

УДК 629.7.083

ДИНАМИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕОБСЛУЖИВАЕМОЙ В МЕЖРЕГЛАМЕНТНЫЙ ПЕРИОД БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А.М. БРОННИКОВ¹, Д.В. МОРОЗОВ²

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

Рассматривается задача моделирования процесса изменения технического состояния необслуживаемой в межрегламентный период бортовой системы летательного аппарата, полный отказ которой в полете приводит к катастрофической ситуации. Необслуживаемым называется бортовое оборудование с возможностью автоматического самовосстановления в период между регламентными работами при возникновении отказов компонентов. Бортовое оборудование при эксплуатации накапливает отказы с сохранением своих функций с уровнем надежности не ниже заданного. Устранение отказов осуществляется либо по окончании межрегламентного периода (как правило), либо после возникновения такого отказа, которое привело к нарушению решаемых функций или снижению ниже заданного уровня безопасности полетов (как исключение). Система содержит как резервированные, так и нерезервированные блоки и элементы с известными интенсивностями отказов. Система может находиться в одном из трех состояний: работоспособное, предельное и состояние отказа. За счет избыточности резервированных элементов система в течение межрегламентного периода накапливает отказы, которые устраняются при проведении регламентных работ. Процесс изменения технического состояния системы описывается дискретно-непрерывной моделью в полетном времени. На основе информации о вероятностях нахождения бортового оборудования в работоспособном, предельном состоянии и состоянии отказа можно вычислить такие комплексные показатели эффективности, как средние потери в самолетовылетах, средние затраты на эксплуатацию, математическое ожидание числа аварийных восстановительных работ и др. Были проведены численные исследования для проверки корректности предложенной модели. Считается, что регламентные работы полностью обновляют систему. Анализ данных показателей позволит оценить эффективность эксплуатации необслуживаемого бортового оборудования, а также провести сопоставление по эффективности с другими методами эксплуатации. Модель может использоваться для оценки показателей эффективности рассматриваемой системы технической эксплуатации. Также модель может быть использована для оптимизации межрегламентного периода.

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

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений, позволяющих существенно снизить затраты на техническое обслуживание летательных аппаратов (ЛА), является концепция необслуживаемого бортового оборудования [1, 2]. Необслуживаемым называется бортовое оборудование с возможностью автоматического самовосстановления в период между регламентными работами при возникновении отказов компонентов [1]. Бортовое оборудование при эксплуатации накапливает отказы с сохранением своих функций с уровнем надежности не ниже заданного. Устранение отказов осуществляется либо по окончании межрегламентного периода (как правило), либо после возникновения такого отказа, которое привело к нарушению решаемых функций или снижению ниже заданного уровня безопасности полетов (как исключение) [1].

В статье предлагается модель процесса изменения технического состояния необслуживаемой в межрегламентный период бортовой системы (БС) ЛА, полный отказ которой в полете приводит к катастрофической ситуации. За счет избыточности резервированных элементов БС в течение межрегламентного периода накапливает отказы, которые устраняются при проведении регламентных работ. Если количество отказов какого либо резерва приближается к критическому значению, при котором возникает полный отказ БС, то восстановление системы (устранение всех отказов) осуществляется в межрегламентный период. Считается, что регламентные работы полностью обновляют систему. Процесс изменения технического состояния БС описывается дискретно-непрерывной моде-

лю в полетном времени. При разработке модели использован подход профессора Л.П. Колодежного к моделированию процессов технического обслуживания и ремонта бортового оборудования [3]. Данный подход применительно к стратегии технического обслуживания до отказа демонстрируется в работах [4, 5]. Исследования базируются также на результатах, полученных в [6, 7, 8].

Результаты работы могут использоваться для оценки показателей эффективности необслуживаемого в межрегламентный период бортового оборудования, а также для рационального назначения его программы технического обслуживания и ремонта.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (14-08-01173а).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть БС состоит из n разнотипных блоков (устройств, элементов). Из них n_p блоков являются резервированными, а n_{np} блоков – нерезервированными ($n = n_p + n_{np}$). Резервированный блок q ($q = 1 \dots n_p$) содержит k_q резервов.

В состоянии отказа БС переходит при отказе хотя бы одного нерезервированного блока, а также 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. 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 $k_{крq} = k_{прq} + 1$.

Примем допущение, что для необслуживаемой в межрегламентный период БС возможна летная эксплуатация с накоплением отказов до момента возникновения предельного количества отказов $k_{прq}$ хотя бы для одного резервированного блока. Даже если не закончился межрегламентный период, но для одного из резервированных блоков отказало $k_{прq}$ резервов, то летная эксплуатация необслуживаемой БС приостанавливается, выполняются аварийно-восстановительные работы (АВР), при которых устраняются все накопившиеся отказы.

В связи с этим при составлении модели было принято, что БС может находиться в одном из трех состояний:

- S_0 – работоспособное состояние, в котором исправны все нерезервированные элементы, а в каждой группе резервированных элементов исправны не менее $k_{прi} + 1$ резервов;
- S_1 – предельное состояние, в котором исправны все нерезервированные элементы, а хотя бы один из резервированных блоков содержит предельное количество отказов $k_{прi}$;
- S_2 – состояние отказа БС.

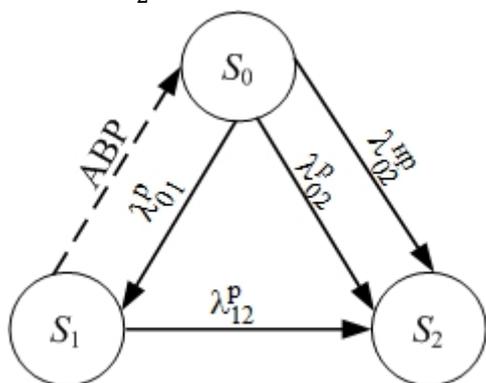


Рис. 1. Граф состояний БС
Fig. 1. Graf of technical states of onboard system

В состоянии S_0 продолжается летная эксплуатация БС без ограничений. Если БС переходит в состояние S_1 , то летная эксплуатация ЛА должна быть приостановлена и проведены АВР, при которых устраняются все возникшие отказы. Нахождение системы в состоянии S_1 приводит к срыву выполнения полетного задания. Состояние S_2 соответствует отказу БС. Наступление данного состояния в полете приводит к катастрофической ситуации. Поэтому считается, что из состояния S_2 система не восстанавливается ни в какие другие состояния (рис. 1).

На рис. 1 приведен граф состояний БС. Переход системы из состояния S_0 в состояние S_1 может быть связан только с отказами резервированных элементов. В состояние

S_2 может осуществляться переход как из состояния S_0 (λ_{02}^p – интенсивность переходов для резервированной подсистемы, λ_{02}^{HP} – интенсивность переходов для нерезервированной подсистемы), так и из состояния S_1 (λ_{12}^p – интенсивность переходов для резервированной подсистемы).

Рассматривается конечный интервал эксплуатации T . Среднее время полета составляет T_{Π} . В течение интервала эксплуатации совершается m полетов ($m = T/T_{\Pi}$). С периодичностью τ_{pp} на БС проводятся регламентные работы. Считается, что регламентные работы полностью обновляют БС. Это соответствует в полетном времени скачкообразному переходу всех интенсивностей отказов в значение, соответствующее нулевому времени $\lambda(0)$, а также устранению всех отказов. Система имеет встроенные средства автоматического контроля, которые с вероятностью $1 - \beta$ распознают состояние S_1 (β – вероятность необнаружения (пропуска) состояния S_1).

Задача: разработать математическую модель для расчета вероятностей $P_i(S_0)$, $P_i(S_1)$, $P_i(S_2)$ ($i = 1, \dots, m$) нахождения БС в состояниях S_0 , S_1 , S_2 соответственно в каждом из m полетов.

РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТЕЙ СОСТОЯНИЙ

Для вычисления интенсивностей переходов q -го резервированного блока из состояния S_0 в состояние S_1 будем использовать следующую приближенную формулу на основе численного дифференцирования:

$$\lambda_{01q}^p \approx \frac{Q_{01q}(t + \Delta t) - Q_{01q}(t)}{(1 - Q_{01q}(t))\Delta t}. \quad (1)$$

В формуле (1) Δt – приращение времени; $Q_{01q}(t)$ – вероятность перехода q -го резервированного блока из состояния S_0 в состояние S_1 , которая вычисляется по формуле

$$Q_{01q}(t) = C_{k_q}^{k_{npq}} (1 - e^{-\lambda_q t})^{k_{npq}} (e^{-\lambda_q t})^{k_q - k_{npq}},$$

где $C_{k_q}^{k_{npq}}$ – число сочетаний k_{npq} из k_q ; λ_q – интенсивность отказов одного устройства (элемента) резервированного блока.

По аналогии определяются остальные интенсивности перехода резервированных блоков, обозначенных на рис. 1. Интенсивности переходов из состояния в состояние резервированной и нерезервированной подсистем в целом находятся как суммы интенсивностей переходов блоков.

Для нерезервированной подсистемы дискретно-непрерывная модель имеет вид

$$P_i^{HP}(S_0) = P_{i-1}^{HP}(S_0)(1 - a_{02i}^{HP}), \quad P_0^{HP}(S_0) = 1, \quad (2)$$

$$P_i^{HP}(S_2) = P_{i-1}^{HP}(S_2) + P_{i-1}^{HP}(S_0)a_{02i}^{HP}, \quad P_0^{HP}(S_2) = 0, \quad (3)$$

где $i = 1, \dots, m$; a_{02i}^{HP} – вероятность перехода нерезервированной подсистемы с наработкой iT_{Π} из состояния S_0 в состояние S_2 в i -м полете:

$$a_{02i}^{HP} = 1 - \exp\left(-\int_{(i-1)T_{\Pi}}^{iT_{\Pi}} \lambda_{02}^{HP}(u) du\right). \quad (4)$$

Для резервированной подсистемы для сокращения записи введем в модель дополнительную переменную $P_{\text{HВ}i}^p(S_0)$ – вероятность нахождения в i -м полете в состоянии S_0 невозстанавливаемой резервированной подсистемы. Она рассчитывается по следующей рекуррентной формуле:

$$P_{\text{HВ}i}^p(S_0) = P_{\text{HВ}i-1}^p(S_0)(1 - a_{01i}^p)(1 - a_{02i}^p), \quad P_{\text{HВ}0}^p(S_0) = 0, \quad (5)$$

где a_{01i}^p и a_{02i}^p – вероятности перехода резервированной подсистемы с наработкой $iT_{\text{п}}$ из состояния S_0 в состояния S_1 и S_2 в i -м полете:

$$a_{01i}^p = 1 - \exp\left(-\int_{(i-1)T_{\text{п}}}^{iT_{\text{п}}} \lambda_{01}^p(u) du\right), \quad a_{02i}^p = 1 - \exp\left(-\int_{(i-1)T_{\text{п}}}^{iT_{\text{п}}} \lambda_{02}^p(u) du\right). \quad (6)$$

Вероятности нахождения системы в i -м полете в состояниях S_0 , S_1 и S_2 определяются следующими рекуррентными уравнениями:

$$P_i^p(S_0) = P_{\text{HВ}i}^p(S_0) + \sum_{k=1}^{i-1} (1 - \beta) P_k^p(S_1) (1 + P_k^p(S_2)) P_{\text{HВ}i-k}^p(S_0), \quad (7)$$

$$P_i^p(S_1) = (\beta P_{i-1}^p(S_1) + P_{\text{HВ}i-k}^p(S_0) a_{01i}^p + \sum_{k=1}^{i-1} (1 - \beta) P_k^p(S_1) (1 + P_k^p(S_2)) \times \\ \times P_{\text{HВ}i-k-1}^p(S_0) (1 - a_{02i-k}^p) a_{01i-k}^p) (1 - a_{12i}^p), \quad (8)$$

$$P_i^p(S_2) = P_{i-1}^p(S_2) (1 - (1 - \beta) P_{i-1}^p(S_1)) + P_{\text{HВ}i-k}^p(S_0) a_{02i}^p + P_i^p(S_1) a_{12i}^p + \\ + \sum_{k=1}^{i-1} (1 - \beta) P_k^p(S_1) (1 + P_k^p(S_2)) P_{\text{HВ}i-k-1}^p(S_0) (1 - a_{01i-k}^p) a_{02i-k}^p \quad (9)$$

Здесь

$$a_{12i}^p = 1 - \exp\left(-\int_{(i-1)T_{\text{п}}}^{iT_{\text{п}}} \lambda_{12}^p(u) du\right) \quad (10)$$

вероятность перехода резервированной подсистемы с наработкой $iT_{\text{п}}$ из состояния S_1 в состояние S_2 в i -м полете.

Остается найти значения вероятностей состояний для БС в целом на основе значений вероятностей состояний нерезервированных и резервированных подсистем. Вероятности состояний для БСУ в целом вычисляются по следующим формулам:

$$P_i(S_0) = P_i^p(S_0) P_i^{\text{HP}}(S_0), \quad (11)$$

$$P_i(S_1) = P_i^p(S_1) P_i^{\text{HP}}(S_0), \quad (12)$$

$$P_i(S_2) = P_i^p(S_2) + P_i^{hp}(S_2) - P_i^p(S_2)P_i^{hp}(S_2). \quad (13)$$

Проведение регламентных работ влияет на моделирование следующим образом. Регламентные работы, полностью обновляющие БС, проводятся с периодичностью τ_{pp} или через k_{pp} полетов ($k_{pp} = \tau_{pp}/T_n$). Тогда формулы (2)–(13) имеет смысл рассчитать только для k_{pp} полетов. Остальные $m - k_{pp}$ полетов вероятности состояний будут повторять ряды $P_i(S_0)$, $P_i(S_1)$, $P_i(S_2)$, $i = 1, \dots, k_{pp}$.

Были проведены численные исследования для проверки корректности предложенной модели (2)–(13). Сумма вероятностей состояний в каждый момент времени (для рассматриваемого случая дискретно-непрерывной модели – в каждом полете) должна строго равняться единице. Данное условие для модели (2)–(13) выполняется с точностью до вычислительных погрешностей. Также было проведено сопоставление решений разработанной модели и уравнений Колмогорова. Уравнения Колмогорова позволяют получить в непрерывном времени изменение технического состояния БС в течение межрегламентного периода при отсутствии АВР. Для сопоставления решений уравнений Колмогорова и разработанной модели зададимся в уравнениях (7)–(9) значением вероятности пропуска предельного состояния $\beta = 1$. В этом случае модель (2)–(13) не учитывает проведение АВР. Ее решение с точностью до вычислительных погрешностей совпадает с решением уравнений Колмогорова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модель (1)–(13) позволяет определять вероятности нахождения системы $P_i(S_0)$, $P_i(S_1)$, $P_i(S_2)$ ($i = 1, \dots, m$) в трех введенных состояниях (работоспособное, предельное, состояние отказа) в каждом из полетов на рассматриваемом интервале эксплуатации (m полетов). Корректность модели подтверждается численными исследованиями. На основе информации о вероятностях нахождения БС в работоспособном, предельном состоянии и состоянии отказа можно вычислить такие комплексные показатели эффективности, как средние потери в самолетовылетах [4, 5], средние затраты на эксплуатацию, математическое ожидание числа АВР и др. Анализ данных показателей позволит оценить эффективность эксплуатации необслуживаемого бортового оборудования, а также провести сопоставление по эффективности с другими методами эксплуатации БС ЛА. Также модель (1)–(13) может быть использована для оптимизации межрегламентного периода τ_{pp} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bukov V., Kutahov V., Bekkiev A. Avionics of Zero Maintenance Equipment. 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (Nice, France, ICAS 2010). CD-ROM Proceedings. 2010. Pp. 7–11.
2. 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.
3. Колодежный Л.П., Чернодаров А.В. Надежность и техническая диагностика: учебник для вузов ВВС. М.: ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2011. 452 с.
4. 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.

5. **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.

6. **Бронников А.М., Морозов Д.В.** Локализация непосредственно не наблюдаемых отказов бортовых систем на основе смешанных направленных графов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 1. С. 62–66.

7. **Кузнецов С.В.** Математические модели процессов и систем технической эксплуатации бортовых комплексов и функциональных систем авионики // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Том 20, № 01. С. 38–47.

8. Контроль и информационная надежность резервированных инерциальных навигационных систем / А.В. Чернодаров, А.П. Патрикеев, О.О. Казьмин, О.С. Халютин // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2016. № 2. С. 85–88.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бронников Андрей Михайлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры МГТУ им. Н.Э. Баумана, bronnikov_a_m@mail.ru.

Морозов Дмитрий Владимирович, преподаватель кафедры ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», stik-self@yandex.ru.

PROCESS OF CHANGES OF MAINTENANCE-FREE ONBOARD SYSTEM OPERATIONAL STATUS BETWEEN SCHEDULED MAINTENANCES

Andrey M. Bronnikov¹, Dmitry V. Morozov²

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

²*Air force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and
Y.A. Gagarin, Voronezh, Russia*

ABSTRACT

In this article the authors consider the problem of simulating the process of a maintenance-free between scheduled maintenance aircraft system operational status changes, which failure during the flight leads to the disaster. On-board equipment with automatic self-repair between routine maintenance in the event the components fail is called maintenance-free. During operation, onboard equipment accumulates failures maintaining its functions with a safety level not lower than the required minimum. Trouble shooting is carried out either at the end of between-maintenance period (as a rule), or after the failure, which led to the functions disorder or to the decrease below the target level of flight safety (as an exception). The system contains both redundant and nonredundant units and elements with the known failure rates. The system can be in one of the three states: operable, extreme, failed. The excessive redundant elements allow the system to accumulate failures which are repaired during the routine maintenance. The process of system operational status changes is described with the discrete-continuous model in the flight time. Basing on the information about the probabilities of the on-board equipment being in an operable, extreme or failed state, it is possible to calculate such complex efficiency indicators as the average loss of sorties, the average operating costs, the expected number of emergency recovery operations and others. Numerical studies have been conducted to validate the proposed model. It is believed that maintenance work completely updates the system. The analysis of these indicators will allow to evaluate the maintenance-free aircraft equipment operation efficiency, as well as to make an effectiveness comparison with other methods of technical operation. The model can be also used to assess the technical operation systems performance. The model can be used to optimize the period between maintenance.

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. 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (Nice, France, ICAS 2010). CD-ROM Proceedings. 2010. Pp. 7–11.
2. Chuyanov G.A., Kosyanchuk V.V., Selvesyuk N.I. *Perspektivy razvitiya kompleksov bortovogo oborudovaniya na baze integrirovannoy modul'noy avioniki* [Prospects of development of complex onboard equipment on the basis of integrated modular avionics]. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskkiye nauki* [Proceedings of SFedU. Engineering Sciences], 2013, no. 3 (140), pp. 55–62. (in Russian)
3. Kolodezny L.P., Chernodarov A.V. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika* [Reliability and technical diagnostics]. *VUNTS VVS «VVA im. professora N.Ye. Zhukovskogo i YU.A. Gagarina»* [Air force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin], 2011, 452 p. (in Russian)
4. Bronnikov A.M., Kahovec S.N., Morozov D.V. *Optimizatsiya periodichnosti uglublennogo nazemnogo kontrolya aviatsionnykh kompleksov po kriteriyu minimuma poter' v samoletovyletakh* [Optimization of the periodicity of ground monitoring of airborne integrated systems by using the test for minimum losses in aircraft flights]. *Nauchnyj Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of the MSTUCA], 2012, no. 185, pp. 13–18. (in Russian)
5. Bronnikov A.M., Kahovec S.N. *Optimizatsiya periodichnosti nazemnogo kontrolya aviatsionnykh navigatsionnykh kompleksov po kriteriyu minimuma poter' v samoletovyletakh* [Optimization of the Periodicity of Ground Monitoring of Airborne Integrated Navigation Systems by Using the Test for Minimum Losses in Aircraft Flights]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2013, no. 1, pp. 39–46. (in Russian)
6. Bronnikov A.M., Morozov D.V. *Lokalizatsiya neposredstvenno ne nablyudayemykh otkazov bortovykh sistem na osnove smeshannykh napravlennykh grafov* [Troubleshooting of Directly not Observable Refusals of Airborne Systems Based on Mixed Directed Graph]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, Automation, Control], 2013, no. 1, pp. 62–66. (in Russian)
7. Kuznetsov S.V. *Matematicheskiye modeli protsessov i sistem tekhnicheskoy ekspluatatsii bortovykh kompleksov i funktsional'nykh sistem avioniki* [Mathematical models of processes and systems of technical operation for onboard complexes and functional systems of avionics]. *Nauchnyj Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of the MSTUCA], 2017, vol. 20, no. 01, pp. 38–47. (in Russian)
8. Chernodarov A.V., Patrikeyev A.P., Kaz'min O.O., Khalyutina O.S. *Kontrol' i informatsionnaya nadezhnost' rezervirovannykh inertsiyal'nykh navigatsionnykh sistem* [Control and information reliability of redundant inertial navigation systems]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»* [Proceedings of the international symposium "Reliability and quality"], 2016, no. 2, pp. 85–88. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bronnikov Andrey Mikhaylovich, Doctor of Science, Full Professor of Bauman Moscow State Technical University, bronnikov_a_m@mail.ru.

Morozov Dmitriy Vladimirovich, Lecturer of Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, stik-self@yandex.ru.