УДК 629.7/621.01

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ САМОЛЕТОВ

О. Г. Бойко, Е. А. Фурманова

Введение. Полные отказы функциональных систем самолетов (ФСС) чреваты катастрофами. Их вероятность не велика и по требованиям Норм летной годности не превышает $1\cdot10^{-9}$ ч$^{-1}$ [1]. Высокая безотказность ФСС обеспечивается использованием нагруженного резервирования и восстановления систем после каждого полета в случае реализации отказа.

В соответствии с документами [2, 3] расчет безотказности ФСС выполняется методами, основанными на использовании теоремы умножения вероятностей. Недостатки этих методов рассмотрены в работах [4, 5]. Здесь следует отметить, что указанные методы не учитывают дискретность отказов элементов, изменение структуры систем в процессе развития отказов и влияние восстановления.

Вместе с этим следует отметить, что:

– в статистической физике, задолго до создания теории надежности, были сформулированы постулаты и принципы решения задач статистическими методами. Постулат Макса Планка, в частности, гласит [6]: «Всякая конечная физическая система при рассмотрении ее статистическими методами должна представляться так, как будто она может находиться только в дискретных состояниях». Для ФСС такими состояниями являются: исправное, работоспособные с функциональными отказами и неработоспособное;

– опыт эксплуатации ФСС и выполненные нами эксперименты показывают, что потоки отказов в системах характеризуются постоянством средней наработки на отказ $\overline{T}$ (а следовательно, постоянным параметром потока отказов ω), т.е. являются стационарными пуассоновскими, а системы нестареющими [7, 8]. Следовательно, в качестве математической модели вероятности отказов элементов может быть принято распределение равномерной плотности вида

$$q(t)=\begin{cases} f(t)\cdot t & \text{при} \quad 0\le t<2\overline{T} \\ 1 & \text{при} \quad t\ge 2\overline{T} \end{cases}, \tag{1}$$

где плотность вероятности $f(t)$ будет иметь вид

$$f(t)=\begin{cases} 0 & \text{при} \quad t<0, \quad t>2\overline{T} \\ \dfrac{1}{2\overline{T}}, & 0\le t\le 2\overline{T} \end{cases}. \tag{2}$$

Целью данной работы является разработка методологического подхода к расчету безотказности ФСС, в котором теорема умножения вероятности не используется. Подход основан на представлении о том, что вероятность отказа элемента в ФСС определяется суммарным параметром потока отказов элементов работоспособной части системы и их предшествующей наработкой [9].

Основная часть. В рамках предлагаемого подхода рассмотрим метод оценки безотказности для системы общего резервирования, приведенной на рис. 1.

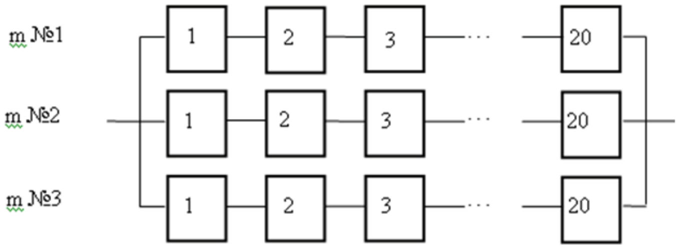

Рис. 1. Расчетная схема системы m = 3, n = 20

Система состоит из m = 3 параллельно включенных подсистем, каждая из которых содержит n = 20 последовательно соединенных элементов, имеющих одинаковые параметры потоков отказов $\omega = 2 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$. Такая схема является приближенным аналогом гидравлической системы самолета Ту-154М и обеспечивает наглядность при иллюстрации метода. Очевидно, что полный отказ системы достигается после отказа в ней трех элементов.

Оценка безотказности по предлагаемому методологическом подходу структурно состоит из трех этапов.

На первом этапе проводится анализ и подготовка исходных данных в соответствии с методикой ОСТ [2]. Результатом первого этапа будет расчетная схема надежности.

На втором этапе выполняется расчет интервалов времени, на которых с заданной вероятностью произойдут отказы в системе без ее восстановления.

На третьем этапе выполняется расчет наработок времени, на которых реализуются отказы в системе с учетом ее восстановлений, и вероятностей ее отказов за час полета.

Поскольку первый этап стандартный [2], то представление подхода начнем со второго этапа. На втором этапе сначала определяется суммарный параметр потока отказов системы как

$$\omega_{\Sigma 1} = n \cdot m \cdot \omega = 60\omega, \tag{3}$$

а, следовательно, суммарная плотность потока отказов будет иметь вид

$$f_{\Sigma}(t) = 0{,}5\omega_{\Sigma}. \tag{4}$$

В соответствии с (1) вероятность первого отказа в системе определится как

$$q_1(t) = f_{\Sigma}(t) \cdot t_1. \tag{5}$$

При стационарном процессе эксплуатации, в соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга, невозможно заранее знать, какой именно из элементов системы откажет на рассматриваемом отрезке времени. Следует обратить внимание на то, что в практике эксплуатации самолетов фиксируются только наработки на первый отказ элементов на самолете в целом и в отдельных системах. При этом фиксируется только время, и никогда не отмечается, какой именно элемент отказывает.

Из (5) находится время t_1 как граница отрезка [0, t_1], на котором реализуется первый отказ в системе с вероятностью $q_1(t)$ в виде

$$t_1 = \frac{q_1(t)}{f_{\Sigma}(t)}. \tag{6}$$

Следует учесть, что при стационарном процессе эксплуатации все моменты времени равноправны, и поэтому за начало отсчета (за 0) можно принять любой произвольный момент времени. Таким образом, время t_1 выражено в (6) через заданное значение вероятности первого отказа $q_1(t)$, параметры системы n и m и параметры потоков отказов элементов ω. Поскольку отказы в системе события достоверные, то вероятность реализации отказа на рассматриваемом отрезке положим равную единице $q_1(t)$ = 1, и, таким образом, граница отрезка [0, t_1], на котором произойдет первый отказ в системе, может быть найдена как выражение (7):

$$t_1 = \frac{1}{f_{\Sigma}(t)} = \frac{1}{60 \cdot 10^{-4}} = 166 \text{ ч.} \tag{7}$$

Очевидно, что первый отказ в системе общего резервирования приводит к отказу одной из трех подсистем, так как элементы в ней соединены последовательно. При этом структура системы на отрезке [0, t_1] изменится, что приведет к изменению ω_{Σ}, а следовательно, суммарной плотности потока $f_{\Sigma}(t)$ системы.

В оставшихся двух работоспособных подсистемах плотность суммарного потока определится в виде

$$f_{\Sigma 2} = n(m-1) \cdot 0{,}5 \cdot \omega. \tag{8}$$

Аналогично вероятность отказа следующего (второго) элемента с учетом предыдущей наработки системы t_1 определится в виде

$$q_2(t) = f_{\Sigma 2}(t) \cdot t_2 = n(m-1)0,5 \cdot \omega \cdot t_2\,, \tag{9}$$

где

$$t_2 = t_1 + \Delta t_2. \tag{10}$$

Приращение времени между первым и вторым отказами Δt_2 из (10) с учетом $q_2(t) = 1$ выразится как

$$\Delta t_2 = \frac{q_2(t) - n\left(m-1\right)0,5 \cdot \omega \cdot t_1}{n\left(m-1\right)0,5 \cdot \omega} = 84 \text{ ч.} \tag{11}$$

После второго отказа в рассматриваемой системе останется работоспособной только одна подсистема, содержащая 20 элементов. Через вероятность ее отказа выразится приращение времени до третьего отказа как

$$\Delta t_3 = \frac{q_3(t) - n(m-2) \cdot 0,5 \cdot \omega (t_1 + \Delta t_2)}{n(m-2) \cdot 0,5 \cdot \omega} = 250 \text{ ч.} \tag{12}$$

Рассчитанные на втором этапе значения t_1, Δt_2, Δt_3 определяют границы временных интервалов, на которых с заданной вероятностью реализуются отказы в системе при стационарном процессе эксплуатации и отсутствии ее восстановления. Полученные значения t_1, Δt_2, Δt_3 являются исходными данными для расчета безотказности системы с учетом ее восстановления на третьем этапе.

Расчеты, выполненные для приближенной системы-аналога гидросистемы Ту-154М, показали, что с вероятностью $q(t) = 1$ первая подсистема откажет до времени $t_1 = 166$ ч; вторая – на интервале от [t_1, 250] ч; система в целом откажет на интервале [t_2, 500] ч.

Графически процесс изменения вероятности отказа системы может быть представлен в виде, приведенном на рис. 2. Поскольку рассматриваемая система состоит из трех подсистем, то отказ каждой из них увеличивает вероятность отказа всей системы на $\Delta Q = 0,333$. В связи с этим времени t_1 будет соответствовать вероятность отказа системы $Q(t_1) = 0,333$. Времени t_2 будет соответствовать $Q(t_2) = 0,666$, а вся система с вероятностью $Q(t_3) = 1$ откажет до времени $t_3 = 500$ ч соответственно.

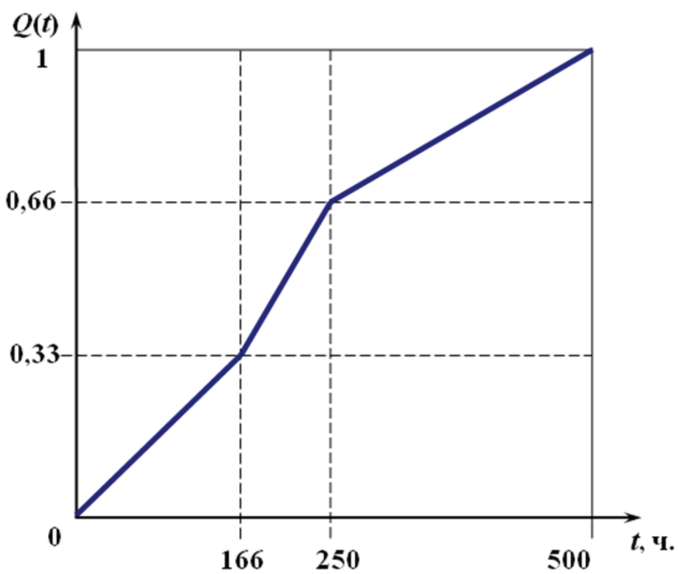

Рис. 2. Изменение вероятности отказа системы-аналога гидросистемы самолета Ту-154М без учета восстановления

Характер изменения вероятности отказа, показанный на рис. 2, полностью отражает процесс выхода из строя подсистем изменением угла наклона последующих участков на графике. Следует иметь в виду, что при стационарном процессе эксплуатации в соответствии с моментом времени, принятым за начало отсчета, может быть построено поле таких зависимостей, как на рис. 2.

По российским статистическим данным налет на один отказ какого-либо агрегата на самолете в целом составляет: для Ту-154М – 33 ч, Ту-134А –23 ч, Ил-86 – 27 ч, Ил-76 – 7 ч соответственно. Поскольку на самолете Ту-154М отказывали элементы нескольких систем, а аналог гидросистемы, рассмотренный выше, приближенный, то полученное значение налета на отказ элемента в гидросистеме, равное 166 ч, следует признать близким к действительному.

Для высоконадежных ФСС время t_1, получаемое по статистическим данным, фиксируемым в серийной эксплуатации, является единственным расчетным показателем, дающим возможность подтвердить правомерность любого методологического подхода.

На третьем этапе метода выполняются расчеты изменения безотказности системы с учетом ее восстановления и вероятности ее отказа за час полета.

При построении метода учтено, что вследствие резервирования один отказ в системе самолета в полете на безопасность полета особого влияния не оказывает. Но существует вероятность реализации за время полета и других отказов, таких, что система может потерять работоспособность, что приведет к катастрофе. Если число отказов не катастрофично, то после завершения полета система будет восстановлена на земле. Поэтому время восстановления системы следует рассматривать состоящим из двух частей: времени полета с отказавшим элементом $T_{\text{по}}$ и времени восстановления системы на земле $T_{\text{вост.з}}$:

$$T_{\text{вост}} = T_{\text{по}} + T_{\text{вост.з}}\,. \tag{13}$$

Поскольку время восстановления системы на земле не оказывает влияния на безопасность полета, то в расчетах используется только время $T_{\text{по}}$.

При стационарном процессе эксплуатации изменение надежности в функциональной системе циклично и является следствием многократных повторений «отказов–восстановлений». Таким образом, наработку восстанавливаемой системы можно представить в виде совокупности таких циклов. Тогда продолжительность цикла «один отказ–восстановление» в системе выразится как

$$t_{\text{ц}}^{1} = t_1 + T_{\text{по}}\,. \tag{14}$$

Через некоторое конечное множество таких циклов в полете могут реализоваться два отказа. Циклограмма времен отказов и восстановлений в системе до наступления события двух отказов за полет приведена на рис. 3.

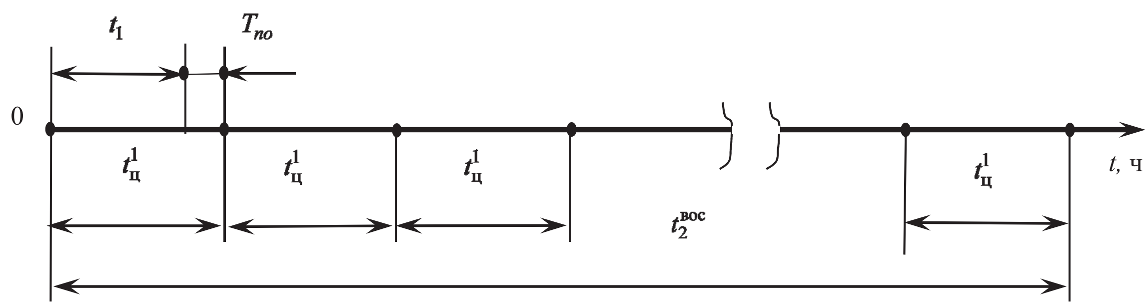

Рис. 3. Циклограмма процесса отказов–восстановлений до реализации второго отказа в системе

Число циклов «один отказ–восстановление» в системе должно быть таким, чтобы сумма времен $T_{\text{по}}$ каждого из них стала равной Δt_2. Это обеспечивает возможность определить число циклов как

$$k_2 = \frac{\Delta t_2}{T_{\text{по}}}, \tag{15}$$

и выразить через него наработку системы $t_2^{\text{вос}}$ в соответствие с рис. 3 в виде

$$t_2^{\text{вос}} = t_{\text{ц}}^1 \cdot k_2 = \left(t_1 + T_{\text{по}}\right)\frac{\Delta t_2}{T_{\text{по}}}. \tag{16}$$

Число циклов отказ–восстановление, которые реализуются до совместных отказов за полет трех элементов, подобно (15), выразится в виде

$$k_3 = \frac{\Delta t_3}{T_{\text{по}}}, \tag{17}$$

а время реализации трех отказов, т.е. отказ всей системы определится как

$$t_3^{\text{вос}} = \left(t_{\text{ц}}^2 + T_{\text{по}}\right)\frac{\Delta t_3}{T_{\text{по}}} \tag{18}$$

или в развернутом виде

$$t_3^{\text{вос}} = \left[\left(t_1 + T_{\text{по}}\right)\frac{\Delta t_3}{T_{\text{по}}} + T_{\text{по}}\right] \cdot \frac{\Delta t_3}{T_{\text{по}}}. \tag{19}$$

В соответствие с (16) и (19) величина времени $T_{\text{по}}$ оказывает непосредственное влияние на наработки $t_2^{\text{вос}}$ и $t_3^{\text{вос}}$ и, следовательно, на надежность систем. При $T_{\text{по}} = 0$ времена $t_2^{\text{вос}}$ и $t_3^{\text{вос}}$ стремятся к бесконечности, т.е. при мгновенном восстановлении система становится безотказной.

Значения наработок t_1, $t_2^{\text{вос}}$ и $t_3^{\text{вос}}$ обеспечивают возможность определения вероятности возникновения как функциональных, так и полного отказов в восстанавливаемой системе за час полета. Учитывая, что каждый отказ в рассматриваемой системе увеличивает вероятность ее отказа на $\Delta Q = 0{,}333$, можно оценить вероятность отказа на 1 ч полета при наработке системы t_1 в виде

$$Q_1(1) = \frac{\Delta Q}{t_1} = \frac{0{,}333}{t_1} = 2 \cdot 10^{-3}\ \text{ч}^{-1}, \tag{20}$$

при наработке системы $t_2^{\text{вос}}$ в виде

$$Q_2(1) = \frac{2\Delta Q}{t_2^{\text{вос}}} = \frac{0{,}666}{t_2^{\text{вос}}} = 4{,}75 \cdot 10^{-5}\ \text{ч}^{-1}, \tag{21}$$

и при наработке системы $t_3^{\text{вос}}$ в виде

$$Q_3(1) = \frac{1}{t_3^{\text{вос}}} = 2{,}85 \cdot 10^{-7}\ \text{ч}^{-1}. \tag{22}$$

В соответствии с [2, 3] вероятность отказа за 1 ч полета $Q(1)$ определяется только на отрезке времени [0, 1ч], т.е. за первый час полета. Такую оценку трудно признать представительной, поскольку $Q(t)$ является нелинейной функцией времени и, следовательно, $Q(1)$ будет меняться в процессе налета часов. Приведенная оценка $Q_3(1)$ по (22) определяет вероятность отказа за час интегрально, во всем диапазоне наработки ФСС от 0 до $t_3^{\text{вос}}$. Но в этом диапазоне момент реализации отказа остается никак не определен.

Если в расчетных выражениях (6), (11) и (12) задать ряд одинаковых значений для вероятностей отказов элементов $q_1(t) = q_2(t) = q_3(t)$, например, 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1, то будет получен ряд значений времен отказа системы $t_3^{\text{вос}}$, соответствующих вероятностям отказа системы $Q(t) = 0{,}2$;

04; 06; 0,8 и 1. Это обеспечит возможность построить графическую зависимость изменения вероятности отказа системы с учетом ее восстановления $Q(t)$, а по ней и зависимость плотности вероятности отказа от времени, и определить математическое ожидание времени $\left\langle t^{\text{отк}} \right\rangle$ до отказа системы. Тогда математическое ожидание вероятности отказа системы за 1 час полета будет определено как

$$\left\langle Q_3(1) \right\rangle = \frac{1}{\left\langle t^{\text{отк}} \right\rangle}. \quad (23)$$

Эта оценка вероятности отказа восстанавливаемой системы за час полета является более представительной, по сравнению с показанной ранее.

Предлагаемый методологический подход обеспечил возможность построения решения задач для оценки надежности систем с различным видом резервирования, в том числе с раздельным резервированием и систем, расчет которых не сводится к схеме последовательно-параллельного соединения.

Расчет таких систем имеет две отличительные особенности. Первая состоит в том, что при выходе из строя элемента в системе ее суммарный параметр потока отказов уменьшается только на параметр потока отказов этого отказавшего элемента [10].

Второе отличие состоит в том, что отказ таких систем может реализоваться по различным путям (сценариям) развития отказов элементов. В связи с этим для каждого сценария необходимо определять и учитывать эти вероятности при расчете времен до отказа системы. Эти методы подробно изложены в работе [11].

Заключение. Предлагаемый подход позволяет определять временные интервалы наступления событий отказов в резервированной системе при стационарном процессе эксплуатации, учитывает изменение структуры и восстановление, а также обеспечивает возможность расчета вероятностей отказа на час полета.

Предложенная оценка математического ожидания вероятности отказа системы за час полета является по существу математическим ожиданием вероятности катастрофической ситуации за час полета.

Новый подход обеспечивает возможность по новому решать вопросы оптимизации функциональных систем самолетов гражданской авиации.

Список литературы

1. АП-25. Авиационные правила. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. – М. : МАК. Авиаиздат, 2004. – 240 с.
2. ОСТ 1 00132-97. Надежность изделий авиационной техники. Методы количественного анализа безотказности функциональных систем при проектировании самолетов и вертолетов. – 70 с.
3. SAE ARP 4761. Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on civil Airborne Systems Equipment. USA. – 269 p.
4. Бойко, О. Г. Надежность функциональных систем самолетов гражданской авиации : моногр. / О. Г. Бойко. – М. : РАН, 2009. – 119 с.
5. Бойко, О. Г. Проблемы и перспективы методов расчета надежности сложных функциональных систем / О. Г. Бойко, Л. Г. Шаймарданов // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики : материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. «АНТЭ-2011». – Казань : КазГТУ-КАИ, 2011. – Т. 1. – С. 24–30.
6. Трайбус, М. Термостатика и термодинамика / М. Трайбус ; пер. с англ. под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия, 1970. – 504 с.
7. Дедков, В. К. Компьютерное моделирование характеристик надежности нестареющих восстанавливаемых объектов / В. К. Дедков, Н. А. Северцев // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. – Т. 1. – С. 368–370.
8. Дедков, В. К. Прогностика и косвенное прогнозирование надежности технических объектов / В. К. Дедков // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. – Т. 1. – С. 108–110.
9. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ / Б. В. Гнеденко. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
10. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 75–79.

11. Бойко, О. Г. Об одном из направлений оптимизации структуры функциональных систем самолетов / О. Г. Бойко, Е. А. Фурманова // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики : материалы Междунар. науч.-техн. конф. «АНТЭ-2013». – Казань : КНИТУ-КАИ, 2013. – С. 73–79.

УДК 629.7/621.01

Бойко, О. Г.

Методология оценки вероятности катастрофических отказов функциональных систем самолетов / О. Г. Бойко, Е. А. Фурманова // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2(6). – С. 7–13.

Бойко Оксана Геннадьевна
кандидат технических наук, доцент,
кафедра технической эксплуатации
летательных аппаратов и двигателей,
Сибирский государственный аэрокосмический
университет имени академика М. Ф. Решетнева
(660014, Россия, Красноярск, проспект имени газеты
«Красноярский рабочий» 31)
(391) 233-15-51
E-mail: bouko1962@yandex.ru

Boyko Oksana Gennad'evna
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of technical manual aircraft and engines,
Siberian State Aerospace University
named after academician M. F. Reshetnev,
(660014, 31 avenue named after newspaper
«Krasnoyarskiy rabochiy», Krasnoyarsk, Russia)

Фурманова Евгения Андреевна
ассистент,
кафедра технической эксплуатации
летательных аппаратов и двигателей,
Сибирский государственный аэрокосмический
университет имени академика М. Ф. Решетнева
(660014, Россия, Красноярск, проспект имени газеты
«Красноярский рабочий» 31)
(391) 233-15-51
E-mail: furmula@mail.ru.

Furmanova Evgeniya Andreevna
assistant,
sub-department of technical manual aircraft and engines,
Siberian State Aerospace University
named after academician M. F. Reshetnev,
(660014, 31 avenue named after newspaper
«Krasnoyarskiy rabochiy», Krasnoyarsk, Russia)

Аннотация. Рассмотрен новый методологический подход к расчету безотказности восстанавливаемых резервированных систем, в котором не используется теорема умножения вероятностей. Новый подход основан на предположении о том, что при стационарном процессе эксплуатации вероятность отказа элемента определяется суммарным параметром потока отказов элементов работоспособной части системы и их предшествующей наработкой. Особенностями методологического подхода являются возможности оценки временных интервалов, на которых с заданной вероятностью реализуются отказы в системе. На основании нового подхода разработаны методы оценки безотказности функциональных систем самолетов. Расчет безотказности выполняется без учета и с учетом восстановления системы. Метод учитывает изменение структуры в системе по мере реализации в ней отказов и дает оценку вероятностей ее отказов за час полета. В работе показана зависимость безотказности от времени полета с отказом. Приведено решение задачи расчета безотказности функциональной системы с общим нагруженным резервированием.

Abstract. The new methodological approach is considered in the article. This new approach may be applied to calculate restorable redundant systems infallibility. Probability theory of multiplication is not used in this approach. The new approach is based upon assumption that during stationary exploitation process, the element refusal probability may be defined by summary of elements refusals flow parameter of the workable system part and elements preview working hours. The features of methodological approach are possibilities of time intervals estimation. In these intervals the system refusals may be realized with given probability. Based on the new approach the airplanes functional systems infallibility estimation methods are developed. The infallibility calculation may be performed with and without taking into account the system recovery. The method considers structure changing in system, as the refusals in system may be realized. The method gives the estimation of system refusal probabilities per flying hour. The dependence of infallibility from flight time with refusal is considered.
The solution of functional system infallibility calculation task, meaning the system with active redundancy which is currently running, is presented.

Ключевые слова: функциональная система, безотказность, резервирование, восстановление, вероятность на час полета.

Key words: functional system, reliability, redundancy, recovery, the probability for an hour flight.