

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ДОСТОВЕРНОСТИ СРЕДСТВ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ИЗ УСЛОВИЙ ПРИЕМЛЕМОГО РИСКА

Л. Н. Чувычкин, А. А. Любовец

ФГКВБОУ ВО «ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

Рецензент д-р техн. наук, доцент В. А. Малышев

Ключевые слова: инструментальная достоверность контроля; система эксплуатационного контроля; средства контроля; полнота контроля; удельная стоимость контроля; эксплуатационный контроль; эффективность контроля.

Аннотация: Представлено обоснование требований к достоверности средств эксплуатационного контроля с целью уменьшения рисков от отказов авиационной техники в полете и затрат на проведение контрольных и диагностических операций на земле. Приведены формулы для расчета асимптотических оценок стоимости контроля, в том числе с использованием идеальных средств контроля и контроля органолептического.

Эксплуатация авиационной техники (АТ) неразрывно связана с рисками от ее отказов и наступления других, неблагоприятных с точки зрения безопасности и регулярности полетов событий. Работоспособное состояние АТ обеспечивается системой технического обслуживания и ремонта (ТО и Р). Для сложных систем бортового оборудования основу ТО как по временным, так и по финансовым затратам составляет наземный контроль работоспособности (КР) при подготовках к полетам. Основное назначение такого контроля состоит в том, чтобы выявить и устранить скрытые, необнаруженные в полетах отказы и не допустить выпуска самолетов в очередные полеты в неисправном состоянии.

Все операции КР и диагностирования (поиска места отказа) осуществляются в рамках системы эксплуатационного контроля (СЭК), под которой будем понимать совокупность объектов, применяемых средств и установленной программы контроля, а также персонала, выполняющего опе-

Чувычкин Леонид Николаевич – кандидат технических наук, профессор кафедры эксплуатации авиационного оборудования; Любовец Александр Александрович – адъюнкт кафедры эксплуатации авиационного оборудования, Lubovets@mail.ru, ФГКВБОУ ВО «ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, Россия.

рации КР и поиска места отказа. Эффективность СЭЖ определяется как качеством ее составных частей, так и характеристиками самолета и условиями его применения. Новые требования к АТ усложняют конструкцию самолетов, вызывают необходимость внедрения нового бортового оборудования, а также наличия эффективной программы эксплуатационного контроля для выявления скрытых отказов резервированных элементов систем и оборудования, предупреждения функциональных отказов систем в целом.

Все это существенно влияет на регулярность полетов и стоимость эксплуатации, так как при этом растут трудозатраты на поиск неисправностей в сложных резервированных системах, появляются ложные отказы. Количество последних по статистическим данным для системы «АВАКС» и инерциальной системы И-11 (самолет Ил-86) в 10 раз больше количества действительных отказов. Вследствие этого неоправданный съем оборудования для системы И-11 достигает 47 % от общего количества демонтированных блоков по предполагаемым неисправностям. Для самолета В-737-300 подтвердившиеся в мастерской отказы составляют только 46 %. Общий поток отказов электронного оборудования бомбардировщика В-1В и отечественных военных самолетов содержит порядка 30% ложных [1 – 3].

Приведенные данные подчеркивают актуальность задачи количественной оценки эффективности СЭЖ при создании нового типа воздушного судна (ВС) с учетом требований безопасности, готовности ВС к эксплуатации и экономичности. При заданных ограничениях затрат на эксплуатационный контроль решается обратная задача: определяются наилучшие с точки зрения затрат параметры СЭЖ. При этом контролируется допустимый уровень безопасности и регулярности полетов. Для разработки путей решения обратной задачи рассмотрим подробнее эксплуатацию АТ, представляющую собой состояния и процессы: функционирования АТ в полете; подготовки самолетов к полетам; контроля и восстановления свойств АТ. Отказы изделий авиационной техники при их эксплуатации обнаруживаются:

– в полете – экипажем без применения инструментальных средств контроля через последствия отказа (контроль функционирования), а также бортовыми средствами контроля (непрерывный контроль);

– на земле – бортовыми или наземными средствами контроля в процессе ТО при подготовках к полетам (наземный контроль).

При принятии решения о применении какого-либо средства контроля разработчик ВС должен среди прочих характеристик оценить его эксплуатационные характеристики и их влияние на общие эксплуатационные показатели ВС. Основными характеристиками средств контроля являются: вес, габариты, стоимость, вариант исполнения, элементная база, степень универсальности, характеристики безотказности, методической и инструментальной достоверности, продолжительность и трудозатраты на КР и поиск места отказа. Желательно при выборе средства контроля обеспечить две или более альтернативы.

Все возрастающая стоимость закупки и эксплуатации, как авиационной техники, так и средств эксплуатационного контроля, значительные убытки при ее функционировании в состоянии скрытого отказа и простое

при поиске места отказа требуют применения экономического критерия для оценки рисков недостоверного определения технического состояния. Поэтому за показатель экономической эффективности СЭК предлагается принять удельную суммарную стоимость контроля [4]. Для ее определения рассмотрим модель наземного контроля изделия АТ по налету ВС с учетом инструментальной достоверности, представленную на рис. 1. При этом считаем, что изделие отказывает только при функционировании в полете, а методическая достоверность контроля равна единице.

На рисунке 1 представлена модель, где показаны случайные величины и вероятности: η_r – случайная величина налета самолета от момента возникновения отказа до самопроявления отказа в r -м полете, $r = \overline{0, n-k}$; F_{ξ_s} – вероятность безотказной работы изделия в s -м полете $s = \overline{1, k}$; F_{η_r} – вероятность самопроявления отказа изделия в r -м полете, $r = \overline{0, n-k}$.

При реальной эксплуатации отказ изделия АТ, появившийся в случайный момент времени ξ , либо проявляется самостоятельно через время η в одном из полетов, либо обнаруживается при наземном КР с периодом контроля равным x часов налета. Применяемое средство контроля может обнаружить отказ при очередном КР с вероятностью p или признать отказавшее изделие АТ работоспособным с вероятностью $1-p$ (вероятность необнаруженного отказа $P_{НО}$), а работоспособное изделие – отказавшим с вероятностью q (вероятность ложного отказа $P_{ЛО}$).

Если при КР устанавливается, что изделие работоспособно, никаких дополнительных работ, связанных с контролем, не проводится и продолжается его эксплуатация. Если в результате контроля изделие признается неработоспособным (отказ, ложный отказ), а также после самостоятельного проявления отказа в полете проводится углубленный контроль дополнительными идеальными средствами контроля $p = 1, q = 0$ с поиском места

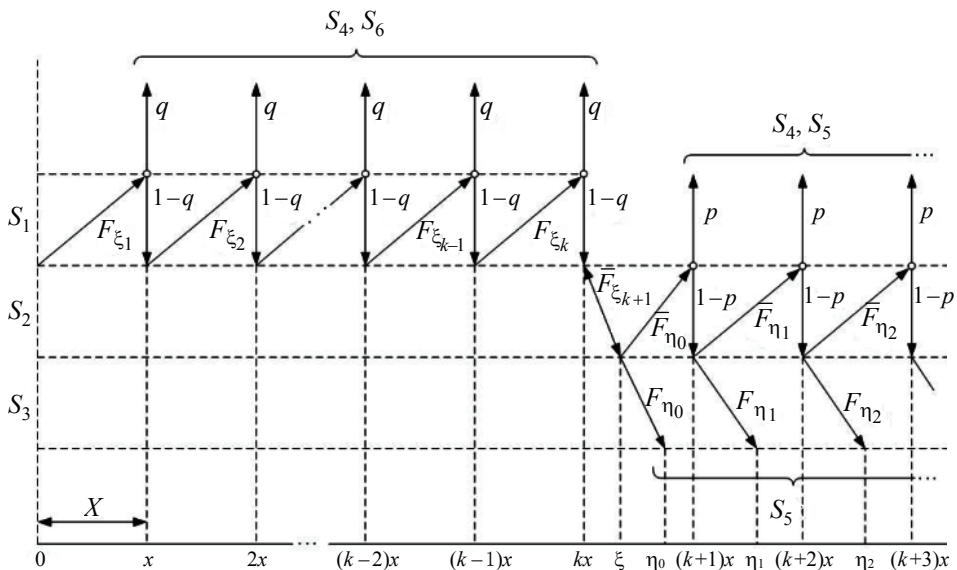


Рис. 1. Модель периодического контроля с учетом инструментальной достоверности

отказа и восстановлением путем замены, после чего процесс эксплуатации повторяется. В этом случае математическое ожидание (МО) налета до полного восстановления можно считать периодом регенерации и значение средней удельной стоимости контроля C рассчитывать как отношение МО финансовых затрат на проведение эксплуатационного контроля и ущерба от неблагоприятных событий за период регенерации к МО периода регенерации [5].

Неблагоприятными событиями являются отказы АТ (скрытые, обнаруженные, ложные). Первые требуют проведения планового КР перед полетом ВС, а при их самопроявлении в полете могут привести к досрочному прекращению полета и даже более серьезным последствиям. Отказы, обнаруженные в полете и при КР на земле, в том числе и ложные, требуют проведения мероприятий по их локализации и устранению. При определении риска от неблагоприятных событий необходимо учитывать не только вероятность этих событий, но также все их возможные последствия [6].

Причины, вызывающие финансовые затраты на проведение эксплуатационного контроля изделия за период регенерации, можно объединить в 6 групп:

- затраты на разработку, производство, техническое обслуживание, проверку, ремонт и модернизацию самих средств контроля;
- потери вследствие отказов изделия в полетах (досрочное прекращение полета, авария, катастрофа);
- затраты на проведение наземного КР изделия;
- поиск мест самопроявившихся в полете отказов изделия;
- проведение поиска мест отказов, обнаруженных на наземном КР;
- поиск ложных отказов изделия.

Полное восстановление изделия после отказа (ложного отказа) позволяет процесс эксплуатации считать альтернирующим процессом восстановления [2] с шестью возможными состояниями: изделие функционирует в работоспособном состоянии; в состоянии скрытого отказа; в состоянии явного отказа; проводится контроль работоспособности; поиск места отказа; поиск места ложного отказа. Связав затраты с нахождением изделия в каждом из состояний через коэффициенты стоимости по каждой причине затрат C_i , $i = 1, 2, \dots, 6$, получим суммарные затраты для проведения наземного контроля изделия на конечном интервале налета $(0, T)$

$$C_{\Sigma}(m, T, x) = \overline{C_1}M[t_n(m, T, x)] + \overline{C_2}M[N_{н.з.}(m, T, x)] + \overline{C_3}M[N_k(m, T, x)] + \overline{C_4}M[N_n(m, T, x)] + \overline{C_5}M[N_o(m, T, x)] + \overline{C_6}M[N_{л.о}(m, T, x)], \quad (1)$$

где m – число полетов; $\overline{C_1}$, $\overline{C_2}$, $\overline{C_3}$ – средние затраты, связанные с эксплуатацией средства контроля за час налета, срывом выполнения полетного задания, проведением одного наземного КР; $\overline{C_4}$, $\overline{C_5}$, $\overline{C_6}$ – средние затраты, связанные с поиском места отказа, проявившегося в полете, обнаруженного при КР, ложно признанного системой контроля; $M[t_n(m, T, x)]$ – МО налета; $M[N_{н.з.}(m, T, x)]$, $M[N_k(m, T, x)]$, $M[N_n(m, T, x)]$, $M[N_o(m, T, x)]$, $M[N_{л.о}(m, T, x)]$ – МО числа невыполненных полетных заданий из-за самопроявления отказов в полете, назем-

ных КР, проявившихся в полете отказов, обнаруженных при КР отказов и ложных отказов при проведении КР соответственно.

Переход к расчету асимптотической оценки показателя C на периоде регенерации при $T \rightarrow \infty$ наиболее просто осуществить при известных параметрах экспоненциальных законов распределения времени безотказной работы λ и времени самопроявления отказа μ :

$$C = c_1 + c_2 \alpha \left(\lambda \mu^2 \left(1 - e^{-\lambda x} \right) \left(1 - (1-p)e^{-\mu x} \right) - \lambda^2 \mu \left(1 - e^{-\mu x} \right) \left(1 - (1-p)e^{-\lambda x} \right) \right) + \\ + c_3 \alpha \left(\lambda \mu^2 e^{-\lambda x} \left(1 - (1-p)e^{-\mu x} \right) - \lambda^2 \mu e^{-\mu x} \left(1 - (1-p)e^{-\lambda x} \right) \right) + \\ + c_4 \alpha \left(\lambda \mu^2 \left(1 - e^{-\lambda x} \right) \left(1 - (1-p)e^{-\mu x} \right) - \lambda \mu^2 \left(1 - e^{-\mu x} \right) \left(1 - (1-p)e^{-\lambda x} \right) \right) + \\ + c_5 \alpha p \lambda^2 \mu \left(e^{-\lambda x} - e^{-\mu x} \right) + c_6 \alpha q e^{-\lambda x} \lambda \mu (\mu - \lambda) \left(1 - (1-p)e^{-\mu x} \right), \quad (2)$$

где $\alpha = \left(\mu^2 \left(1 - e^{-\lambda x} \right) \left(1 - (1-p)e^{-\mu x} \right) - \lambda^2 \left(1 - e^{-\mu x} \right) \left(1 - (1-p)e^{-\lambda x} \right) \right)^{-1}$.

Выражение (2) имеет шесть слагаемых, каждое из которых обусловлено соответствующей причиной затрат. При этом основной риск от скрытых отказов описывается вторым слагаемым, а от ложных отказов – шестым, которое прямопропорционально зависит от вероятности ложного отказа. Выражение для расчета C при идеальном контроле получено из (2) путем предельного перехода при $p \rightarrow 1, q \rightarrow 0$:

$$C = c_1 + (c_2 + c_4) \frac{\lambda \mu^2 \left(1 - e^{-\lambda x} \right) - \lambda^2 \mu \left(1 - e^{-\mu x} \right)}{\mu^2 \left(1 - e^{-\lambda x} \right) - \lambda^2 \left(1 - e^{-\mu x} \right)} + c_3 \frac{\lambda \mu^2 e^{-\lambda x} - \lambda^2 \mu e^{-\mu x}}{\mu^2 \left(1 - e^{-\lambda x} \right) - \lambda^2 \left(1 - e^{-\mu x} \right)} + \\ + c_5 \frac{\lambda^2 \mu \left(e^{-\lambda x} - e^{-\mu x} \right)}{\mu^2 \left(1 - e^{-\lambda x} \right) - \lambda^2 \left(1 - e^{-\mu x} \right)}. \quad (3)$$

Сравнение выражений (2) и (3) показывает влияние характеристик инструментальной достоверности на стоимость контроля и подтверждает вывод, что для снижения рисков от недостоверного контроля технического состояния учет требований контроле пригодности должен проводиться с самого начала проектирования – с этапа формирования облика будущего самолета. Оценка экономической эффективности эксплуатационного контроля позволит при этом рационально распределить совокупность имеющихся средств контроля и персонала по различным этапам ТО.

Для учета методической достоверности рассмотрим многоэтапную СЭК. В этом случае каждому j -му этапу ТО $j = 1, M$ соответствует j -й этап контроля, который будем характеризовать достоверностью контроля $D_j = D_{ij} D_{mj}$ и периодом его проведения, где D_{ij} – инструментальная достоверность контроля на j -м этапе, D_{mj} – методическая [7]. Поскольку методика контроля и принятые в ней критерии оценки технического состояния объекта контроля часто носят субъективный характер, то при дальнейших расчетах будем оценивать методическую достоверность наиболее существенной ее составляющей – полнотой контроля Q_k , характери-

зующей возможность выявления отказов в этом объекте при выбранном методе контроля его технического состояния. Одним из выражений, определяющих полноту контроля для простейшего потока отказов, является зависимость [7]

$$Q_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_0}, \quad (4)$$

где λ_k – суммарная интенсивность тех отказов в объекте, которые способен выявить алгоритм контроля его технического состояния; λ_0 – суммарная интенсивность отказов всех элементов указанного объекта.

Методическая достоверность $Q_k = 1$ обеспечивает возможность обнаружения любого отказа из множества всех возможных отказов объекта контроля. Однако увеличение Q_k до единицы приводит к существенному увеличению стоимости, сложности, затрат на эксплуатацию самого средства контроля и снижению его надежности, а также к увеличению времени подготовки самолетов к полету. В связи с этим наиболее часто выполняемый контроль объектов АТ при подготовках к полетам имеет полноту $Q_k \leq 1$.

Каждый последующий этап контроля объекта с суммарной интенсивностью отказов всех элементов объекта в целом Λ , как правило, выполняется с большим периодом контроля, чем предыдущий $x_{j+1} > x_j$, с большей полнотой контроля $Q_{j+1} > Q_j$ и вызывает большие затраты времени на контроль $t_{k,j+1} > t_{k,j}$. Обозначим полноту каждого этапа соответственно Q_1, Q_2, \dots, Q_M , причем $Q_1 < Q_2 < \dots < Q_M$. Тогда суммарная интенсивность отказов элементов объекта, которые дополнительно позволяет выявить j -й этап контроля по сравнению с предыдущим, определяется следующим образом:

$$\lambda_j = \Lambda(Q_j - Q_{j-1}), \forall j = \overline{1, M}. \quad (5)$$

Суммарная интенсивность отказов, которые не удастся выявить на последнем этапе контроля с помощью применяемых средств контроля, равна

$$\lambda_{M+1} = \Lambda(1 - Q_M). \quad (6)$$

Такие отказы будут обнаруживаться экипажем в полете при контроле функционирования, а затем устраняться после полета на земле. Средние удельные затраты можно получить из выражения (3) предельным переходом при $x \rightarrow \infty$, $c_1 = c_3 = c_5 = 0$

$$C = c_2 \frac{\lambda\mu}{(\lambda + \mu)} + c_4 \frac{\lambda\mu}{(\lambda + \mu)}. \quad (7)$$

Тогда суммарная интенсивность отказов всех элементов объекта в целом равна сумме интенсивностей отказов на всех этапах контроля

$$\Lambda = \sum_{j=1}^{M+1} \lambda_j. \quad (8)$$

С учетом ординарности потока отказов общая средняя удельная стоимость контроля C функциональной системы АТ может быть представлена в виде суммы затрат, связанных с эксплуатационным контролем «условных» подсистем на каждом этапе

$$C(\Lambda) = C_1(\lambda_1) + C_2(\lambda_2) + \dots + C_{M+1}(\lambda_{M+1}) = \sum_{j=1}^{M+1} C_j(\lambda_j). \quad (9)$$

В качестве иллюстрации запишем выражение для двухэтапной системы контроля: первый этап – контроль функционирования в полете экипажем с полнотой контроля $Q_1 = \frac{\lambda_1}{\Lambda}$; $Q_1 < 1$; второй этап – наземный периодический контроль бортовыми средствами с полнотой $Q_2 < 1$; $\lambda_2 = \Lambda(1 - Q_1)$; $\lambda_1 + \lambda_2 = \Lambda$ и инструментальной достоверностью $p_2 < 1$; $q_2 > 0$.

Потери, связанные с эксплуатацией каждой подсистемы, можно вычислить с помощью выражений для асимптотических оценок показателя C одноэтапной системы контроля при $Q_k = 1$. Общая средняя удельная стоимость C контроля всей системы составит

$$C(\Lambda) = C_1(\lambda_1) + C_2(\lambda_2), \quad (10)$$

где $C_1(\lambda_1)$, $C_2(\lambda_2)$ – рассчитанные по (7) и (2) средние удельные стоимости контроля функционирования в полете и работоспособности на земле соответственно.

При обосновании требований к характеристикам достоверности средств эксплуатационного контроля при создании нового типа ВС необходимо учесть следующие эксплуатационные параметры: сценарии применения и базирования; продолжительность полета и частота вылетов; варианты окружающей среды; ожидаемый срок службы; возможности и ограничения заказчика; интервалы техобслуживания с учетом интенсивности использования ВС.

Далее осуществляется процесс определения систем, важных для эксплуатационного контроля, основанный на ожидаемых последствиях отказа (с использованием инженерных оценок). По каждому из потенциальных отказов определяются их интенсивности, возможные последствия и ущерб без выполнения контроля. Все множество отказов распределяется по величине риска на группы по этапам контроля. Для каждой группы определяются интенсивности отказов, назначаются вид и возможные средства контроля. Затем в выражения (2), (3), (7) подставляются значения параметров и коэффициентов стоимости с учетом применяемых средств контроля в порядке возрастания их достоверности и стоимости. Полученный результат (10) сравнивается с величиной приемлемого риска.

Если расчетный риск больше приемлемого, нужно повышать характеристики инструментальной достоверности, в первую очередь снижать ве-

роятность необнаруженного отказа, исходя из условий безопасности полетов. Если расчетный риск не удается снизить до величины приемлемого даже при идеальной инструментальной достоверности, может потребоваться перераспределение отказов по этапам контроля, назначение новой полноты контроля инструментальными средствами и повторение расчетов.

Если невозможно выполнить условия приемлемого риска за счет повышения достоверности средств контроля, то целесообразно провести исследования при измененной программе контроля, ввести контрольные допуски на контролируемые параметры, доработать объекты контроля для повышения их надежности (ввести резервирование). Однако это скажется в свою очередь и на величине приемлемого риска.

Список литературы

1. Мышкин, Л. В. Прогнозирование развития авиационной техники: теория и практика / Л.В. Мышкин. – М. : ФИЗМАЛТИТ, 2006. – 304 с.
2. Колодежный, Л. П. Надежность и техническая диагностика : учеб. для слушателей и курсантов вузов ВВС / Л. П. Колодежный, А. В. Чернодаров. – М. : ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, 2010. – 452 с.
3. Управление техническим состоянием авиационной техники : учеб. пособие / А. Д. Артемов, [и др.] ; под ред. А. Д. Артемова. – М. : ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, 2009. – 195 с.
4. ГОСТ Р 53863–2010. Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Термины и определения. – Введ. 2011–07–01. – М. : Стандартинформ, 2011. – 24 с.
5. Викторова, В. С. Модели и методы расчета надежности технических систем / В. С. Викторова, А. С. Степанянц. – М. : ЛЕНАНД, 2014. – 256 с.
6. Половко, А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
7. Кондратенко, А. Н. Современные проблемы эксплуатационного контроля воздушных судов военного назначения / А. Н. Кондратенко // Сборник трудов НИИЭРАТ. – 2005–2006. – № 87. – С. 79 – 83.

References

1. Myshkin L.V. *Prognozirovanie razvitiya aviatsionnoi tekhniki: teoriya i praktika* [Forecasting of development of aviation technics: the theory and practice], Moscow: FIZMALIT, 2006, 304 p. (In Russ).
2. Kolodezhnyj L.P., Chernodarov A.V. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika* [Reliability and technical diagnostics], Moscow: VVA im. prof. N. E. Zhukovskogo i Yu. A. Gagarina, 2010, 452 p. (In Russ).
3. Artyomov A.D., Bagautdinov R.G., Matjuhina K.N., Muhtarov V.S., Tyurin S.P., Shumsky A.V. *Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem aviatsionnoi tekhniki* [Management of a technical condition of aviation technics: the Manual], Moscow: VVA im. prof. N. E. Zhukovskogo i Yu. A. Gagarina, 2009, 195 p. (In Russ).
4. Federal Agency on Technical Regulating and Metrology, *GOST P 53863-2010. Vozdushnyi transport. Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta aviatsionnoi tekhniki. Terminy i opredeleniya* [State Standards of the Russian Federation 53863-2010. Airtransport. Maintenance and repair system of aviation equipment. Terms and definitions], Moscow: Standartinform, 2011, 24 p. (In Russ).

5. Viktorova V.S., Stepanjants A.S. *Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem* [Models and methods of calculation of reliability of technical systems], Moscow: LENARD, 2014, 256 p. (In Russ).

6. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Bas of reliability theory], St. Petersburg: BHV-Peterburg, 2006, 704 p. (In Russ).

7. Kondratenko A.N. [Modern of a problem of operational control of military-oriented aircrafts], *Sbornik trudov NIIRAT* [The collection of works NIIRAT], 2005-2006, no. 87, pp. 79-83. (In Russ).

Rationale for the Requirements to Characteristics of Reliability of Operational Control Means of Aircraft Equipment in Conditions of the Acceptable Risk

L. N. Chuvychkin, A. A. Lyubovets

*Military Educational and Scientific Center of the Air Force
N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia*

Keywords: completeness of control; control devices; efficiency of control; operational control; reliability of control tools; specific cost of control; system of operational control.

Abstract: The article provides a rationale for the requirements to reliability of operational control tools to reduce risks from failures of the aircraft equipment in flight and costs of control and diagnostic operations on land. We propose to use the average specific cost of control as an indicator of economic efficiency of the system of operational control. The developed model of periodic land control on the aircraft flight hours considers the influence of probabilities of false and undetected failures as tool reliability indicators on the cost of control. The model of operational control of a complex system of the onboard equipment at multi-stage servicing allows using an additive cost index of control of conditional subsystems with various values of completeness of control at each stage. Formula for calculating the asymptotic estimates of cost control, including those for ideal control devices and organoleptic control are given. We propose a step-by-step guide for justification of requirements to reliability of control in conditions of acceptable risk.

© Л. Н. Чувычкин, А. А. Любовец, 2016