

УДК 629.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-58-74

Характеристики достоверности эксплуатационного контроля функциональных систем и комплексов бортового оборудования воздушных судов

С.В. Кузнецов¹

¹ *Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Аннотация: Система эксплуатационного контроля (СЭК) бортового оборудования (БО) воздушных судов (ВС) гражданской авиации (ГА) является важной составляющей его системы технической эксплуатации (СТЭ). Эксплуатационный контроль – составная часть процесса технической эксплуатации. Он позволяет оценить технические состояния (ТС) объектов контроля (ОК) в различных состояниях функционирования БО, подготовки ВС к полету, различных видах технического обслуживания (ТО) и восстановлении. Основным свойством эксплуатационного контроля является достоверность контроля. Ключевая задача эксплуатационного контроля – не только определение вида ТС, но и количественная оценка правильности или ошибочности принятия решений. Характеристики достоверности контроля (ХДК) являются количественными показателями степени объективности принятия решений. В зависимости от уровня детализации задачи следует различать ХДК блоков, функциональных систем и комплексов БО для различных средств эксплуатационного контроля: встроенных, бортовых автономных, наземно-бортовых и наземных. Выбор ХДК основан на системном анализе и математическом аппарате логики, теории вероятности и математической статистики. Сформированы рациональные множества технических состояний и решений о технических состояниях функциональных систем и комплексов 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 функциональных систем и комплексов БО и взаимоотношения между ними. На примере системы кондиционирования воздуха проведены расчеты по достоверности контроля.

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

Для цитирования: Кузнецов С.В. Характеристики достоверности эксплуатационного контроля функциональных систем и комплексов бортового оборудования воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 6. С. 58–74. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-58-74

Characteristics of operational control reliability of aircraft functional systems and avionics suites

S.V. Kuznetsov¹

¹ *Moscow State Technical University of Civil Aviation,
Moscow, Russia*

Abstract: The operational control system (OCS) of civil aircraft (A/C) airborne equipment is an important component of its technical operation system (TOS). Operational control is an integral part of the technical operation process. It makes it possible to assess the technical conditions (TC) of the objects to be monitored in various states of airborne equipment operation, aircraft preparation for flight, various types of maintenance and recovery. The main property of operational control is the reliability of control. The key task of operational control is not only to determine the type of technical condition, but also to quantify the correctness or erroneousness of decision-making. Control reliability characteristics (CRC) are quantitative indicators of the degree

of objectivity in decision-making. Depending on the level of task details, it is necessary to distinguish the control reliability characteristics of units, functional systems (FS) and avionics suites for various means of operational control: built-in test equipment (BITE), on-board self-contained, ground-onboard and ground systems. The choice of the control reliability characteristics is based on the system analysis and the mathematical apparatus of logic, probability theory and mathematical statistics. Rational sets of technical states and decision-making about the technical conditions of functional systems and avionics suites are formed. Based on these sets, three groups of control reliability characteristics were identified. The first group consists of conditional probabilities of transitions in the operational control process under various types of control. The second group consists of unconditional probabilities of transitions in the operational control process under various types of control. The third group consists of a posteriori decision-making probability in the operational control process under various types of control. Analytical dependences for calculating the control reliability characteristics of three groups for functional systems and avionics suites and relationships between them are determined. The air-conditioning system was used to calculate the reliability of the control.

Key words: operational control system, technical operation process, technical condition, reliability of the control, onboard equipment.

For citation: Kuznetsov, S.V. (2023). Characteristics of operational control reliability of aircraft functional systems and avionics suites. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 6, pp. 58–74. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-58-74

Введение

Эффективность технической эксплуатации бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации проявляется в процессе его технической эксплуатации. Основной составляющей этого процесса является процесс эксплуатационного контроля. Он включает процессы контроля в полете, послеполетный и предполетный контроль, а также контроль демонтированного с борта оборудования в наземных условиях. Основным свойством эксплуатационного контроля является достоверность контроля, определяющая степень объективности отображения результатами контроля реального технического состояния объекта. Бортовое оборудование как объект технической эксплуатации представляет собой совокупность блоков, систем и комплексов. В зависимости от глубины детализации задачи оценки эффективности эксплуатационного контроля следует использовать соответствующие математические модели.

Характеристика современного бортового оборудования как интегрированной модульной авионики дана в [1]. Актуальные исследования в области достоверности контроля приведены в работах отечественных ученых [2–10] и зарубежных авторов [11–16].

В [17] автором сформулирована научная задача формирования системы эксплуатационного контроля (СЭК) бортового оборудования (БО) воздушных судов (ВС) граждан-

ской авиации (ГА), в [18] осуществлен выбор и проведено обоснование параметров и показателей эффективности системы эксплуатационного контроля на нижнем уровне иерархии для блоков бортового оборудования. В настоящей статье проводятся выбор и обоснование параметров и показателей эффективности эксплуатационного контроля второго и третьего уровней иерархии для функциональных систем и бортовых комплексов.

Методы и методология исследования

В основе исследования лежат логико-вероятностные методы, наиболее адекватно описывающие реальные процессы эксплуатационного контроля как суть случайные процессы, подчиненные строгим и детерминированным правилам, следующим из программы технического обслуживания и ремонта ВС. Эти методы естественным образом вписываются в общую методологию исследования систем технической эксплуатации ВС в целом и бортового оборудования в частности.

Формирование множеств технических состояний и решений о технических состояниях функциональных систем и комплексов. В общем случае техническое состояние (ТС) i -й функциональной системы (ФС) может быть описано множеством $S(I)$, состоящим из двух элементов:

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

где $S^+(I)$ – исправное ТС ФС; $S^-(I)$ – множество неисправных ТС ФС.

Пусть ФС состоит из M блоков. Тогда каждый элемент множества $S(I)$ характеризуется совокупностью элементов множеств $s(j)$; $j = \overline{1, M}$ и множества ТС межблочных связей $s(i, j)$:

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

где $S^+(i, j)$ – исправное ТС межблочной связи блоков i и j ; $S^-(i, j)$ – множество неисправных ТС межблочной связи блоков i и j . Тогда

$$\begin{aligned} S^+(I) &= \{S^+(j); S^+(i, j) = \overline{1, M}\}, \\ S^-(I) &= \{S^-(j); S^-(i, j) = \overline{1, M}\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Решение о ТС I -й ФС принадлежит множеству решений $Z(I)$, также состоящему из двух элементов:

$$Z(I) = \{Z^+(I); Z^-(I)\}, \quad (4)$$

где $Z^+(I)$ – решение об исправности I -й ФС; $Z^-(I)$ – множество решений о наличии неисправностей I ФС.

Решение о ТС межблочных связей I -й ФС принадлежит множеству решений

$$Z(i, j) = \{Z^+(i, j); Z^-(i, j)\}, \quad (5)$$

где $Z(i, j)$ – решение об исправности межблочной связи блоков i и j ; $Z^-(i, j)$ – решение о неисправности межблочной связи блоков i и j . Тогда

$$\begin{aligned} Z^+(I) &= \{Z^+(j); Z^+(i, j) = \overline{1, M}\}, \\ Z^-(I) &= \{Z^-(j); Z^-(i, j) = \overline{1, M}\}. \end{aligned} \quad (6)$$

События, связанные с принадлежностью текущего ТС ФС $s(I)$ одному из элементов множества $S(I)$, а также принадлежностью текущего решения о ТС ФС $z(I)$ одному из элементов множества $Z(I)$, являются попарно совместными, и их можно объединить в три группы.

Первая группа событий:

$$\{z(I) \in Z^+(I)/s(I) \in S^+(I)\};$$

$$\begin{aligned} \{z(I) \in Z^-(I)/s(I) \in S^+(I)\}; \\ \{z(I) \in Z^+(I)/s(I) \in S^-(I)\}; \\ \{z(I) \in Z^-(I)/s(I) \in S^-(I)\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Вторая группа событий:

$$\begin{aligned} \{z(I) \in Z^+(I); s(I) \in S^+(I)\}; \\ \{z(I) \in Z^-(I); s(I) \in S^+(I)\}; \\ \{z(I) \in Z^+(I); s(I) \in S^-(I)\}; \\ \{z(I) \in Z^-(I); s(I) \in S^-(I)\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Третья группа событий:

$$\begin{aligned} \{s(I) \in S^+(I)/z(I) \in Z^+(I)\}; \\ \{s(I) \in S^-(I)/z(I) \in Z^+(I)\}; \\ \{s(I) \in S^+(I)/z(I) \in Z^-(I)\}; \\ \{s(I) \in S^-(I)/z(I) \in Z^-(I)\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда достоверность контроля ФС количественно можно определить вероятностями появления каждого события из соответствующей группы событий (7)–(9). Такие вероятности будем называть характеристиками достоверности контроля (ХДК) ФС.

В зависимости от вида эксплуатационного контроля будем различать ХДК ФС:

- в полете (когда ТС I -й ФС на момент окончания полета $s_p(I)$, а решение системы контроля о ТС этой ФС $z_p(I)$);
- при послеполетном контроле (когда ТС I -й ФС на момент окончания послеполетного контроля $s_{псп}(I)$, а решение системы контроля о ТС этой ФС $z_{псп}(I)$);
- при предполетном контроле (когда ТС I -й ФС на момент окончания предполетного контроля $s_{прп}(I)$, а решение системы контроля о ТС этой ФС $z_{прп}(I)$).

Так как вне борта самолета ФС как единое целое не существует (она представляет собой не связанные между собой демонтированные блоки), вводить ХДК демонтированной ФС нецелесообразно.

Рассмотрим далее процедуру формирования множеств ТС и решений о ТС бортовых комплексов (БК). В общем случае ТС БК описывается множеством S , состоящим из двух элементов:

$$S = \{S^+; S^-\}, \quad (10)$$

где S^+ – исправное ТС оборудования БК;
 S^- – множество неисправных ТС БК.

Пусть БК состоит из L ФС. Тогда каждый элемент множества S характеризуется совокупностью элементов множества $S(I)$, $I = \overline{1, L}$ и множества ТС межсистемных связей $S(I, J)$:

$$S(I, J) = \{S^+(I, J); S^-(I, J)\}, \quad (11)$$

где $S^+(I, J)$ – исправное ТС межсистемной связи ФС I и J ; $S^-(I, J)$ – множество неисправных ТС межсистемной связи ФС I и J . Тогда

$$\begin{aligned} S^+ &= \{S^+; S^+(I, J); I, J = \overline{1, L}\}, \\ S^- &= \{S^-; S^-(I, J); I, J = \overline{1, L}\}. \end{aligned} \quad (12)$$

Решение о ТС БК принадлежит множеству решений Z , состоящему из двух элементов:

$$Z = \{Z^+; Z^-\}, \quad (13)$$

где Z^+ – решение об исправности БК; Z^- – решение о наличии неисправностей в БК.

Решение о ТС межсистемных связей БК принадлежит множеству решений

$$Z(I, J) = \{Z^+(I, J); Z^-(I, J)\}, \quad (14)$$

где $Z^+(I, J)$ – решение об исправности межсистемной связи I и J ; $Z^-(I, J)$ – решение о наличии неисправностей в межсистемной связи I и J . Тогда

$$\begin{aligned} Z^+ &= \{Z^+; Z^+(I, J); I, J = \overline{1, L}\}, \\ Z^- &= \{Z^-; Z^-(I, J); I, J = \overline{1, L}\}. \end{aligned} \quad (15)$$

События, связанные с принадлежностью текущего ТС БК s одному из элементов множества S , а также принадлежностью текущего решения о ТС БК z одному из элементов множества Z , являются попарно совместными, и их можно объединить в три группы.

Первая группа событий:

$$\begin{aligned} \{z \in Z^+ / s \in S^+\}; \{z \in Z^- / s \in S^+\}; \\ \{z \in Z^+ / s \in S^-\}; \{z \in Z^- / s \in S^-\}. \end{aligned} \quad (16)$$

Вторая группа событий:

$$\begin{aligned} \{z \in Z^+, s \in S^+\}; \{z \in Z^-, s \in S^+\}; \\ \{z \in Z^+, s \in S^-\}; \{z \in Z^-, s \in S^-\}. \end{aligned} \quad (17)$$

Третья группа событий:

$$\begin{aligned} \{s \in S^+ / z \in Z^+\}; \{s \in S^+(I) / z \in Z^-\}; \\ \{s \in S^- / z \in Z^+\}; \{s \in S^- / z \in Z^-\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Тогда достоверность контроля БК количественно можно определить вероятностями появления каждого события из соответствующей группы событий (16)–(18). Такие вероятности будем называть ХДК БК.

В зависимости от вида эксплуатационного контроля будем различать ХДК БК:

- в полете (когда ТС БК на момент окончания полета s_n , а решение системы контроля о ТС БК z_n);
- при послеполетном контроле (когда ТС БК на момент окончания послеполетного контроля $s_{псп}$, а решение системы контроля о ТС БК $z_{псп}$);
- при предполетном контроле (когда ТС БК на момент окончания предполетного контроля $s_{прп}$, а решение системы контроля о ТС БК $z_{прп}$).

Эти ХДК являются показателями эффективности СЭК БК.

Характеристики достоверности эксплуатационного контроля функциональных систем и комплексов бортового оборудования

Первая группа характеристик. Первую группу ХДК I -й ФС составляют условные вероятности переходов процесса эксплуатационного контроля ФС. При контроле в полете это следующие вероятности:

$\alpha_n(I) = P\{\exists z_n(i) \in Z^-(i) \vee \exists z_n(i, j) \in Z^-(i, j) / \forall s_n(i) \in S^+(i), \forall s_n(i, j) \in S^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$ – вероятность принятия решения при контроле в полете ФС о нахождении хотя бы одного блока ФС или хотя бы одной межблочной связи в неработоспособном состоянии при условии, что действительные ТС всех блоков и межблочных связей

являются работоспособными (вероятность ошибки контроля ФС в полете 1-го рода);

$\beta_{\pi}(I) = P\{\forall z_{\pi}(i) \in Z^{+}(i), \forall z_{\pi}(i, j) \in Z^{+}(i, j) / \exists s_{\pi}(i) \in S^{-}(i), \forall s_{\pi}(i, j) \in S^{-}(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$ – вероятность принятия решения при контроле в полете ФС о работо-

способности всех блоков и всех межблочных связей ФС при условии, что существует хотя бы один блок или хотя бы одна межблочная связь, действительное ТС которых является неработоспособным (вероятность ошибки контроля ФС в полете 2-го рода).

Аналогичным образом получим ХДК первой группы при послеполетном контроле ФС:

$$\alpha_{\text{псп}}(I) = P\{\exists z_{\text{псп}}(i) \in Z^{-}(i) \vee \exists z_{\text{псп}}(i, j) \in Z^{-}(i, j) / \forall s_{\text{псп}}(i) \in S^{+}(i), \forall s_{\text{псп}}(i, j) \in S^{+}(i, j); i, j = \overline{1, M}\}; \quad (19)$$

$$\beta_{\text{псп}}(I) = P\{\forall z_{\text{псп}}(i) \in Z^{+}(i) \vee \forall z_{\text{псп}}(i, j) \in S^{+}(i, j) / \exists s_{\text{псп}}(i) \in S^{-}(i), \forall s_{\text{псп}}(i, j) \in S^{-}(i, j); i, j = \overline{1, M}\}.$$

При предполетном контроле ФС ХДК 1-й группы определяются следующим образом:

$$\alpha_{\text{прп}}(I) = P\{\exists z_{\text{прп}}(i) \in Z^{-}(i) \vee \exists z_{\text{прп}}(i, j) \in Z^{-}(i, j) / \forall s_{\text{прп}}(i) \in S^{+}(i), \forall s_{\text{прп}}(i, j) \in S^{+}(i, j); i, j = \overline{1, M}\}; \quad (20)$$

$$\beta_{\text{прп}}(I) = P\{\forall z_{\text{прп}}(i) \in Z^{+}(i) \vee \forall z_{\text{прп}}(i, j) \in Z^{+}(i, j) / \exists s_{\text{прп}}(i) \in S^{-}(i), \forall s_{\text{прп}}(i, j) \in S^{-}(i, j); i, j = \overline{1, M}\}.$$

Первую группу ХДК комплекса составляют условные вероятности переходов процесса эксплуатационного контроля комплекса. При контроле в полете это следующие вероятности:

$A_{\pi} = P\{\exists z_{\pi}(I) \in Z_{\pi}^{-}(I) \vee \exists z_{\pi}(I, J) \in Z_{\pi}^{-}(I, J) / \forall s_{\pi}(I) \in S_{\pi}^{+}(I), \forall s_{\pi}(I, J) \in S_{\pi}^{+}(I, J); I, J = \overline{1, L}\}$ – вероятность принятия решения при контроле в полете комплекса о нахождении хотя бы одной ФС комплекса или хотя бы одной межсистемной связи в неработоспособном состоянии при условии, что действительные ТС всех ФС и межсистемных связей являются работоспособными (вероятность ошибки контроля комплекса в полете 1-го рода);

$B_{\pi} = P\{\exists z_{\pi}(I) \in Z_{\pi}^{-}(I) \vee \exists z_{\pi}(I, J) \in Z_{\pi}^{-}(I, J) / \forall s_{\pi}(I) \in S_{\pi}^{+}(I), \forall s_{\pi}(I, J) \in S_{\pi}^{+}(I, J); I, J = \overline{1, L}\}$ – вероятность принятия решения при контроле в полете комплекса о работоспособности всех ФС и всех межсистемных связей при условии, что существует хотя бы одна ФС или хотя бы одна межсистемная связь, действительное ТС которых является неработоспособным (вероятность ошибки контроля комплекса в полете 2-го рода).

Аналогичным образом получим ХДК 1-й группы при послеполетном контроле комплекса:

$$A_{\text{псп}} = P\{\exists z_{\text{псп}}(i) \in Z^{-}(I) \vee \exists z_{\text{псп}}(I, J) \in Z^{-}(I, J) / \forall s_{\text{псп}}(I) \in S^{+}(I), \forall s_{\text{псп}}(I, J) \in S^{+}(I, J); I, J = \overline{1, L}\}; \quad (21)$$

$$B_{\text{псп}} = P\{\forall z_{\text{псп}}(I) \in Z^{+}(I) \vee \forall z_{\text{псп}}(I, J) \in Z^{+}(I, J) / \exists s_{\text{псп}}(i) \in S^{-}(I), \forall s_{\text{псп}}(I, J) \in S^{-}(I, J); I, J = \overline{1, L}\}.$$

При предполетном контроле комплекса ХДК 1-й группы определяются следующим образом:

$$A_{\text{прп}} = P\{\exists z_{\text{прп}}(I) \in Z^{-}(I) \vee \exists z_{\text{прп}}(I, J) \in Z^{-}(I, J) / \forall s_{\text{прп}}(I) \in S^{+}(I), \forall s_{\text{прп}}(I, J) \in S^{+}(I, J); I, J = \overline{1, L}\};$$

(22)

$$B_{\text{прп}} = P\{\forall z_{\text{прп}}(I) \in Z^+(I) \forall z_{\text{прп}}(I, J) \in Z^+(I, J) / \\ \exists s_{\text{прп}}(i) \in S^-(I), \forall \exists s_{\text{прп}}(I, J) \in S^-(I, J); I, J = \overline{1, L}\}.$$

Вторая группа характеристик. Вторую группу ХДК I-й ФС составляют безусловные вероятности нахождения процесса эксплуатационного контроля ФС в состояниях контроля. При контроле ФС в полете это следующие вероятности:

$p_{\text{по}}^{\text{н}}(I) = P\{\forall s_{\text{н}}(i) \in S^+(i), \forall s_{\text{н}}(i, j) \in S^+(i, j); \exists z_{\text{н}}(i) \in Z^-(i) \forall \exists z_{\text{н}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$ – вероятность нахождения всех блоков ФС и всех межблочных связей в работоспособном ТС совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении хотя бы одного блока ФС или хотя бы одной межблочной связи в неработоспособном состоянии (вероятность ложного отказа ФС в полете);

$p_{\text{но}}^{\text{н}}(I) = P\{\exists s_{\text{н}}(i) \in S^-(i) \forall \exists s_{\text{н}}(i, j) \in S^-(i, j); \forall z_{\text{н}}(i) \in Z^+(i), \forall z_{\text{н}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$; – вероятность нахождения хотя бы одного блока ФС или хотя бы одной межблочной связи в неработоспособном состоянии совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении всех блоков и межблочных связей ФС в работоспособном состоянии (вероятность необнаруженного отказа ФС в полете);

$p_{\text{ра}}^{\text{н}}(I) = P\{\forall s_{\text{н}}(i) \in S^+(i), \forall s_{\text{н}}(i, j) \in S^+(i, j); \forall z_{\text{н}}(i) \in Z^+(i), \forall z_{\text{н}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$ – вероятность нахождения всех блоков и всех межблочных связей ФС в работоспособном состоянии совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении всех блоков и межблочных связей ФС в работоспособном состоянии (вероятность контролируемой работоспособности ФС в полете);

$p_{\text{ко}}^{\text{н}}(I) = P\{\exists s_{\text{н}}(i) \in S^-(i) \forall \exists s_{\text{н}}(i, j) \in S^-(i, j); \exists z_{\text{н}}(i) \in Z^-(i) \forall \exists z_{\text{н}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$ – вероятность нахождения хотя бы одного блока или хотя бы одной межблочной связи ФС в неработоспособном состоянии совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении этого же самого блока или этой же межблоч-

ной связи в неработоспособном состоянии (вероятность контролируемого отказа ФС в полете).

Аналогичным образом получим ХДК 2-й группы при после- и предполетном контроле ФС.

Вторую группу ХДК комплекса составляют безусловные вероятности нахождения процесса эксплуатационного контроля комплекса в состояниях контроля. При контроле комплекса в полете это следующие вероятности:

$P_{\text{по}}^{\text{н}} = P\{\forall s_{\text{н}}(I) \in S^+(I), \forall s_{\text{н}}(I, J) \in S^+(I, J); \exists z_{\text{н}}(I) \in Z^-(I) \forall \exists z_{\text{н}}(I, J) \in Z^-(I, J); I, J = \overline{1, L}\}$ – вероятность нахождения всех ФС и межсистемных связей комплекса в работоспособном ТС совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении хотя бы одной ФС или одной межблочной связи в неработоспособном состоянии (вероятность ложного отказа комплекса в полете);

$P_{\text{но}}^{\text{н}} = P\{\exists s_{\text{н}}(I) \in S^-(I) \forall \exists s_{\text{н}}(I, J) \in S^-(I, J); \forall z_{\text{н}}(I) \in Z^+(I), \forall z_{\text{н}}(I, J) \in Z^+(I, J); I, J = \overline{1, L}\}$ – вероятность нахождения хотя бы одной ФС комплекса или хотя бы одной межсистемной связи в неработоспособном состоянии совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении всех ФС и всех межсистемных связей в работоспособном состоянии (вероятность необнаруженного отказа комплекса в полете);

$P_{\text{ра}}^{\text{н}} = P\{\forall s_{\text{н}}(I) \in S^+(I), \forall s_{\text{н}}(I, J) \in S^+(I, J); \forall z_{\text{н}}(I) \in Z^+(I), \forall z_{\text{н}}(I, J) \in Z^+(I, J); I, J = \overline{1, L}\}$ – вероятность нахождения всех ФС и всех межсистемных связей комплекса в работоспособном состоянии совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении всех ФС и всех межсистемных связей комплекса в работоспособном состоянии (вероятность контролируемой работоспособности комплекса в полете);

$P_{\text{ко}}^{\text{п}} = P\{\exists s_{\text{п}}(I) \in S^-(I) \vee \exists s_{\text{п}}(I, J) \in S^-(I, J); \exists z_{\text{п}}(I) \in Z^-(I) \vee \exists z_{\text{п}}(I, J) \in Z^-(I, J); I, J = \overline{1, L}\}$ – вероятность нахождения хотя бы одной ФС или хотя бы одной межсистемной связи комплекса в неработоспособном состоянии совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении той же самой ФС или той же самой межсистемной связи в неработоспособном состоянии (вероятность контролируемого отказа комплекса в полете).

Аналогичным образом получим ХДК 2-й группы при после- и предполетном контроле комплекса.

Третья группа характеристик. Третью группу ХДК I-й ФС составляют апостериорные вероятности нахождения процесса эксплуатационного контроля ФС в состояниях контроля. При контроле ФС в полете это следующие вероятности:

$d_{\text{г/г}}^{\text{п}}(I) = P\{\forall s_{\text{п}}(i) \in S^+(i), \forall s_{\text{п}}(i, j) \in S^+(i, j) / \forall z_{\text{п}}(i) \in Z^+(i), \forall z_{\text{п}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$ – вероятность нахождения всех блоков и всех межблочных связей ФС в работоспособном состоянии при усло-

вии, что принято решение при контроле в полете, что все блоки и межблочные связи ФС находятся в работоспособном состоянии (вероятность достоверного результата контроля ФС в полете «годен»);

$d_{\text{нг/кг}}^{\text{п}}(I) = P\{\exists s_{\text{п}}(i) \in S^-(i) \vee \exists s_{\text{п}}(i, j) \in S^-(i, j) / \exists z_{\text{п}}(i) \in Z^-(i) \vee \exists z_{\text{п}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$ – вероятность того, что хотя бы один блок или хотя бы одна межблочная связь ФС находится в неработоспособном состоянии при условии, что принято решение при контроле в полете, что этот блок или эта межблочная связь находится в неработоспособном состоянии (вероятность достоверного результата контроля ФС в полете «не годен»).

Аналогичным образом получим ХДК третьей группы при послеполетном и предполетном контроле ФС.

Третью группу ХДК комплекса составляют апостериорные вероятности нахождения процесса эксплуатационного контроля комплекса в состояниях контроля. При контроле комплекса в полете это следующие вероятности:

$$D_{\text{г/г}}^{\text{п}} = P\{\forall s_{\text{п}}(I) \in S^+(I), \forall s_{\text{п}}(I, J) \in S^+(I, J) / \forall z_{\text{п}}(I) \in Z^+(I), \forall z_{\text{п}}(I, J) \in Z^+(I, J); I, J = \overline{1, L}\}, \quad (23)$$

$$D_{\text{нг/кг}}^{\text{п}} = P\{\exists s_{\text{п}}(I) \in S^-(I) \vee \exists s_{\text{п}}(I, J) \in S^-(I, J) / \exists z_{\text{п}}(I) \in Z^-(I) \vee \exists z_{\text{п}}(I, J) \in Z^-(I, J); I, J = \overline{1, L}\}.$$

Аналогичным образом получаем ХДК 3-й группы при послеполетном и предполетном контроле комплекса.

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

$p_{\text{п}}(J) = P\{s_{\text{п}}(J) \in S^+(J)\}$ – вероятность безотказной работы ФС J -й номенклатуры в полете за время между окончанием предполетного контроля и окончанием полета;

$q_{\text{п}}(J) = P\{s_{\text{п}}(J) \in S^-(J)\}$ – вероятность отказа ФС J -й номенклатуры в полете за время между окончанием предполетного контроля и окончанием полета;

$p_{\text{псп}}(J) = P\{s_{\text{псп}}(J) \in S^+(J)\}$ – вероятность безотказной работы ФС J -й номенклатуры при послеполетном контроле за время между окончанием полета и окончанием послеполетного контроля;

$q_{\text{псп}}(J) = P\{s_{\text{псп}}(J) \in S^-(J)\}$ – вероятность отказа ФС J -й номенклатуры при послеполетном контроле за время между окончанием полета и окончанием послеполетного контроля;

$p_{\text{прп}}(J) = P\{s_{\text{прп}}(J) \in S^+(J)\}$ – вероятность безотказной работы ФС J -й номенклатуры при предполетном контроле за время между

окончанием полета или послеполетного контроля и окончанием предполетного контроля;

$q_{\text{прп}}(J) = P\{s_{\text{прп}}(J) \in S^-(J)\}$ – вероятность отказа ФС J -й номенклатуры при предполетном контроле за время между окончанием полета или послеполетного контроля и окончанием предполетного контроля.

Аналитические зависимости между характеристиками достоверности контроля функциональных систем и комплексов.
Если определены ХДК ФС 1-й группы ФС

блока, то ХДК блока 2-й группы можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{\text{ра}} &= p(J)[1 - \alpha(J)]; \\ P_{\text{ло}} &= p(J) \alpha(J); \\ P_{\text{ко}} &= q(J)[1 - \beta(J)]; \\ P_{\text{но}} &= p(J) \beta(J). \end{aligned} \quad (24)$$

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

$$\begin{aligned} D_{\text{г/г}}(J) &= P_{\text{ра}}(J)/[P_{\text{ра}}(J) + P_{\text{но}}(J)]; \\ D_{\text{нг/нг}}(J) &= P_{\text{ко}}(J)/[P_{\text{ко}}(J) + P_{\text{ло}}(J)]; \\ D_{\text{нг/г}}(J) &= P_{\text{ло}}(J)/[P_{\text{ко}}(J) + P_{\text{ло}}(J)]; \\ D_{\text{г/нг}}(J) &= P_{\text{но}}(J)/[P_{\text{ра}}(J) + P_{\text{но}}(J)]. \end{aligned} \quad (25)$$

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

$$\begin{aligned} D_{\text{г/г}}(J) &= p(J)[1 - \alpha(J)]/\{p(J)[1 - \alpha(J)] + q(J)\beta(J)\}; \\ D_{\text{нг/нг}}(J) &= q(J)[1 - \beta(J)]/\{q(J)[1 - \beta(J)] + p(J)\alpha(J)\}; \\ D_{\text{нг/г}}(J) &= p(J)\alpha(J)/\{q(J)[1 - \beta(J)] + p(J)\alpha(J)\}; \\ D_{\text{г/нг}}(J) &= q(J)\beta(J)/\{p(J)[1 - \alpha(J)] + q(J)\beta(J)\}. \end{aligned} \quad (26)$$

На основе аналитических зависимостей (24)–(26) определяются соотношениями между ХДК БО различных групп для СЭК.

Результаты исследования. Три группы ХДК ФС представлены в табл. 1, 2 и 3.

Таблица 1
Table 1

Первая группа характеристик достоверности эксплуатационного контроля ФС
The first group of operational control reliability characteristics of functional systems

ХДК ФС	Обозначение и определение	Примечание
Контроль в полете		
Вероятность ошибки контроля 1-го рода	$\alpha_{\text{п}}(I) = P\{\exists z_{\text{п}}(i) \in Z^-(i); \forall z_{\text{п}}(i, j) \in Z^-(i, j) / \forall s_{\text{п}}(i) \in S^+(i); \forall s_{\text{п}}(i, j) \in S^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	После окончания полета: $s_{\text{п}}(i)$ – ТС i -го блока; $s_{\text{п}}(i, j)$ – ТС межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность ошибки контроля 2-го рода	$\beta_{\text{п}}(I) = P\{\forall z_{\text{п}}(i) \in Z^+(i), \forall z_{\text{п}}(i, j) \in Z^+(i, j) / \exists s_{\text{п}}(i) \in S^-(i), \forall s_{\text{п}}(i, j) \in S^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$z_{\text{п}}(i), z_{\text{п}}(i, j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков

Окончание таблицы 1
Continuation of Table 1

Послеполетный контроль		
Вероятность ошибки контроля 1-го рода	$\alpha_{\text{псп}}(I) = P\{\exists z_{\text{псп}}(i) \in Z^-(i); \forall z_{\text{псп}}(i,j) \in Z^-(i,j)/\forall s_{\text{псп}}(i) \in S^+(i); \forall s_{\text{псп}}(i,j) \in S^+(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	После окончания контроля: $s_{\text{псп}}(i), s_{\text{псп}}(i,j)$ – ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность ошибки контроля 2-го рода	$\beta_{\text{псп}}(I) = P\{\forall z_{\text{псп}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{псп}}(i,j) \in S^+(i,j)/\exists s_{\text{псп}}(i) \in S^-(i); \forall s_{\text{псп}}(i,j) \in S^-(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	$z_{\text{псп}}(i), z_{\text{псп}}(i,j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Предполетный контроль		
Вероятность ошибки контроля 1-го рода	$\alpha_{\text{прп}}(I) = P\{\exists z_{\text{прп}}(i) \in Z^-(i); \forall z_{\text{прп}}(i,j) \in Z^-(i,j)/\forall s_{\text{прп}}(i) \in S^+(i); \forall s_{\text{прп}}(i,j) \in S^+(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	После окончания предполетного контроля: $s_{\text{прп}}(i), s_{\text{прп}}(i,j)$ – ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность ошибки контроля 2-го рода	$\beta_{\text{прп}}(I) = P\{\forall z_{\text{прп}}(i) \in Z^+(i); \forall s_{\text{прп}}(i,j) \in S^+(i,j)/\exists s_{\text{прп}}(i) \in S^-(i); \forall s_{\text{прп}}(i,j) \in S^-(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	$z_{\text{прп}}(i), z_{\text{прп}}(i,j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков

Таблица 2
Table 2

Вторая группа характеристик достоверности эксплуатационного контроля ФС
The second group of operational control reliability characteristics of functional systems

ХДКФС	Обозначение и определение	Примечание
Контроль в полете		
Вероятность ложного отказа	$p_{\text{по}}^{\text{п}}(I) = P\{\forall s_{\text{п}}(i) \in S^+(i); \forall s_{\text{п}}(i,j) \in S^+(i,j); \exists z_{\text{п}}(i) \in Z^-(i); \forall z_{\text{п}}(i,j) \in Z^-(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	После окончания полета: $s_{\text{п}}(i)$ – ТС i -го блока; $s_{\text{п}}(i,j)$ – ТС межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность необнаруженного отказа	$p_{\text{но}}^{\text{п}}(I) = P\{\exists s_{\text{п}}(i); \forall s_{\text{п}}(i,j) \in Z^-(i,j); \forall z_{\text{п}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{п}}(i,j) \in Z^+(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	
Вероятность контролируемой работоспособности	$p_{\text{ра}}^{\text{п}}(I) = P\{\forall s_{\text{п}}(i) \in S^-(i); \forall s_{\text{п}}(i,j) \in S^+(i,j); \forall z_{\text{п}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{п}}(i,j) \in Z^+(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	$z_{\text{п}}(i), z_{\text{п}}(i,j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность контролируемого отказа	$p_{\text{ко}}^{\text{п}}(I) = P\{\exists s_{\text{п}}(i) \in S^-(i); \forall s_{\text{п}}(i,j) \in S^-(i,j); \exists z_{\text{п}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{п}}(i,j) \in Z^+(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	
Послеполетный контроль		
Вероятность ложного отказа	$p_{\text{по}}^{\text{псп}}(I) = P\{\forall s_{\text{псп}}(i) \in S^+(i); \forall s_{\text{псп}}(i,j) \in S^+(i,j); \exists z_{\text{псп}}(i) \in Z^-(i); \forall z_{\text{псп}}(i,j) \in Z^-(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	После окончания контроля: $s_{\text{псп}}(i), s_{\text{псп}}(i,j)$ – ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков

Окончание таблицы 2
Continuation of Table 2

Вероятность необнаруженного отказа	$p_{\text{но}}^{\text{псп}}(I) = P\{\exists s_{\text{псп}}(i); \forall s_{\text{псп}}(i, j) \in S^-(i, j); \forall z_{\text{псп}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{псп}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	
Вероятность контролируемой работоспособности	$p_{\text{ра}}^{\text{псп}}(I) = P\{\forall s_{\text{псп}}(i) \in S^-(i), \forall s_{\text{псп}}(i, j) \in S^+(i, j); \forall z_{\text{псп}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{псп}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$z_{\text{псп}}(i), z_{\text{псп}}(i, j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность контролируемого отказа	$p_{\text{ко}}^{\text{псп}}(I) = P\{\exists s_{\text{псп}}(i) \in S^-(i) \exists s_{\text{псп}}(i, j) \in S^-(i, j); \exists z_{\text{псп}}(i) \in Z^-(i) \forall z_{\text{псп}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	
Предполетный контроль		
Вероятность ложного отказа	$p_{\text{по}}^{\text{прп}}(I) = P\{\forall s_{\text{прп}}(i) \in S^+(i); \forall s_{\text{прп}}(i, j) \in S^+(i, j); \exists z_{\text{прп}}(i) \in Z^-(i); \forall z_{\text{прп}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	После окончания контроля: $s_{\text{прп}}(i), s_{\text{прп}}(i, j)$ – ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность необнаруженного отказа	$p_{\text{но}}^{\text{прп}}(I) = P\{\exists s_{\text{прп}}(i) \in S^-(i); \forall \exists s_{\text{прп}}(i, j) \in S^-(i, j) \forall z_{\text{прп}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{прп}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	
Вероятность контролируемой работоспособности	$p_{\text{ра}}^{\text{прп}}(I) = P\{\forall s_{\text{прп}}(i) \in S^-(i), \forall s_{\text{прп}}(i, j) \in S^+(i, j); \forall z_{\text{прп}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{прп}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$z_{\text{прп}}(i), z_{\text{прп}}(i, j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность контролируемого отказа	$p_{\text{ко}}^{\text{прп}}(I) = P\{\exists s_{\text{прп}}(i) \in S^-(i) \forall \exists s_{\text{прп}}(i, j) \in S^-(i, j); z_{\text{прп}}(i, j) \in Z^-(i) \forall z_{\text{прп}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	

Таблица 3
Table 3

Третья группа характеристик достоверности эксплуатационного контроля ФС
The third group of operational control reliability characteristics of functional systems

ХДК ФС	Обозначение и определение	Примечание
Контроль в полете		
Вероятность достоверности результатов контроля в полете:		После окончания полета:
Годен	$d_{\text{г}}^{\text{п}}(I) = P\{\forall s_{\text{п}}(i) \in S^+(i); \forall s_{\text{п}}(i, j) \in S^+(i, j) / \forall z_{\text{п}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{п}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$s_{\text{п}}(i)$ – ТС i -го блока; $s_{\text{п}}(i, j)$ – ТС межблочной связи i -го и j -го блоков
Не годен	$d_{\text{кг}}^{\text{п}}(I) = P\{\exists s_{\text{п}}(i) \in S^-(i); \forall \exists s_{\text{п}}(i, j) \in S^-(i, j) / \exists z_{\text{п}}(i) \in Z^-(i); \forall z_{\text{п}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$z_{\text{п}}(i), z_{\text{п}}(i, j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков

Окончание таблицы 3
Continuation of Table 3

Послеполетный контроль		
Годен	$d_{\Gamma}^{\text{псп}}(I) = P\{\forall s_{\text{псп}}(i) \in S^+(i);$ $\forall s_{\text{псп}}(i, j) \in S^+(i, j) / \forall z_{\text{псп}}(i) \in Z^+(i);$ $\forall z_{\text{псп}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	После окончания контроля: $s_{\text{псп}}(i), s_{\text{псп}}(i, j)$ – ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Не годен	$d_{\Gamma}^{\text{псп}}(I) = P\{\exists s_{\text{псп}}(i) \in S^-(i);$ $\forall s_{\text{псп}}(i, j) \in S^-(i, j) / \exists z_{\text{псп}}(i) \in Z^-(i, j);$ $\forall z_{\text{псп}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$z_{\text{псп}}(i), z_{\text{псп}}(i, j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Предполетный контроль		
Годен	$d_{\Gamma}^{\text{прп}}(I) = P\{\forall s_{\text{прп}}(i) \in S^+(i);$ $\forall s_{\text{прп}}(i, j) \in S^+(i, j) / \forall z_{\text{прп}}(i) \in Z^+(i);$ $\forall z_{\text{прп}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$s_{\text{прп}}(i), s_{\text{прп}}(i, j)$ – ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Не годен	$d_{\Gamma}^{\text{прп}}(I) = P\{\exists s_{\text{прп}}(i) \in S^-(i);$ $\forall s_{\text{прп}}(i, j) \in S^-(i, j) / \exists z_{\text{прп}}(i) \in$ $\in Z^-(i, j) \forall z_{\text{прп}}(i, j) \in$ $\in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$z_{\text{прп}}(i), z_{\text{прп}}(i, j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков

Граф-модель надежности и достоверности контроля блока управления комплексной системы кондиционирования воздуха БУ КСКВ1 представлена на рис. 1.

Результаты расчета достоверности контроля приведены на рис. 2–4.

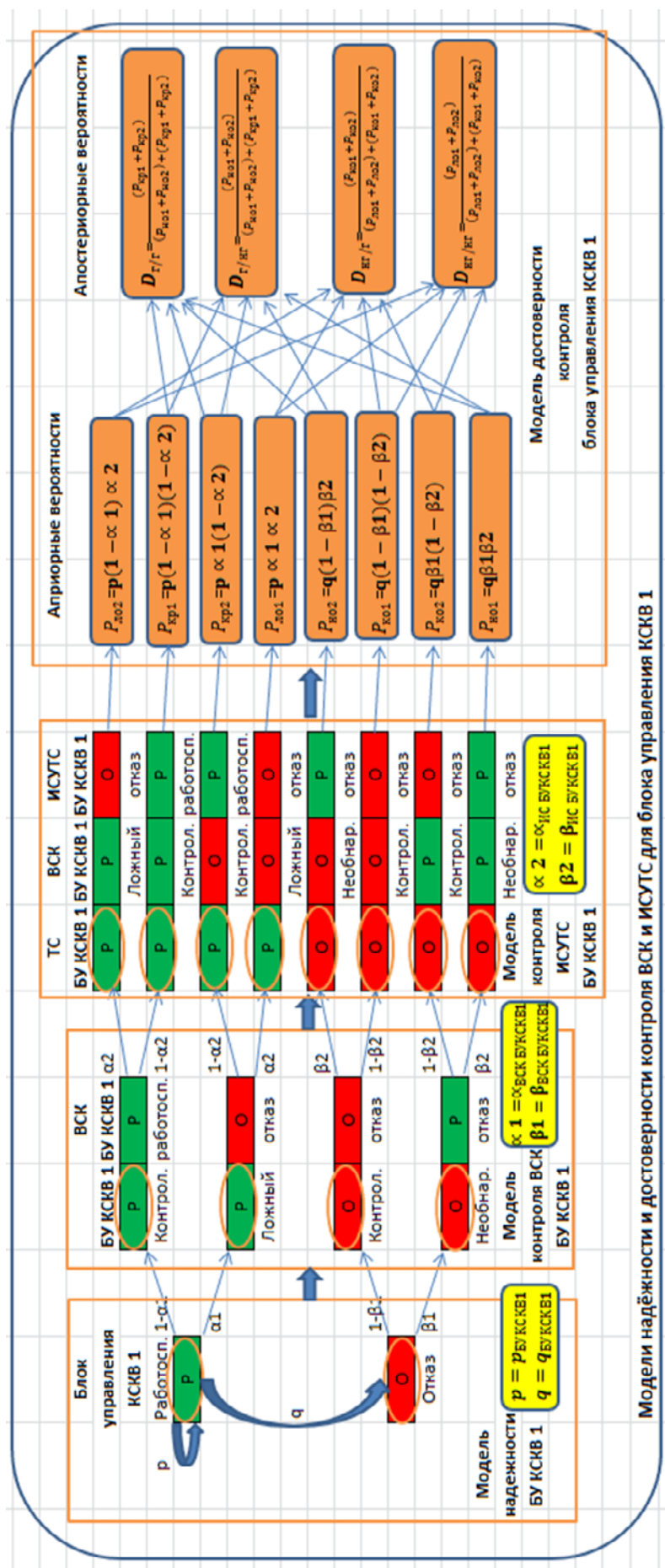


Рис. 1. Граф-модель надёжности и достоверности контроля блока управления КСКВ1
Fig. 1. Graph-model of control consistency and reliability of the IACS1 control unit

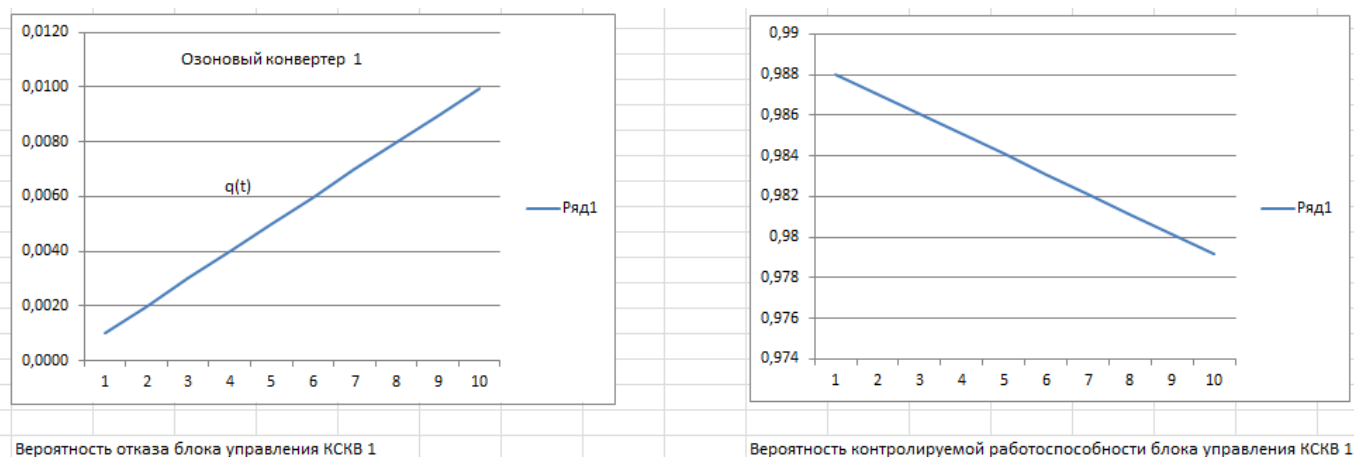


Рис. 2. Графики зависимости вероятности отказа и вероятности контролируемой работоспособности блока управления КСКВ1
Fig. 2. Graphs of dependence of the failure probability and the monitored performance probability of the IACS1 control unit

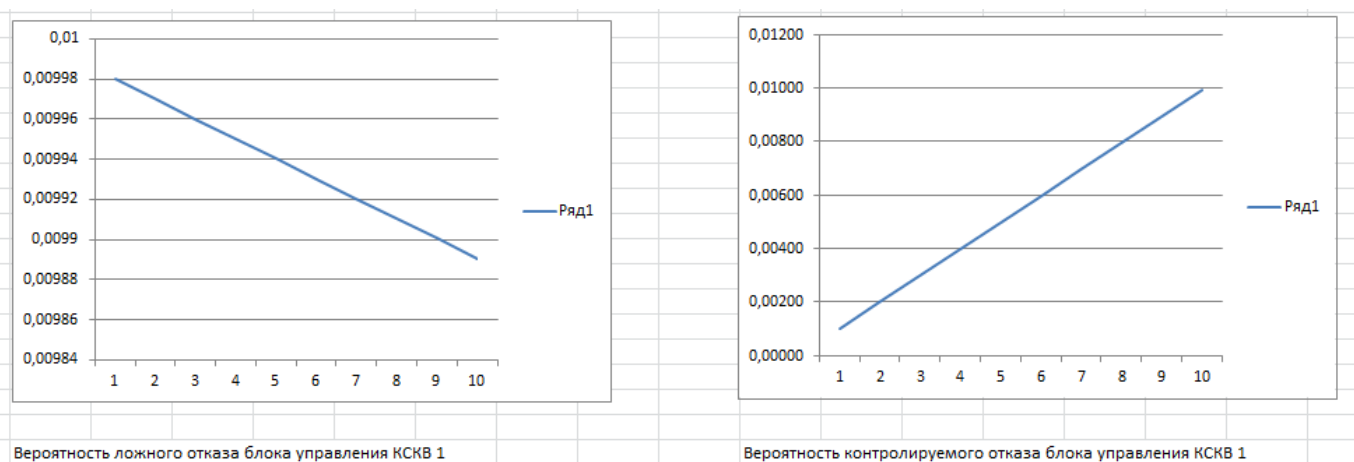


Рис. 3. Графики зависимости вероятностей ложного и контролируемого отказа блока управления КСКВ1
Fig. 3. Graphs of dependence of the false and controlled failure probabilities of the IACS1 control unit

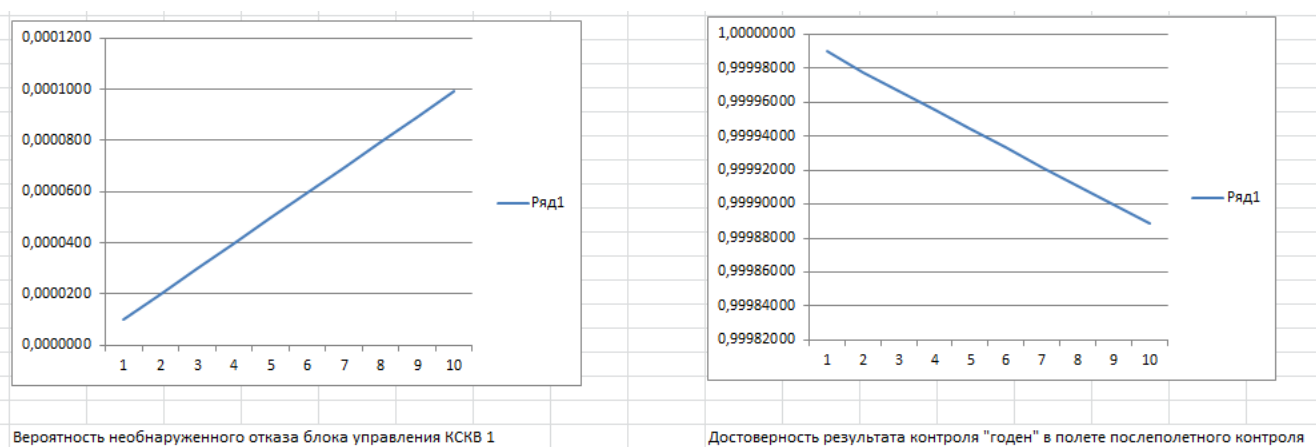


Рис. 4. Графики зависимости вероятности необнаруженного отказа и достоверности результатов контроля «годен» блока управления КСКВ1
Fig. 4. Graphs of dependence of an undetected failure probability and reliability of the control results “valid” for the IACS1 control unit

Заключение

1. Качество СЭК определяется основным свойством – достоверностью контроля или степенью объективности отображения результатами контроля реального технического состояния функциональных систем и комплексов бортового оборудования в процессе эксплуатационного контроля – в полете, при послеполетном и предполетном контроле. Оценка достоверности контроля требует применения системного подхода на основе соответствующего математического аппарата.

2. Определены параметры и показатели эффективности СЭК функциональных систем и комплексов бортового оборудования. Для этого сформированы рациональные множества технических состояний и решений о технических состояниях объектов контроля, определены характеристики достоверности эксплуатационного контроля функциональных систем и комплексов бортового оборудования, осуществлено их группирование по видам контроля и типам вероятностей.

3. На основе разработанных математических моделей проведен анализ достоверности контроля в полете с помощью встроенных средств контроля и послеполетного контроля с помощью интегральной системы управления техническим состоянием с последующей выработкой рекомендаций по повышению достоверности эксплуатационного контроля функциональных систем и комплексов бортового оборудования.

Список литературы

1. Федосов Е.А., Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И. Интегрированная модульная Авионика // Радиоэлектронные технологии. 2015. № 1. С. 66–71.

2. Левин С.Ф. Качество поверки средств измерений и апостериорная достоверность контроля // Измерительная техника. 2018. № 9. С. 20–25. DOI: 10.32446/0368-1025it-2018-9-20-25

3. Мальцев Г.Н., Якимов В.Л. Достоверность многоэтапного контроля техниче-

ского состояния объектов испытаний // Информационно-управляющие системы. 2018. № 1 (92). С. 49–57. DOI: 10.15217/issnl684-8853.2018.1.49

4. Данилевич С.Б., Третьяк В.В. Метрологическое обеспечение достоверности результатов контроля // Контроль. Диагностика. 2018. № 7. С. 56–60. DOI: 10.14489/td.2018.07.pp.056-060

5. 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.

6. Масленников Д.В. Влияние погрешностей средств измерительной техники на достоверность контроля / Д.В. Масленников, И.В. Куличкова, В.С. Еремина, Т.Д. Клочкова // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXVIII Международной научно-практической конференции. Пенза, 25 мая 2019 г. Пенза: Наука и Просвещение, 2019. С. 113–116.

7. Чинючин Ю.М., Соловьев А.С. Применение Марковских процессов для анализа и управления эксплуатационной технологичностью летательного аппарата // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 1. С. 71–83. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-1-71-83

8. Данилевич С.Б., Третьяк В.В. Влияние вида распределения погрешности измерения на показатели достоверности контроля // Контроль. Диагностика. 2020. № 7. С. 48–52. DOI: 10.14489/td.2020.07.pp.048-052

9. Антонюк Е.М. О достоверности контроля адаптивных информационно-измерительных систем / Е.М. Антонюк, П.Е. Антонюк, И.Е. Варшавский, Д.С. Гвоздев // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям: сборник материалов конференции, 2022. Т. 1. С. 234–236.

10. Рагуткин А.В. Методы повышения достоверности контроля работоспособности цифровых систем / А.В. Рагуткин, М.Е. Ставровский, И.А. Александров, Е.С. Юрцев // Технология машиностроения. 2022. № 6. С. 36–42.

11. Okamura H., Dohi T. On Kolmogorov-Smirnov test for software reliability models with grouped data // 2019 IEEE 19th International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS). Bulgaria, Sofia, 22–26 July 2019. Pp. 77–82. DOI: 10.1109/QRS.2019.00023

12. Lu P., Lu H. Application research of highly accelerated life test on civil aircraft airborne equipment // 2020 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Shanghai). China, Shanghai, 16–18 October 2020. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/PHM-Shanghai49105.2020.9280918

13. Yin L. Test suite generation for software reliability testing based on hybrid Musa and Markov method // 2020 7th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA). China, Xi'an, 28–29 November 2020. Pp. 509–514. DOI: 10.1109/DSA51864.2020.00087

14. Zhang X. Reliability test of aircraft integrated electronic assemblies based on virtual qualification method / X. Zhang, Z. Xie, Z. Wang, C. Lu // 2021 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Nanjing). China, Nanjing, 5–17 October 2021. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/PHM-Nanjing52125.2021.9613086

15. Pan G. A Reliability evaluation method for multi-performance degradation products based on accelerated degradation testing / G. Pan, D. Li, Q. Li, C. Huang, B. Mo // 2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). China, Chongqing, 17–19 June 2022. Pp. 1871–1875. DOI: 10.1109/ITAIC54216.2022.9836924

16. Jiang P. A new method for deriving reliability qualification test plans / P. Jiang, B. Wang, D. Zhang, J. Qi // 2022 13th International Conference on Reliability, Maintainability, and Safety (ICRMS). Hong Kong, Kowloon, 21–24 August 2022. Pp. 140–143. DOI: 10.1109/ICRMS55680.2022.9944586

17. Кузнецов С.В. Системы эксплуатационного контроля бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию МГТУ ГА. Москва, 25–26 мая

2021 г. М.: ИД Академии Жуковского, 2021. С. 239–242.

18. Кузнецов С.В. Выбор и обоснование параметров и показателей эффективности системы эксплуатационного контроля блоков бортового оборудования воздушных судов // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2022. № 4. С. 70–82. DOI: 10.51955/2312-1327_2022_4_70

References

1. Fedosov, E.A., Kosyanchuk, V.V., Selvesyuk, N.I. (2015). Integrated modular avionics. *Radioelektronnyye tekhnologii*, no. 1, pp. 66–71. (in Russian)

2. Levin, S.F. (2018). Level of verification of measuring instruments and a posteriori reliability of control. *Measurement Techniques*, vol. 61, no. 9, pp. 863–871. DOI: 10.1007/s11018-018-1516-0 (in Russian)

3. Maltsev, G.N., Yakimov, V.L. (2018). Reliability of multi-stage control over technical condition of tested objects. *Information and control systems*, no. 1 (92), pp. 49–57. DOI: 10.15217/issnl684-8853.2018.1.49 (in Russian)

4. Danilevich, S.B., Tretyak, V.V. (2018). Metrological supervision of control results validity. *Kontrol'. Diagnostika*, no. 7, pp. 56–60. DOI: 10.14489/td.2018.07.pp.056-060 (in Russian)

5. Bogoyavlenskiy, A.A. (2021). Methodology and practice of ensuring the uniformity of measurements in the operation of ground-based automated systems for diagnostics airborne equipment of aircraft. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no. 37, pp. 31–41. (in Russian)

6. Maslennikov, D.V., Kulichkova, I.V., Eremina, V.S., Klochkova, T.D. (2019). The effect of errors of measuring instruments the reliability of the control. In: *Sovremennyye tekhnologii: aktual'nyye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statey XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moscow: Nauka i Prosveshcheniye, pp. 113–116. (in Russian)

7. Chinyuchin, Yu.M., Solov'ev, A.S. (2020). Application of Markov processes for

analysis and control of aircraft maintainability. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 23, no. 1, pp. 71–83. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-1-71-83 (in Russian)

8. **Danilevich, S.B., Tretyak, V.V.** (2020). Influence of measurement error distribution the accuracy rates of the control. *Kontrol'. Diagnostika*, no. 7, pp. 48–52. DOI: 10.14489/td.2020.07.pp.048-052 (in Russian)

9. **Antonyuk, E.M., Antonyuk, P.E., Varshavskiy, I.E., Gvozdev, D.S.** (2022). On the reliability of control of adaptive information-measuring systems. In: *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam: sbornik materialov konferentsii*, vol. 1, pp. 234–236. (in Russian)

10. **Ragutkin, A.V., Stavrovskiy, M.E., Aleksandrov, I.A., Yurtsev, E.S.** (2022). Methods for increasing the reliability of digital systems performance monitoring. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*, no. 6, pp. 36–42. (in Russian)

11. **Okamura, H., Dohi, T.** (2019). On Kolmogorov-Smirnov test for software reliability models with grouped data. In: *2019 IEEE 19th International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS)*. Sofia, Bulgaria, 22–26 July, pp. 77–82. DOI: 10.1109/QRS.2019.00023

12. **Lu, P., Lu, H.** (2020). Application research of highly accelerated life test on civil aircraft airborne equipment. In: *2020 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Shanghai)*. Shanghai, China, 16–18 October, pp. 1–6. DOI: 10.1109/PHM-Shanghai49105.2020.9280918

13. **Yin, L.** (2020). Test suite generation for software reliability testing based on hybrid Musa and Markov method. In: *2020 7th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA)*. Xi'an, China, 28–29 November, pp. 509–514. DOI: 10.1109/DSA51864.2020.00087

14. **Zhang, X., Xie, Z., Wang, Z., Lu, C.** (2021). Reliability test of aircraft integrated electronic assemblies based on virtual qualification method. In: *2021 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Nanjing)*. Nanjing, China, 5–17 October, pp. 1–5. DOI: 10.1109/PHM-Nanjing52125.2021.9613086

15. **Pan, G., Li, D., Li, Q., Huang, C., Mo, B.** (2022). A reliability evaluation method for multi-performance degradation products based on accelerated degradation testing. In: *2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*. Chongqing, China, 17–19 June, pp. 1871–1875. DOI: 10.1109/ITAIC54216.2022.9836924

16. **Jiang, P., Wang, B., Zhang, D., Qi, J.** (2022). A new method for deriving reliability qualification test plans. In: *2022 13th International Conference on Reliability, Maintainability, and Safety (ICRMS)*. Kowloon, Hong Kong, 21–24 August, pp. 140–143 DOI: 10.1109/ICRMS55680.2022.9944586

17. **Kuznetsov, S.V.** (2021). Operational control systems for on-board equipment of civil aviation aircraft. In: *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva: sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letiyu MGTU GA*. Moscow: ID Akademii Zhukovskogo, pp. 239–242. (in Russian)

18. **Kuznetsov, S.V.** (2022). Election and substantiation of parameters and performance indicators of the in-service inspection system of onboard aircraft equipment units. *Crede Expert: Transport, Society, Education, Language*, no. 4, pp. 70–82. DOI: 10.51955/2312-1327_2022_4_70 (in Russian)

Сведения об авторе

Кузнецов Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов МГТУ ГА, s.kuznetsov@mstuca.aero.

Information about the author

Sergey V. Kuznetsov, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Head of the Aircraft Electrical Systems and Avionics Technical Operation Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, s.kuznetsov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию	30.06.2023	Received	30.06.2023
Одобрена после рецензирования	21.07.2023	Approved after reviewing	21.07.2023
Принята в печать	21.11.2023	Accepted for publication	21.11.2023