

УДК 629.735

DOI 10.51955/2312-1327_2022_4_70

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ БЛОКОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

*Сергей Викторович Кузнецов,
orcid.org/0000-0001-8629-7500,
доктор технических наук, профессор
Московский государственный технический
университет гражданской авиации,
Кронштадтский бульвар, д. 20
Москва, 125993, Россия
s.kuznetsov@mstuca.aero*

Аннотация. Система эксплуатационного контроля (СЭК) бортового оборудования (БО) воздушных судов (ВС) гражданской авиации (ГА) обеспечивает управление процессами технической эксплуатации. Ее качество проявляется в процессе эксплуатационного контроля. Эксплуатационный контроль – это совокупность процессов определения технического состояния (ТС) объектов контроля (ОК) на различных этапах эксплуатации: в полете, при оперативном техническом обслуживании (предполетный и послеполетный контроль), при периодическом техническом обслуживании, после демонтажа оборудования с борта. Анализ проблемы формирования и совершенствования СЭК БО показывает ее сложность, требующую применения системного подхода на основе соответствующего математического аппарата. Процесс эксплуатационного контроля характеризуется достоверностью контроля – свойством контроля технического состояния ОК, определяющим степень объективности отображения в результате контроля действительного вида технического состояния ОК. Количественными параметрами и показателями эффективности СЭК БО служат характеристики достоверности контроля (ХДК). Для их определения сформированы рациональные множества технических состояний и решений о технических состояниях блоков БО. На основании принадлежности к этим множествам определены три группы характеристик достоверности контроля. Первую группу составляют условные вероятности переходов процесса эксплуатационного контроля при различных видах контроля. Вторую группу составляют безусловные вероятности переходов процесса эксплуатационного контроля при различных видах контроля. Третью группу составляют апостериорные вероятности принятия решений в процессе эксплуатационного контроля при различных видах контроля. Определены аналитические зависимости для вычисления ХДК трех групп для блоков БО и взаимоотношения между ними.

Ключевые слова: система эксплуатационного контроля, процесс технической эксплуатации, техническое состояние, достоверность контроля, бортовое оборудование.

SELECTION AND SUBSTANTIATION OF PARAMETERS AND PERFORMANCE INDICATORS OF THE IN- SERVICE INSPECTION SYSTEM OF ONBOARD AIRCRAFT EQUIPMENT UNITS

*Sergey V. Kuznetsov,
orcid.org/0000-0001-8629-7500,
Doctor of Technical Sciences, Professor
Moscow State Technical University of Civil Aviation,
20 Kronshtadtsky blvd,
Moscow, 125993, Russia,
s.kuznetsov@mstuca.aero*

Abstract. The in-service inspection (ISI) system of onboard equipment of civil aircraft provides management of technical operation processes. Its quality is manifested in the process of in-service inspection. The ISI involves determining the technical state of monitor objects at various stages of operation: in flight, during operational maintenance (pre-flight and post-flight check), during periodic maintenance, after removing the equipment from the aircraft. The analysis of the problem of forming and improving the ISI system for onboard equipment shows its complexity requiring a systematic approach based on the appropriate mathematical apparatus. The ISI is characterized by the inspection accuracy, i.e. a property of technical state inspection which determines the degree of display objectivity as a result of monitoring the actual technical state of a monitor object. As quantitative parameters and performance indicators of the ISI system for onboard equipment, the characteristics of the inspection accuracy serve. To determine them, rational sets of technical states and decisions about the technical states of onboard units were formed. Based on belonging to these sets, three groups of the inspection accuracy characteristics were identified. The first group consists of conditional probabilities of transitions in the in-service inspection for various types of control. The second group consists of unconditional probabilities of transitions in the in-service inspection for various types of control. The third group consists of a posteriori decision-making probabilities in the process of in-service inspection for various types of control. Analytical dependencies for calculating the inspection accuracy characteristics of the three groups for onboard units and the relationship between them were determined.

Key words: in-service inspection system, technical operation process, technical state, inspection accuracy, onboard equipment.

Анализ СЭК БО должен проводиться на основе математического аппарата, позволяющего количественно и качественно описать эффективность системы, которая проявляется в достоверности эксплуатационного контроля. Этот аппарат базируется на стохастических процессах, как правило, марковских и полумарковских. Научные основы формирования СЭК БО сформулированы в работах [Кузнецов, 2021а; Кузнецов, 2021б]. Исследования в области достоверности контроля и эффективности различных средств контроля представлены в [Богоявленский, 2021; Левин, 2018; Мальцев и др., 2018; Меженев, 2018; Мусорин и др., 2020; Сартаков, 2020; Сухоруков и др., 2019; Хайруллин, 2022]. Стохастические методы на основе марковских и полумарковских процессов разработаны у [Мищенко и др., 2021; Чинючин и др., 2020; Karnov et al., 2017]. Основные принципы и перспективы современного БО на основе интегральной модульной авионики, для которой особенно актуально это исследование, определены у [Кулабухов, 2015; Федосов и др., 2015].

Цель: Повышение эффективности системы эксплуатационного контроля блоков бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации на основе мониторинга показателей эффективности и управления ее параметрами

Задачи: для выбора и обоснования параметров и показателей эффективности системы эксплуатационного контроля блоков бортового оборудования воздушных судов следует:

- 1) сформировать рациональные множества ТС и решений о ТС ОК - БО;
- 2) определить ХДК эксплуатационного контроля блоков БО;
- 3) вывести аналитические зависимости между ХДК блоков;
- 4) осуществить математическое моделирование на примере одного из блоков, подтверждающее работоспособность и адекватность моделей.

Формирование рациональных множеств технических состояний и решений о технических состояниях объектов контроля

Любой контроль предусматривает существование правила, связывающего с наблюдаемыми данными конкретное решение о принадлежности текущего ТС ОК определенному множеству состояний, поэтому описание процедур контроля должно сопровождаться описанием соответствующих множеств ТС и решений о ТС ОК. Решения о ТС ОК на борту принимают встроенные средства контроля (ВСК). Решения о ТС ОК в наземных условиях лаборатории принимают наземные автоматизированные средства контроля (НАСК). Рассмотрим последовательно эти множества для блоков БО.

В общем случае ТС j -го блока может быть описано множеством $S(j)$, состоящим из двух элементов:

$$S(j) = \{S^+(j); S^-(j)\}, \quad (1)$$

где $S^+(j)$ – исправное ТС j -го блока; $S^-(j)$ – множество неисправных ТС j -го блока.

Решение о ТС j -го блока принадлежит множеству решений $Z(j)$, также состоящему из двух элементов:

$$Z(j) = \{Z^+(j); Z^-(j)\}, \quad (2)$$

где $Z^+(j)$ – решение об исправности j -го блока; $Z^-(j)$ – множество решений о неисправностях j -го блока.

События, связанные с принадлежностью текущего ТС блока $s(j)$ одному из элементов множества $S(j)$, а также принадлежностью текущего решения о ТС блока $z(j)$ одному из элементов множества $Z(j)$, являются попарно совместными. Такие события в зависимости от последовательности их появления можно объединить в три группы.

Первая группа объединяет условные события, когда решение о ТС блока является следующим:

$$\{ z(j) \in Z^+(j)/s(j) \in S^+(j) \}; \{ z(j) \in Z^-(j)/s(j) \in S^+(j) \}; \\ \{ z(j) \in Z^+(j)/s(j) \in S^-(j) \}; \{ z(j) \in Z^-(j)/s(j) \in S^-(j) \}. \quad (3)$$

Вторая группа объединяет попарно совместные события:

$$\{ z(j) \in Z^+(j); s(j) \in S^+(j) \}; \{ z(j) \in Z^-(j); s(j) \in S^+(j) \}; \\ \{ z(j) \in Z^+(j); s(j) \in S^-(j) \}; \{ z(j) \in Z^-(j); s(j) \in S^-(j) \}. \quad (4)$$

Третья группа объединяет условные события, когда решение о ТС является предшествующим:

$$\begin{aligned} & \{ s(j) \in S^+(j)/z(j) \in Z^+(j) \}; \{ s(j) \in S^-(j)/z(j) \in Z^-(j) \}; \\ & \{ s(j) \in S^+(j)/z(j) \in Z^-(j) \}; \{ s(j) \in S^-(j)/z(j) \in Z^+(j) \}. \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда достоверность контроля блока количественно можно определить вероятностями появления событий (3) - (5). Такие вероятности будем называть характеристиками достоверности контроля блоков.

В зависимости от вида эксплуатационного контроля будем различать характеристики достоверности контроля (ХДК) блоков:

- в полете [когда ТС j -го блока на момент окончания полета $s_{\pi}(j)$, а решение системы контроля о ТС этого блока $z_{\pi}(j)$];
- при послеполетном контроле [когда ТС j -го блока на момент окончания послеполетного контроля $s_{\pi\pi}(j)$, а решение системы контроля о ТС этого блока $z_{\pi\pi}(j)$];
- при предполетном контроле [когда ТС j -го блока на момент окончания предполетного контроля $s_{\pi\pi\pi}(j)$, а решение системы контроля о ТС этого блока $z_{\pi\pi\pi}(j)$];
- демонтированных при контроле в лаборатории [когда ТС j -го блока на момент окончания контроля в лаборатории $s_d(j)$, а решение системы контроля о ТС этого блока $z_d(j)$].

Характеристики достоверности эксплуатационного контроля блоков бортового оборудования

Первая группа характеристик. Первую группу характеристик достоверности контроля БО составляют условные вероятности переходов процесса эксплуатационного контроля при контроле в полете:

$\alpha_{\pi}(j) = P\{z_{\pi}(j) \in Z^-(j)/s_{\pi}(j) \in S^+(j)\}$ – вероятность принятия решения в полете $z_{\pi}(j)$ о нахождении блока j -й номенклатуры в неисправном состоянии при условии, что действительное техническое состояние блока в полете $s_{\pi}(j)$ является исправным (вероятность ошибки контроля блока в полете 1-го рода);

$\beta_{\pi}(j) = P\{z_{\pi}(j) \in Z^+(j)/s_{\pi}(j) \in S^-(j)\}$ – вероятность принятия решения в полете $z_{\pi}(j)$ о нахождении блока j -й номенклатуры в исправном состоянии при условии, что действительное техническое состояние блока в полете $s_{\pi}(j)$ является неисправным (вероятность ошибки контроля блока в полете 2-го рода);

$1 - \alpha_{\pi}(j) = P\{z_{\pi}(j) \in Z^+(j)/s_{\pi}(j) \in S^+(j)\}$ – вероятность принятия решения в полете $z_{\pi}(j)$ о нахождении блока j -й номенклатуры в исправном состоянии при условии, что действительное техническое состояние блока в полете $s_{\pi}(j)$ является исправным (вероятность отсутствия ошибки контроля блока в полете 1-го рода);

$1 - \beta_{\pi}(j) = P\{z_{\pi}(j) \in Z^-(j)/s_{\pi}(j) \in S^-(j)\}$ – вероятность принятия решения в полете $z_{\pi}(j)$ о нахождении блока j -й номенклатуры в неисправном состоянии при условии, что действительное техническое состояние блока в полете $s_{\pi}(j)$ является неисправным (вероятность отсутствия ошибки контроля блока в полете 2-го рода).

Аналогично получим характеристики достоверности эксплуатационного контроля первой группы при послеполетном контроле блока БО:

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{псп}}(j) &= P\{z_{\text{псп}}(j) \in Z^-(j)/s_{\text{псп}}(j) \in S^+(j)\}; \\ \beta_{\text{псп}}(j) &= P\{z_{\text{псп}}(j) \in Z^+(j)/s_{\text{псп}}(j) \in S^-(j)\};\end{aligned}\tag{6}$$

$$\begin{aligned}1 - \alpha_{\text{псп}}(j) &= P\{z_{\text{псп}}(j) \in Z^+(j)/s_{\text{псп}}(j) \in S^+(j)\}; \\ 1 - \beta_{\text{псп}}(j) &= P\{z_{\text{псп}}(j) \in Z^-(j)/s_{\text{псп}}(j) \in S^-(j)\};\end{aligned}$$

при предполетном контроле блока БО:

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{прп}}(j) &= P\{z_{\text{прп}}(j) \in Z^-(j)/s_{\text{прп}}(j) \in S^+(j)\}; \\ \beta_{\text{прп}}(j) &= P\{z_{\text{прп}}(j) \in Z^+(j)/s_{\text{прп}}(j) \in S^-(j)\};\end{aligned}\tag{7}$$

$$\begin{aligned}1 - \alpha_{\text{прп}}(j) &= P\{z_{\text{прп}}(j) \in Z^+(j)/s_{\text{прп}}(j) \in S^+(j)\}; \\ 1 - \beta_{\text{прп}}(j) &= P\{z_{\text{прп}}(j) \in Z^-(j)/s_{\text{прп}}(j) \in S^-(j)\};\end{aligned}$$

при контроле демонтированного блока БО:

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{д}}(j) &= P\{z_{\text{д}}(j) \in Z^-(j)/s_{\text{д}}(j) \in S^+(j)\}; \\ \beta_{\text{д}}(j) &= P\{z_{\text{д}}(j) \in Z^+(j)/s_{\text{д}}(j) \in S^-(j)\};\end{aligned}\tag{8}$$

$$\begin{aligned}1 - \alpha_{\text{прп}}(j) &= P\{z_{\text{прп}}(j) \in Z^+(j)/s_{\text{прп}}(j) \in S^+(j)\}; \\ 1 - \beta_{\text{прп}}(j) &= P\{z_{\text{прп}}(j) \in Z^-(j)/s_{\text{прп}}(j) \in S^-(j)\}.\end{aligned}$$

Вторая группа характеристик. Вторую группу характеристик достоверности эксплуатационного контроля блоков составляют безусловные вероятности нахождения процесса в состояниях контроля. При контроле блока в полете:

$P_{\text{ло}}^{\text{п}}(j) = P\{s_{\text{п}}(j) \in S^+(j), z_{\text{п}}(j) \in Z^-(j)\}$ – вероятность сохранения блоком j -й номенклатуры на момент окончания полета исправного технического состояния $s_{\text{п}}(j)$ совместно с принятием во время контроля в полете решения $z_{\text{п}}(j)$ о нахождении блока в неисправном состоянии (вероятность ложного отказа блока в полете);

$P_{\text{но}}^{\text{п}}(j) = P\{s_{\text{п}}(j) \in S^-(j), z_{\text{п}}(j) \in Z^+(j)\}$ – вероятность нахождения блока j -й номенклатуры на момент окончания полета в неисправном ТС $s_{\text{п}}(j)$ совместно с принятием решения во время контроля в полете $z_{\text{п}}(j)$ о нахождении блока в исправном состоянии (вероятность необнаруженного отказа блока в полете);

$P_{\text{ра}}^{\text{п}}(j) = P\{s_{\text{п}}(j) \in S^+(j), z_{\text{п}}(j) \in Z^+(j)\}$ – вероятность нахождения блока j -й номенклатуры на момент окончания полета в исправном ТС $s_{\text{п}}(j)$ совместно с принятием решения во время контроля в полете $z_{\text{п}}(j)$ о нахождении блока в исправном состоянии (вероятность контролируемой работоспособности блока в полете);

$P_{\text{ко}}^{\text{п}}(j) = P\{s_{\text{п}}(j) \in S^-(j), z_{\text{п}}(j) \in Z^-(j)\}$ – вероятность нахождения блока j -й номенклатуры на момент окончания полета в неисправном ТС $s_{\text{п}}(j)$ совместно с принятием решения во время контроля в полете $z_{\text{п}}(j)$ о нахождении блока в

неисправном состоянии (вероятность контролируемого отказа блока в полете).

Аналогично определим характеристики достоверности эксплуатационного контроля второй группы при послеполетном контроле блока БО:

$$\begin{aligned} P_{\text{ло}}^{\text{псп}}(j) &= P\{s_{\text{псп}}(j) \in S^+(j), z_{\text{псп}}(j) \in Z^-(j)\}; \\ P_{\text{но}}^{\text{псп}}(j) &= P\{s_{\text{псп}}(j) \in S^-(j), z_{\text{псп}}(j) \in Z^+(j)\}; \\ P_{\text{ра}}^{\text{псп}}(j) &= P\{s_{\text{псп}}(j) \in S^+(j), z_{\text{псп}}(j) \in Z^+(j)\}; \\ P_{\text{ко}}^{\text{псп}}(j) &= P\{s_{\text{псп}}(j) \in S^-(j), z_{\text{псп}}(j) \in Z^-(j)\}; \end{aligned} \quad (9)$$

при предполетном контроле блока БО:

$$\begin{aligned} P_{\text{ло}}^{\text{прп}}(j) &= P\{s_{\text{псп}}(j) \in S^+(j), z_{\text{псп}}(j) \in Z^-(j)\}; \\ P_{\text{но}}^{\text{прп}}(j) &= P\{s_{\text{псп}}(j) \in S^-(j), z_{\text{псп}}(j) \in Z^+(j)\}; \\ P_{\text{ра}}^{\text{прп}}(j) &= P\{s_{\text{псп}}(j) \in S^+(j), z_{\text{псп}}(j) \in Z^+(j)\}; \\ P_{\text{ко}}^{\text{прп}}(j) &= P\{s_{\text{псп}}(j) \in S^-(j), z_{\text{псп}}(j) \in Z^-(j)\}; \end{aligned} \quad (10)$$

при контроле демонтированного блока БО:

$$\begin{aligned} P_{\text{ло}}^{\text{д}}(j) &= P\{s_{\text{псп}}(j) \in S^+(j), z_{\text{псп}}(j) \in Z^-(j)\}; \\ P_{\text{но}}^{\text{д}}(j) &= P\{s_{\text{псп}}(j) \in S^-(j), z_{\text{псп}}(j) \in Z^+(j)\}; \\ P_{\text{ра}}^{\text{д}}(j) &= P\{s_{\text{псп}}(j) \in S^+(j), z_{\text{псп}}(j) \in Z^+(j)\}; \\ P_{\text{ко}}^{\text{д}}(j) &= P\{s_{\text{псп}}(j) \in S^-(j), z_{\text{псп}}(j) \in Z^-(j)\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Третья группа характеристик. Третью группу характеристик достоверности эксплуатационного контроля блоков БО составляют апостериорные вероятности нахождения процесса в состояниях контроля. При контроле блока в полете это следующие вероятности:

$D_{\text{г/г}}^{\text{п}}(j) = P\{s_{\text{п}}(j) \in S^+(j), z_{\text{п}}(j) \in Z^+(j)\}$ – вероятность нахождения блока j -й номенклатуры в исправном ТС $s_{\text{п}}(j)$ после окончания полета при условии, что система контроля по окончании полета принимает решение $z_{\text{п}}(j)$ о нахождении блока в исправном состоянии (вероятность достоверного результата контроля блока в полете "годен");

$D_{\text{нг/нг}}^{\text{п}}(j) = P\{s_{\text{п}}(j) \in S^-(j), z_{\text{п}}(j) \in Z^-(j)\}$ – вероятность нахождения блока j -й номенклатуры в неисправном ТС $s_{\text{п}}(j)$ после окончания полета при условии, что система контроля по окончании полета принимает решение $z_{\text{п}}(j)$ о нахождении блока в неисправном состоянии (вероятность достоверного результата контроля блока в полете "не годен");

$D_{\text{нг/г}}^{\text{п}}(j) = P\{s_{\text{п}}(j) \in S^-(j), z_{\text{п}}(j) \in Z^+(j)\}$ – вероятность нахождения блока j -й номенклатуры в неисправном ТС $s_{\text{п}}(j)$ после окончания полета при условии, что система контроля после окончания полета принимает решение $z_{\text{п}}(j)$ о нахождении блока в исправном состоянии (вероятность недостоверного результата контроля в полете "годен");

$D_{г/нг}^п(j) = P\{s_п(j) \in S^+(j), z_п(j) \in Z^-(j)\}$ – вероятность нахождения блока j -й номенклатуры в исправном ТС $s_п(j)$ после окончания полета при условии, что система контроля после окончания полета принимает решение $z_п(j)$ о нахождении блока в неисправном ТС (вероятность недостоверного результата контроля в полете "не годен").

Аналогично определим характеристики достоверности эксплуатационного контроля третьей группы при послеполетном контроле блока БО:

$$\begin{aligned} D_{г/г}^{псп}(j) &= P\{s_{псп}(j) \in S^+(j), z_{псп}(j) \in Z^+(j)\}; \\ D_{нг/нг}^{псп}(j) &= P\{s_{псп}(j) \in S^-(j), z_{псп}(j) \in Z^-(j)\}; \\ D_{нг/г}^{псп}(j) &= P\{s_{псп}(j) \in S^-(j), z_{псп}(j) \in Z^+(j)\}; \\ D_{г/нг}^{псп}(j) &= P\{s_{псп}(j) \in S^+(j), z_{псп}(j) \in Z^-(j)\}; \end{aligned} \quad (12)$$

при предполетном контроле блока БО:

$$\begin{aligned} D_{г/г}^{прп}(j) &= P\{s_{псп}(j) \in S^+(j), z_{псп}(j) \in Z^+(j)\}; \\ D_{нг/нг}^{прп}(j) &= P\{s_{псп}(j) \in S^-(j), z_{псп}(j) \in Z^-(j)\}; \\ D_{нг/г}^{псп}(j) &= P\{s_{псп}(j) \in S^-(j), z_{псп}(j) \in Z^+(j)\}; \\ D_{г/нг}^{псп}(j) &= P\{s_{псп}(j) \in S^+(j), z_{псп}(j) \in Z^-(j)\}; \end{aligned} \quad (13)$$

при контроле демонтированного блока БО:

$$\begin{aligned} D_{г/г}^д(j) &= P\{s_{псп}(j) \in S^+(j), z_{псп}(j) \in Z^+(j)\}; \\ D_{нг/нг}^д(j) &= P\{s_{псп}(j) \in S^-(j), z_{псп}(j) \in Z^-(j)\}; \\ D_{нг/г}^д(j) &= P\{s_{псп}(j) \in S^-(j), z_{псп}(j) \in Z^+(j)\}; \\ D_{г/нг}^д(j) &= P\{s_{псп}(j) \in S^+(j), z_{псп}(j) \in Z^-(j)\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Характеристики безотказности блоков в процессе эксплуатационного контроля. Характеристики безотказности (ХБ) блоков в процессе эксплуатационного контроля представляют собой априорные вероятности безотказности и отказов блоков в промежутках между определенными видами контроля:

$p_п(j) = P\{s_п(j) \in S^+(j)\}$, $p_{псп}(j) = P\{s_{псп}(j) \in S^+(j)\}$, $p_{прп}(j) = P\{s_{прп}(j) \in S^+(j)\}$, $p_{псп}(j) = P\{s'_{прп}(j) \in S^+(j)\}$, $p_д(j) = P\{s_д(j) \in S^+(j)\}$ – соответственно вероятности безотказной работы блока j -й номенклатуры в полете за время между окончанием предполетного контроля и окончанием полета; при послеполетном контроле за время между окончанием полета и окончанием послеполетного контроля; при предполетном контроле за время между окончанием полета или послеполетного контроля и окончанием предполетного контроля; при предполетном контроле за время между

окончанием контроля демонтированного блока и окончанием предполетного контроля; вероятность безотказной работы демонтированного блока j -й номенклатуры между окончанием послеполетного контроля и окончанием его контроля в лаборатории.

$q_{\text{п}}(j) = P\{s_{\text{п}}(j) \in S^-(j)\}$, $q_{\text{псп}}(j) = P\{s_{\text{псп}}(j) \in S^-(j)\}$, $q_{\text{прп}}(j) = P\{s_{\text{прп}}(j) \in S^-(j)\}$, $q'_{\text{прп}}(j) = P\{s'_{\text{прп}}(j) \in S^-(j)\}$, $q_{\text{д}}(j) = P\{s_{\text{д}}(j) \in S^-(j)\}$ – соответственно вероятность отказа блока j -й номенклатуры в полете за время между окончанием предполетного контроля и окончанием полета; при послеполетном контроле за время между окончанием полета и окончанием послеполетного контроля; при предполетном контроле за время между окончанием полета или послеполетного контроля и окончанием предполетного контроля; при предполетном контроле за время между окончанием контроля демонтированного блока и окончанием предполетного контроля; между окончанием послеполетного контроля и окончанием его контроля в лаборатории.

Аналитические зависимости между характеристиками достоверности контроля блоков. Если определены ХДК блока 1-й группы ХБ блока, то ХДК блока 2-й группы можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{\text{ра}} &= p(j)[1 - \alpha(j)]; \\ P_{\text{ло}} &= p(j) \alpha(j); \\ P_{\text{ко}} &= q(j)[1 - \beta(j)]; \\ P_{\text{но}} &= p(j) \beta(j). \end{aligned} \tag{15}$$

Если определены ХДК блока 2-й группы, то можно определить ХДК блока 3-й группы:

$$\begin{aligned} D_{\text{г/г}}(j) &= P_{\text{ра}}(j)/[P_{\text{ра}}(j) + P_{\text{но}}(j)]; \\ D_{\text{нг/нг}}(j) &= P_{\text{ко}}(j)/[P_{\text{ко}}(j) + P_{\text{ло}}(j)]; \\ D_{\text{нг/г}}(j) &= P_{\text{ло}}(j)/[P_{\text{ко}}(j) + P_{\text{ло}}(j)]; \\ D_{\text{г/нг}}(j) &= P_{\text{но}}(j)/[P_{\text{ра}}(j) + P_{\text{но}}(j)]. \end{aligned} \tag{16}$$

Если определены ХДК блока 1-й группы и ХБ блока, то ХДК блока 3-й группы определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} D_{\text{г/г}}(j) &= p(j)[1 - \alpha(j)]/\{p(j)[1 - \alpha(j)] + q(j)\beta(j)\}; \\ D_{\text{нг/нг}}(j) &= q(j)[1 - \beta(j)]/\{q(j)[1 - \beta(j)] + p(j)\alpha(j)\}; \\ D_{\text{нг/г}}(j) &= p(j)\alpha(j)/\{q(j)[1 - \beta(j)] + p(j)\alpha(j)\}; \\ D_{\text{г/нг}}(j) &= q(j)\beta(j)/\{p(j)[1 - \alpha(j)] + q(j)\beta(j)\}. \end{aligned} \tag{17}$$

Если определены ХДК блока 3-й группы, а также ХБ блока, то можно определить ХДК блока 1-й группы:

$$\alpha(j) = \frac{[1 - D_{\text{нГ/нГ}}(j)][D_{\text{Г/Г}}(j) - p(j)]}{p(j)[D_{\text{Г/Г}}(j) + D_{\text{нГ/нГ}}(j) - 1]};$$

$$\beta(j) = \frac{[1 - D_{\text{Г/Г}}(j)][D_{\text{нГ/нГ}}(j) - q(j)]}{q(j)[D_{\text{Г/Г}}(j) + D_{\text{нГ/нГ}}(j) - 1]};$$
(18)

а также ХДК блока 2-й группы:

$$P_{\text{ра}}(j) = \frac{D_{\text{Г/Г}}(j)[D_{\text{нГ/нГ}}(j) - q(j)]}{[D_{\text{Г/Г}}(j) + D_{\text{нГ/нГ}}(j) - 1]};$$

$$P_{\text{ло}}(j) = \frac{[1 - D_{\text{нГ/нГ}}(j)][D_{\text{Г/Г}}(j) - p(j)]}{[D_{\text{Г/Г}}(j) + D_{\text{нГ/нГ}}(j) - 1]};$$

$$P_{\text{ко}}(j) = \frac{D_{\text{нГ/нГ}}(j)[D_{\text{Г/Г}}(j) - p(j)]}{[D_{\text{Г/Г}}(j) + D_{\text{нГ/нГ}}(j) - 1]};$$

$$P_{\text{но}}(j) = \frac{\left[1 - D_{\frac{\text{Г}}{\text{Г}}}(j)\right] \left[D_{\frac{\text{нГ}}{\text{нГ}}}(j) - q(j)\right]}{\left[D_{\frac{\text{Г}}{\text{Г}}}(j) + D_{\frac{\text{нГ}}{\text{нГ}}}(j) - 1\right]}.$$
(19)

На основе аналитических зависимостей (15) – (19) определяются соотношениями между ХДК блоков БО различных групп для СЭК.

Разработанный в статье математический аппарат был применен при исследовании эффективности бортового контроля системы кондиционирования воздуха (СКВ) самолета SSJ100. На рис. 1 представлены модели надежности и достоверности контроля для одного из блоков СКВ-блока управления. На рис. 2 представлены результаты математического моделирования. На основе полученных результатов проведен анализ достоверности контроля блока в полете и послеполетного контроля с последующей выработкой рекомендаций по повышению достоверности эксплуатационного контроля.

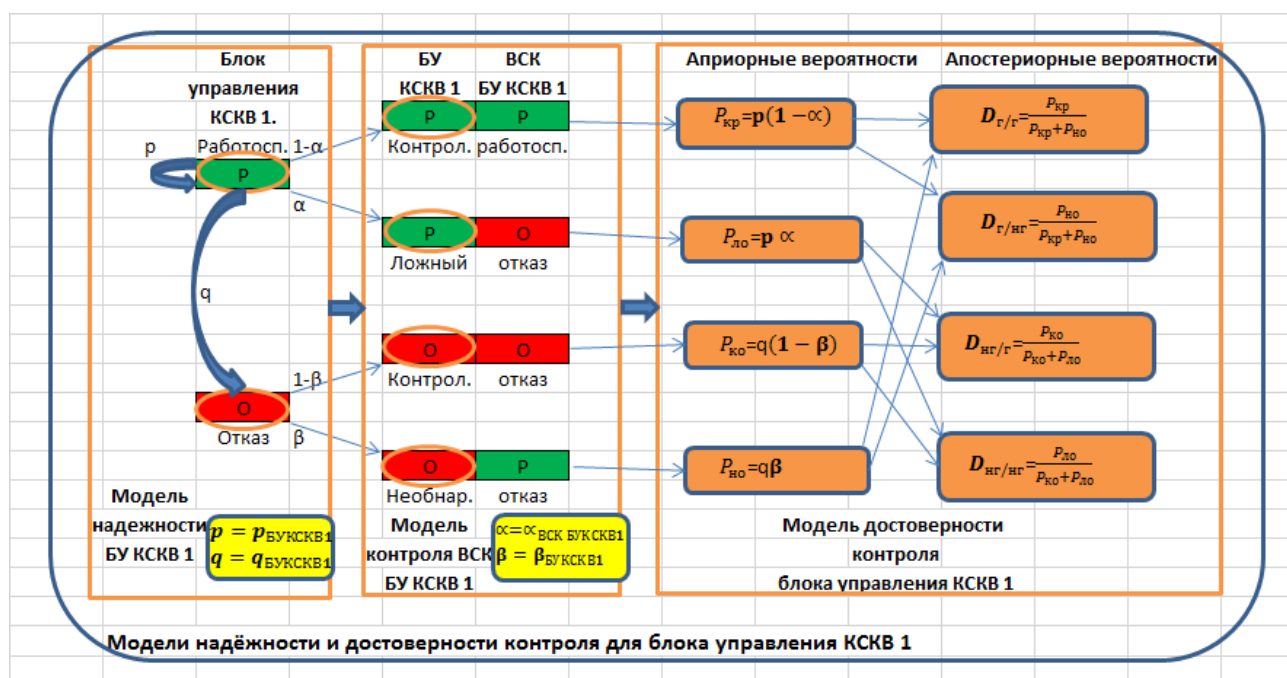


Рисунок 1 – Модели надежности и достоверности контроля для блока управления системы кондиционирования воздуха

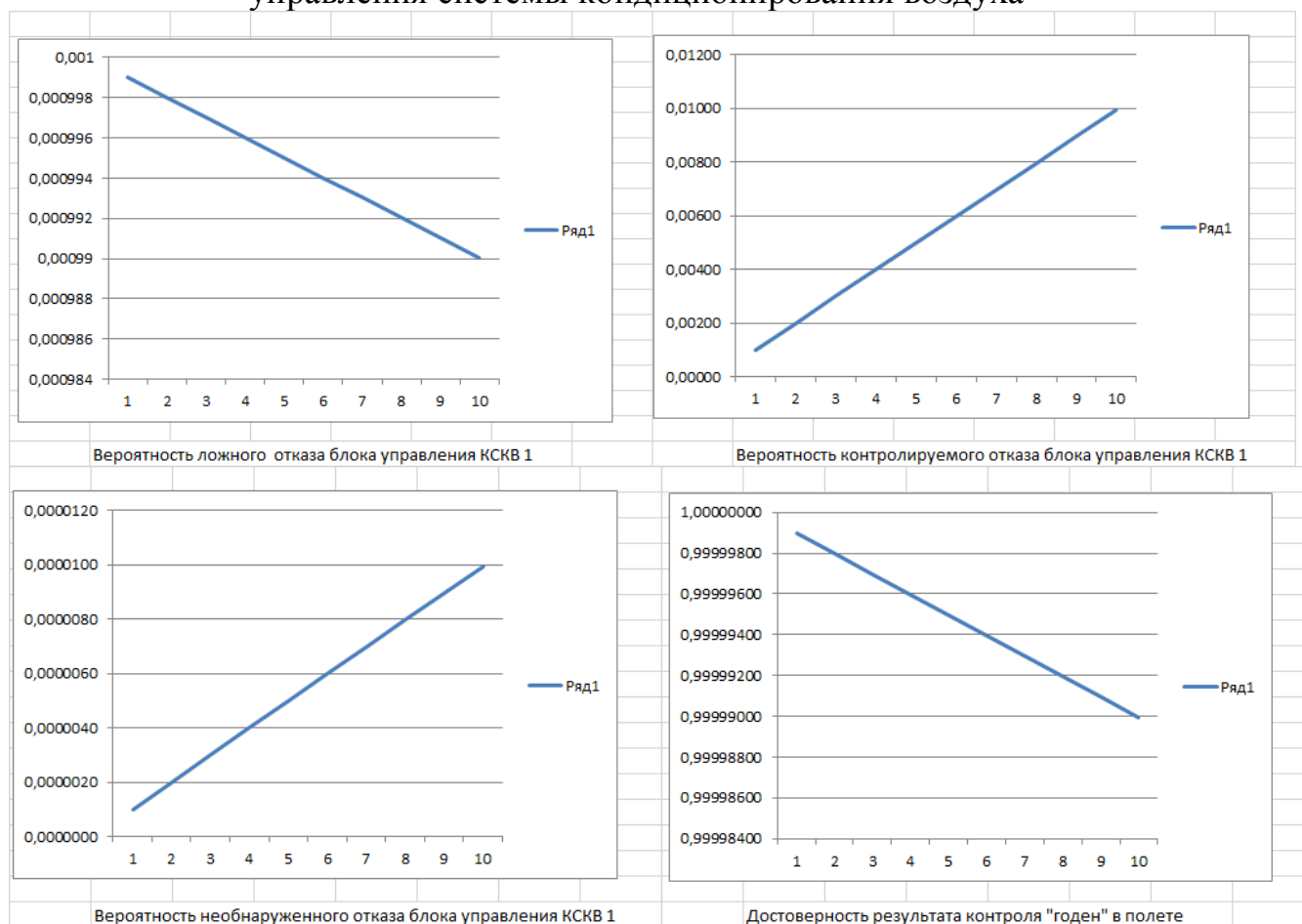


Рисунок 2 – Результаты математического моделирования

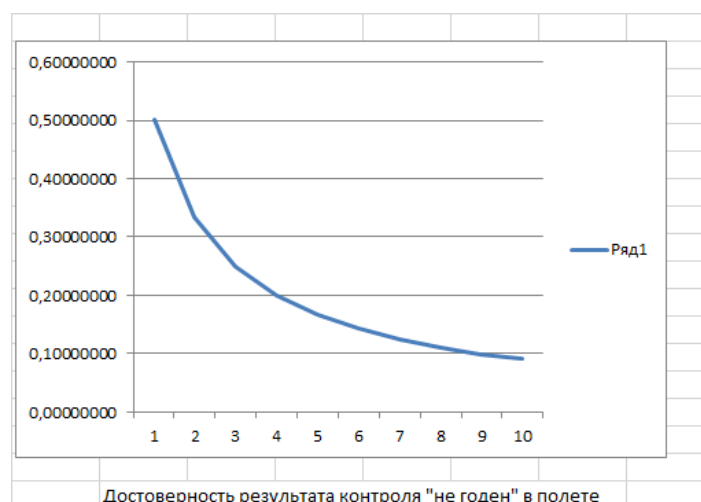


Рисунок 2 Продолжение – Результаты математического моделирования

В качестве итога, следует подчеркнуть следующее.

1. Качество СЭК проявляется в процессе технической эксплуатации (ТЭ). Это качество определяется основным свойством – достоверностью контроля или степенью объективности отображения результатами контроля реального технического состояния БО.

2. Анализ проблемы формирования и совершенствования СЭК и БО показывает ее сложность, требующую применения системного подхода на основе соответствующего математического аппарата.

3. Выбраны и обоснованы параметры и показатели эффективности СЭК. Для этого сформированы рациональные множества технических состояний и решений о технических состояниях объектов контроля, определены характеристики достоверности эксплуатационного контроля блоков БО, осуществлено их группирование.

4. На основе разработанных математических моделей проведен анализ достоверности контроля в полете и послеполетного контроля на примере одного из блоков системы кондиционирования воздуха с последующей выработкой рекомендаций по повышению достоверности эксплуатационного контроля.

Библиографический список

- Богоявленский А. А.* Методология и практика обеспечения единства измерений при эксплуатации наземных автоматизированных систем контроля бортового оборудования воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 37. С. 31-41.
- Кузнецов С. В.* Система эксплуатационного контроля бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации и научные основы ее формирования. // Научный Вестник МГТУ ГА. 2021а. Том 24. №3. С.31-41.
- Кузнецов С. В.* Системы эксплуатационного контроля бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации. В книге: Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества. Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию МГТУ ГА. Москва, 2021б. С. 239-242.

- Кулабухов В. С. Федеративно-интегрированная распределенная модульная авионика // Авиакосмическое приборостроение. 2015. №12. С. 11-31.
- Левин С. Ф. Качество поверки средств измерений и апостериорная достоверность контроля. Измерительная техника. 2018. № 9. С. 20-25.
- Мальцев Г. Н. Достоверность многоэтапного контроля технического состояния объектов испытаний / Г. Н. Мальцев, В. Л. Якимов // Информационно-управляющие системы. 2018. № 1 (92). С. 49-57.
- Меженев А. В. Модель контроля технического состояния средств связи и радиотехнического обеспечения // Техника средств связи. 2020. № 1 (149). С. 54-64.
- Мищенко В. И. Полумарковская модель функционирования резервируемых средств измерений с учётом периодичности поверки / В. И. Мищенко, А. Н. Кравцов, Т. Ф. Мамлеев // Измерительная техника. 2021. № 4. С. 22-27.
- Мусорин А. С. Автоматизация контрольных карт проверок на самолёте SSJ-100. В сборнике: Авиация России: прошлое, настоящее, будущее / А. С. Мусорин, В. П. Ползик // Материалы II научно-практической конференции филиала "Стрела" МАИ в г.о. Жуковский, посвященной 100-летию создания ФГУП "ЦАГИ". 2018. С. 83-90.
- Сартаков С. С. Анализ методов и средств испытаний радиоэлектронного оборудования воздушных судов. В сборнике: Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2020. С. 206-207.
- Сухоруков В. А. Поддержание летной годности бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации при технической эксплуатации до отказа с контролем уровня надежности / В. А. Сухоруков, Н. М. Семенов, А. Л. Рябинин, С. В. Бармина // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 29. С. 116-123.
- Федосов Е. А. Интегрированная модульная авионика // Е. А. Федосов, В. В. Косьянчук, Н. И. Сельвесюк // Радиоэлектронные технологии. 2015. № 1. С. 66-71.
- Хайруллин Р. З. Оптимизация процессов эксплуатации и обновления парка измерительной техники. Измерительная техника. 2022. № 8. С. 28-34.
- Чинючин Ю. М. Применение марковских процессов для анализа и управления эксплуатационной технологичностью летательного аппарата / Ю. М. Чинючин, А. С. Соловьев // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2020. Т. 23. № 1. С. 71-83.
- Karnov A.A., Zelenov S.V. Stochastic methods for analysis of complex hardware-software systems. Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. 2017. T. 29. № 4. pp. 191-202.

References

- Bogoyavlensky A. A. (2021). Methodology and practice of ensuring the uniformity of measurements in the operation of ground-based automated control systems for on-board equipment of aircraft. Scientific. Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation. 37: 31-41.
- Chinyuchin Yu. M., Solovyov A. S. (2020). The use of Markov processes for the analysis and control of the operational manufacturability of the aircraft. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. V. 23. No. 1: 71-83
- Fedosov E. A., Kosyanchuk V. V., Selvesyuk N. I. (2015). Integrated modular avionics. Radioelectronic technologies. 1: 66 – 71.
- Karnov A. A., Zelenov S. V. (2017). Stochastic methods for analysis of complex hard-ware-software systems. Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. V. 29. No. 4: 191-202.
- Khairullin R. Z. (2022). Optimization of operation processes and updating of the measuring equipment fleet. Measuring technology. 8: 28-34.
- Kulabukhov V. S. (2015). Federated-integrated distributed modular avionics. Aerospace instrumentation. 12: 11-31.
- Kuznetsov S. V. (2021a). Operational control systems for on-board equipment of civil aviation aircraft. In the book: Civil aviation at the present stage of development of science, technology and

society. *Collection of abstracts of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 50th anniversary of MSTU GA*. Moscow. 239-242.

Kuznetsov S. V. (2021b). The system of operational control of on-board equipment of civil aviation aircraft and the scientific basis for its formation. *Scientific Bulletin of MSTU GA*. Volume 24. No. 3: 31-41.

Levin S. F. (2018). The quality of verification of measuring instruments and a posteriori reliability of control. *Measuring technology*. 9: 20-25.

Maltsev G. N., Yakimov V. L. (2018). Reliability of multi-stage control of the technical condition of test objects. *Information and control systems*. 1 (92): 49-57.

Mezhenov A. V. (2020). Model for monitoring the technical condition of communications and radio engineering. *Communication technology*. 1 (149): 54-64.

Mishchenko V. I., Kravtsov A. N., Mamleev T. F. (2021). Semi-Markov model of the functioning of redundant measuring instruments, taking into account the frequency of verification. *Measuring technology*. 4: 22-27.

Musorin A. S., Polzik V. P. (2018). Automation of checklists on SSJ-100 aircraft. In the collection: Aviation of Russia: past, present, future. Materials of the II scientific-practical conference of the "Strela" branch of the MAI in the city of Zhukovsky, dedicated to the 100th anniversary of the establishment of TsAGI. 83-90.

Sartakov S. S. (2020). Analysis of methods and means of testing aircraft radio-electronic equipment. In the collection: Actual problems of radio electronics and telecommunications. Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference. 206-207.

Sukhorukov V. A., Semenov N. M., Ryabinin A. L., Barmina S. V. (2019). Maintaining the airworthiness of on-board equipment of civil aviation aircraft during technical operation to failure with monitoring of the level of reliability. *Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation*. 29: 116-123.