

В. Л. Медведев, О. Г. Бойко, А. Г. Зосимов, Л. Г. Шаймарданов

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ САМОЛЕТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ МАТЕРИАЛАМ ЭКСПЛУАТАНТА

Рассмотрены вопросы определения надежности функциональных систем самолетов по статистическим материалам эксплуатанта в прямых показателях, нормируемых Нормами летной годности. Предложена методика оценки надежности функциональных систем как в среднем по парку, так и для конкретных экземпляров самолетов эксплуатанта.

В настоящее время в традиционно сложившейся системе оценок надежности авиационной техники гражданской авиации (ГА) используются косвенные показатели оценки надежности. К ним можно отнести такие показатели, как средняя наработка на отказ, количество отказов на 1 000 часов налета (K_{1000}) [1] и их разновидности. Отслеживание динамики изменения этих показателей в функции календарного времени обеспечивает возможность для разработки и принятия мер по поддержанию надежности авиационной техники и ее летной годности. Летная годность определяется ее нормами [2], которые представляют требования государства к надежности авиационной техники как к основе обеспечения безопасности полетов. В Нормам летной годности (НЛГ) надежность определена вероятностью появления в полете особых ситуаций различной тяжести, вызванных отказами авиационной техники. Нормируется катастрофическая, аварийная и сложная ситуация. Так, вероятность возникновения катастрофической ситуации определена как практически невероятная с частотой возникновения не более чем $1 \cdot 10^{-7}$ на 1 ч полета для самолета в целом и $1 \cdot 10^{-8}$ на 1 ч полета для отдельных систем самолета.

В зарубежной практике эксплуатанты, по мере накопления опыта, приобретают право самостоятельно разрабатывать программы технической эксплуатации, сертифицировав их в установленном порядке. Перевод имеющегося российского самолетного парка на стратегию эксплуатации по фактическому техническому состоянию и введение в эксплуатацию самолетов нового поколения приближает отечественную гражданскую авиацию к общемировым нормам. Государственным научно-исследовательским институтом гражданской авиации (ГосНИИ ГА) выпущен документ, дающий российским эксплуатантам возможность для разработки и сертификации программ технической эксплуатации авиационной техники [3]. Эти программы включают стратегии и режимы технического обслуживания, призванные поддерживать летную годность, т. е. безотказность и долговечность, по мере их уменьшения в процессе эксплуатации.

Для обоснованного подхода при формировании таких программ необходимо контролировать

надежность авиационной техники в прямых оценках определяемых нормами летной годности. В применении норм для оценки надежности парка самолетов эксплуатантов и отдельных экземпляров есть ряд методически не решенных вопросов. Рассмотрим эти вопросы более подробно.

Прежде всего следует иметь в виду, что при расчете надежности функциональных систем парка самолетов эксплуатанта, определяется вероятность безотказной работы $P(t)$ отказа $Q(t)$ при налете t . При этом нормируемая вероятность безотказной работы за 1 ч полета при рассматриваемом налете определится в виде

$$q = \frac{Q}{T}. \quad (1)$$

Зависимость $Q(t)$, как правило, нелинейна (рис. 1), и выражение (1) определяет q как тангенс угла наклона секущей за весь период T . В начале периода надежность существенно выше, чем в конце, и формула (1) оценивает ее среднее значение за весь период T . Если же решается вопрос о продлении ресурсов агрегатам функциональной системы сверх межремонтных, то целесообразно оценить надежность системы в конце периода T . Очевидно, что такую оценку можно выполнить в виде тангенса угла наклона касательной к кривой $Q(t)$ в точке с абсциссой, равной T . Как показано ниже, при выполнении мониторинга надежности функциональных систем экземпляра самолета эта оценка является единственным возможной.

Агрегаты функциональных систем экземпляра самолета после определенного налета, вследствие их замены по различным причинам, имеют далеко не одинаковую наработку. Поэтому определение вероятности безотказной работы системы на 1 ч полета по выражению (1) представляется некорректным. Как показано в [4], попытка приведения к 1 ч налета вероятности безотказной работы системы по надежности агрегатов, определенной на 1 ч полета, приводит к ошибке, равной T^{n-1} , где n – число параллельно соединенных (резервированных) агрегатов. При $T = 10\,000$ ч и $n = 4$ ошибка составит $10\,000^3$.

Кроме того, при приведении вероятности безотказной работы к 1 ч полета по выражению (1) следует обратить внимание на тот факт, что оно правомерно лишь в определенном диапазоне изменения вероятности отказа. При больших значе-

ниях она, по мере увеличения наработки T , имеет перегиб и асимптотически приближается к 1 (см. рис. 1). Вследствие этого у систем с малой надежностью вероятность отказа на 1 ч полета, определенная по выражению (1), проходит через максимум и затем уменьшается (рис. 2), хотя вероятность отказа катастрофически приближается к 1. В этом случае при определении вероятности отказа на 1 ч полета по касательной к кривой $Q(t)$, ее значения при малых и больших наработках могут оказаться одинаковыми, что совершенно не соответствует действительному состоянию безотказности систем. Для высоконадежных систем точка перегиба кривой $Q(t)$ (см. рис. 1) находится далеко за пределами ресурсов систем и самолета в целом.

В статистические материалы эксплуатанта заносятся все отказы и неисправности агрегатов и комплектующих изделий, потребовавшие их снятия или восстановления работоспособности (регулирования и т. п.). В связи с этим при определении оценок надежности агрегатов и влияния их

отказов и неисправностей на надежность систем необходимо выполнять тщательный инженерный анализ. Например, в гидросистеме самолета Ту-154М установлены гидронасосы ПМ-89А(Д), имеющие две разновидности отказов: разрушение корпуса насоса и разрушение приводной рессоры. При разрушении корпуса гидрожидкость системы, в которой он установлен, теряется и система полностью выходит из строя. В этом случае гидронасос в расчетной схеме надежности должен быть включен последовательно. При разрушении приводной рессоры гидросистема остается работоспособной. Гидронасос ПМ-89А(Д) резервирован в гидросистеме 1 таким же насосом, в гидросистемах 2 и 3 – насосными станциями НС-46-2 и в расчетной схеме должен включаться параллельно с ними. Последовательное и параллельное включение насоса в расчетную схему должно осуществляться с оценками надежности, определяемыми статистикой рассмотренных разновидностей отказов.

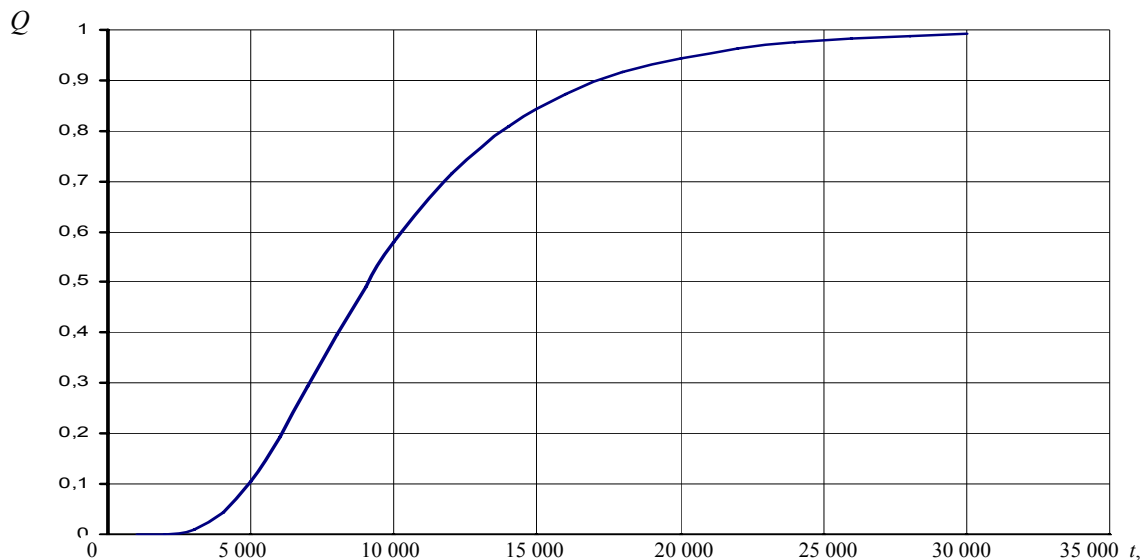


Рис. 1. Зависимость вероятности отказа гидросистемы Ту-154М при $K_{1\ 000} = 0,2$ для всех агрегатов

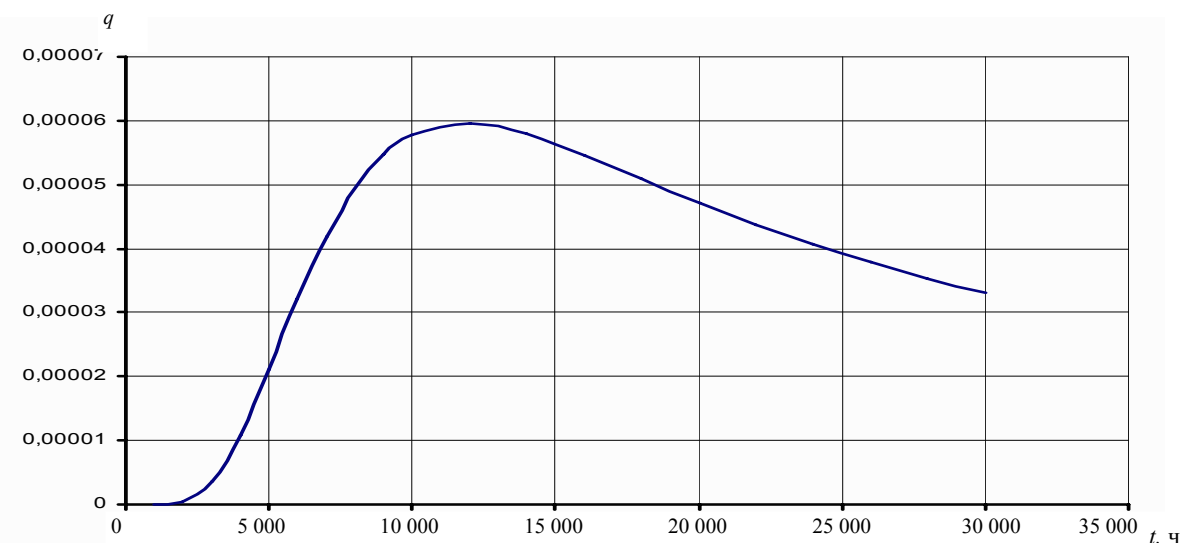


Рис. 2. Зависимость вероятности отказа гидросистемы Ту-154М на 1 ч полета при $K_{1\ 000} = 0,2$ для всех агрегатов

Реализацию предложенных рекомендаций, постановку и решение некоторых других проблемных вопросов рассмотрим на примере анализа надежности гидросистемы самолета Ту-154М. Гидросистема Ту-154М имеет полное трехкратное резервирование и выполнена в виде гидросистем 1, 2 и 3.

Гидросистемы 2 и 3 аналогичны друг другу. Гидросистема 1 отличается тем, что в ней установлены два насоса НПО ПМ-89А(Д), два гидроаккумулятора и два гасителя пульсаций. Статистические характеристики отказов агрегатов системы при налете парка самолетов за пять лет, равном 121 631 ч, приведены в табл. 1. Анализ функциональной схемы гидросистемы и последствий отказов ее агрегатов дает возможность представить расчетную схему ее надежности в виде, показанном на рис. 3. При этом имеется возможность исследовать надежность гидросистем 1, 2 и 3 как по отдельности, так и всей гидросистемы самолета, имея в виду параллельность работы этих систем.

Число отказов агрегатов приведенное в табл. 1, не достаточно для построения зависимости интен-

сивности отказов $\lambda(t)$ в функции налета часов. При этом для определения вероятностей отказов агрегатов использована рекомендуемой в [5] точечная оценка в виде параметра потока отказов ω .

В соответствии с приведенной расчетной схемой и параметрами потока отказов (см. табл. 1) математические модели вероятности отказов для гидросистем 1, 2 (рис. 4) и гидросистемы в целом имеют следующий вид:

$$Q_1 = 1 - [1 - (1 - \exp - 1,23 \cdot 10^{-5} \cdot t)^2 \times (1 - \exp - 2 \cdot 10^{-6} \cdot t)^2] \exp - 4 \cdot 10^{-6} \times t \cdot \exp - 6,4 \cdot 10^{-6} \cdot t \cdot \exp - 4,8 \cdot 10^{-6} \cdot t, \quad (2)$$

$$Q_2 = 1 - [1 - (1 - \exp - 1,23 \cdot 10^{-5} \cdot t) \times (1 - \exp - 2 \cdot 10^{-6} \cdot t) (1 - \exp - 8,2 \cdot 10^{-6} \cdot t)] \times \exp - 2 \cdot 10^{-6} \cdot t \cdot \exp - 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot t \times \exp - 4,8 \cdot 10^{-6} \cdot t, \quad (3)$$

$$Q = Q_1 \cdot Q_2, \quad (4)$$

где Q_1 , Q_2 , Q – вероятности отказов для гидросистемы 1, гидросистемы 2 и гидросистемы в целом соответственно.

Таблица 1

Статистические характеристики отказов агрегатов гидросистемы

Наименование агрегата	Последствия отказа	Число отказов	Налет на отказ, ч	Параметр потока отказов ω	Число агрегатов на экземпляре
Гидронасос ПМ-89А(Д)	Отказ сист.	1	486 524	$2 \cdot 10^{-6}$	4
	Отказ агр.	6	81 087	$1,23 \cdot 10^{-5}$	
Насосная станция НС-46-2	Отказ сист.	0	∞	0	2
	Отказ агр.	2	121 631	$8,2 \cdot 10^{-6}$	
Гидроаккумулятор	Отказ сист.	0	∞	0	4
	Отказ агр.	1	486 524	$2 \cdot 10^{-6}$	
Гидрокран ГА-165	Отказ сист.	1	608 155	$1,6 \cdot 10^{-6}$	5
	Отказ агр.	2	304 077	$3,2 \cdot 10^{-6}$	
Гидрошланг	Отказ сист.	2	608 155	$2 \cdot 10^{-6}$	9
	Отказ агр.	0	∞	0	

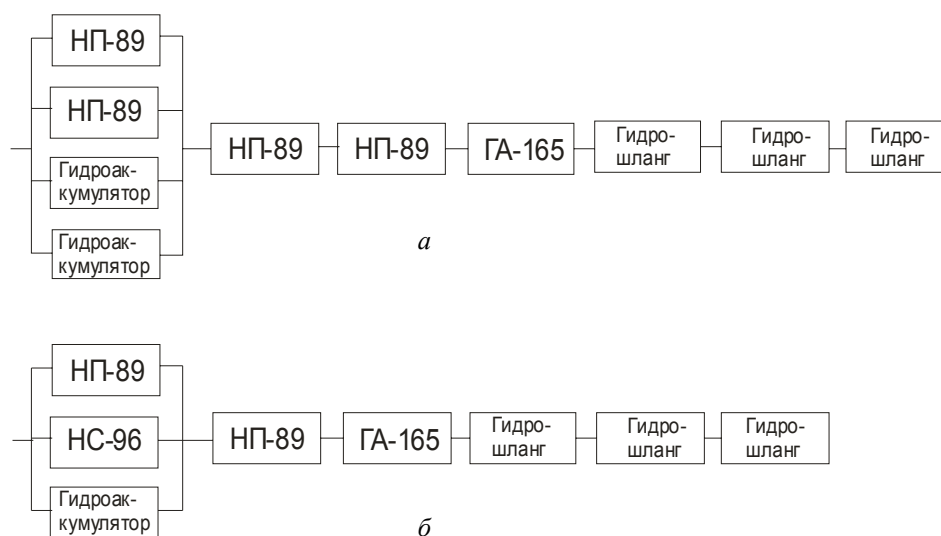


Рис. 3. Расчетная схема гидросистемы 1 (а); 2 и 3 (б)

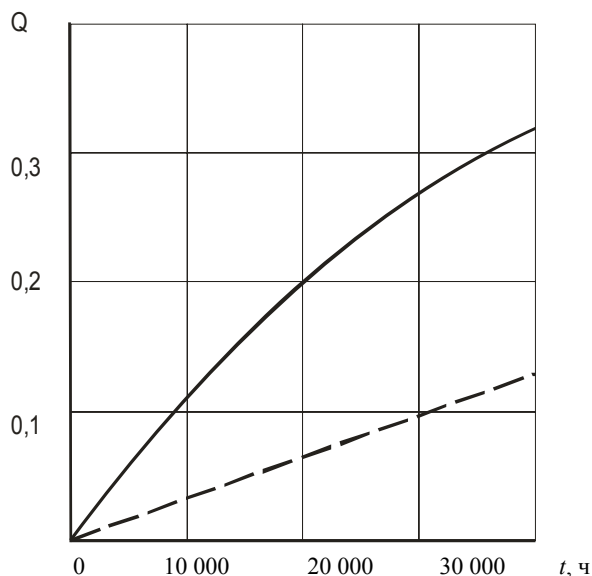


Рис. 4. Расчетные значения вероятностей отказа: — гидросистемы 1; ----- гидросистемы 2

Приведенные ниже значения вероятностей отказа при параллельной работе гидросистемы 2 и 3 и гидросистем 1, 2 и 3 (рис. 5) еще не дают возможности оценить соответствие надежности гидросистемы Нормам летной годности при различных значениях налета часов. Для получения таких оценок необходимо привести полученные вероятности к 1 ч полета. Ранее мы отмечали, что это можно выполнить по тангенсу угла наклона секущей (по секущей), учитывая предыдущие состояния и по тангенсу угла наклона касательной (по касательной), получая зависимость мгновенных значений вероятности отказа на 1 ч полета в функции налета (рис. 6).

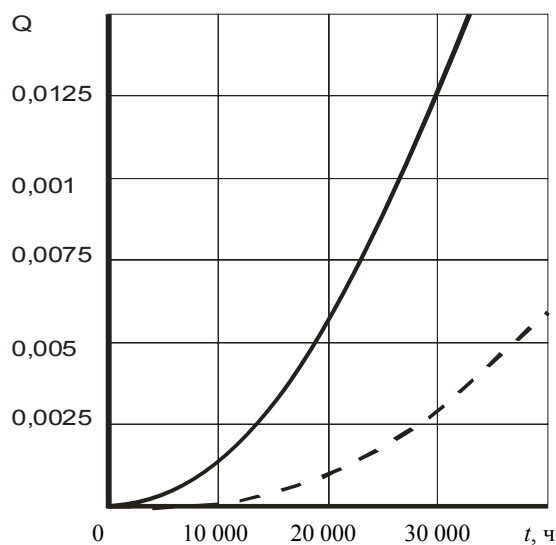


Рис. 5. Зависимость вероятностей отказа от налета при совместной работе: — гидросистем 2 и 3; ----- гидросистем 1, 2 и 3

На основании вышесказанного и рис. 6 можно сделать вывод о том, что при определении веро-

ятности отказа на 1 ч полета по секущей надежность гидросистемы удовлетворяет требованиям НЛГ во всем диапазоне часов межремонтного ресурса ее агрегатов. А при определении вероятности отказа на 1 ч полета по касательной, результат хуже и требования НЛГ удовлетворяются только в пределах 5 000 летных часов.

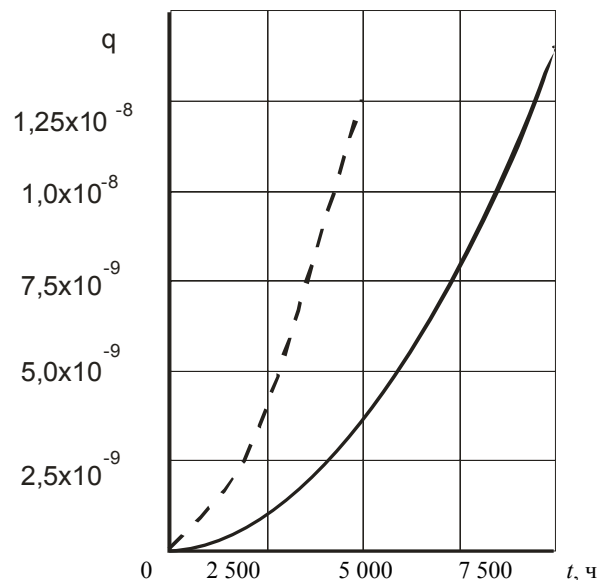


Рис. 6. Зависимость вероятностей отказа на 1 ч полета гидросистемы самолета от налета часов: — по секущей; ----- по касательной

Необходимо отметить, что в проведенных исследованиях для всех агрегатов гидросистемы задавался одинаковый налет, соответствующий его значениям по оси абсцисс на рис. 5, 6. В действительности же на экземплярах воздушных судов разные агрегаты имеют различные наработки в пределах ресурсов. Поэтому представленные результаты характеризуют нижнюю границу средней по парку самолетов эксплуатанта надежности гидросистемы.

Еще одним из направлений выполненных авторами исследований явился анализ возможности построения процедуры отработки ресурсов агрегатами функциональных систем таким образом, чтобы при обеспечении соответствия требованиям НЛГ выявить возможности эксплуатации ресурсных агрегатов и агрегатов с продленными ресурсами. Для этого авторами были рассчитаны вероятности безотказной совместной работы гидросистемы 1, агрегаты которой начинают отработку ресурсов с нулевой наработки, и гидросистем 2 и 3, которые при этом предварительно отработали 10 000 ч (рис. 7). И в этом случае вновь проявляется неоднозначность толкования результатов при определении вероятности отказов на 1 ч полета по секущей (рис. 8). Но эта неоднозначность связана не с методом определения $q(t)$ по $Q(t)$, а с временным фактором, при котором нет однозначности в отсчете времени отработки гидросистем. В расчете заложено условие, что в мо-

мент, принятый за начало отсчета наработки, гидросистемы 2 и 3 уже имели налет по 10 000 ч, а налет агрегатов гидросистемы 1 принят равным нулю. Поэтому при определении вероятности отказа на 1 ч полета мы можем отнести вероятность отказа к текущему по оси абсцисс времени либо к этому времени, по увеличенному на 10 000 ч. При этом оценки надежности на 1 ч полета становятся существенно различными (см. рис. 8).

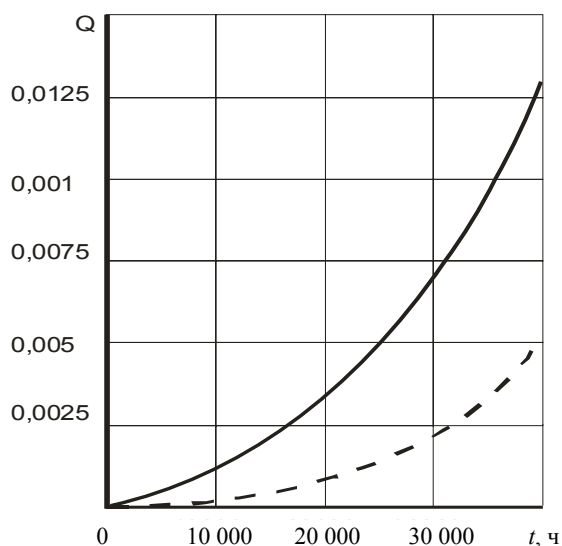


Рис. 7. Зависимость вероятностей отказа гидросистемы от наработки при работе гидросистемы 1 с 0 ч и гидросистемы 2 и 3 с 10 000 ч: — — отсчет t с 0 ч; - - - - отсчет t с 10 000 ч

Представленные оценки надежности (см. рис. 7, 8) содержат заданную авторами в 10 000 ч разницу в наработках агрегатов гидросистем 1, 2 и 3, при этом наработки агрегатов в данных системах приняты одинаковыми. Такой анализ дает возможность оценить надежность систем при варьировании наработками агрегатов, но только в среднем по парку. Но пассажиров же везет конкретный экземпляр самолета (борт), и в его системах отклонения наработок от средних значений в большую либо в меньшую сторону могут быть весьма существенными.

В настоящее время в гражданской авиации введена сертификация не только типа самолета,

но и отдельных экземпляров. Экземпляры находятся в ведении эксплуатантов и от того, настолько качественно осуществляется техническое обслуживание, зависит их летная годность. Сертификация экземпляра направлена главным образом на контроль качества технического обслуживания. Но вопросы летной годности с позиций надежности в прямых показателях, нормируемых в НЛГ, при сертификации экземпляра не рассматриваются. Однако, располагая параметрами потока отказов, определенными по парку самолетов (см. табл. 1), расчетными схемами гидросистемы (см. рис. 3) и наработками агрегатов на экземплярах самолетов в работе, можно выполнить оценку надежности гидросистем, например, для четырех самолетов (табл. 2).

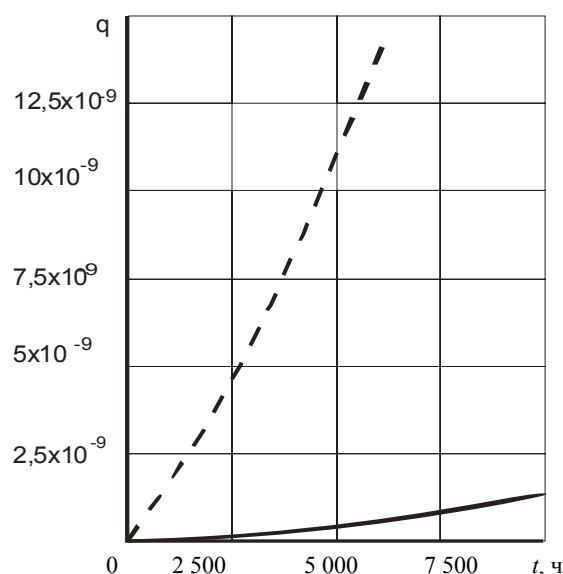


Рис. 8. Вероятности отказов системы на 1 ч полета, определенные по секущим к кривой $Q(t)$: — — отсчет времени с 10 000 ч; - - - - отсчет времени с 0 ч

Таблица 2

Параметры надежности гидросистемы экземпляров самолетов

Бортовой номер самолета	Налет, ч	Вероятность отказа, Q	Расчет вероятности отказа на 1 ч полета	
			По касательной	По секущей
85672	12 804	$1,17 \cdot 10^{-5}$	$6,93 \cdot 10^{-9}$	$9,13 \cdot 10^{-10}$
85682	12 386	$5,04 \cdot 10^{-6}$	$4,02 \cdot 10^{-9}$	$3,24 \cdot 10^{-10}$
85694	19 972	$5,47 \cdot 10^{-9}$	$3,03 \cdot 10^{-11}$	$2,74 \cdot 10^{-13}$
85702	21 438	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$3,54 \cdot 10^{-8}$	$6,53 \cdot 10^{-9}$

Во всех предшествующих случаях расчета надежности строилась зависимость вероятности отказа от времени $Q = f(t)$, а затем при определенных t к ней восстанавливалась секущая либо касательная и в виде тангенса угла их наклона определялись зависимости от времени вероятностей

отказа на 1 ч полета. Но при мониторинге надежности экземпляра может быть получено только одно значение вероятности отказа Q (назовем его Q_m), положение которого не определено по временной координате. Поэтому, используя метод секущей, мы можем отнести его к налету самолета с начала эксплуатации (см. табл. 2) либо после последнего ремонта. Определение вероятности отказа на 1 ч полета по первому или второму значению налета самолета не отражает действительного состояния надежности рассматриваемой системы, агрегаты которой имеют налеты t_i , весьма слабо связанные с налетом самолета.

Предложенный в данной статье метод расчета вероятности отказа на 1 ч полета с использованием тангенса угла наклона касательной, лишен отмеченных выше недостатков. Для его реализации при мониторинге надежности системы экземпляра самолета к налету ее агрегатов t_i задаются приращения $\pm\Delta t$, одинаковые для всех агрегатов. Это обеспечивает возможность расчета вероятности отказа $Q_{i+\Delta}$ при налете $t_i + \Delta t$ и $Q_{i-\Delta}$ при налете $t_i - \Delta t$. Тогда вероятность отказа системы на 1 ч полета может быть определена в виде

$$q = \frac{Q_{i+\Delta} - Q_{i-\Delta}}{2\Delta t}. \quad (5)$$

Это значение вероятности отказа на 1 ч полета оценивает ее величину непосредственно по состоянию системы на момент мониторинга ее надежности. Значения вероятностей отказа системы экземпляров самолетов, приведенные в табл. 2 в графе «По касательной», определены по представленной выше методике, которая обеспечивает

возможность для анализа надежности функциональных систем экземпляра самолета при продлении ресурсов его агрегатам, а также для разработки обоснований по изменению режимов замен либо технического обслуживания агрегатов, при условии обеспечения надежности системы в соответствии с требованиями НЛГ.

Библиографический список

1. Информационно-справочные и аналитические материалы по основным вопросам в области поддержания летной годности гражданских воздушных судов / Упр. поддержания лет. годности Федер. авиац. службы Рос. Федерации. М., 1998. 137 с.
2. АП-26. Авиационные правила. Нормы летной годности / Межгос. авиац. комитет. М., 1989. 265 с.
3. Руководство для конструкторов и эксплуатантов по разработке и сертификации программ технического обслуживания и ремонта функциональных систем ВС (РДКЭ) / Летно-исслед. ин-т. им. М. М. Громова. М., 1993. 64 с.
4. Бондаренко, В. Г. Вопросы методологии обеспечения надежности, летной годности и безопасности полетов самолетов гражданской авиации / В. Г. Бондаренко, Л. Г. Шаймарданов // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева / под ред. проф. Г. П. Белякова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005. Вып. 6. С. 109–113.
5. Воробьев, В. Г. Надежность и эффективность авиационного оборудования / В. Г. Воробьев, В. Д. Константинов. М.: Транспорт, 1995. С. 248.

V. L. Madvedev, O. G. Boyko, A. G. Zosimov, L. G. Shaymardanov

THE ESTIMATING METHOD OF THE CIVIL AVIATION AIRPLANES FUNCTIONAL SYSTEMS RELIABILITY WITH A HELP OF THE USER'S STATISTIC MATERIALS

The determination of reliability of the airplanes functional systems with a help of the user's statistic materials in direct indexes, which are normed by the norms of the flying suitability are considered. The estimation method of reliability of the airplanes functional systems is proposed. It may be used for the whole airplane park and for the concrete user's airplanes.