2 BS

На рис. 2 приведены графики изменения потерь в самолетовылетах при изменении периода между ТО  $\tau_{mc}$ . У необслуживаемой БС с увеличением интервала между ТО потери в самолетовылетах сначала уменьшаются, а начиная с времени  $\tau_{mc} = 800 \dots 1000$  ч растут. Рост связан с увеличением потерь, связанных с проведением АВР. Потери имеют минимальное значение при  $\tau_{mc} = 800 \dots 1000$  ч. Однако из графика на рис. 1 следует, что при  $\tau_{mc} > 500$  ч для необслуживаемой системы нарушаются требования безопасности. Поэтому, несмотря на оптимальное значение потерь для необслуживаемой БС следует назначить межсервисный интервал в 500 ч. Прогнозируемые потери в самолетовылетах при таком интервале будут составлять 22 вылета при 10 000-часовом интервале эксплуатации. Для обслуживаемой системы выраженного оптимума в проведении ТО нет. Из графика следует, что оптимальной стратегией для обслуживаемой БС является эксплуатация до отказа. При этом потери составляют около 40 самолетовылетов, что почти в два раза больше, чем для необслуживаемой БС. Но из рис. 1 следует, что при межсервисном интервале более 32 ч уровень надежности системы становится ниже требований [13]. При межсервисном интервале в 32 ч потери для обслуживаемой БС составляют 170 самолетовылетов, что более чем в 8 раз выше, чем у необслуживаемой системы.

На рис. 3 приведены графики затрат на эксплуатацию обслуживаемой и необслуживаемой БС при изменении периодичности выполнения ТО от 50 до 600 ч.

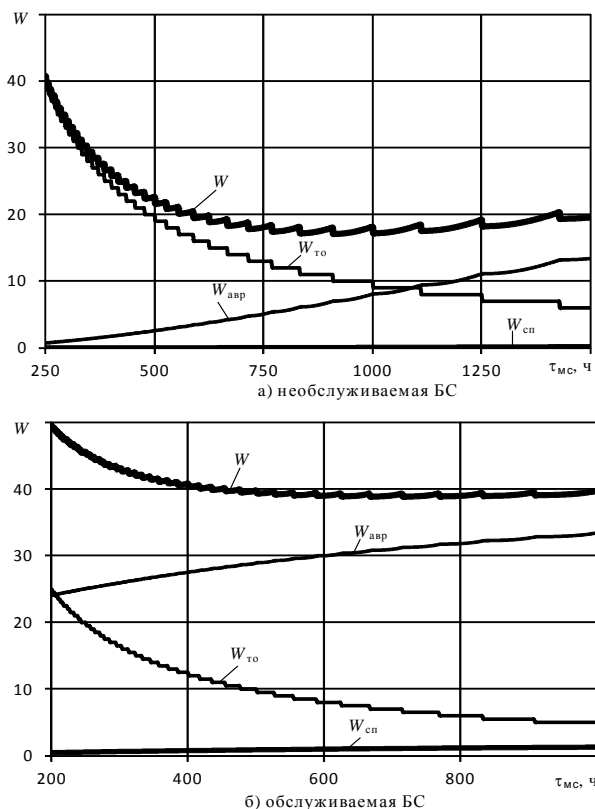


Рис. 2. Средние потери в самолетовылетах  
Fig. 2. Average losses in air missions

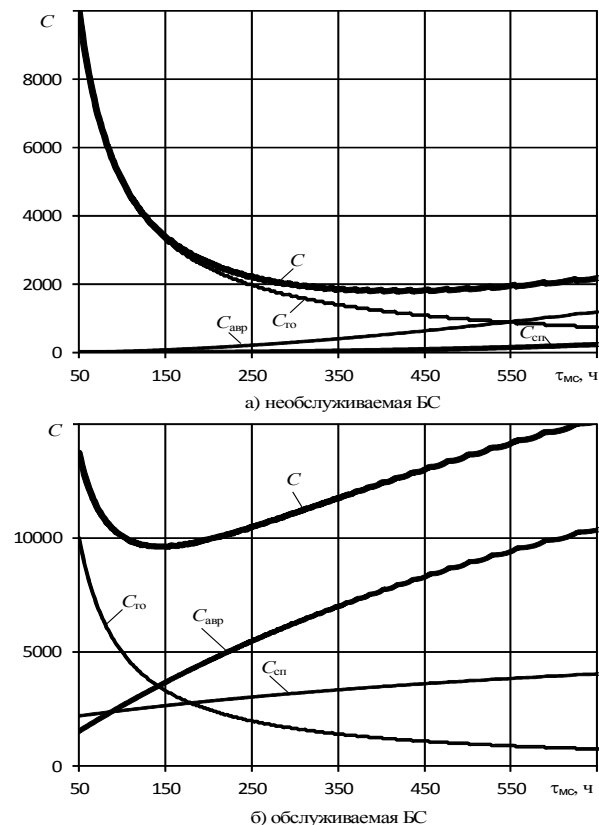


Рис. 3. Средние затраты на эксплуатацию  
Fig. 3. Average maintenance costs

Анализ графиков показывает, что при малой периодичности ТО основной вклад вносят затраты на выполнение ТО. При большой периодичности ТО основной вклад вносят затраты, связанные с проведением АБР. Для обслуживаемой БС при используемых исходных данных оптимальной периодичностью ТО является 350–400 ч, а для необслуживаемой – 150 ч. При этом затраты составляют 2 000 и 10 000 у.е. соответственно. При периодичности в ТО в 32 ч (реже проводить ТО нельзя по требованиям безопасности, см. рис. 1) обслуживаемая БС имеет затраты 18 000 у.е., что в 9 раз больше, чем необслуживаемая, для которой при проведении ТО через 400 ч требования безопасности не нарушаются.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагается оценивать эффективности технической эксплуатации необслуживаемой БС по комплексным критериям средних потерь в самолетовылетах и средних затрат на эксплуатацию. Методика оценки эффективности технической эксплуатации основана на использовании дискретно-непрерывной модели изменения технического состояния необслуживаемой системы. На первом этапе по заданным количествам нерезервированных и резервированных элементов БС, их интенсивностям отказов, количествам предельных и критических отказов резервов вычисляются интенсивности переходов БС из состояния в состояние. На втором этапе определяются вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии  $P(S_0)$ , в предельном состоянии  $P(S_1)$ , в состоянии отказа  $P(S_2)$  в каждом из  $m$  полетов на рассматриваемом интервале эксплуатации. На третьем этапе по формулам (1)–(3) вычисляются математические ожидания количества срыва полетных заданий, АБР, работ по ТО, отказов системы и на их основе вычисляются средние потери в самолетовылетах и средние затраты на эксплуатацию по формулам (4) и (5).

Численные исследования демонстрируют пригодность предложенной методики для проведения анализа эффективности технической эксплуатации необслуживаемой в межсервисный период БС. Также данная методика может быть использована для теоретического обоснования рациональной периодичности работ по ТО.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки эффективности необслуживаемых в межсервисный период систем при разработке нового поколения авиационных комплексов бортового оборудования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bukov V., Kutahov V., Bekkiev A.** Avionics of Zero Maintenance Equipment. 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences 2010 (ICAS 2010), 2010, pp. 3507–3514.
2. Опыт создания технологии проектирования и производства информационно-вычислительной среды для комплексов авиационного бортового оборудования на основе концепций интегрированности, модульности и необслуживаемости / В.А. Чернышов, А.А. Оводенко, В.Н. Буков, Ю.Е. Шейнин, В.А. Шурман, И.В. Боблак // Вестник Академии военных наук. 2012. № 3 (40). С. 132–138.
3. **Чуянов Г.А., Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И.** Перспективы развития комплексов бортового оборудования на базе интегрированной модульной авионики // Известия ЮФУ. Технические науки, 2013. № 3 (140). С. 55–62.
4. Эксплуатация авиационных систем по состоянию (математические модели и техническая реализация) / Е.Ю. Барзилович, А.А. Букреев, В.П. Парфенов, В.А. Осташкевич // Научный Вестник МГТУ ГА. 2008. № 127. С. 7–15.
5. **Кузнецов С.В.** Математические модели процессов и систем технической эксплуатации бортовых комплексов и функциональных систем авионики // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 132–140.
6. **Войтович А.В., Григорьев К.Л., Шульгин А.Е.** Математическая модель определения оптимальных периодов управления техническим состоянием средств сложной организационно-технической системы // Фундаментальные исследования. 2015. № 11-5. С. 858–862.
7. **Уланский В.В., Мачалин И.А.** Показатели эффективности эксплуатации резервированных авиационных радиоэлектронных систем // Математические машины и системы. 2006. Т. 1, № 4. С. 155–163.
8. **Wang H., Pham H.** Reliability and optimal maintenance. New York, Springer, 2006, 360 p.
9. **Vovk S.P., Ginis L.A.** Modelling and forecasting of transitions between levels of hierarchies in Difficult formalized systems. European Researcher, 2012, Vol. 20, № 5-1, pp. 541–545.
10. **Бронников А.М., Морозов Д.В.** Динамика технического состояния необслуживаемой в межрегламентный период бортовой системы летательного аппарата // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 152–158.
11. **Бронников А.М., Коховец С.Н., Морозов Д.В.** Оптимизация периодичности углубленного наземного контроля авиационных комплексов по критерию минимума потерь в самолетовылетах // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 185. С. 13–18.
12. **Бронников А.М., Коховец С.Н.** Оптимизация периодичности наземного контроля авиационных навигационных комплексов по критерию минимума потерь в самолетовылетах // Контроль. Диагностика. 2013. № 1. С. 39–46.
13. Руководство Р4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации. М.: Авиаздат, 2011. 266 с.
14. **Оболенский Ю.Г.** Управление полетом маневренных самолетов. М.: Воениздат, 2007. 480 с.



## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Бронников Андрей Михайлович**, доктор технических наук, доцент, заместитель главного конструктора технического направления АО МНПК «Авионика», [bronnikov\\_a\\_m@mail.ru](mailto:bronnikov_a_m@mail.ru).

## TECHNICAL MAINTENANCE EFFICIENCY OF THE AIRCRAFT MAINTENANCE-FREE ON-BOARD SYSTEM BETWEEN SCHEDULED MAINTENANCES

**Andrey M. Bronnikov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*JSC MRPC «Avionica», Moscow, Russia*

### ABSTRACT

The avionics concept of the maintenance-free on-board equipment implies the absence of necessity to maintain onboard systems between scheduled maintenance, preserving the required operational and technical characteristics; it should be achieved by automatic diagnosis of the technical condition and the application of active means of ensuring a fail-safe design, allowing to change the structure of the system to maintain its functions in case of failure. It is supposed that such equipment will reduce substantially and in the limit eliminate traditional maintenance of aircraft between scheduled maintenance, ensuring maximum readiness for use, along with improving safety. The paper proposes a methodology for evaluating the efficiency of maintenance-free between scheduled maintenance aircraft system with homogeneous redundancy. The excessive redundant elements allow the system to accumulate failures which are repaired during the routine maintenance. If the number of failures of any reserve is approaching a critical value, the recovery of the on-board system (elimination of all failures) is carried out between scheduled maintenance by conducting rescue and recovery operations. It is believed that service work leads to the elimination of all failures and completely updates the on-board system. The process of system operational status changes is described with the discrete-continuous model in the flight time.

The average losses in the sorties and the average cost of operation are used as integrated efficiency indicators of system operation. For example, the evaluation of the operation efficiency of formalized on-board system with homogeneous redundancy demonstrates the efficiency of the proposed methodology and the possibility of its use while analyzing the efficiency of the maintenance-free operation equipment between scheduled periods. As well as a comparative analysis of maintenance-free operation efficiency of the on-board system with excessive redundancy and on-board system with rational redundancy serviced by the strategy of "to failure" is carried out.

**Key words:** maintenance-free avionics, operational status, excess, redundancy, methods of maintenance, simulation.

### REFERENCES

- 1. Bukov V., Kutahov V., Bekkiev A.** Avionics of Zero Maintenance Equipment. 27<sup>th</sup> Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences 2010 (ICAS 2010), 2010, pp. 3507–3514.
- 2. Chernyshov V.A., Ovodenko A.A., Bukov V.N., Sheynin Y.E., Shulman V.A., Boblak I.V.** *Opyt sozdaniya tekhnologii proektirovaniya i proizvodstva informacionno-vychislitel'noj sredy dlya kompleksov aviacionnogo bortovogo oborudovaniya na osnove koncepcij integrirovannosti, modul'nosti i neobsluzhivaemosti* [Creation of designing and producing technology for information-calculating environment for airborne equipment package on basis of integrating, moduleness and zero maintenance conceptions]. *Vestnik akademii voennih nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Military Sciences], 2012, № 3 (40), pp. 132–138. (in Russian)
- 3. Chuyanov G.A., Kos'yanchuk V.V., Sel'vesyuk N.I.** *Perspektivy razvitiya kompleksov bortovogo oborudovaniya na baze integrirovannoj modul'noj avioniki* [Prospects of development of complex onboard equipment on the basis of integrated modular avionics]. *Izvestiya YuFU Tehnicheskiye nauki* [Izvestiya of Southern Federal University. Engineering science], 2013, № 3 (140), pp. 55–62. (in Russian)
- 4. Barzilovich E.Yu., Bukreev A.A., Parfenov V.P., Ostashkevich V.A.** *Ehkspluatatsiya aviacionnyh sistem po sostoyaniyu (matematicheskie modeli i tekhnicheskaya realizatsiya)* [Operation of

aviation systems (mathematical models and technical realization)]. *Nauchnyy Vestnik Moscovskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta Grazhdanskoy Aviatsii* [Scientific Bulletin of MSTUCA], 2008, № 127, pp. 7–15. (in Russian)

**5. Kuznecov S.V.** *Matematicheskie modeli processov i sistem tekhnicheskoy ehkspluatacii bortovyh kompleksov i funkcional'nyh sistem avioniki* [Mathematical models of processes and systems of technical maintenance of onboard systems and functional systems of avionics]. *Nauchnyy Vestnik Moscovskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta Grazhdanskoy Aviatsii* [Scientific Bulletin of MSTUCA]. 2017, vol. 20, № 1, pp. 132–140 (in Russian)

**6. Vojtovich A.V., Grigor'ev K.L., Shul'gin A.E.** *Matematicheskaya model' opredeleniya optimal'nyh periodov upravleniya tekhnicheskim sostoyaniem sredstv slozhnoj organizacionno-tekhnicheskoy sistemy* [A mathematical model for determining optimal periods of control the technical condition of means and technical system]. *Fundamentalniye issledovaniya* [Fundamental research], 2015, № 11-5, pp. 858–862. (in Russian)

**7. Ulanskij V.V., Machalin I.A.** *Pokazateli ehffektivnosti ehkspluatacii rezervirovannyh aviacionnyh radioehlektronnyh sistemy* [Effectiveness' indicators of redundant aircraft electronic systems' use]. *Matematicheskiye mashiny i sistemy* [Mathematical machines and systems], 2006, Vol. 1, № 4, pp. 155–163. (in Russian)

**8. Wang H., Pham H.** Reliability and optimal maintenance. New York, Springer, 2006, 360 p.

**9. Vovk S.P., Ginis L.A.** Modelling and forecasting of transitions between levels of hierarchies in Difficult formalized systems. *European Researcher*, 2012, Vol. (20), № 5-1, pp. 541–545.

**10. Bronnikov A.M., Morozov D.V.** *Dinamika tekhnicheskogo sostoyaniya neobsluzhivaemoj v mezhreglamentnyj period bortovoj sistemy letatel'nogo apparata* [Process of changes of maintenance-free onboard system operational status between scheduled maintenance]. *Nauchnyy Vestnik Moscovskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta Grazhdanskoy Aviatsii* [Scientific Bulletin of MSTUCA], 2017, Vol. 20, № 1, pp. 152–158. (in Russian)

**11. Bronnikov A.M., Kohovec S.N., Morozov D.V.** *Optimizaciya periodichnosti uglublennogo nazemnogo kontrolya aviacionnyh kompleksov po kriteriyu minimuma poter' v samo-letovylyetah* [Optimization of the periodicity of ground monitoring of airborne integrated systems according by using the test for minimum losses in aircraft flights]. *Nauchnyy Vestnik Moscovskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta Grazhdanskoy Aviatsii* [Scientific Bulletin of MSTUCA], 2012, № 185, pp. 13–18. (in Russian)

**12. Bronnikov A.M., Kohovec S.N.** *Optimizaciya periodichnosti nazemnogo kontrolya aviacionnyh navigacionnyh kompleksov po kriteriyu minimuma poter' v samoletovylyetah* [Optimization of the periodicity of ground monitoring of airborne integrated navigation systems by using the test for minimum losses in aircraft flights]. *Kontrol' Diagnostika* [Control. Diagnosis], 2013, № 1, pp. 39–46. (in Russian)

**13. ARP4761.** Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment. M.: Aviaizdat, 2011, 266 p.

**14. Obolenskij Yu.G.** *Upravlenie poletom manevrennyh samoletov* [Flight control of maneuverable aircraft]. M., Military publishing, 2007, 480 p. (in Russian)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Andrey M. Bronnikov**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Chief Designer of the Technical Direction at JSC MRPC «Avionica», [bronnikov\\_a\\_m@mail.ru](mailto:bronnikov_a_m@mail.ru).

Поступила в редакцию 07.10.2017  
Принята в печать 23.11.2017

Received 07.10.2017  
Accepted for publication 23.11.2017