

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

## НАДЕЖНОСТЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ САМОЛЕТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

*Рассмотрены вопросы старения и изменения надежности функциональных систем длительно эксплуатирующихся самолетов гражданской авиации.*

По данным [1], на конец 2004 г. парк российских магистральных самолетов насчитывал 1 500 экземпляров, что составило 11 % мирового парка. При этом на долю России в мировом пассажирообороте приходится лишь 2 %. Имеющийся парк обладает избыточностью по отношению к объемам перевозок в 4...5 раз. По прогнозам [2], избыток авиационной техники сохранится до 2006–2007 гг., по оптимистичному прогнозу – до 2010 г. Такая же избыточность авиационной техники, хотя и вследствие иных причин, в настоящее время наблюдается и в зарубежных авиакомпаниях. Вследствие этого и в России, и за рубежом сложилась необходимость в эксплуатации стареющего парка самолетов. Старение самолетов может быть как моральным, так и физическим. Моральное старение определяется в первую очередь ухудшением экономических показателей по мере поступления в эксплуатацию самолетов последующих поколений. Физическое старение же проявляется в выработке ресурсов в летных часах, посадках, циклах либо в исчерпании календарных сроков службы.

Самолет в целом принято рассматривать состоящим из планера со средствами его механизации, двигателей и функциональных систем.

Планер и двигатели – наиболее значительные и ответственные элементы самолета. Двигатели являются настолько самостоятельными объектами в плане разработки, постройки и научного обеспечения, что ими занимается отдельная отрасль промышленности и область исследований – двигателестроение. Проблемам обеспечения надежности планера и ее сохранения при длительной эксплуатации также посвящено достаточно большое число серьезных исследований, лежащих в основе такой отрасли авиационной промышленности, как самолетостроение.

В тоже время исследованиям надежности функциональных систем длительно эксплуатирующихся самолетов уделено существенно меньше внимания. Во многом это связано с тем, что разработчики и изготовители агрегатов и комплектующих изделий функциональных систем работают в различных отраслях науки и техники. Но, тем не менее, влияние функциональных систем на надежность авиационной техники и безопасность полетов весьма существенно: около 75 % общего числа отказов, приводящих к авиапроисшествиям по всем типам самолетов, связано именно с конструктивно-производственными дефектами функциональных систем. И здесь следует иметь в виду,

что из-за архитектурной сложности этих систем поиск отказов и их устранение сопряжены с большими потерями времени и средств.

Ресурсы агрегатов и комплектующих изделий функциональных систем существенно меньше, чем ресурсы планера. Планер самолета представляет собой статическую конструкцию, агрегаты же функциональных систем выполнены в виде механических, электрогидравлических, гидромеханических, пневматических и подобных им машин, механизмов, аппаратов. В связи с этим старение планера и функциональных систем имеет различную физическую и организационно-техническую основу. Различия физической природы старения планера и систем достаточно очевидны и пояснений не требуют. А организационно-технические различия процессов старения определяются объемами, содержанием и периодичностью работ, выполняемых для поддержания надежности планера и функциональных систем при их длительной эксплуатации.

Функциональные системы содержат в своих структурах большое число агрегатов, имеющих различные физические основы функционирования и конструктивное исполнение. Так, на самолетах Ту-154М и Ту-154Б только до безопасного отказа эксплуатируются 934 агрегата [3]. И если изучение старения систем построить только на рассмотрении процессов деградации структурных элементов агрегатов и их выходных характеристик, то этот путь может и оказаться крайне трудным, если не тупиковым. Но если допустить, что ресурсы: назначенный, до первого ремонта и межремонтный – в определенной степени характеризуют возможности агрегатов выполнять свои функции, то степень отработки агрегатами их ресурсов можно принять за основу оценки старения функциональных систем. Определим ее в виде среднего значения отработки ресурсов агрегатами системы:

$$t_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (1)$$

где  $n$  – число агрегатов в системе;  $\bar{t}_i$  – относительная отработка ресурса  $i$ -м агрегатом,

$$\bar{t}_i = \frac{t_i}{T_i}, \quad (2)$$

здесь  $t_i$  – наработка агрегата,  $T_i$  – ресурс агрегата (назначенный, до первого ремонта, межремонтный). Отсчет наработки  $t_i$  необходимо согласовать с началом отработки соответствующего ресурса.

При определении средних относительных отработок ресурсов агрегатами функциональных систем авторами была использована информация о наработках самолетов и агрегатов по парку из 15 экземпляров самолетов Ту-154М и Ту-154Б (табл. 1, рис. 1). Но условия сбора и хранения информации о наработках самолетов и агрегатов их систем в авиакомпаниях обеспечивают получение этих значений только в рассматриваемый момент времени, в связи с этим не удается выдержать равные интервалы распределения значений по оси абсцисс – оси наработки планера самолета (см. рис. 1). Поэтому каждой точке фактически соответствует средняя относительная отработка ресурсов агрегатами системы определенного экземпляра самолета.

Авторами получены подобные зависимости для гидросистемы (рис. 2), системы управления и механизации планера (рис. 3), агрегатов шасси (рис. 4) самолетов Ту-154М и Ту-154Б и трансмиссии вертолета Ми-8МТВ (рис. 5). Эти зависи-

мости позволяют сделать ряд существенных выводов.

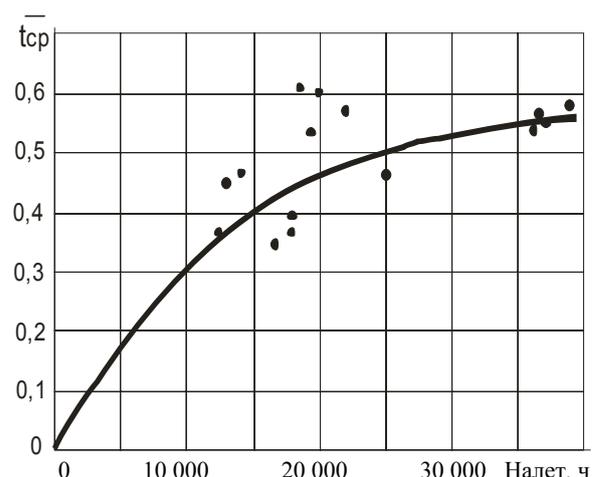


Рис. 1. Зависимость средней относительной наработки агрегатов топливной системы самолета Ту-154М от налета

Таблица 1

Значения относительных отработок ресурсов для агрегатов топливной системы ЛА Ту-154М и Ту-154Б

№ борта	Налет, ч, с начала эксплуатации	$\tau_{нар} / T_{рес}$
85201	36 406	0,559
85489	37 950	0,582
85505	36 175	0,572
85529	35 866	0,561
85672	12 804	0,444
85678	18 857	0,601
85679	25 078	0,465
85682	12 386	0,369
85683	18 021	0,374
85694	19 972	0,597
85702	21 438	0,568
85704	16 567	0,345
85708	18 027	0,397
85720	19 542	0,537
85759	14 564	0,466

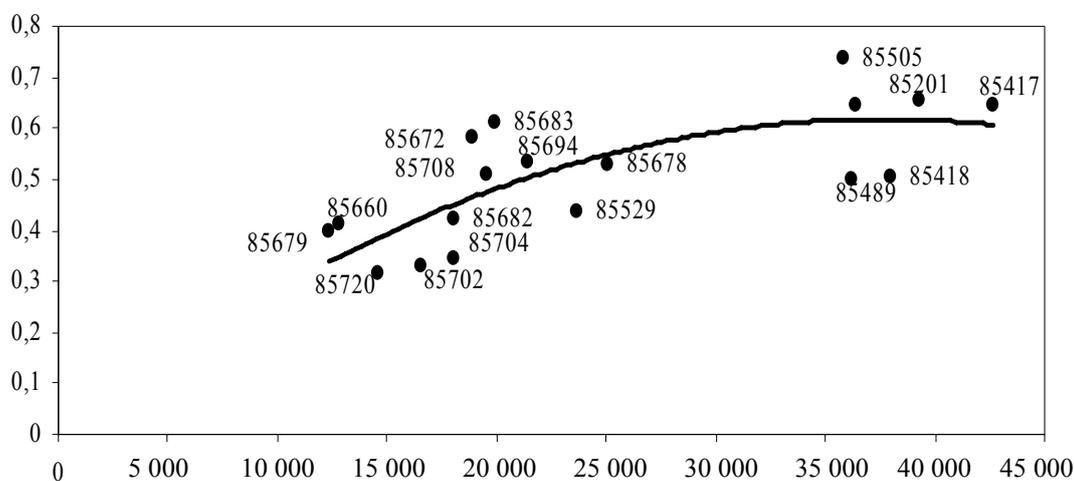


Рис. 2. Зависимость средней относительной наработки агрегатов гидросистемы от налета самолета Ту-154М и Ту-154Б

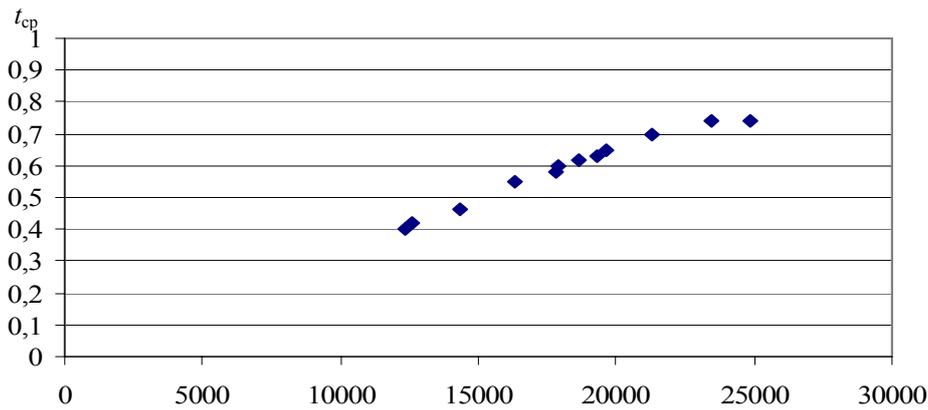


Рис. 3. Относительная обработка ресурсов агрегатами системы управления и механизации Ту-154М и Ту-154Б

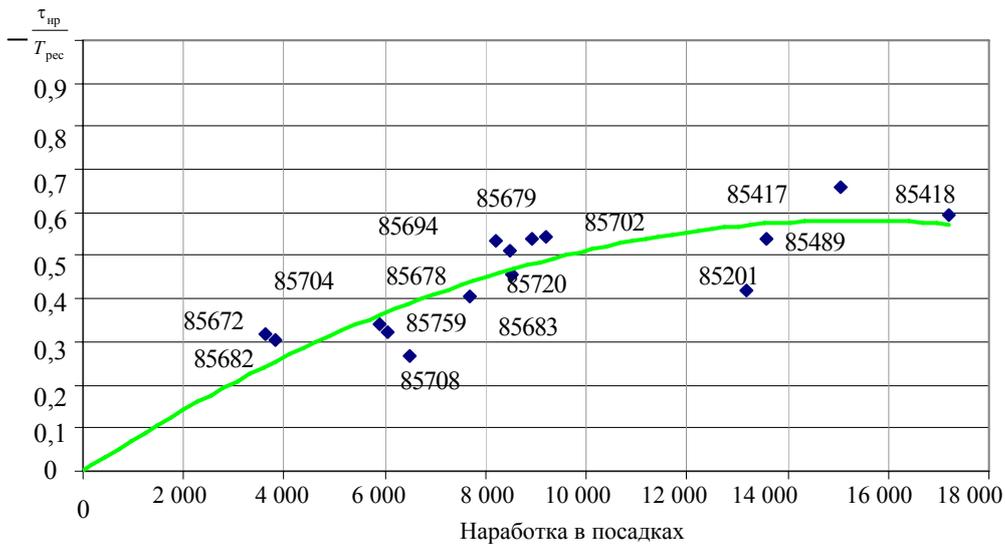


Рис. 4. Средняя относительная обработка ресурсов агрегатами шасси

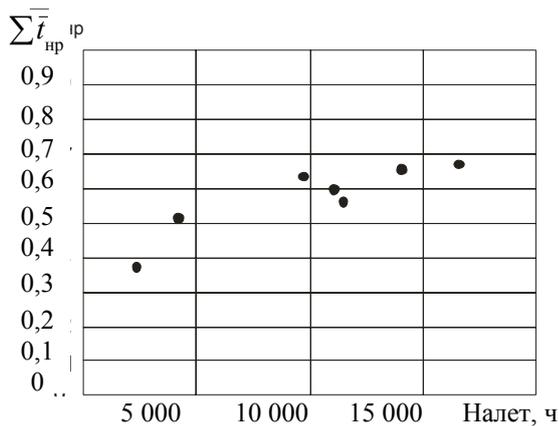


Рис. 5. Старение агрегатов трансмиссии вертолета Ми-8 по назначенному ресурсу

Прежде всего отметим, что агрегаты и комплектующие изделия функциональных систем по мере увеличения налета планера также увеличивают среднюю по системе обработку ресурсов, но только до величины 0,4...0,6 от их ресурсов. Следовательно, функциональные системы стареющих самолетов не стареют. Еще один важный вывод: налет

планера, при котором стабилизируется относительная обработка агрегатами систем, зависит от ресурсов агрегатов. Ресурсы агрегатов вертолета существенно меньше, чем самолета, и стабилизация их средней относительной обработки наступает уже при 3 000 ч налета вертолета (рис. 5).

Стабилизация средней относительной обработки ресурсов у агрегатов функциональных систем определяется случайными процессами их плановых (по обработке ресурсов) и неплановых (вследствие отказов, неисправностей и т. п.) замен.

Отсутствие старения у функциональных систем дает основание для того, чтобы ставить вопрос об изменении как стратегий, так и режимов их технического обслуживания. Для получения обоснованного ответа на эти вопросы необходимо оценить надежность функциональных систем и ее изменение в процессе длительной эксплуатации самолетов.

При оценке надежности агрегатов и функциональных систем авторами была использована статистическая информация крупной авиакомпании, эксплуатирующей 15 самолетов Ту-154М

и Ту-154Б. Обработка этой информации выполнена по известным методикам [4; 5].

Здесь следует сделать важное замечание. Даже крупнейший эксплуатант России не может предоставить полную статистическую информацию для исследования вопросов надежности авиационной техники, в связи с чем в ряде случаев приходится мириться с ограниченностью объема этой информации.

После того, как был получен достаточный объем статистики отказов, строили ранжированные временные диаграммы, а затем гистограммы, которые аппроксимировали для получения зависимостей интенсивностей отказов  $\lambda(t)$  в функции наработки. При этом вероятность отказа агрегата  $P(t)$  рассчитывали по выражению

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (3)$$

В практике эксплуатации самолетов часто наблюдаются агрегаты, имеющие малое число отказов, недостаточное для определения интенсивности отказов в функции времени, а также агрегаты, не имеющие отказов за весь период эксплуатации.

В первом случае определение вероятности безотказной работы выполнено по выражению [5]

$$P(t) = e^{-\omega t}, \quad (4)$$

где  $\omega$  – параметр потока отказов, определяемый по средней наработке на отказ  $T_{cp}$  в виде

$$\omega = \frac{1}{T_{cp}} \quad (5)$$

Для агрегатов, не имеющих отказов, рассчитывалось значение верхней доверительной границы вероятности отказа  $q_2$  с доверительной вероятностью  $\beta$  по выражению [6]

$$q_2 = 1 - \sqrt[n]{2 - \beta}, \quad (6)$$

где  $n$  – число опытов.

Функциональные системы, как мы уже отмечали, включают в свой состав большое число агрегатов и имеют как полное, так и частичное резервирование. Например, гидросистема самолетов Ту-154М и Ту-154Б имеет трехкратное полное резервирование и шестикратное резервирование источников высокого давления. При расчете надежности систем их структурные схемы заменяли эквивалентными, а те, в свою очередь, – расчетными системами.

Результаты расчета надежности системы кондиционирования воздуха (рис. 6), гидросистемы (рис. 7) и топливной системы (рис. 8) позволяют сделать вывод, что приведенные оценки надежности функциональных систем получены при задании их агрегатам одинаковых наработок летных часов вплоть до максимальных, предусматриваемых нормативно-технической документацией. Но, как было показано ранее, одинаковая наработка агрегатов не реализуема. Более того, средняя по системе отработка ресурсов агрегатами не превышает 0,6. В связи с этим данные оценки надежности следует рассматривать как их нижние границы, характеризующие надежность функциональных систем в среднем по парку конкретного эксплуатанта. Кроме того, использование выражения (4) для оценки надежности агрегатов, имеющих малое число отказов, задает падающую характеристику их надежности, в то время как интенсивность их отказов  $\lambda(t)$  вполне может быть уменьшающейся.

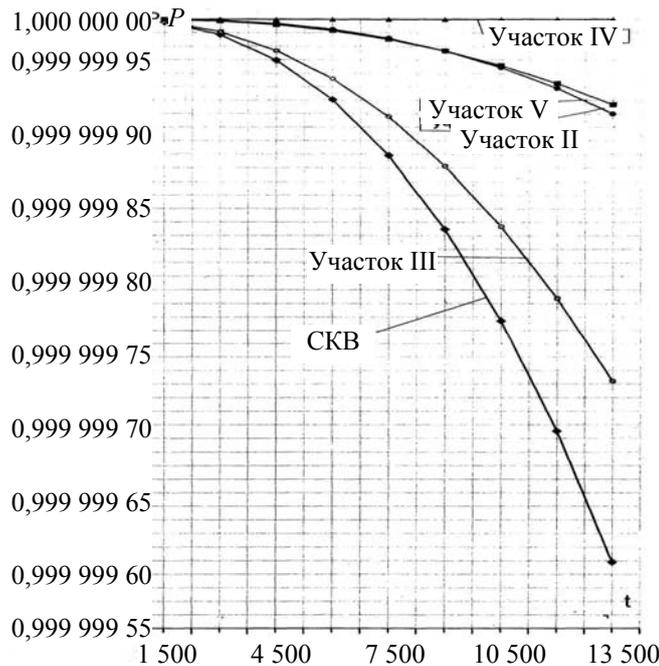


Рис. 6. Вероятность безотказной работы СКВ (безотказные агрегаты взяты с  $P(t) = 1$ )

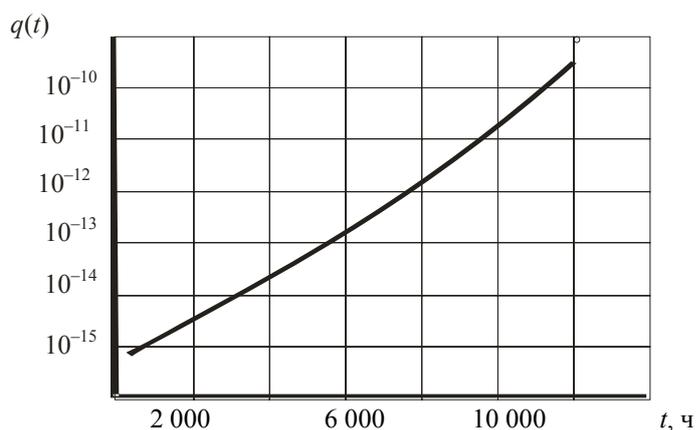


Рис. 7. Зависимость вероятности отказа на 1 ч полета от налета часов

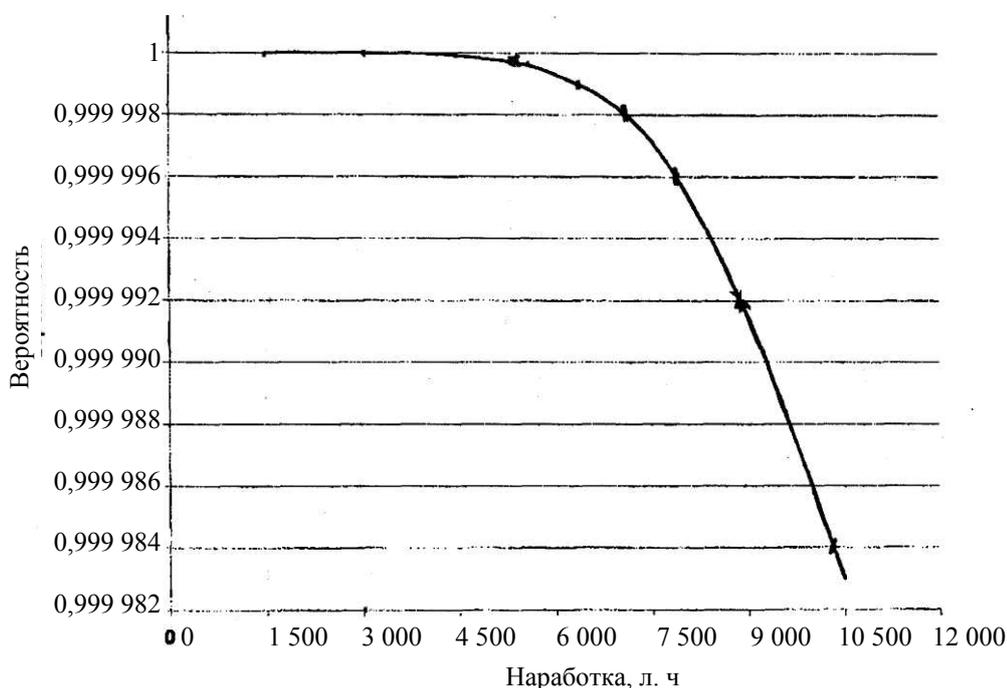


Рис. 8. Зависимость вероятности безотказной работы топливной системы от наработки

Полученные оценки (см. рис. 6...8) характеризуют надежность систем во всем рассматриваемом диапазоне наработки, определяемой по оси абсцисс. Но в Нормах летной годности даны допустимые значения вероятностей реализаций в полете особых ситуаций, вызванных отказами авиационной техники на 1 ч полета. Поэтому надежность функциональных систем в расчете на 1 ч будет существенно выше показанной на рис. 6...8.

Авторами выполнена оценка надежности функциональных систем некоторых экземпляров самолетов (мониторинг надежности). Так, для основной гидросистемы самолетов Ту-154М и Ту-154Б вероятность отказа определена в диапазоне  $10^{-10} \dots 10^{-13}$  при наработках агрегатов, соответствующих моменту времени мониторинга. Од-

нако приведение результатов мониторинга надежности к 1 ч полета для сопоставления с требованиями Норм летной годности сопряжено с методическими трудностями и отсутствием нормативных материалов.

Эти трудности состоят в том, что для определения вероятности отказа на 1 ч полета ее значение может быть отнесено только к налету планера, что представляется некорректным, поскольку у разных агрегатов рассматриваемой системы налеты различны и могут быть существенно меньше. С другой стороны, кажется вполне возможным приведение показателей надежности агрегатов к 1 ч налета, а затем осуществление расчета надежности системы в целом. Однако тестовая задача расчета надежности системы из  $n$  одинаковых параллельно соединительных элементов, от-

работавших  $T$  ч, выявила ошибочность такого подхода в  $\frac{1}{T^{n-1}}$  раз. При  $T = 10\ 000$  ч и  $n = 4$  это ошибка более чем существенна.

Для эксплуатантов большой интерес представляет изменение надежности функциональных систем при продлении ресурсов их агрегатам. Выполненные авторами расчеты дали возможность установить, что увеличение наработки насосной станции НС-46-2 на 1 000 ч сверх межремонтного ресурса увеличивает вероятность отказа основной гидросистемы на  $0,5 \cdot 10^{-8}\%$ . При продлении на 1 000 ч ресурсов гидроаккумуляторов надежность гидросистемы уменьшается на  $0,49 \cdot 10^{-7}\%$ . Увеличение наработки всем плунжерным гидронасосам НП-89 на 1 000 ч увеличивает вероятность отказа системы на  $1,6 \cdot 10^{-7}\%$ . А если увеличить наработку всем агрегатам гидросистемы на 1 000 ч, то ее надежность снизится на  $2,05 \cdot 10^{-7}\%$ . Подобным образом на продление ресурсов их агрегатам реагируют и другие функциональные системы самолета.

Таким образом, представленные в данной статье результаты дают основание эксплуатантам ставить вопросы об изменении подходов к выбору стратегий и режимов технического обслуживания функциональных систем, длительно

эксплуатирующихся самолетов гражданской авиации.

### Библиографический список

1. Гипич, Г. Н. Некоторые вопросы современного состояния развития авиационной деятельности в России / Г. Н. Гипич, Ю. М. Чинючин // Науч. вест. Мос. гос. техн. ун-та. гражд. авиации. 2004. № 9(75). С. 5–10.
2. Гипич, Г. Н. Обоснование и разработка концепции поддержания летной годности гражданских воздушных судов при эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук / Г. Н. Гипич. М., 2001. 259 с.
3. Методика автоматизированного контроля, анализа и подготовки решений по управлению уровнем надежности агрегатов и комплектующих изделий самолета типа Ту-154, эксплуатируемых по техническому состоянию : утв. гл. конструктором А. С. Шенгардтом / КБ им. А. Н. Туполева. М., 2001. 47 с.
4. Эксплуатационная надежность и режимы технического обслуживания самолетов / Н. Н. Смирнов, А. М. Андронов, Н. И. Владимиров, Ю. И. Лемин. М. : Транспорт, 1974. 304 с.
5. Воробьев, В. Г. Надежность и эффективность авиационного оборудования / В. Г. Воробьев, В. Д. Константинов. М. : Транспорт, 1995. 245 с.

V. L. Medvedev, A. G. Zosimov, L. G. Shaymardanov

### RELIABILITY OF THE FUNCTIONAL SYSTEMS OF LONG EXPLOITING CIVIL AVIATION AIRPLANES

*The questions of getting old and changing of the functional systems reliability of the long exploited civil aviation airplanes are considered.*