

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.3.019

МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ НОРМАЛЬНЫХ КОНТРОЛЬНЫХ И ОПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА БЕЗОТКАЗНОСТЬ

© Авторы, 2024

doi: 10.25210/jfor-2403-BYYWLX | edn: BYYWLX

Баттулга Э. — аспирант, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва. E-mail: enhee.jrgl@yahoo.com

Сидняев Н. И. — д.т.н., профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва. E-mail: sidnyaev@yandex.ru

Аннотация

Изложены методы математической статистики, позволяющие контролировать качество аэрокосмических систем в процессе их экспериментального исследования и заранее сигнализировать о возможных нарушениях при контроле качества оборудования. Установлено, что прогнозирование среднего числа отказов по авиационному оборудованию (БО) аэрокосмической техники в целом необходимо проводить в тех случаях, когда по отдельным агрегатам в полном объеме дано небольшое число отказов и их прогнозирование на назначенную наработку для этих агрегатов приводит к значительным ошибкам. В статье предложена методика планирования и проведения эквивалентно-циклических нормальных контрольно-определятельных испытаний бортового оборудования (БО) на надежность, а также эквивалентно-циклических ускоренных контрольных испытаний электронного и электрического БО самолетов и космических аппаратов на надежность. Предложены эквивалентно-циклические определители для оценки фактических значений достигнутых уровней надежности БО.

Ключевые слова: вероятность, статистика, контроль, методики, закон распределения, точность, обработка

Abstract

Methods of mathematical statistics are described, which make it possible to monitor the quality of aerospace systems during its experimental research and to signal in advance about possible violations during quality control of equipment. It has been established that forecasting the average number of failures for aircraft equipment (BO) of aerospace equipment as a whole must be performed when a small number of failures are given for individual units in full and their prediction for the assigned operating time for these units leads to significant errors. The article proposes a method for planning and conducting equivalent-cyclic normal control and determination tests of on-board equipment (BO) for reliability, as well as equivalent-cyclic accelerated control tests of electronic and electrical BO of aircraft and spacecraft for reliability. Equivalent-cyclic determinants are proposed to assess the actual values of the achieved reliability levels of the BO.

Keywords: probability, statistics, control, methods, distribution law, accuracy, processing

Введение

Статистико-математические методы контроля дают возможность контролировать непосредственно сам ход производства космических аппаратов (КА) с точки зрения его устойчивости в соблюдении заданных технических условий и на основании непрерывного наблюдения за качеством изготавливаемой продукции упреждать дефекты [1–3]. Это предупреждение брака возможно потому, что статистический метод контроля указывает на необходимость вмешательства в производственный процесс [4–7] тогда, когда количество брака еще не возросло, когда выпускаемая продукция удовлетворяет техническим условиям КА но, когда определенные статистические характеристики дают основание подозревать появление систематических ошибок, нарушающих устойчивое состояние процесса. Такое предупреждение брака особенно важно в высокотехнологичном производстве космических аппаратов при изготовлении деталей, где задача контроля заключается в том, чтобы не допускать просачивания дефектных деталей, и чтобы добиться возможной однородности качества и взаимозаменяемости деталей [8–11]. Статистический контроль позволяет уменьшить и практически свести к нулю дефекты КА [10–12]. Кроме того, статистико-математические методы позволяют надежно пользоваться выборочным контролем и получать достаточно обоснованные выводы относительно всего парка КА, исходя из данных анализа сравнительно небольшой выборки [13, 14].



Уменьшение объема выборки удешевляет организацию контроля и позволяет более тщательно производить отдельные измерения, что приводит часто к лучшим результатам, чем сплошной контроль. Если процесс производства приведен в устойчивое состояние, то методы математической статистики довольно эффективно используются для того, чтобы заблаговременно определить возможные нарушения этого состояния [15, 16].

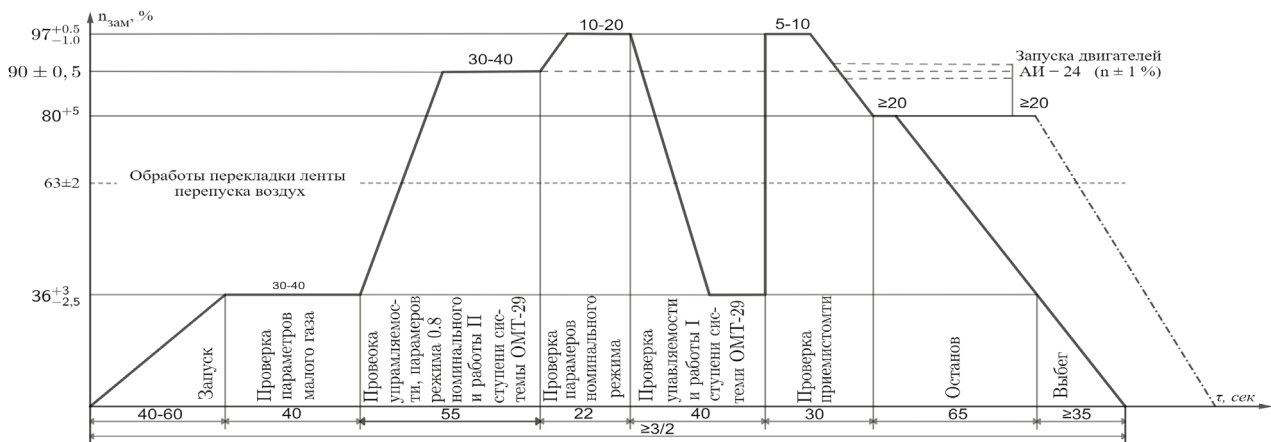


Рис. 1. Циклограмма комплексного нагружения.

При испытаниях, проводимых в реальном масштабе времени, БО подвергается циклическому воздействию внешних факторов (ВВФ), имитирующих предполетные, полетные и послеполетные условия, составляющие типовые циклы, которые объединяются в базовые циклы, каждый из которых имитирует условный год эксплуатации БО на борту летательного аппарата (ЛА). Базовый цикл эксплуатации БО состоит из типовых циклов количество которых n_r определяется соотношением среднегодового налета t_r ЛА к продолжительности имитации полетных условий $t_{\text{л}}$ в типовом цикле испытаний. При проведении испытаний с целью контроля или оценки средней наработки на отказ T_0 годовой цикл дополняется наработкой БО в условиях, соответствующих условиям проведения регламентных работ. Для формирования базового цикла испытаний разрабатывается несколько типовых циклов, учитывающих сезонные (зима, лето, весна, осень) изменения климатических факторов, и ВВФ, возникающие на борту при выполнении различных типовых задач, характерных для соответствующего самолета (вертолета). Последовательность реализации типовых циклов при проведении испытаний определяется средней частотой полетов соответствующего ЛА в течение условного года эксплуатации. Количество базовых циклов эксплуатации L (включая неполный базовый цикл), реализуемых при испытаниях, определяется по формуле $L = [n^* / n_r] + 1$, где n^* — общее количество типовых циклов, реализуемое в процессе испытаний; $[n^* / n_r]$ — целая часть отношения n^* / n_r . В каждом типовом цикле испытаний воспроизводятся следующие ВВФ: широкополосная случайная вибрация (ШСВ) (для вертолетов с добавлением узкополосных составляющих); механические нагрузки режимов взлет-посадка; механические нагрузки режимов работы стрелково-пушечного вооружения или(и) нагрузки, возникающие при срабатывании катапульт; термовоздействия; баровоздействия; воздействие влаги при испытаниях по последовательной схеме; дополнительные воздействия, характерные для БО конкретного ЛА. Пример циклограммы комплексного нагружения приведен на рис. 1.

В случае отсутствия испытательного оборудования, позволяющего комплексировать ВВФ, испытания допускается проводить циклами с реализацией ВВФ по последовательной схеме в следующем порядке: механические воздействия; воздействие влаги; температурные и барометрические воздействия.

Пример циклограммы испытаний, проводимых по последовательной схеме, определяющей последовательность воспроизведения ВВФ при имитации одного полетного цикла в зимнее время, приведен на рис. 2. В технически обоснованных случаях допускается проводить баровоздействия отдельными циклами вне циклов комплексного нагружения, а в случае реализации последовательной схемы испытаний — между механическими и термовлаговоздействиями. Пример циклограммы комплексного нагружения в термовиброкамере, определяющей последовательность воспроизведения ВВФ при имитации одного полетного цикла в зимнее время, приведен на рис. 2, а для осенне-весеннего периода — на рис. 3.

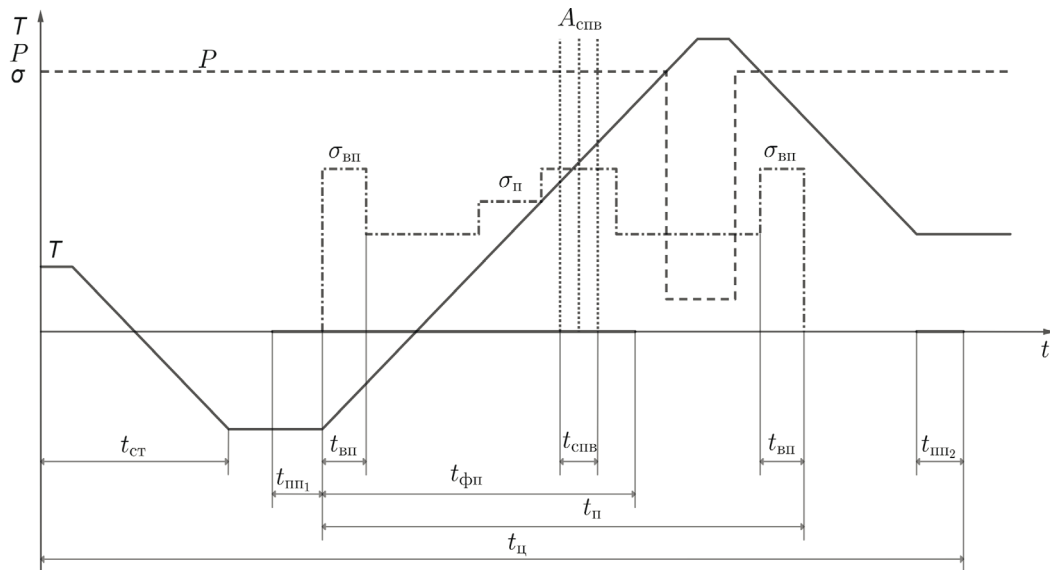


Рис. 2. Циклограмма в зимнее время.

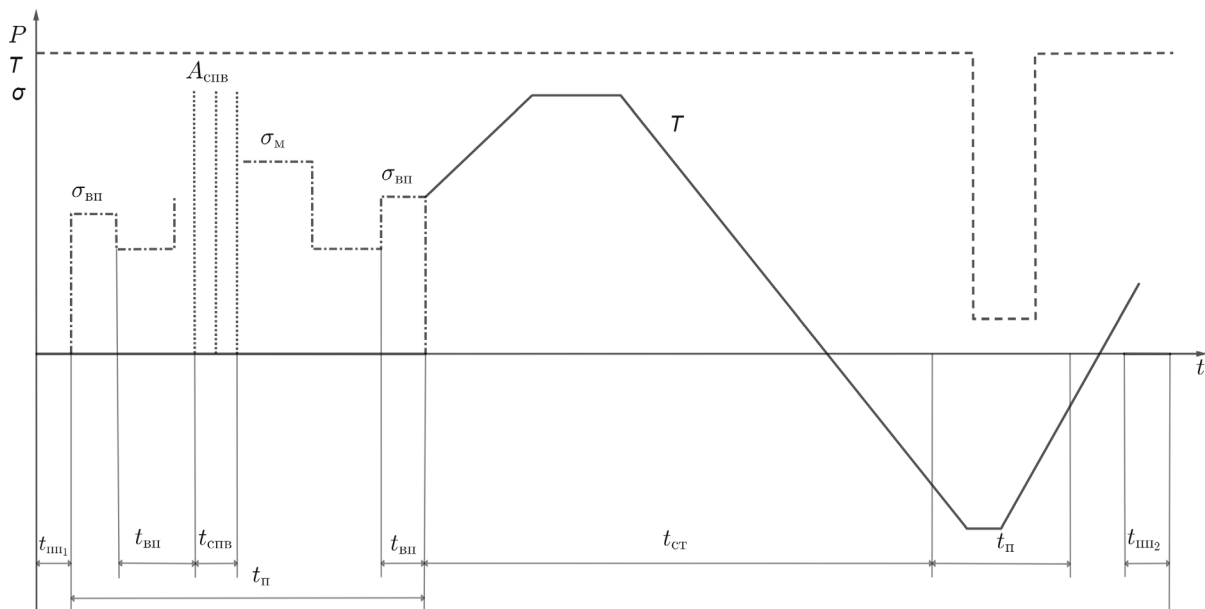


Рис. 3. Циклограмма в осенне-весенний период.

На рисунках введены следующие обозначения: P — давление воздуха в термобаровиброкамере; T — температура воздуха в термобаровиброкамере; σ — среднее квадратическое значение ускорения; $\sigma_{ВП}$ — среднее квадратическое значение ускорения на режиме «взлет-посадка»; σ_M — среднее квадратическое значение ускорения во время маневра; t_M — продолжительность маневра; $A_{СПВ}$ — максимальная амплитуда виброускорения при работе стрелково-пушечного вооружения; $t_{СТ}$ — продолжительность имитации предполетных условий (стоянки); t_o — продолжительность выхода БО на заданный режим; $t_{ВП}$ — продолжительность воспроизведения режима «взлет-посадка»; $t_{ФП}$ — продолжительность функционирования БО в полете; $t_{СПВ}$ — продолжительность имитации работы стрелково-пушечного вооружения; $t_{ПП1}(t_{ПП2})$ — продолжительность проведения предполетной (послеполетной) проверки; $t_{П}$ — продолжительность имитации полета; $t_{Ц}$ — общая продолжительность проведения цикла.

Функционирование и контроль санкционирования БО на участке t_{nn1} и t_{nn2} осуществляется в режимах предполетной и послеполетной проверок.

На участке t_n в режимах, соответствующих выполнению конкретных полетных заданий, одновременно с помощью тестов встроенного контроля, контрольно-проверочной аппаратуры и контрольно-записывающей аппаратуры, ведутся проверки качества функционирования БО в соответствии с программой испытаний (ПИ).

1. Воздействия внешних факторов

Требования к исходной информации, заданию и воспроизведению ВВФ при проведении испытаний. При подготовке исходных данных результаты измерений должны быть упорядочены: по профилям полетов, соответствующих типовым задачам, выполняемым самолетом (вертолетом); по климатическим районам для сезонных периодов эксплуатации.

1.1. Механические ВВФ

Механические воздействия задаются и воспроизводятся по одной оси в эксплуатационном положении БО (амортизированное оборудование должно находиться на штатных амортизаторах). Циклограммы механических воздействий формируются путем задания временной последовательности характеристик механических ВВФ, полученных в процессе обработки измерений, произведенных на характерных режимах полета в местах установки БО на борту ЛА. Вибрационные воздействия, соответствующие различным режимам полета, представляют собой шкалу случайных вибраций (ШСВ) и задаются:

- спектральными плотностями ускорения $S_w(f)$;
- суммарными средними квадратическими значениями ускорения $\sigma_\Sigma(\Pi)$, где Π — количество воспроизводимых режимов;
- продолжительностями режимов $t(\Pi)$.

Для моделирования работы стрелково-пушечного вооружения (СПВ) в случаях, не оговоренных особо, продолжительность $t_{СПВ}$, не должна превышать 2 с с интервалами между ними не менее 60 с. Для моделирования ударов от срабатывания катапульт информации задается в виде:

- спектральной плотности ускорения $S_{\text{сб}}(f)$;
- максимальной амплитуды виброускорения A_{max} и процентного распределения виброускорения по частотам.

Для моделирования, режима взлет-посадка информация задается

- в виде ШСВ;
- в виде максимальной амплитуды виброускорения для нескольких частот заполнения, длительности и количества ударов.

При моделировании виброударных процессов, возникающих при взлете (посадке) самолета (вертолета) корабельного базирования, дополнительно задаются следующие характеристики:

- спектр, максимальное значение виброускорения и длительности виброударов при трамплинном (катапультном) взлете;
- спектр, максимальное значение виброускорения и длительности виброудара при срабатывании аэрофинишера.

Для формирования базового цикла разрабатываются 2–3 циклограммы механических воздействий, соответствующих различным типовым задачам, решаемым самолетом (вертолетом), и содержащих большую часть возможных режимов полетов. Частота воспроизведения различных циклограмм в базовом цикле должна соответствовать частоте выполнения соответствующих задач при боевой подготовке. При отсутствии реальных замеров уровней ШСВ на ЛА или его прототипе допускается формировать циклограммы механических воздействий на основе основных технических требований (ОТТ) с соблюдением распределения продолжительности воздействия соответствующих уровней виброускорения в процентном соотношении от всего времени испытаний.

1.2. Климатические ВВФ

Основными климатическими ВВФ, воспроизводимыми при испытаниях, являются барометрическое давление и температура воздуха в отсеке ЛА, влажность при испытаниях по последовательной схеме. Подготовка исходных данных для формирования циклограмм климатических воздействий проводится с учетом особенностей изменения их характеристик и функциональных воздействий на этапах: предполетном; полета; послеполетном. Длительность послеполетного этапа определяется временным интервалом от момента посадки ЛА до момента достижения БО значения суточной температуры на этапе стоянки. Изменение барометрического давления в течение типового цикла должно соответствовать (с учетом возможностей оборудования) его изменению в отсеке самолета (вертолета) в зависимости от высоты $H(t)$ моделируемого полетного задания. При формировании базового цикла эксплуатации разрабатываются температурные циклограммы типовых циклов для трех климатических районов, задающих экстремальные условия сезонных периодов эксплуатации ЛА:

- очень холодный — зимний период;
- умеренно холодный — весенне-осенний период;
- очень жаркий — летний период.

Температурная циклограмма типового цикла эксплуатации состоит из двух этапов;

- t'_0 – время, в течение которого моделируется условие стоянки на земле для соответствующего периода, эксплуатации, включая режим функционирования на земле при проверках;
- t_n — продолжительность имитации полетных условий в типовом цикле испытаний.

Формирование базового цикла эксплуатации проводится на основе данных по распределению температур на этапе стоянки самолета (вертолета) для трех климатических районов, задающих экстремальные условия сезонных периодов за календарный год эксплуатации, путем задания экстремальных значений температур в соответствующих температурных диапазонах и приведением их к условному году эксплуатации.

Количество типовых циклов, соответствующих i -м условиям стоянки, определяется по формуле $n_i = n_r \mu_i$. В технически обоснованных случаях по решению разработчика ЛА или разработчика и изготовителя БО в состав ВВФ могут назначаться дополнительные факторы (например, влажность, массовая скорость перемещения воздуха, поступающего на охлаждение, туман, термоудары, броски напряжения питания и т.д.), оказывающие существенное влияние на работоспособность БО, устанавливаемого на конкретном ЛА. Уровни дополнительных ВВФ должны соответствовать реальным значениям, а время воздействия должно быть согласовано с основными циклограммами испытаний. При назначении в состав ВВФ относительной влажности базовый цикл формируется в соответствии с данными по распределению температур и относительной влажности на стоянках ЛА за календарный год эксплуатации, и данными по распределению температур, частоты i -х условий стоянки, μ_i и относительной влажности в условном году эксплуатации по климатическим районам.

2. Порядок проведения испытаний

Беспилотное оборудование, поступившее на испытание, проходит проверку и регулировку согласно техническим условиям (ТУ) и ПИ. После контроля и регулировок БО устанавливается на испытательных стендах и подключается к контрольно-проверочной аппаратуре, контрольно-записывающей аппаратуре, имитаторам внешних систем и т.д. В случае испытаний на комплексные воздействия последовательно имитируется L базовых циклов эксплуатации. Реализация полетных циклов внутри годового цикла производится в соответствии с циклограммами полетных циклов. При последовательной схеме испытаний в базовом цикле сначала воспроизводятся нагрузки, задаваемые циклограммами механических воздействий в годовом объеме N_T , а затем нагрузки, задаваемые циклограммами климатических воздействий. При реализации температурных циклограмм контроль производится по показаниям датчика, контролирующего температуру воздуха в камере.

Воспроизведение ВВФ и имитация работы стрелково-пушечного вооружения участками ШСВ проводятся по ГОСТ 30630.0.0-99 «Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Общие требования». При испытаниях фиксируются:

- характеристики воздействий внешних факторов;
- наработка и значения входных и выходных (определяющих) параметров во время контроля испытуемого БО;
- моменты возникновения отказов (повреждений);
- режимы работы, при которых зарегистрированы отказы, их характер;
- моменты снятия БО с испытаний.

При возникновении отказа испытания останавливаются, БО восстанавливается, а при необходимости — дорабатывается. После восстановления БО испытания не заканчиваются, но засчитывается количество проведенных циклов. При возникновении повреждения цикл продолжается. После его окончания БО при необходимости восстанавливается (дорабатывается), после чего производится корректировка числа испытательных циклов, если имело место учитываемое повреждение, и испытания продолжаются. После окончания испытаний производится дефектация БО с целью выявления возникших повреждений.

2.1. Планирование контрольных и определительных испытаний систем

Предполагается, что на момент испытаний информация о фактическом вне безотказности испытываемого БО отсутствует. Необходимо спланировать число испытаний для определения или подтверждения вероятности безотказной работы БО за время одного полета (или цикла испытаний).

В том случае, если показатель безотказности задан в виде наработки или налета:

- для показателя среднего налета на отказ, приводящего к невыполнению боевого задания $T_{6,3}$, вероятность безотказной работы при выполнении боевого задания $P_{6,3}$ рассчитывается по формуле

$$P_{6,3} = T_{6,3} / T_{\delta,3} + t_{\Pi}.$$

Для показателя наработки (налета) на отказ в полете $T_{оп(по)}$ вероятность безотказной работы в полете

$P_{оп(по)}$ рассчитывается по формуле

$$P_{оп(по)} = \frac{2T_{оп(по)} - t_{фп(п)}}{2T_{оп(по)} + t_{фп(п)}},$$

где $t_{фп(п)}$ — продолжительность функционирования системы в полете. Для показателя средней наработки на отказ в полете и на земле T_o вероятность безотказной работы P_o рассчитывается по формуле:

$$P_o = \frac{2T_o - t_{фп(п)} - t_{пров}}{2T_o + t_{фп(п)} + t_{пров}},$$

где $t_{пров}$ — суммарная продолжительность предполетной и послеполетной проверок. Для показателя средней наработки на отказ и повреждений, выявленных в полете и на земле при всех видах технического обслуживания, T_c вероятность безотказной работы P_c рассчитывается по формуле: $P_c = (T_c - t) / T$. Для показателя средней наработки на отказ и повреждений, выявленных в полете и на земле при всех видах технического обслуживания, T'_c вероятность безотказной работы P'_c , рассчитывается по формуле:

$$P'_c = \frac{T'_c - t_{фп} - t_{пров} - qt_{повт.пров}}{T'_c},$$

где q — частота повторных проверок; $t_{повт.пров}$ — продолжительность повторных проверок. Зависимость общего количества типовых циклов n^* , необходимых для подтверждения требуемого значения вероятности безотказной работы с заданной доверительной вероятностью γ , от количества отказов и повреждений m^* при отсутствии доработок задается уравнением:

$$\gamma = \frac{\Gamma(n^* + 2)}{\Gamma(n^* - m^* + 1)\Gamma(m^* + 1)} \int_{P_H} p^{n^* - m^*} (1 - p)^{m^*} dp,$$

где P_H — нижняя граница вероятности безотказной работы.

Решение уравнения — общее количество типовых циклов n^* , реализуемых в процессе испытаний, необходимых для подтверждения требуемого значения вероятности безотказной работы P с заданной доверительной вероятностью γ приведено в [1], а определение общего количества типовых циклов n^* , реализуемых в процессе испытаний, с помощью аппроксимирующей зависимости приведено в [3]. При планировании контрольных испытаний в качестве P_H выбирается требуемый уровень вероятности безотказной работы, соответствующий ТТЗ(ТЗ). Допускается планировать испытания по нижней доверительной границе. При этом для систем со средней наработкой (налетом) на отказ $T_o < 150$ ч — значение относительной погрешности $d \leq 0.1$; для систем со средней наработкой (налетом) $1 T_o$ от 150 до 500 ч $d = 0.15$, а для остальных $d = 0.20$. При планировании определительных испытаний на безотказность должны быть указаны ожидаемое значение вероятности безотказной работы $P_{ож}(T_{ож})$ и максимально допустимая дисперсия оценки $D(P_{ож})$ оценки $P_{ож}$.

Общее количество типовых циклов n^* при отсутствии доработок БО в процессе испытаний и отсутствии информации о вероятности безотказной работы P перед началом испытаний вычисляется по формуле

$$n^* = \left\lceil \frac{P_{ож}(1 - P_{ож})}{D(P_{ож})} - 3 \right\rceil.$$

Планирование контрольных испытаний подсистем с целью контроля соответствия вероятности безотказной работы P систем заданным уровням. Планирование испытаний подсистем осуществляется на основе заданных на систему значений вероятности безотказной работы системы P и вероятности безотказной работы ее подсистемы P_i , на основе заданных значений P и γ , выбирается план испытаний ($n^*; m^*$) для системы и вычисляется значение условной частоты отказов системы $R: R(n^*; m^*; \gamma) = \hat{Q} / Q$, где Q — вероятность отказа, $\hat{Q}$ — частота отказов системы. Для каждой составляющей определяется допустимое значение частоты отказов i -й составляющей системы (толерантная граница) Q_i для частоты отказов при реализации выбранного для системы плана испытаний $\tilde{Q}_i = Q[R(n^*; m^*; \gamma)]^{1/a_i}$, где $Q_i = 1 - P_i$, a_i — кратность резервирования i -й составляющей системы.

Допустимое количество отказов и повреждений подсистемы m_i^* и общее количество типовых циклов подсистемы n_i^* для каждой составляющей (подсистемы) вычисляется по формулам

$$m_i^* = \begin{cases} \lceil \tilde{Q}_i n^* \rceil + 1, & \text{если } \tilde{Q}_i \cdot n^* > 1, \\ \lceil \tilde{Q}_i n^* \rceil, & \text{если } \tilde{Q}_i \cdot n^* = 1, \\ 0, & \text{если } \tilde{Q}_i \cdot n^* < 1, \end{cases} \quad n_i^* = \begin{cases} m_i^* / \tilde{Q}_i, & \text{если } \tilde{Q}_i n^* \geq 1 \\ n^*, & \text{если } \tilde{Q}_i n^* < 1 \end{cases}.$$

План испытаний для i -й подсистемы назначается в зависимости от значения $\tilde{Q}_i n^*$. Если $\tilde{Q}_i n^* < 1$, то для i -й подсистемы назначается план испытаний объемом n^* с нулем отказов; если $\tilde{Q}_i n^* \geq 1$, то для i -й подсистемы назначается план испытаний для подтверждения вероятности безотказной работы подсистемы P_i с ограничением объема значения n_i^* . При планировании испытаний подсистем, проводимых с целью оценки показателей безотказной системы, объем испытаний каждой подсистемы назначается равным объему, рассчитанному для системы.

При оценке и контроле показателей безотказности не учитываются зависящие отказы, отказы, происшедшие по вине обслуживающего персонала, отказы, возникшие в результате превышения при испытаниях реальных уровней ВВФ. При оценке и контроле показателей $P_{бз}(T_{бз})$, $P_{оп(по)}(T_{оп(по)})$ не учитываются отказы, происшедшие при воспроизведении участков циклограмм, имитирующих предполетные и послеполетные условия, а для систем, включающих резервные группы элементов, не учитываются отказы отдельных элементов резервных групп (отказом считается отказ всех групп элементов). При оценке и контроле показателя $P_o(T_o)$ учитываются отказы отдельных элементов резервных групп, возникшие при имитации предполетных и послеполетных условий, и отказ всех элементов резервной группы, возникший при имитации полета (отказы отдельных элементов резервной группы, возникшие при имитации полета, не учитываются). При оценке и контроле показателя $P_c(T'_c)$ учитываются все отказы и повреждения, возникшие на любом участке циклограммы испытаний. При отсутствии информации о вероятности безотказной работы БО и отсутствии доработок в процессе испытаний оценка вероятности безотказной работы $\hat{P}$ и ее дисперсия $D(\hat{P})$ вычисляются по формулам:

$$\hat{P} = \frac{k+1}{k+m+2}; \quad D(\hat{P}) = \frac{\hat{P}(1-\hat{P})}{k+m+1},$$

где m — число испытаний, в которых произошли отказы; k — число успешных испытаний изделия. В том случае, если в процессе испытаний проводились доработки, оценка вероятности безотказной работы $\hat{P}$ и ее дисперсия $D(\hat{P})$, соответственно определялись по формулам:

$$\hat{P} = \frac{k+1}{1}; \quad D(\hat{P}) = \frac{\hat{P}(1-\hat{P})}{1};$$

$$k+m_0 + \sum_{i=1}^l r_i + m_i + 2, \quad k+m_0 + \sum_{i=1}^l r_i + m_i + 3, \quad r_i = \frac{\frac{k_i + j}{n_i + k_i + j}}{\frac{k_i + j}{n_i + k_i + j} + l},$$

где m_0 — количество отказов, по причинам возникновения которых доработки не проводились; l — количество причин отказов, по которым проведены доработки; r_i — вероятность неустранения, проведенной доработкой i -й причины отказа; k_i — количество успешных испытаний до проведения доработки БО с целью устранения i -й причины отказа; m_i — количество отказов по i -й причине, происшедших до проведения соответствующей доработки; n_i — количество успешных циклов испытаний после доработки БО с целью устранения i -й причины отказа.

Если после доработки БО с целью устранения i -й причины отказа вновь возникает отказ по этой причине, то считаем $r_i = 1$ до момента следующей доработки по i -й причине отказа.

Оценка безотказности в форме наработки на отказ определяется по формулам:

$$T_{бз} = \frac{(k+1)t_{\pi}}{m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i}, \quad T_{оп(по)} = \frac{(k+1)t_{\phi\pi(п)}}{m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i} + 0.5t_{\phi\pi(п)}, \quad T_0 = \frac{(k+1)(t_{\phi\pi} + t_{\piров})}{m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i} + 0.5(t_{\phi\pi} + t_{\piров}),$$

где $m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i \geq 1$;

$$T_c = \frac{\left(k + m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i + 1\right) t_{\pi}}{m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i + d_0 + \sum_{i=1}^l r_{\text{ни}} d_i}, \quad T'_c = \frac{\left(k + m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i + 1\right) (t_{\phi\pi} + t_{\piров} + q t_{\text{повт.пров}})}{m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i + d_0 + \sum_{i=1}^l r_{\text{ни}} d_i},$$

где $m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i + d_0 + \sum_{i=1}^l r_{\text{ни}} d_i \geq 1$ d_0 — количество повреждений, по причинам возникновения которых доработки не проводились. Если в приведенных зависимостях знаменатель принимает значение, меньшее единицы, то принимаем его равным единице.

Дисперсия оценок этих показателей определяется по формулам

$$D(T_{\delta.3(оп,по)}) = \frac{(k+1)(k+2)t_{\Pi(оп,по)}^2}{(m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i)(m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i - 1)} - T_{\delta.3(оп,по)}^2; \quad D(T_0) = \frac{(k+1)(k+2)(t_{\Pi} + t_{\Pi_{прог}})^2}{(m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i)(m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i - 1)} - T_0^2$$

при $m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i \geq 2$;

$$D(T_0) = \frac{(k + m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i + 1)(k + m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i + 2)t^2}{(m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i + d_0 + \sum_{i=1}^l r_i d_i)(m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i + d_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i - 1)} - T_c^2$$

при $m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i + d_0 + \sum_{i=1}^l r_i d_i \geq 2$;

где l_H — количество причин повреждений, по которым проведены доработки; d_i — количество повреждений, происшедших по i -й причине; r_{ni} — вероятность неустранения проведенной доработкой БО i -й причины повреждения.

Контроль соответствия показателя безотказности требованиям, заданным ТЗ(ТТЗ) при отсутствии доработок осуществляется следующим образом:

- если в первых n_0^* испытаниях отказов не было, то принимаются решения о соответствии БО заданным требованиям;
- если произошел один отказ(повреждение), то общее число испытаний увеличивается до n_1^* , если два, то до n_2^* и т.д.;
- если при проведении n_m^* испытаний количество отказов(повреждений) меньше или равно m^* , то принимается решение о соответствии БО заданным требованиям, в противном случае, испытания продолжают вплоть до максимального допустимого объема испытаний $n_{\max}^*$, соответствующего числу отказов(повреждений) $m_{\max}^*$;
- если при проведении $n_{\max}^*$ испытаний число отказов (и повреждений) меньше или равно $m_{\max}^*$, то принимается решение о соответствии БО требованиям ТЗ по безотказности, в противном случае принимается решение о несоответствии ТЗ. В том случае, если в процессе испытаний проводятся доработки БО, то контроль на соответствие ТЗ проводится так, что если на некоторый момент испытаний выполняется условие

$$\left. \begin{aligned} k + m_0 \pm \sum_{i=1}^l r_i m_i &\geq n_m^* \\ m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i &\leq m^*, \end{aligned} \right\}$$

то с уровнем доверия γ требования ТЗ выполнены.

При контроле показателя $P_c(T_c)$ должны выполняться условия:

$$\left. \begin{aligned} k + m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i &\geq n_m^*; \\ m_0 + \sum_{i=1}^l r_i m_i + d_0 + \sum_{i=1}^l r_i d_i &\leq m^*; \end{aligned} \right\}.$$

Если перед началом испытаний имелась информация о безотказности из эксплуатации или предыдущего этапа испытаний, то необходимое число испытаний может быть уменьшено. Оценка и контроль соответствия показателя безотказности систем заданным требованиям по результатам испытаний подсистем

При планировании испытаний применяется следующее правило контроля:

- для планов с нулевым количеством отказов подсистема считается выдержавшей испытания, если при проведении n^* испытаний, отказов зарегистрировано не было, а в случае возникновения отказов, устраненных путем доработок — при выполнении условия:

$$\sum_{j=1}^l r_{ij} m_{ij} < \tilde{Q}_i n^*,$$

где r_{ij} — вероятность неустранения доработкой i -й подсистемы j -й причины отказа; m_{ij} — число отказов i -й подсистемы, происшедших по j -й причине.

Эквивалентные результаты испытаний «укрупненной» системы, состоящей из последовательно соеди-

ненных подсистем, вычисляются по формулам:

$$\hat{P}_i = \frac{k_i}{k_i + m_i + \sum_{j=1}^l r_{ij} m_{ij}}; \hat{P}_U = \prod_{i=1}^T \hat{P}_i; N_U = \min(k_i + m_i + \sum_{j=1}^l r_{ij} m_{ij}); K_U = N_U \hat{P}_U; m_U = N_U - K_U,$$

где $\hat{P}_i$ — частота невозникновения отказов i -й подсистемы с учетом проведенных доработок); $\hat{P}_U$ — эквивалентная частота успешных испытаний укрупненной системы; N_U — общее эквивалентное количество испытаний укрупненной системы; k_U — эквивалентное количество успешных испытаний укрупненной системы; m_U — эквивалентное количество испытаний с отказами укрупненной системы.

Нижняя γ -я доверительная граница показателя безотказности вычисляется с заменой k^* и m^* на k_U и m_U . Нижняя γ -я доверительная граница вероятности безотказной работы «укрупненной» подсистемы, состоящей из параллельно соединенных подсистем P_U вычисляется по формуле $\underline{P}_U = 1 - (1 - \underline{P}_U^{1/r})r$, где $\underline{P}_U$ — нижняя γ -я доверительная граница для последовательной цепочки, состоящей из тех же элементов. В том случае, если все элементы идентичны, нижняя γ -я доверительная граница определяется по формуле: $\underline{P}_U = 1 - (1 - \underline{P}_i)r$. Частота успешных испытаний для «укрупненной» подсистемы, состоящей из параллельно соединенных подсистем, определяется по формуле

$$\hat{P}_U = 1 - \prod_{i=1}^r (1 - \hat{P}_i).$$

Эквивалентное количество испытаний N_U определяется из уравнения

$$\gamma = \frac{\Gamma(N_U + 2)}{\Gamma(N_U \hat{P}_U + 1) \Gamma(N_U + N_U \hat{P}_U + 1)} \int_{\hat{P}_U} P^{N_U \hat{P}_U} (1 - p)^{N_U (1 - \hat{P}_U)} dp.$$

После получения значений k_U и m_U для системы находится нижняя γ доверительная граница контролируемой вероятности безотказной работы системы в соответствии с приложением Г и ее точечная оценка. Контроль соответствия системы заданным в ТЗ(ТТЗ) требованиям производится путем сравнения полученной нижней γ -й доверительной границы $\underline{P}_U$, с заданной на систему величиной P_{TP} . Если $\underline{P}_U \geq P_{TP}$, то считаем, что система удовлетворяет заданным требованиям. Изложенная методика должна использоваться при выдаче окончательного заключения для систем, содержащих резервные группы элементов, и при проведении контрольных испытаний в сборе в случае отказов подсистем, входящих в резервные группы. При этом, если резервные группы состоят из идентичных элементов, то значение P_i определяется исходя из объема испытаний n_i : $n_i = \sum_{i=1}^r (k_i + m_i)$.

2.1. Эквивалентно-циклические ускоренные испытания БО на безотказность

Данный раздел устанавливает методы планирования и проведения эквивалентно-циклических ускоренных контрольных испытаний БО на безотказность. Планирование эквивалентно — циклических ускоренных контрольных испытаний на безотказность. Ускорение достигается за счет увеличения значений воздействующих факторов и ужесточения режимов функционирования БО при испытаниях. Испытания на безотказность проводятся последовательным методом с усечением продолжительности испытаний и числа отказов m_{yc} при контроле средней наработки на отказ, или средней наработки до отказа, или усечением по числу циклов, испытаний N_{yc} и количеству отказов r_{yc} при контроле вероятности безотказной работы БО с сохранением рисков заказчика и поставщика.

Для ремонтируемого БО продолжительность испытаний ограничивается ресурсом до первого ремонта T_p , а для неремонтируемого БО — назначенным ресурсом T_{AH} . Количество испытываемых образцов БО определяется по выбранному плану испытаний. При этом учитывается сложность БО, его стоимость, объем заказов, требования директивных документов и т.д. Количество испытываемых образцов БО допускается устанавливать равным количеству образцов, предъявляемых на периодические испытания. Для выбора плана испытаний при контроле средней наработки на отказ или средней наработки до отказа БО используются следующие исходные данные:

α — риск поставщика;

β — риск заказчика;

T_α — приемочное значение средней наработки на отказ или средней наработки до отказа, при котором вероятность приемки БО равна $1 - \alpha$;

T_β — браковочное значение средней наработки на отказ или средней наработки до отказа, при котором вероятность браковки БО равна $1 - \beta$;

T_{TP} — значение средней наработки на отказ или средней наработки до отказа, заданное в ТТЗ(ТЗ) или ТУ.

При установлении интервала $[T_\alpha, T_\beta]$ значения T_β принимают равным T_{TP} заданному в ТТЗ (ТЗ) или ТУ. Отношение T_α / T_β следует устанавливать равным: 1,5–2,0 — для комплексов и систем БО и 2,0–3,0 — для подсистем БО. Риски поставщика α и заказчика β устанавливаются по согласованию между ними. Для принятых α , β и T_α / T_β шифр планов испытаний, уравнения линий, определяющих область соответствия и несоответствия, значения m_{yc} , B_{yc} . Средняя продолжительность испытаний для контроля средней наработки на отказ или средней наработки до отказа БО $\tilde{t}_{k,u}$ определяется по формуле $\tilde{t}_{k,u} \leq B T_\alpha / n$, где B — нормируемый коэффициент; n — число испытываемых образцов. Продолжительность испытаний $\tilde{t}_{k,u}$ разбивается не менее чем на три основных цикла. По согласованию с заказчиком может быть выбрано число циклов испытаний более трех. Продолжительность одного цикла соответственно будет равна одной трети к менее $\tilde{t}_{k,u}$. Для планирования испытаний при контроле вероятности безотказной работы задаются следующие исходные данные:

- приемочное значение вероятности отказа q_0 при котором вероятность приемки БО равна $1 - \alpha$;
- браковочное значение вероятности отказа q_1 , при котором вероятность браковки БО равна $1 - \beta$.

Значение q_1 определяется по формуле $q_1 = 1 - P(t)$, где $P(t)$ — значение вероятности безотказной работы, заданное в ТТЗ(ТЗ) или ТУ. Отношение q_1 / q_0 следует устанавливать равным: 1.5–2.0 — для комплексов и систем БО, а 2.0–3.0 — для подсистем БО. Порядок графического представления планов испытаний для контроля вероятности безотказной работы БО определяется в соответствии с ГОСТ 30630.0.0-99. Средняя продолжительность испытаний для контроля вероятности безотказной работы БО определяется по формуле $\tilde{t}_{k,u} \leq (N \cdot t_{6,p}) / n$, где N — число циклов испытаний длительность $t_{6,p} / n$ каждый; $t_{6,p}$ — продолжительность непрерывной работы, заданная в ТТЗ(ТЗ) или ТУ.

По согласованию с заказчиком при наличии предварительной информации о соответствии средней наработки на отказ или средней наработки до отказа БО требованиям, заданным в ТТЗ (ТЗ) или ТУ, значения T_α и T_β определяются из выражений:

$$T_\alpha = (m_{yc} \cdot T_{TP}) / t_{1-\alpha}; \quad T_\beta = (m_{yc} \cdot T_{TP}) / t_\beta,$$

где $t_{1-\alpha}$, t_β — квантили пуассоновского распределения.

3. Способы реализации воздействия внешних факторов при испытаниях

Реализация воздействующих факторов при испытании БО на безотказность проводится одним из следующих способов;

- комплексным — реализация воздействующих факторов осуществляется на одном испытательном стенде одновременно;
- комбинированным — реализация отдельных сочетаний воздействующих факторов осуществляется поочередно.

При комбинированных испытаниях количество испытательных стендов меньше количества воздействующих факторов. Частным случаем комбинированного способа является комплексный способ реализации воздействующих факторов. При отсутствии необходимого испытательного оборудования для реализации воздействующих факторов комплексным или комбинированным способами допускается проводить испытания БО на безотказность последовательным способом: реализация каждого воздействующего фактора осуществляется поочередно на соответствующем количестве испытательных стендов.

Выбор способа реализации воздействующих факторов и их состав: осуществляется разработчиком БО с учетом оснащенности и перспективы развития лабораторно-экспериментальной базы, а также степени влияния каждого воздействующего фактора на БО. Здесь t_{U1}^{PB} — продолжительность воздействия повышенной влажности в одном цикле испытаний; t'_{U1} — продолжительность максимального из воздействий широкополосной случайной вибрации (ШСВ) или циклического воздействия температур в одном цикле испытаний; $t_{U1}^{ШСВ}$ — продолжительность воздействия ШСВ в одном цикле испытаний по одной координатной оси; $t_{U1}^{\Delta T}$ — продолжительность циклических воздействий температур в одном цикле испытаний; t_{U1} — продолжительность одного цикла ускоренных испытаний.

3.1. Испытания БО на воздействие вибрации

При ускоренных испытаниях имитация эксплуатационных вибрационных нагрузок на БО осуществляется последовательным воспроизведением ШСВ в заданном диапазоне частот. При отсутствии испытательного оборудования, необходимого для воспроизведения ШСВ, испытания проводятся последовательно на:

- синусоидальную вибрацию (СВ), эквивалентную ШСВ, методом качающейся частоты;
- СВ с фиксированными частотами (при необходимости имитации вибрации БО от воздействия воздушных винтов самолета или вертолета);

— ударные воздействия.

БО должно подвергаться воздействию вибрации в режимах, имитирующих основные η -е режимы эксплуатации:

— полет (взлет–посадка, набор высоты, работа синусоидальных полетных вибраций (СПВ), выполнение фигур высшего пилотажа и т.д.);

— руление и обслуживание на земле.

Исходная информация по вибрационным воздействиям должна представляться в виде:

— максимальных значений спектральной плотности виброускорений для различных участков нормируемого диапазона частот по трем координатным осям для основных η -х режимов эксплуатации $S_{\max}^{\eta}(f)$;

— суммарной наработки БО на земле и в полете T_p ;

— наработки БО в полете T_{Π} ;

— суммарных средних квадратических виброускорений для η -х режимов эксплуатации $\delta_{\Sigma i}^{\eta}$;

— максимальных средних квадратических виброускорений для η -х режимов эксплуатации $\delta_{\max}^{\eta}(f)$;

— наработок БО в каждом η -м ($\eta = 1 - k$) режиме эксплуатации T^{η} .

БО должно испытываться поочередно по трем координатным осям в эксплуатационном положении с закреплением, имитирующим установку на борту ЛА. Под эксплуатационным положением понимается положение, при котором направление действия силы тяжести БО, установленного на вибростенде, соответствует ее направлению на ЛА.

Испытательный уровень спектральной плотности виброускорений $S_u^{\eta}(f)$, эквивалентны η -му ($\eta = 1 - k$) режиму эксплуатации, устанавливается разработчиком по результатам исследований и предварительных расчетов, проводимых с учетом запаса прочности конструкции и ее элементов, требований к БО по вибропрочности, заданным в ТТЗ(ТЗ) и ТУ, и технологических особенностей.

Коэффициент жесткости $K_{ж}$ определяется по формуле:

$$K_{ж} = \sigma_{\Sigma u}^{\eta}(f) / \sigma_{\max}^{\eta}(f).$$

Коэффициент ускорения испытаний на воздействие ШСВ, имитирующих η -й режим эксплуатации $K_y^{\eta ШСВ}$ в зависимости от величины средней продолжительности испытаний τ_{KU} . Продолжительность воздействия ШСВ при испытаниях, имитирующих η -й режим эксплуатации $K_y^{\eta ШСВ}$, определяется по формуле

$$t_u^{\eta ШСВ} = (\tilde{t}_{ки} \cdot A \cdot B^{\eta}) / K_y^{\eta ШСВ},$$

где A — доля наработки БО η -м режиме эксплуатации T_{Π} от наработки БО на земле полете T_p ; B^{η} — доля наработки БО η -м режиме эксплуатации T^{η} от наработки БО в полете T_{Π} .

Доля наработки БО в полете от суммарной наработки БО на земле и в полете A определяется по формуле $A = T_{\Pi} / T_p$. Доля наработки БО в η -м режиме эксплуатации от наработки БО в полете B^{η} определяется по формуле $B^{\eta} = T^{\eta} / T_{\Pi}$. Продолжительность воздействия ШСВ при испытаниях, имитирующих η -е ($\eta = 1 - k$) режимы эксплуатации, в одном цикле испытаний по одной координатной оси $t_{U1}^{\eta ШСВ}$ определяется по следующей формуле:

$$t_{U1}^{\eta ШСВ} = \left(\tilde{t}_{ки} \cdot A \cdot \sum_{\eta=1}^k \frac{B^{\eta}}{K_y^{\eta ШСВ}} \right) / N.$$

3.2. Испытания на воздействие синусоидальной вибрации методом качающейся частоты

Синусоидальное виброускорение $\alpha_{\delta i}^{\eta}$, эквивалентное максимальному значению спектральной плотности $S_{\max}^{\eta}$ для i -й частоты и η -го режима эксплуатации, определяется по формуле

$$\alpha_{\delta i}^{\eta} = K_{CB.K.Ч} \sqrt{S_{\max}^{\eta} i \Delta f_{pj}},$$

где $K_{CB.K.Ч}$ — коэффициент перевода из ШСВ в СВ с качающейся частотой; Δf_{pj} — ширина резонансной полосы частот в зависимости от диапазона частот. По рассчитанным значениям $\alpha_{\delta i}^{\eta}$ строится спектр синусоидальных виброускорений $\alpha_j^{\eta}(f)$, эквивалентный спектру $S_{\max}^{\eta}$, по которому разработчик БО формирует базовый спектр $\alpha_{\delta}^{\eta}(f)$. Под базовым спектром $\alpha_{\delta}^{\eta}(f)$ понимается спектр, сформированный по максимальным значениям синусоидальных виброускорений $\alpha_{\delta j}^{\eta}$ в j -х ($j = 1 - M$) диапазонах частот, устанавливаемых разработчиком БО, т.е. $\alpha_{\delta \delta}^{\eta}(f) = \max \{ \alpha_j^{\eta} \} j$.

Значения частотных диапазонов с постоянным уровнем виброускорений устанавливаются с учетом возможностей их реализации на испытательном оборудовании. Испытательный уровень виброускорения $\alpha_{ij}^{\eta}(f)$ в j -м диапазоне, соответствующий η -му режиму эксплуатации, устанавливается разработчиком по результатам исследований предварительных расчетов, проводимых с учетом запаса прочности, конструкции и ее элементов, требований к БО по вибропрочности, заданным в ТТЗ (ТЗ) или ТУ, и технологических

особенностей. Коэффициент жесткости $K_{ж}$ определяется по формуле $K_{ж} = \alpha_{ij}^{\eta}(f) / \alpha_{sj}^{\eta}(f)$.

Продолжительность испытаний на воздействие синусоидальной вибрации методом качающейся частоты определяется по формуле

$$t_u^{CB.K.ч} = \sum_{\eta=1}^k \sum_{j=1}^M \tilde{t}_{ку} AB^{\eta} \frac{\eta_j l_n (f_B / f_H)^j}{K_{жj}^{mj}},$$

где f_B, f_H — соответственно верхняя и нижняя частоты j -го ($j = 1 - M$) диапазона; $K_{жj}$ — коэффициент жесткости для j -го диапазона частот. Здесь значения условной добротности на резонансной частоте η_j и тангенс угла наклона кривой усталости m_j для j -х диапазонов частот заданы. Продолжительность испытаний на воздействие синусоидальной вибрации методом качающейся частоты в одном цикле испытаний по одной координатной оси $t_{U1}^{CB.K.ч}$ определяется по формуле $t_{U1}^{CB.K.ч} = t_u^{CB.K.ч} / N$.

Синусоидальное виброускорение α_{ji}^{η} , эквивалентное максимальному значению спектральной плотности $S_{\max i}^{\eta}$ для фиксированной i -й ($i = 1 - D$) частоты БО и η -го ($\eta = 1 - k$) режима эксплуатации, определяется по формуле $\alpha_{ji}^{\eta} = K_{CB.ф.ч} \sqrt{S_{\max i}^{\eta} \Delta f_{pj}}$, где $K_{CB.ф.ч}$ — коэффициент перевода из ШСВ в СВ с фиксированными частотами; Δf_{pj} — ширина узкополосной полосы частот в зависимости от диапазона частот. Испытательный уровень виброускорения α_{ji}^{η} для i -й ($i = 1 - D$) фиксированной частоты БО и η -го режима эксплуатации устанавливает разработчик по результатам предварительных расчетов, производимых с учетом запаса прочности конструкции и ее элементов, требований к БО по прочности, заданным в ТТЗ (ТЗ) или ТУ, и технологических особенностей. Коэффициент жесткости КЖ определяется по формуле $K_{ж} = \alpha_{ui}^{\eta} / \alpha_{sj}^{\eta}$. Продолжительность испытаний на СВ с фиксированными частотами $t_{U1}^{\text{н.д.с.}}$, определяется по формуле:

$$t_u^{CB.ф.ч} = \sum_{\eta=1}^k \sum_{j=1}^D \frac{\tilde{t}_{ку} \cdot A \cdot B^{\eta}}{K_{жj}^{mj}}.$$

Продолжительность испытаний на СВ с фиксированными частотами в одном цикле испытаний по одной координатной оси $t_{U1}^{CB.ф.ч}$ определяется по формуле: $t_{U1}^{CB.ф.ч} = t_u^{CB.ф.ч} / N$. Для проведения испытаний на воздействие СВ с фиксированными частотами фиксированные частоты БО устанавливаются экспериментально.

3.3. Испытания на ударные воздействия

Уровень ударных нагрузок при испытании на безотказность назначается исходя из результатов измерений (или прогноза) ударных воздействий в местах установки БО на ЛА.

Суммарное количество ударов φ_{U1}^{yD} по трем координатам осей, эквивалентное установленному в ТТЗ(ТЗ) и ТУ назначенному сроку службы, определяется по формуле

$$\varphi_{U1}^{yD} = Q_{\Gamma} \cdot T_{CH}$$

где Q_{Γ} — количество полетов самолета(вертолета) за год эксплуатации; T_{CH} — назначенный срок службы БО. Количество ударов в одном цикле испытаний по одной координатной оси φ_{U1}^{yD} определяется так

$$\varphi_{U1}^{yD} = \varphi_{U1}^{yD} / N.$$

Продолжительность ударных воздействий в цикле испытаний по одной координатной оси t_{U1}^{yD} определяется по формуле

$$t_{U1}^{yD} = \varphi_{U1}^{yD} / (F \cdot 60),$$

где F — количество ударов в одну минуту ($F = 40_80$).

3.4. Испытания на воздействие повышенной влажности

Продолжительность воздействия повышенной влажности в одном цикле испытаний t_{U1}^{PB} при контроле показателей безотказности определяется по формуле $t_{U1}^{PB} = t_{U1}^{PB} \cdot T_c / N$ где t_{U1}^{PB} — продолжительность ускоренных испытаний на воздействие повышенной влажности, эквивалентная воздействию влаги в течение года эксплуатации в зависимости от установившейся температуры в камере; T_c — срок службы БО, соответствующий наработке, равной $\tilde{t}_{ку}$. В процессе воздействия повышенной влажности БО должно находиться в камере в выключенном состоянии. Периодически необходимо осуществлять кратковременное включение-выключение БО. По согласованию с заказчиком в технически обоснованных случаях с учетом конструктивно-технологических особенностей БО испытание на воздействие повышенной влажности допускается не проводить.

3.5. Испытания на циклическое воздействие температур

Исходная информация по циклическому воздействию температур должна представляться в виде:

- значения температуры окружающей среды в отсеке самолета(вертолета) в режиме применения $T_{от}$
- количества полетов самолета(вертолета) Q продолжительностью более 1 ч за подтверждаемый срок службы;
- количества кратковременных полетов самолета (вертолета) $Q_{к.п}$ продолжительностью, равной или менее 1 ч за подтверждаемый срок службы;
- количества кратковременных стоянок самолета (вертолета) $Q_{к.ст}$ продолжительностью, равной или менее 1 ч за подтверждаемый срок службы;
- назначенного срока службы $T_{сн}$.

Количество испытательных термоциклов $\varphi_{от}^{\Delta T}$, эквивалентное Q , определяется по формуле: $\varphi_{от}^{\Delta T} = \varphi_{и.г}^{\Delta T} Q / 100$, где $\varphi_{и.г}^{\Delta T}$ — количество испытательных термоциклов, эквивалентное $Q = 100$. Количество испытательных термоциклов $\varphi_{у.г.т}^{\Delta T}$, эквивалентное $Q_{н.}$, определяется по формуле

$$\varphi_{у.г.т}^{\Delta T} = Q_{к.п} \left(\frac{T_{от} \cdot (1 - e^{-mt_{к.п}})}{\Delta T_u} \right)^3,$$

где m — темп нагрева БО при естественном нагреве (охлаждении). Для БО массой менее 0.5 кг $m = (0.72 \pm 3.60) \text{ ч}^{-1}$. Для БО массой более 0.5 кг $m = 0.72 \text{ ч}^{-1}$; $t_{н.}$ — продолжительность кратковременного полета (принимается равной 1 ч).

Количество испытательных термоциклов $\varphi_{у.к.ст}^{\Delta T}$, эквивалентное $Q_{к.ст}$, определяется по формуле

$$\varphi_{у.к.ст}^{\Delta T} = Q_{к.ст} \left(\frac{e^{-mt_{к.ст}}}{\Delta T_u} \right)^3,$$

где $t_{к.ст}$ — продолжительность кратковременных стоянок (принимается равной 1 ч).

Количество испытательных термоциклов $\varphi_{у.хр}^{\Delta T}$, эквивалентное количеству циклов изменения температур на стоянке самолета(вертолета) за подтверждаемый срок службы T_c , определяется по формуле: $\varphi_{у.хр}^{\Delta T} = \varphi_{у.хр.г}^{\Delta T} \cdot T_c$, где $\varphi_{у.хр.г}^{\Delta T}$ — количество испытательных термоциклов, эквивалентное количеству циклов изменения температур на ЛА за год эксплуатации. Общее количество испытательных термоциклов в одном цикле испытаний БО для выбранного значения испытательного диапазона изменения температур определяется по формуле $\varphi_{и.г}^{\Delta T} = (\varphi_{и.г}^{\Delta T} + \varphi_{у.к.п}^{\Delta T} + \varphi_{у.к.ст}^{\Delta T} + \varphi_{у.хр}^{\Delta T}) / N$.

Продолжительность циклических воздействий температур в одном цикле испытаний $t_{и.г}^{\Delta T}$ определяется по формуле

$$t_{и.г}^{\Delta T} = \varphi_{и.г}^{\Delta T} (\tau_o + \tau_n),$$

где τ_n , τ_o — продолжительность достижения (нагрева τ_n , охлаждения τ_o), наиболее массивным узлом (элементом) БО установленной температуры в испытательной камере. Значения τ_n , τ_o и определяются экспериментально. Циклическое воздействие температур на БО должно осуществляться методом двух камер — тепле и холода. Время переноса БО из одной камеры в другую должно определяться объемом монтажных работ. Допускается испытание БО на циклическое воздействие температур проводить в одной камере, при этом скорость изменения температуры должна быть не менее $2^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$.

4. Режим работы БО ЛА

Форсирование режима работы БО при испытаниях с целью обеспечения эквивалентности по продолжительности функционирования в эксплуатации достигается:

- работой БО в ужесточенном режиме — с повышенной электрической нагрузкой и повышенной температурой окружающей среды;
- работой БО в нормальном режиме при воздействии увеличенных значений воздействующих факторов. Электрическая нагрузка и температура окружающей среды при работе БО в ужесточенном режиме не должны превышать максимально допустимых значений, установленных действующими нормативными документами для наименее надежного комплектующего изделия (КИ) БО. Коэффициент ускорения работы БО в ужесточенном режиме определяется по формуле $K_{уф} = \lambda_u(P) / \lambda_o(P)$, где $\lambda_u(P)$ — интенсивность отказов наименее надежного КИ БО, соответствующая электрической нагрузке и температуре корпуса КИ при работе БО в ужесточенном режиме; $\lambda_o(P)$ — интенсивность отказов наименее надежного КИ БО, соответствующая электрической нагрузке и температуре корпуса КИ при работе БО в режиме применения. Отношение $\lambda_u(P) / \lambda_o(P)$ равно отношению коэффициентов режима K_p или его составляющих.

Значения температур корпуса КИ при работе БО в ужесточенном режиме и режиме применения определяются экспериментально.

Работа БО в нормальном режиме при воздействии увеличенных значений воздействующих факторов осуществляется следующим образом:

- при вибрационных воздействиях БО должно находиться в рабочем состоянии. При этом осуществляется периодическое кратковременное включение-выключение аппаратуры;
- при ударных нагрузках БО должно находиться в рабочем состоянии. При этом осуществляется периодическое кратковременное включение-выключение БО;
- при воздействии повышенной влажности БО должно находиться в выключенном состоянии. В процессе испытаний необходимо осуществлять периодическое кратковременное включение-выключение БО;
- при испытаниях на циклическое воздействие температур БО должно находиться в рабочем состоянии. При этом осуществляется периодическое кратковременное включение-выключение БО. Количество включений-выключений БО ψ определяется по формуле $\psi = 2Q + 2Q_{к.п.}$. При ускоренных испытаниях количество включений-выключений распределяется прямо пропорционально продолжительностям испытаний на воздействие испытательных факторов. При проведении испытаний последовательным способом продолжительность работы БО в ужесточенном режиме $t_{уф}$ определяется по формуле $t_{уф} = t_{уф0} - t_{у.привед}^{\Delta T}$ где $t_{уф0}$ — продолжительность работы БО в ужесточенном режиме, эквивалентная продолжительности работы БО в нормальных условиях в режиме применения; $t_{у.привед}^{\Delta T}$ — приведенная продолжительность работы БО при испытаниях на воздействие циклических изменений температур.

Значение $t_{уф0}$ определяется по формуле

$$t_{уф0} = \tau_{ки} / K_{у.ф}$$

Приведенная продолжительность работы БО при испытаниях на воздействие циклических изменений температур определяется по формуле

$$t_{у.привед}^{\Delta T} = t_u^{\Delta T} / K_{у.ф}^{\Delta T}$$

где $K_{у.ф}^{\Delta T}$ — коэффициент ускорения работы БО при испытании на воздействие циклических изменений температур за счет повышения температуры окружающей среды при испытаниях.

Коэффициент ускорения работы БО при испытаниях на циклическое изменение температур $K_{у.ф}^{\Delta T}$, определяется по формуле $K_{у.ф}^{\Delta T} = \lambda_u / \lambda_\Delta$, где λ_u , λ_Δ — интенсивности отказов наименее надежного КИ БО, соответствующие температурам окружающей среды при испытании на циклическое воздействие температур и работе в режиме применения. При проведении испытаний комбинированным способом продолжительность работы БО в ужесточенном режиме $t_{уф}$ определяется по формуле:

$$t_{уф} = t_{уф0} - \sum_{ae}^{z-1} t_{уф.привед}$$

где $t_{уф.привед}$ — приведенная продолжительность работы БО при воздействии комбинации воздействующих факторов.

Приведенная продолжительность работы БО при воздействии комбинации факторов определяется по формуле $t_{уф.привед} = t_{уф} / K_{у.ф.ае}$ где $t_{уф}$ — коэффициент ускорения работы БО при воздействии комбинации χ [$\chi = 1 - (z - 1)$] воздействующих факторов; $K_{у.ф.ае}$ — коэффициент ускорения работы БО при испытаниях на воздействие комбинации χ [$\chi = 1 - (z - 1)$] воздействующих факторов.

Коэффициент ускорения работы БО $K_{уф}$ определяется так

$$K_{у.ф.ае} = \lambda_{уф} / \lambda_\Delta$$

где $\lambda_{уф}$ — интенсивность отказов наименее надежного комплектующего изделия БО, соответствующая температуре окружающей среды при испытаниях на воздействие комбинации χ [$\chi = 1 - (z - 1)$] воздействующих факторов.

При проведении испытаний комплексным способом продолжительность работы БО в ужесточенном режиме $t_{уф} = t_{уфп}$.

Объемы испытаний на воспроизведение режима работы БО могут быть сокращены, если:

- предварительными исследованиями установлено, что тепловые и электрические нагрузки КИ БО находятся в пределах допустимых значений;
- срок службы и ресурс БО не превышает сроков службы и ресурсов КИ БО.

В этом случае коэффициент ускорения работы БО определяется по формуле

$$K_y = 1 / \left(\sum_{\eta=1}^k B^\eta \cdot \exp \left[-\frac{E}{R} \left(\frac{T_g^* - T^*}{T_g^* \cdot T_\eta^*} \right) \right] \right)$$

где E — энергия активации. При отсутствии экспериментальных данных энергия активации принимается равной $E = 15$ ккал/моль; R — универсальная газовая постоянная ($R = 2$); T_u^* — температура при воспроизведении работы БО; T_{η}^* — температура в η -м режиме эксплуатации. Испытания БО, по которому отсутствуют данные по λ -характеристикам, проводятся по методикам, согласованным с заказчиком и, при необходимости, с головным научно-исследовательским институтом.

5. Определение продолжительности цикла испытаний на безотказность

Продолжительность одного цикла ускоренных испытаний на безотказность определяется продолжительностью воздействия каждого фактора и способом их реализации. Продолжительность цикла ускоренных испытаний t_{U1} при комплексном способе реализации определяется воспроизведением v -го из x факторов, имеющего максимальную продолжительность $t_{U1} = \max\{t_u^v\}_x$.

Продолжительность цикла ускоренных испытаний t_{U1} при комбинированном способе реализации определяется суммой максимальных значений продолжительностей из числа реализуемых факторов в группах и вычисляется по формуле

$$t_{U1} = \sum_{\omega}^y \max\{t_u^v\}_{\omega},$$

где Y — количество групп, в которых реализуемые факторы комплексированы ($Y = 2, 3, \dots$); ω — количество факторов в каждой группе.

Продолжительность цикла ускоренных испытаний при последовательном способе реализации определяется суммой значений продолжительностей реализуемых факторов по формуле $t_{U1} = \sum_{x=1}^z \max\{t_{U1}\}_x$.

Коэффициент ускорения испытаний K_y определяется по формуле $K_y = \tau_{KU} / N \cdot t_{U1}$

Заключение

Форсирование режима работы бортового оборудования (БО) при испытаниях с целью обеспечения эквивалентности по продолжительности функционирования в эксплуатации достигается работой БО в ужесточенном режиме — с повышенной электрической нагрузкой и повышенной температурой окружающей среды, также работой БО в нормальном режиме при воздействии увеличенных значений воздействующих факторов. Электрическая нагрузка и температура окружающей среды при работе БО в ужесточенном режиме не должны превышать максимально допустимых значений, установленных действующими нормативными документами для наименее надежного комплектующего изделия (КИ) БО. Работа БО в нормальном режиме при воздействии увеличенных значений воздействующих факторов осуществляется при вибрационных воздействиях БО должно находиться в рабочем состоянии. При этом осуществляется периодическое кратковременное включение-выключение аппаратуры, а при ударных нагрузках БО должно находиться в рабочем состоянии. При этом осуществляется периодическое кратковременное включение-выключение БО причем при воздействии повышенной влажности БО должно находиться в выключенном состоянии. В процессе испытаний необходимо осуществлять периодическое кратковременное включение-выключение БО. При испытаниях на циклическое воздействие температур БО должно находиться в рабочем состоянии, когда осуществляется периодическое кратковременное включение-выключение БО. Для БО таким же способом определяется среднее число отказов по ЛА в целом за установленные значения наработки и за наработку, на которую необходимо установить прогноз. Прогнозирование среднего числа отказов по БО ЛА в целом необходимо выполнять, когда по отдельным агрегатам наблюдается небольшое число отказов и прогнозирование их за назначенную наработку по этим агрегатам приводит к значительным погрешностям.

Список литературы

- ГОСТ 27.002.2015 «Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения (с Поправкой)», Москва: Издательство стандартов, 2016. 28 с.
- Микрин Е.А. Бортовые комплексы управления космических аппаратов. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 254 с.
- Haigang, G., Hongxing, L., Weijing, Z., and Zhankui, S. Direct Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control with Variable Universe Fuzzy Switching Term for a Class of MIMO Nonlinear Systems // Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2012. P. 1–21. DOI: 10.1155/2012/543039
- Jang, J.-S.R., Chen, J.-L. Wafer map failure pattern recognition and similarity ranking for large-scale data sets. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. 2014. Vol. 28. No. 1. P. 1–12.
- Сидняев Н.И. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 382 с.
- Макриденко Л.А., Геча В.Я., Сидняев Н.И., Онуфриев В.В. Обзор космических факторов влияющих на эксплуатационные характеристики низкоорбитальных спутников // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы создания и применения малых космических аппаратов и робототехнических средств в интересах Вооруженных сил РФ». 2016. Т. 2. С. 234–239.
- Макриденко Л.А., Геча В.Я., Сидняев Н.И., Онуфриев В.В. Определение высотно-скоростных характеристик космических аппаратов методами теории планирования экспе-

- римента // Тезисы докладов Четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». 2016. С. 39–41.
8. Мельников, И.В. Применение имитационной модели надежности при проектировании изделий ракетно-космической техники // Молодой ученый. 2011. № 9. С. 39–42.
 9. Геча В.Я., Сидняев Н.И., Бутенко Ю.И. и др. Методология оценки надежности космических аппаратов при проектной и конструкторской проработке // Надежность. 2019. Т. 19. № 2. С. 3–8. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-2-3-8
 10. Севастьянов Н.Н., Андреев А.И. Основы управления надёжностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации. Томск: ИД ТГУ, 2015. 266 с.
 11. Гурьянов А.В. и др. Алгоритм классификации учитываемых и неучитываемых отказов при оценке показателей надёжности изделий авионики // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. № 1–2. С. 341–345.
 12. ГОСТ Р 56523–2020. Системы и комплексы космические. Программа обеспечения безопасности эксплуатации. 2020. № 845-ст
 13. Губарев, А.В. Анализ принципов и методов обеспечения надежности космических аппаратов на этапах жизненного цикла // NovaInfo. 2022. № 135. С. 8–9.
 14. Абрамешин А.Е., Жаднов В.В., Жаднов И.В. Расчетнаяценка надежности электронных модулей аппаратуры космических аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости. 2012. № 1(40). С. 29–33.
 15. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надёжности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.

Поступила 10 апреля 2024 г.

METHOD FOR PLANNING OF NORMAL CHECK AND DETERMINATION TESTS OF AIRCRAFT EQUIPMENT FOR FAILURE-FREE OPERATION

BATTULGA E., SIDNYAEV N. I.

Bauman Moscow State Technical University

doi: 10.25210/jfop-2403-BYYWLX | edn: BYYWLX

The methods of mathematical statistics are described, which make it possible to monitor the quality of aerospace systems in the course of its experimental research and to signal in advance about possible violations in the quality control of equipment. It is established that the forecasting of the average number of failures for the products of on-board equipment (OE) of aerospace equipment as a whole should be performed when a small number of failures is observed for individual units and their forecasting for the assigned operating time for these units leads to significant errors. A method of planning and conducting equivalent-cyclic normal control and determinative tests of onboard equipment (OE) for failure-free operation, as well as equivalent-cyclic accelerated control tests of radio-electronic and electrotechnical OE of airplanes and spacecraft for failure-free operation is proposed. Equivalent-cyclic determinative tests are proposed to assess the actual values of the achieved levels of failure-free operation, as well as the conformity of BO to the requirements for failure-free operation specified in the tactical-technical (technical) task (TTZ (TK)) and technical specifications (TS). Control equivalent-cyclic tests are considered as part of preliminary or state (interdepartmental) tests, as well as periodic and type tests. Control tests are used to identify design, technological and manufacturing deficiencies, as well as to assess the compliance of failure-free performance of the BO with the requirements specified in the technical specifications (TOR) and specifications and to assess the effectiveness of measures to ensure and improve the reliability of the BO. During normal testing of FBs, cyclic impacts of external influencing factors (EIF) are modeled. During the research, all the requirements established in the test program (TP) and TU are provided: conditions and ways of realization of test factors; test procedure, providing for the frequency of operations and taking into account the specifics of the tested BW; failure criteria, determined on the basis of the requirements for tactical and technical characteristics; test plans and modes; methods of evaluation of their results; list of failures and malfunctions, taken into account when assessing the actual value of the failure rate and evaluating its compliance with the test results; and the list of failures and malfunctions, taken into account when assessing the actual value of the failure rate and evaluating its conformity with the test results. Levels of test modes are assigned based on the results of measurements of the values of real operational impacts in the locations where the FBs are installed. During the study the operating time, current values of output (determining) parameters, moments of failures occurrence, total number of failures, operating modes at which failures appeared, time of serviceability recovery, causes and nature of failures, as well as moments of withdrawal of non-failed BW from testing are recorded.