МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

Е. А. БЕРЕЗИН

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ САМОЛЕТОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ

Методическое пособие к курсовой работе
по курсу «Техническая эксплуатация самолетов
и двигателей»

Утверждено редакционным советом
института 12 июня 1970 года

КУЙБЫШЕВ 1970

ВВЕДЕНИЕ

Современные летательные аппараты представляют собой сложные устройства, состоящие из большого количества взаимосвязанных систем и агрегатов. Обеспечение безотказной работы подобных устройств представляет довольно сложную проблему. В связи с насущными потребностями практики широко развернулись теоретические и экспериментальные исследования надежности и долговечности технических устройств. Значение проблемы надежности объясняется прежде всего вопросами безопасности и экономическими условиями эксплуатации машин.

Каждому работнику народного хозяйства понятно, что увеличение срока службы машины сопровождается значительным сокращением затрат, так как при той же потребности может быть снижено количество машин и запасных частей. Пока стоимость запасных частей значительно превышает стоимость самих машин.

Важнейшим средством повышения общего срока работы любого изделия являются качественное изготовление его деталей и грамотная эксплуатация.

Надежность технических устройств связана с двумя сторонами процесса их эксплуатации: безотказностью в работе в течение определенного промежутка времени и способностью к восстановлению путем ремонта. На базе упомянутых требований сформировалась новая научная дисциплина — **теория надежности.**

Теория надежности устанавливает закономерности возникновения отказов технических устройств и методы их прогнозирования; изыскивает способы повышения надежности изделий при конструировании и последующем изготовлении, а также приемы поддержания надежности при их хранении и эксплуатации.

Оценка надежности не должна носить только качественный характер, который, как правило, основан на сугубо субъективных заключениях. Утверждение типа: «Я уверен, что эта конструкция надежнее, чем другая» — не может служить основанием для оценки надежности. Большинство вопросов теории надежности по своему существу носит математический характер. Теория надежности является комплексной наукой, относящейся к компетенции инженера и экономиста.

Перед теорией надежности зачастую возникают взаимно противоречивые задачи. В случае, когда по замыслу конструктора изделие состоит из большого количества элементов, надежность их совокупного действия уменьшается. А бывает и так, что повышение надежности путем резервирования требует увеличения числа элементов конструкции. Разрешение подобного рода противоречий в каждом отдельном случае требует решения проблемы о целесообразности повышения надежности отдельных элементов или увеличения числа резервных.

Следует всегда помнить, что повышение надежности не дается даром, ее увеличение требует как отдельных материальных затрат, так и статистических научных поисков. Надежность сказывается на стоимости, на затратах времени, а также психологически в виде неудобств, а в отдельных случаях даже грозит безопасности людей.

Для эксплуатации изделий необходимо разрабатывать меры обеспечения надежности, включающие в себя периодичность профилактического обслуживания, замену отдельных элементов и правила поиска неисправностей. Отказ происходит тогда, когда прочность снижается до значения нагрузки. Специфика исследования надежности вытекает, прежде всего, из влияния износа и старения материала, а это приводит к различным зависимостям.

Иногда внешняя нагрузка, приложенная к телу, участвует в процессе старения. В этом случае имеет место сложное изменение механических свойств материала под влиянием ускоренного старения, вызванного самой нагрузкой. Энергия нагрузки, участвуя в реакции старения, приводит к изменению характера распределения вероятности появления дефекта.

Надежность не является свойством только объекта, а определяется «системой», состоящей из объекта с присущими ему свойствами, среды и нагрузки.

Надежность реального объекта невозможно описать без учета фактора времени. Для эксплуатационника при решении вопроса надежности фактор времени приобретает особое значение, позволяющее установить экономическую целесообразность сроков периодичности профилактики.

Для количественной оценки надежности рассматриваемого узла, агрегата или системы в целом применяется множество показателей, являющихся определяющими, в зависимости от характера распределения случайной величины самого отказа или времени его возникновения. Решение этой задачи стало возможным благодаря использованию методов теории вероятностей и математической статистики.

При выполнении курсовой работы или решении отдельных вопросов дипломного проекта могут быть поставлены следующие задачи.

1. Определение функции надежности элемента конструкции по статистическим материалам отказов.

2. Сравнение отдельных элементов конструкции по их надежности за указанный период эксплуатации.

3. Определение надежности системы или ее небольшого участка.

4. Определение времени замены или осмотра заданного агрегата или узла.

В предлагаемом методическом пособии излагаются основные элементы теории надежности, дается методическая последовательность решения поставленных задач, а также приводится перечень необходимой литературы.

НЕКОТОРЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

ТЕРМИНОЛОГИЯ

Правильное решение любой задачи всегда обусловлено конкретизацией и точностью ее постановки, основанной на заранее принятых условиях и строгой терминологии.

Прежде чем решать задачу по оценке надежности интересующего нас узла детали, следует уяснить ряд определений, необходимых для дальнейших рассуждений.

Рассматривая изделие или механизм, мы всегда имеем дело с какой-то системой или группой систем. Итак, **системой** называется всякое техническое устройство, предназначенное для выполнения определенных функций. Система представляет собой совокупность действующих и взаимосвязанных узлов или деталей. Наиболее сложное изделие можно рассматривать как совокупность взаимосвязанных простейших систем, каждая из которых состоит из отдельных узлов или деталей, выполняющих какие-то свои конечные функции. Таким образом, отдельный узел или деталь являются основой, образующей систему. В теории надежности отдельный узел или деталь, входящие в систему, принято называть **элементом системы.**

При анализе неисправностей и отказов систем следует четко ограничивать область определения элемента. Сложные системы в ряде случаев рассматривают как систему нескольких элементов, в то время как эти «элементы» представляют собой самостоятельную систему. Итак, условимся называть элементом системы часть системы, предназначенную для выполнения заданных функций, до момента своего отказа.

Под отказом понимается событие утраты техническим устройством свойства выполнять заданные функции. По характеру своего возникновения отказы делятся на **внезапные** и **постепенные**, а по своим связям — **зависимые** и **независи-**

мые. Зависимые отказы возникают как следствие связей с другими отказами. Основываясь на сказанном, можно дать определение надежности как вероятности безотказной работы.

Надежность—это вероятность того, что за определенный интервал времени работы технического устройства в заданных условиях эксплуатации отказ не произойдет. Противоположным понятием вероятности безотказной работы будет вероятность появления отказа. События безотказной работы и появления отказа являются несовместимыми. Сумма вероятностей несовместимых событий равна единице.

$$P(t) + q(t) = 1, \tag{1}$$

где $P(t)$ — вероятность безотказной работы;

$q(t)$ — вероятность возникновения отказа.

Если через $N(t)$ обозначить число случаев безотказной работы за время t, а через $n(t)$ число случаев появления отказа, то вероятности двух противоположных событий можно записать так:

$$P(t) = \frac{N(t)}{N(t) + n(t)} = \frac{N(t)}{N^0} \text{ и}$$

$$q(t) = \frac{n(t)}{N(t) + n(t)} = \frac{n(t)}{N_0}, \tag{2}$$

тогда $P(t) = 1 - \frac{n(t)}{N_0}$,

где N_0 — общее число всех наблюдений или событий (выборок).

Вероятность безотказной работы является монотонно убывающей функцией, ее числовые значения лежат в пределах 1 и 0 при изменении времени от 0 до ∞. Вероятность появления отказа изменяется от 0 до 1 при изменении времени от 0 до ∞.

ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ

Кроме функциональной зависимости вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности появления отказа $q(t)$, существуют и другие показатели, позволяющие количественно оценить надежность интересующих нас элементов систем. К ним можно отнести следующие.

Среднее время появления отказа или наработка на отказ — $T_{ср}$

Среднее время — это математическое ожидание случайной величины. Среднее время первого отказа или наработка на отказ может быть найдено по формуле

$$T_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (t_i)}{N}, \tag{3}$$

где N — количество отказов;

t_i — время появления i-го отказа.

Определяя среднее время появления отказа как математическое ожидание случайной величины, нельзя ограничиваться нахождением только его численного значения. Для полноты оценки, по законам математической статистики, необходимо дать оценку разброса случайной величины. Мерой разброса случайной величины относительно ее среднего значения (математического ожидания) является дисперсия Д и среднее квадратическое отклонение σ. Иногда приходится давать вероятностную оценку среднего квадратического отклонения. Эта характеристика носит название вероятной средней квадратической погрешности среднего арифметического и определяется по формуле

$$\bar{\sigma} = t_к \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \tag{4}$$

где N — число зарегистрированных отказов при определении $T_{ср}$;

$t_к$ — коэффициент Стьюдента (находится по таблицам, как функция числа измерений N и доверительной вероятности α);

σ — среднее квадратическое отклонение случайной величины.

Опасность или интенсивность отказов — $\lambda(t)$

Опасностью или интенсивностью отказов называется отношение числа отказавших изделий за единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени.

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N_{ср} \Delta t}, \tag{5}$$

где $N_{ср} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}$ — среднее число изделий, исправно работающих в интервале времени Δt;

$n(t)$ — число изделий, отказавших в интервале за время Δt;

Δt — интервал времени;

N_i — число изделий, исправно работающих в начале интервала Δt;

N_{i+1} — число изделий, исправно работающих в конце интервала Δt.

Частота отказов — $f(t)$

Частотой отказов называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к общему числу изделий, находящихся под наблюдением. Частота отказов по существу является плотностью вероятности распределения случайной величины, т. е. времени отказов. Согласно определению

$$f(t) = \frac{n(t)}{N_0 \Delta t}, \tag{6}$$

где N_0 — количество изделий, находящихся под наблюдением; остальные обозначения аналогичны принятым выше.

Частота отказов в полной мере характеризует интересующую нас функцию распределения, т. е. надежность — $P(t)$. Их связь выражена следующими зависимостями:

$$f(t) = \frac{d\,q(t)}{dt}; \; P(t) = 1 - q(t) = 1 - \int_0^t f(t)\,dt.$$

Перечисленные выше показатели (критерии) надежности находятся между собой в определенной связи:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{f(t)}{1 - \int_0^t f(t)\,dt} \quad \text{и}$$

$$T_{ср} = \int_0^\infty t\,f(t)\,dt = \int_0^\infty P(t)\,dt.$$

Из последнего выражения видна графическая интерпретация среднего времени как площади, ограниченной кривой вероятности безотказной работы.

Для практических решений задач по оценке надежности из перечисленных показателей наибольшее значение имеет отыскание эмпирической функции частоты отказов $f_э(t)$.

В теории надежности известен целый ряд закономерных распределений как самих функций надежности, так и других показателей надежности, ранее нами рассмотренных. Значения наиболее распространенных функций и их вид приведены в табл. 6 и на рис. 4 приложения.

При оценке надежности следует определить эмпирическую зависимость функции надежности и степень близости найденной функции с теоретическим распределением.

Степень близости эмпирического распределения с теоретическим определяется критериями согласия А. Н. Колмогорова — $k(\lambda)$, Пирсона — χ^2 и др. Из всех существующих критериев согласия критерий Колмогорова выгодно отличается своей простотой. В качестве меры расхождения между эмпирическим и теоретическим распределениями (рис. 1) рассматривается максимум модуля разности между ними — $|Д|$. Сравнив обе кривые распределения и найдя модуль разности Д, находят аргумент функции сходимости $\lambda = Д\sqrt{n}$, где n— общее число отказов, на основании которых строился экспериментальный (статистический) график (N_0). Определив λ, находят критерий согласия $k(\lambda)$ по

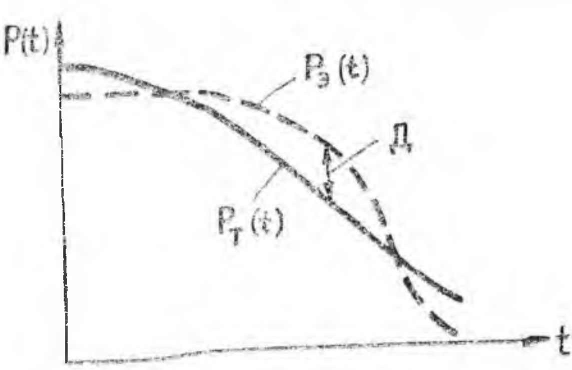


Рис. 1.

таблице 1. Хорошим согласием считается случай, когда показатель $k(\lambda)$ не ниже 0,7.

Таблица 1

λ	$k(\lambda)$	λ	$k(\lambda)$	λ	$k(\lambda)$
0,0	1,000	0,7	0,711	1,4	0,040
0,1	1,000	0,8	0,554	1,5	0,022
0,2	1,000	0,9	0,393	1,6	0,012
0,3	1,000	1,0	0,270	1,7	0,006
0,4	0,997	1,1	0,178	1,8	0,003
0,5	0,964	1,2	0,112	1,9	0,002
0,6	0,864	1,3	0,068	2,0	0,001

В практике определения оценки надежности могут иметь место случаи сложного или совмещенного распределения из-за появления постепенных и внезапных отказов. Внезапные отказы, как правило, подчиняются экспоненциальному закону распределения, а постепенные — нормальному. Выражение для безотказной работы элемента системы в таком случае запишется в виде произведения

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t),$$

где $P_1(t)$ — вероятность безотказной работы, обусловленная внезапными отказами;

$P_2(t)$ — вероятность, обусловленная постепенными отказами.

Тогда на основании табличных формул надежность совмещенного распределения запишется так:

$$P(t) = e^{-\lambda t}\left[\frac{1+\Phi\left(\frac{t-T_{\text{ср}}}{\sigma}\right)}{1+\Phi\left(\frac{T_{\text{ср}}}{\sigma}\right)}\right].$$

Здесь $\Phi(t)$ — соответствующее значение функции Лапласа, взятое из таблиц (например: [1] стр. 25, таблица 2).

СБОР СТАТИСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Решение задач по надежности узлов, агрегатов или систем возможно при наличии опытных данных по отказам изучаемых объектов. В этом случае представляется возможным определить в действительных условиях вид функции плотности вероятности (частоты) отказов интересующих нас узлов. Таким образом, первый этап работы сводится к сбору статистического материала по отказам. Следует отметить, что эта работа весьма трудоемка и порой затруднительна из-за недостаточной организации учета появляющихся отказов в эксплуатационном подразделении или неполноценности сведений о них.

Прежде, чем заниматься сбором данных по отказам, необходимо изучить дефект, а также технические причины и обстоятельства, приводящие к отказам узлов или агрегатов. Выбираются отказы одной категории, обусловленные единством характера, причины и места их возникновения в конструкции. Нельзя фиксировать в единую группу отказы в каком-то насосе по характеру разрушения подшипника, нарушения уплотнения, поломки пружин редукционного клапана и др., ибо эти дефекты привели к отказу насоса по разным причинам и в разных местах конструкции.

При оценке надежности необходимы исследования с полным анализом всей обстановки, при которой имел место отказ. Наработку на каждый отказ можно взять из формулярных данных самолета, двигателя или их агрегатов. Полученные сведения лучше занести в таблицу указанного образца (см. таблицу 2).

Таблица 2

№ п/п.	Наименование детали или узла	Наименование дефекта	Признак дефекта	Наработка до отказа	Примечание
1					
2					
3					

Величина выборки отказов играет роль при статистической обработке. Чтобы получить плавную экспериментальную кривую, необходимо достаточно большое количество точек для ее построения. Их количество пропорционально числу измерений или выборочному числу регистрируемых отказов. Увеличение числа измерений или количества данных по отказам позволяет с большей точностью найти среднее арифметическое случайной величины (в нашем случае наработку на отказ — $T_{ср}$). Среднее арифметическое из ряда измерений отягчено меньшей ошибкой, чем результат каждого измерения. Существует фундаментальный закон возрастания точности при росте числа измерений: «Средняя квадратическая погрешность среднего арифметического равна средней квадратической погрешности отдельного измерения, деленной на корень квадратный из числа измерений» (при единичном измерении погрешность принимается равной половине цены наименьшего деления прибора). Из сказанного следует, что, желая повысить точность в 10 раз, необходимо произвести 100 измерений или выборок. С другой стороны, среднее арифметическое значение времени появления отказа мы определили с точностью до минут или секунд. Есть ли в этом резон? Очевидно, нет большой необходимости оценивать результат вычисления времени возникновения отказа, выраженного в десятках или сотнях часов, минутным уклонением от среднего. В данном случае необходимо ограничиться целыми числами. Обычно в расчетах учебного характера допустима погрешность порядка 5—10% от измеряемой величины. Вообще говоря, существует соотношение: при 10 измерениях ошибка составляет около 30%, при 25 измерениях — около 15% и при 100 — порядка 1%.

Имея оптимальное количество зарегистрированных отказов, по данным времени минимальной и максимальной наработки до отказа определяем ширину диапазона времени отказа. Этот диапазон разбивается на отдельные отрезки времени с обязательной их нумерацией (отрезки можно брать на всем диапазоне равные $\Delta t_i = \mathrm{const}$). Производя такую разбивку, пользуясь формулами 5 и 6, подсчитываем интенсивность и частоту отказов для каждого отрезка времени и последовательности согласно нумерации этих отрезков времени. За общее количество изделий, находящихся под наблюдением N_0 можно принять общее число отказов, зарегистрированных в таблице 2. Порядок группировки статистических данных носит название табуляграммы (см. таблицу 3).

Таблица 3

№ п/п.	Интервал времени Δt_i	Количество отказов Δn_i в интервале времени Δt_i	λ_i	f_i
1	$0-\Delta t$	$n_1(t)$	λ_1	f_1
2	$\Delta t-2\Delta t$	$n_2(t)$	λ_2	f_2
3	$2\Delta t-3\Delta t$	$n_3(t)$	λ_3	f_3
4	$3\Delta t-4\Delta t$	$n_4(t)$	λ_4	f_4
m	$(m-1)\Delta t-mt\Delta$	$n_m(t)$	λ_m	f_m

Пользуясь данными табуляграммы, строим гистограммы интенсивности и частоты отказов. Эти построения заключаются в следующем: на горизонтальной оси последовательно откладываются интервалы Δt_i, а над каждым из них строится прямоугольник высотой, равной λ_i (или f_i) в зависимости от именования гистограммы. Соединяя полученные для каждого интервала времени Δt_i значения λ_i (или f_i) через точки на серединах верхней стороны прямоугольников плавной кривой, получим график интенсивности (или частоты отказов).

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ

Прежде чем производить расчет надежности выбранного элемента конструкции, необходимо выбрать расчетную формулу. Выбор ее основан на определении вида распределения надежности по виду найденной эмпирической функции распределения частоты отказов (последняя не случайно носит название функции плотности вероятности появления отказов, см. раздел 1).

Эмпирическая формула экспериментальной кривой плотности вероятности появления отказов может быть определена одним из способов, разработанных в математике (см. «Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов», И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев). Сравнивая полученную эмпирическую зависимость с табличными зависимостями, приведенными в настоящем пособии, определяем, к какому виду относится распределение функции надежности. Вполне возможно, что при сравнении эмпирической зависимости с табличными значениями может не оказаться близкого сходства. В подобных случаях возможно использовать метод графического интегрирования и проинтегрировать эмпирическую зависимость функции частоты отказов, помня, что событие отказа противоположно событию безотказной работы, и тогда надежность

$$P(t) = 1 - q(t) = 1 - \int_0^t f(t)\,dt\,.$$

После интегрирования кривой распределения функции частоты отказов и получения новой кривой, отображающей распределение вероятности безотказной работы, следует найти ее эмпирическое выражение. В том случае, когда сразу была определена функция надежности, необходимо построить кривую распределения надежности по найденным параметрам. Определение координат отдельных точек кривой распределения производится методом численного решения табличных функций надежности. После построения графиков теоретической и эмпирической функции надежности проверить величину их сходимости по критерию А. Н. Колмогорова.

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ (простейшей) СИСТЕМЫ

«Простейшей» системой условимся считать систему, состоящую из небольшого (не более 10) числа элементов, выполняющих конечные функции, с независимыми друг от друга отказами. При отказе любого из элементов этой системы последняя прекращает функционировать.

В системе может быть различная функциональная связь между элементами. Рассмотрим три наиболее распространенных варианта связей.

Последовательная функциональная связь

Связь элементов системы, действия которых происходят последовательно друг за другом и обратные связи отсутствуют, называется последовательной функциональной связью.

Вариант такой связи можно выразить (рис. 2) логической структурной схемой

Рис. 2.

Если считать, что работа каждого элемента может быть оценена надежностью $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ и т. д., то суммарная (общая) надежность такой системы будет равна произведению надежностей элементов ее составляющих

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \cdot P_4(t) = \prod_{i=1}^{n} \cdot P_i(t).$$

Параллельная функциональная связь

При параллельной функциональной связи элементы соединены параллельно и работают независимо один от другого. Обратные связи между элементами отсутствуют. Логическая структурная схема (рис. 3) будет такова:

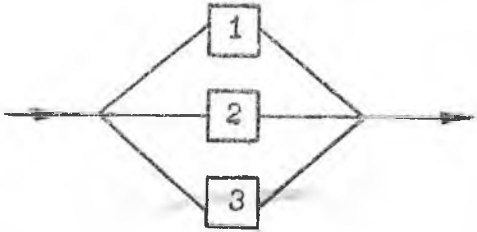


Рис. 3.

Суммарная надежность системы такого варианта определится из следующего выражения:

$$P_c(t) = \{1 - [1 - P_1(t)] \cdot [1 - P_2(t)] \cdot [1 - P_3(t)]\}.$$

В случае, когда надежность всех составляющих элементов одинакова, выражение суммарной надежности примет следующий вид:

$$P_c(t) = \{1 - [1 - P_i(t)]^n\}$$

$$\text{при } P_1(t) = P_2(t) = \ldots P_n(t).$$

Комбинированная функциональная надежность

Комбинированная функциональная связь является совокупностью двух предыдущих. Логическая структурная схема такой связи (рис. 4) имеет вид

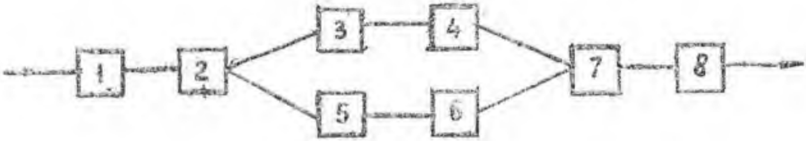


Рис. 4.

Суммарная надежность комбинированной функциональной связи определится из следующего выражения:

$$P_c(t) = P_1(t)\,P_2(t)\,\{1 - [1 - P_3(t)\cdot P_4(t)] \times$$
$$\times [1 - P_5(t)\cdot P_6(t)]\}\cdot P_7(t)\cdot P_8(t).$$

Таким образом, расчет надежности системы будет сводиться к следующим действиям:

1. Тщательное изучение системы, ее элементов и функций, выполняемых каждым элементом и системой в целом. Необходимо вычертить принципиальную схему технического устройства и детально изучить его работу.

2. Составить логическую структурную схему изучаемой системы. Пронумеровать в логической последовательности ее элементы.

3. Составить логическую структурную формулу для определения суммарной надежности системы.

4. Собрать статистический материал по отказам элементов, входящих в рассматриваемую систему, руководствуясь при этом указаниями раздела «Сбор статистического материала» настоящего пособия.

5. Произвести все необходимые расчеты для оценки надежности элементов системы и всей системы в целом.

6. Построить графики надежности элементов, составляющих систему, и график суммарной надежности системы.

7. Вычертить узел технического устройства (элемент системы), обладающий самой низкой надежностью.

8. Произвести инженерно-технический анализ слабого звена (элемента) в техническом устройстве (системе) и дать предложения или рекомендации по повышению его надежности.

Определение времени замены слабого звена конструкции

Время замены слабого звена в конструкции (слабого элемента в системе) можно подсчитать по следующей формуле

$$T_{\text{зам}} = T_{\text{ср}} - \bar{\sigma} - \Delta t_{\text{рег}},$$

где $T_{\text{ср}}$ — среднее время появления отказа;

$\bar{\sigma}$ — вероятная средняя квадратическая погрешность среднего арифметического;

Δt — наработка изделия до первого регламента, в котором предусмотрен осмотр данного (элемента системы) слабого звена.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Г. Л. Глузман, И. П. Падерно.** Надежность установок и систем управления. «Машиностроение», Ленинград, 1966.

2. **Е. С. Вентцель.** Теория вероятностей. Изд. «Наука», Москва, 1969.

3. **Б. В. Гнеденко.** Беседы о математической статистике. «Знание», Москва, 1968.

4. **И. М. Маликов, А. М. Половко.** Количественные характеристики надежности. «Знание», Ленинград, 1968.

5. **А. Н. Зейдель.** Элементарные оценки ошибок измерения. «Наука», Ленинград, 1968.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Р. Хевиленд.** Инженерная надежность и расчет на долговечность.

2. **Б. В. Гнеденко** и др. Математические методы в теории надежности. «Наука», Москва, 1965.

3. **Я. Б. Шор.** Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. «Советское радио», 1962.

Пример расчета надежности барабанов колес

I. Статистика отказов элемента системы в условиях эксплуатации

Таблица 1

№ п/п	Наименование дефекта	Наработка t
1	Трещина в реборде барабана	100
2	колеса К-286	243
3	— " —	262
4	— " —	409
5	— " —	425
6	— " —	454
7	— " —	461
8	— " —	477
9	— " —	483
10	— " —	505
11	— " —	550
12	— " —	536
13	— " —	578
14	— " —	583
15	— " —	588
16	— " —	598
17	— " —	613
18	— " —	627
19	— " —	628
20	Трещина в реборде барабана	680
21	колеса К-286	683
22	— " —	687
23	— " —	688
24	— " —	748
25	— " —	781
26	— " —	803
27	— " —	819
28	— " —	835
29	— " —	851
30	— " —	855
31	— " —	912
32	— " —	927
33	— " —	938
34	— " —	949
35	— " —	967
36	— " —	970
37	— " —	985

Σ 24198

$$T_{ср} = \frac{\Sigma 24198}{N_o} = \frac{\Sigma 24198}{37} = 654$$

ПРИМЕЧАНИЕ. Расчет надежности элемента системы (барабана колеса К-286) выполнен студентом Г. И. СТОКУСОВЫМ.

II. Расчет вероятности безотказной работы элемента системы

1. Оценка разброса величины наработки до отказа

Таблица 2

N п/п	$x_i = t$	$\bar{x} = t_{cp}$	$(x-\bar{x})$	$(x-\bar{x})^2$	$\Sigma(x-\bar{x})^2$	$D = \frac{\Sigma(x-\bar{x})^2}{n-1}$	σ
1	100	654	−554	306916	1741290	48366,6	219
2	243		−411	168921			
3	262		−392	153664			
4	409		−245	60025			
5	425		−229	52441			
6	454		−200	40000			
7	461		−193	37249			
8	477		−177	31329			
9	483		−171	29241			
10	505		−149	22201			
11	536		−118	10816			
12	550		−104	13924			
13	578		−76	5775			
14	583		−71	5041			
15	588		−66	4356			
16	598		−56	3136			
17	613		−41	1681			
18	627		−27	729			
19	628		−26	676			
20	680		26	676			
21	683		29	841			
22	687		33	1156			
23	688		34	1089			
24	748		94	8836			
25	781		127	16129			
26	803		149	22201			
27	813		155	24025			
28	835		181	32761			
29	851		187	38909			
30	855		201	40401			
31	912		258	66564			
32	927		273	74529			
33	938		284	80656			
34	943		295	87025			
35	967		313	97969			
36	970		316	99856			
37	985		331	109561			

2. Расчет частоты отказов – f и интенсивности отказов – λ элемента системы

$N_0 = 37$; $\Delta t = 100$; $N_0 \cdot \Delta t = 3700$

Табуллграмма отказов элемента системы

Таблица 3

N	$\Delta t = 100$	Δn	$f = \frac{\Delta n}{N_0 \cdot \Delta t}$	$N_0 - \Delta n_i$	$(N_0 - \Delta n_i)\Delta t$	$\lambda = \frac{\Delta n}{(N_0 - \Delta n_i)\Delta t}$
1	0 - 100	1	0,00027	36	3600	0,000277
2	100 - 200	–	–	36	3600	–
3	200 - 300	2	0,00054	34	3400	0,000587
4	300 - 400	–	–	34	3400	–
5	400 - 500	6	0,0016	28	2800	0,00214
6	500 - 600	7	0,00188	21	2100	0,00333
7	600 - 700	7	0,00188	14	1400	0,005
8	700 - 800	2	0,00054	12	1200	0,00165
9	800 - 900	5	0,00135	7	700	0,00714
10	900 - 1000	7	0,00188	–	–	

Гистограмма отказов элемента системы

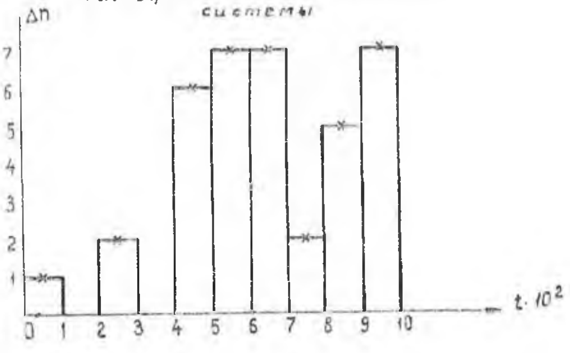


Рис. 1.

Сравнивая графики $\lambda(t)$ и $f(t)$, принимаем зависимость $P(t)$ по усеченно-нормальному закону (см. рис. 1).

Вероятность безотказной работы $P(t)$ по усеченно-нормальному закону (теоретическая)

$$P(t) = \frac{1+\Phi\left(\frac{T_1-t}{\sigma}\right)}{1+\Phi\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)}; \qquad T_1 = t_{ср}.$$

Рис. 2.

Расчет надежности $P(t)$ производится по таблице.

Таблица 4

t	T_1	$T_1 - t$	$\frac{T_1 - t}{6}$	$T_1/6$	$\varphi\left(\frac{T_1 - t}{6}\right)$	$\varphi\left(\frac{T_1}{6}\right)$	$P(t)$
0	654	654	2,986	2,986	0,99712	0,99712	1
50		604	2,757		0,99404		0,986
150		504	2,301		0,97855		0,981
250		404	1,844		0,93423		0,970
350		304	1,388		0,83241		0,919
450		204	0,131		0,54763		0,774
550		104	0,474		0,36164		0,683
650		4	0,018		0,0768		0,538
750		-96	-0,438		-0,3328		0,335
850		-186	-0,814		-0,5265		0,238
950		-296	-1,351		-0,8229		0,088

3. Получение экспериментальной кривой распределения вероятности безотказной работы элемента системы по формуле:

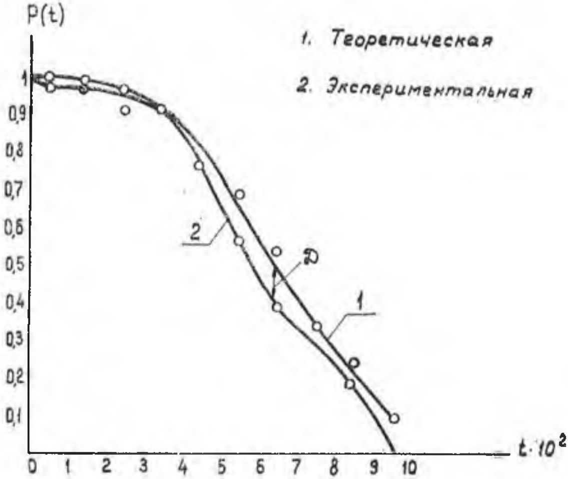
$$P(t) = 1 - \frac{\sum_{1}^{n} n_i}{N_0}$$

n_i – число агрегатов вышедших из строя

Таблица 5

t	n_i/N_0	$P(t)$
0	0	1
50	0,026	0,974
150	0,026	0,974
250	0,081	0,919
350	0,081	0,919
450	0,243	0,757
550	0,432	0,568
650	0,621	0,379
750	0,695	0,325
850	0,810	0,190
950	1	0

График распределения вероятностей безотказной работы элемента системы



4. Определение коэффициента сходимости.

$$\lambda_\kappa = \mathcal{D}\sqrt{N} = (0{,}487 - 0{,}379)\sqrt{37} \approx 0{,}656$$

$$P(\lambda_\kappa = 0{,}86)$$

Рис. 3.

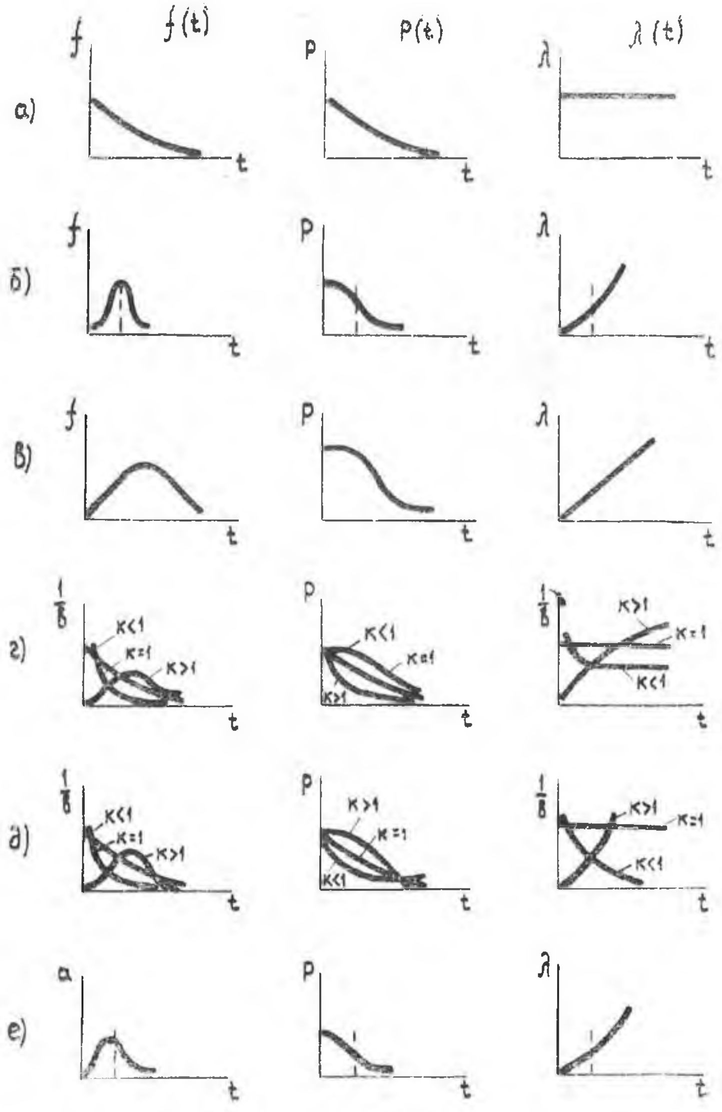


Рис. 4.

Типичные зависимости количественных характеристик надежности во времени, используемые в теории надежности: а—экспоненциальный закон; б—усеченно-нормальный закон; в—закон Рэлея; г—гамма-распределение; д—закон Вейбул; е—логарифмически-нормальный закон.

Таблица 6

Наименование распределения	Частота отказа (плотность распределения) $f(t)$	Вероятность безотказной работы $P(t)$	Опасность отказа $\lambda(t)$	Среднее время безотказной работы T
Экспоненциальный	$\lambda e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	$\lambda = const$	$\frac{1}{\lambda}$
Усеченно-нормальный	$\frac{1}{\Phi\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-T_1)^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{1+\Phi\left(\frac{T_1-t}{\sigma}\right)}{1+\Phi\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)}$	$\frac{e^{-\frac{(t-T_1)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma\cdot\Phi\left(\frac{T_1-t}{\sigma}\right)}$	$T_1 + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}\cdot\Phi\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)} \cdot e^{-\frac{T_1^2}{2\sigma^2}}$
Рэлея	$\frac{t}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{t}{\sigma^2}$	$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma$
Гамма (при К целом)	$\lambda_0 \cdot \frac{(\lambda_0 t)^{K-1}}{(K-1)!} \cdot e^{-\lambda_0 t}$	$e^{-\lambda_0 t} \sum\limits_{i=0}^{K-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$	$\frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{K-1}}{(K-1)! \sum\limits_{i=0}^{K-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i}}$	$\frac{K}{\lambda_0}$
Вейбулла	$\lambda_0 \cdot K t^{K-1} \cdot e^{-\lambda_0 t^K}$	$e^{-\lambda_0 t^K}$	$\lambda_0 K \cdot t^{K-1}$	$\frac{\Gamma\left(\frac{1}{K}+1\right)}{\lambda_0^{\frac{1}{K}}}$
Логарифмически-нормальный:	$\frac{1}{\sigma \cdot t\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{\mu-\ln t}{\sigma}\right)$	$\frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t-\mu}{\sigma}\right)^2}}{0{,}5+\Phi\left(\frac{\mu-\ln t}{\sigma}\right)}$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int\limits_0^{\infty} e^{-\frac{(\ln t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$

СОДЕРЖАНИЕ

Евгений Александрович Березин

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ САМОЛЕТОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ

Методическое пособие к курсовой работе
по курсу «Техническая эксплуатация самолетов и двигателей»

Редактор — *И. С. Колышева*
Корректор — *Л. В. Сидорова*

ЕО00323. Подписано в печать 7.XII.1970 г. Формат бумаги 60 × 84[1]/16.
Объем 2 печ. л. Тираж 500. Зак. № 641. Цена 20 коп.

г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151. Типография УЭЗ КуАИ.