

На правах рукописи



Комиссаров Александр Владимирович

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И УСТРОЙСТВ
БОРТОВЫХ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ
МНОГОФАКТОРНЫХ ЭКВИВАЛЕНТНО-ЦИКЛИЧЕСКИХ
ИСПЫТАНИЙ**

Специальность 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск

Научный руководитель: **Шишкин Вадим Викторович**
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Измерительно-вычислительные комплексы»
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный
технический университет»

Официальные оппоненты: **Гречишников Владимир Михайлович**
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой электротехники ФГБОУ ВО «Самарский
национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

Голушко Дмитрий Александрович
кандидат технических наук, заместитель
начальника отдела АО НПП «Рубин», г. Пенза

Ведущая организация: ФАУ «ГосНИИАС», г. Москва

Защита состоится 28 сентября 2022 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.277.04 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, ауд.211 (гл. учебный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет». Диссертация и автореферат размещены на сайте <http://www.ulstu.ru/>.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим направлять по адресу: ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д212.277.04; тел. (8422)778112. E-mail: nam@ulstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



А.М. Наместников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Безотказность элементов и устройств бортовых систем управления воздушного судна является одним из основных критериев надежности и безопасности летательного аппарата в целом.

За 2006-2011 гг. в российский парк было поставлено 557 пассажирских самолетов зарубежного производства (Boeing, Airbus, Embraer, Bombardier, ATR) и 40 новых отечественных самолетов (Ту-204/214, Ил-96), в 2012 году началась серийная эксплуатация самолетов Sukhoi Superjet 100 (SSJ-100), количество которых достигло в настоящий момент 200 самолетов. На каждом воздушном судне (ВС) была использована бортовая цифровая система управления (БЦСУ), выполняющая множество ответственных за безопасность полета функций. Многообразие функциональных задач, выполняемых элементами и устройствами в составе БЦСУ, приводит к необходимости использования широкой номенклатуры электронной компонентной базы (ЭКБ), включая микросхемы процессоров, памяти, программных логических интегральных схем (ПЛИС), микроконтроллеров, интерфейсных микросхем протоколов обмена бортовых данных и т.д.

К элементам и устройствам БЦСУ предъявляются жесткие требования по надежности, регламентированные международной, государственной, отраслевой и внутрипромышленной нормативно-технической базой. При этом, в последнее время, с увеличением количества эксплуатируемых самолетов и их налета, стало проявляться множество отказов, связанных с различными причинами, одними из которых явились дефекты элементов и устройств БЦСУ воздушным судном. Например, отказ противообледенительной системы двигателя самолета во время полета, был связан с отсутствием информации в шине данных ARINC-429, формируемых одним из вычислительных модулей блока концентратора, вследствие отсутствия питающего напряжения с источника вторичного питания MGDT-20-H-CE/T-L, к отказу которого привел обрыв нейтрали межплатного соединения.

В свою очередь ЭКБ отечественного производства не всегда соответствует в полной мере заданным требованиям по функциональности и массо-габаритным характеристикам. Вследствие чего имеется необходимость в применении иностранных комплектующих, таких как ПЛИС общепромышленного исполнения, изготавливаемых в корпусах типа BGA (Ball grid array), надежность которых оказалась ниже заданных требований по причине возникновения новых видов дефектов, ранее в эксплуатации не фиксировавшихся.

Аналогичным образом на надежности БЦСУ сказалось внедрение новых конструктивных решений по уменьшению масса-габаритных характеристик изделий за счет увеличения количества слоев в печатных платах и высокой плотности монтажа, а также новых технологий производства БЦСУ. Особенности данных дефектов заключаются в их проявлении при длительной наработке в эксплуатации.

Исследование подобных отказов позволило накопить базу данных дефектов, а также определить основные причины развития процессов их образования.

Например, по сведениям авиакомпании «Аэрофлот», множество отказов систем управления связано с дефектами элементов и устройств системы управления, которые возникли при налетах самолета не менее 3000-5000 часов. Аналогичные проблемы были обнаружены и в ходе эксплуатации зарубежных воздушных судов.

Обращает на себя внимание то, что в соответствии со сложившейся мировой практикой контроль надежности систем управления на всех воздушных судах проводится многочасовыми испытаниями по методу эквивалентно-циклических испытаний на безотказность по ОСТ 1 01204-2012 (MIL-HDBK-781A в США, IEC 62506-2013 в ЕС, GJB 899A-2009 в Китае), которые с одной стороны подтверждают соответствие заданным требованиям, а с другой – не соответствуют среднему налету на отказ в эксплуатации.

В настоящее время, при отбраковочных испытаниях применяют методы многофакторных испытаний с целью отбраковать потенциально дефектные элементы и стабилизировать поток отказов элементов на этапе эксплуатации. Рядом исследователей доказано, что такие режимы испытаний могут форсировать процессы накопления усталости в изделии, приводящих к ускоренному проявлению дефектов. Однако сведения о применении в методиках испытаний на безотказность данных методов отсутствуют.

Разработкой теоретических основ в части комплексного решения по повышению надежности, организации испытаний изделий и их методического обеспечения посвящены работы И.Н. Животкевича, А.П. Смирнова, вопросы разработки методов многофакторных испытаний электронных систем нашли отражение в трудах таких учёных, как В.А. Острейковский, А.В. Майоров, Н.П. Потюков, В.Н. Постнов, С.В. Луговской, М. Krasich, M. Pecht, Shen Zhong-hong, Liu Ju и ряда других.

Вопросам автоматизации обеспечения и повышения надежности уделено большое внимание в работах Ю.Н. Кофанова, С.У. Увайсова, В.В. Жаднова, Ralf R. Fullwood, David L. Iverson и др.

Проблемы обеспечения надежности БЦСУ по исключению дефектов решались разнообразными методами, такими как отработка новых технологических процессов с насыщением их контрольными операциями для исключения производственных отказов, ужесточением испытаний в плане воздействующих факторов, влияющих на безотказность; разработкой комплексов программных средств на основе статистического анализа надежности и др.

Как показывает последнее десятилетие эксплуатации бортовых цифровых систем управления как зарубежных, так и отечественных самолетов, для обеспечения надежности становятся актуальными:

- проведение исследований, устанавливающих взаимосвязь между отказами, дефектами и их причинами;
- исследование и внедрение новых методов испытаний на безотказность в части выявления дефектов и их связи с последующими корректирующими действиями, направленными на повышение надежности.

Объект исследования – надежность элементов и устройств бортовых цифровых систем управления воздушным судном.

Предмет исследования – методы испытаний на безотказность, как инструменты обеспечения надежности элементов и устройств бортовых цифровых систем управления.

Цель работы – повышение безотказности элементов и устройств бортовых цифровых систем управления воздушным судном на основе многофакторных эквивалентно-циклических испытаний.

Для достижения указанной цели требуется решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать отказы бортовых цифровых систем управления воздушным судном в эксплуатации для определения причины возникновения дефектов и факторов, их интенсифицирующих.

2. Разработать модель и методику многофакторных эквивалентно-циклических испытаний на безотказность, которые связывают основные категории дефектов и этапы их возникновения при эксплуатации воздушного судна и обеспечивают, за счет применения интенсифицирующих факторов, выявление таких категорий дефектов в ходе испытаний. Планировать и проводить испытания исходя из значимости дефектов.

3. Провести экспериментальные исследования по определению эффективности разработанной методики.

4. Разработать методику формирования программы корректирующих действий по результатам многофакторных эквивалентно-циклических испытаний на безотказность с возможностью оценки их эффективности.

5. Разработать программный комплекс поддержки процессов обеспечения надежности бортовых цифровых систем управления воздушным судном в эксплуатации на базе методики многофакторных эквивалентно-циклических испытаний и методики формирования корректирующих действий с учетом выявленных дефектов.

Методы исследований. Для решения поставленных задач и достижения намеченной цели использованы методы:

- теории вероятности и математической статистики;
- теории повреждающих процессов (физики отказов);
- прикладные методы обеспечения надежности в областях проектирования и технологии изготовления, эксплуатации и ремонта объектов изучаемого типа.

Числовые расчеты и моделирование проводились с использованием программных комплексов MathCad, SolidWorks и ANSYS.

Достоверность полученных теоретических результатов и выводов подтверждена результатами экспериментальных исследований серийно выпускаемых устройств бортовых цифровых систем управления воздушным судном.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель и методика многофакторных эквивалентно-циклических испытаний на безотказность элементов и устройств бортовых систем управления воздушным судном, позволяющая контролировать безотказность и определять процессы накопления повреждений, тем самым достигая определенных уровней дефектного состояния изделия, аналогичных длительной эксплуатации на борту воздушного судна.

2. Методика формирования программы корректирующих действий по результатам контрольных многофакторных эквивалентно-циклических испытаний на безотказность с оценкой их эффективности, позволяющая вырабатывать эффективные конструктивно-технологические решения, устраняющие типовые виды дефектов, выявленных в ходе многофакторных эквивалентно-циклических испытаний.

3. Программный комплекс поддержки процессов обеспечения надежности бортовых цифровых систем управления воздушным судном в эксплуатации, позволяющий повысить эффективность процессов исключения систематических групп отказов бортовых цифровых систем управления в эксплуатации, обеспечивая поэтапное повышение надежности.

Научной новизной обладают следующие результаты диссертации:

1. Модель и методика многофакторных эквивалентно-циклических испытаний на безотказность элементов и устройств бортовых цифровых систем управления воздушным судном, которые отличаются тем, что формируется отбраковка наиболее значимых дефектов, выявленных на разных стадиях жизненного цикла эксплуатации изделия и их зависимость от испытательных воздействующих факторов, что обеспечивает новые режимы испытаний с помощью воздействия тепловой и механической энергий на элементы и устройства БЦСУ, тем самым обеспечивая достижение дефектного состояния изделия, аналогичного длительной эксплуатации в составе воздушного судна.

2. Методика по формированию программы корректирующих действий на основании проведенных испытаний, отличающаяся тем, что по классифицируемому дефекту формируется проблемный узел с набором корректирующих процедур из библиотеки конструктивных и технологических паттернов.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработанные в диссертации методики и программный комплекс по обеспечению надежности бортовых цифровых систем управления воздушным судном могут быть теоретической основой исследований в области повышения надежности элементов и устройств широкого класса цифровых систем управления в других областях (космическая отрасль, надводные и подводные аппараты, спецтехника МЧС и др.).

Практической значимостью обладают разработанные в рамках данной работы методика многофакторных эквивалентно-циклических испытаний и методика формирования корректирующих действий, которые применяются в АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения» для обеспечения надежности элементов и устройств бортовых систем управления общесамолетным оборудованием типа СУОСО-МС-21, систем СОК-МС-21 и СОКЭ-95, ПУСС-МС-21, комплексной системы КСЭИС-76, а также отдельно установленных блоков в системах управления на воздушных судах Sukhoi Super Jet-100 (RRJ-95NEW), МС-21, Ил-76МД-90А, Ил-96-400М и вертолетах Ми-171А2, Ми-171А3.

Разработаны нормативные документы для научно-производственной деятельности, утверждённые независимой инспекцией Федерального агентства воздушного транспорта министерства транспорта Российской Федерации:

- руководящего материала РМ 134-2017 по порядку исследования отказов комплектующих электрорадиоизделий;
- руководящего материала РМ 190-2021 по оценке технической эффективности проведения отбраковочных испытаний, технологической приработки и технологической тренировки изделий различного структурного уровня;
- руководящего материала РМ 200-2021 по методам проведения испытаний изделий авиационного назначения с использованием процедур HALT/HASS.

Соответствие специальности. Содержание диссертационной работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»:

- п. 2 – Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик;
- п. 4 – разработка научных подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих надежность, контроль и диагностику функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления.

Апробация работы. Результаты исследований получены на основе фундаментальных принципов теории надежности. Использованные при этом методы решения поставленных задач корректны с формальной математической точки зрения. Контроль достоверности результатов осуществлялся анализом физического смысла решений и натурным экспериментом.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- V Международной научно-практической конференции «Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития» (г. Ульяновск, 2016 г.);
- Всероссийской научно-технической конференции «Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы ИВК-2017» (г. Ульяновск, 2017 г.);
- X Всероссийском конкурсе молодых ученых РАН (г. Миасс, 2018 г.);
- VI Международной научно-практической конференции «Авиатор» (г. Воронеж, 2019 г.);
- научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Ульяновского государственного технического университета «Вузовская наука в современных условиях» (г. Ульяновск, 2016-2020 гг.).

Публикации по работе. По теме диссертации опубликовано 20 работ (статей), в т.ч. 8 работ опубликованы в рецензируемых изданиях, определенных ВАК РФ, 1 работа опубликована в рецензируемых изданиях базы данных Scopus, 6 материалов и тезисов докладов.

Личный вклад автора. Все исследования в диссертационной работе проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в

диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, приложений и библиографического списка, содержащего 123 наименования. Работа изложена на 187 страницах, содержит 35 рисунков, 23 таблицы и 7 приложений (с 59 рисунками и 16 таблицами).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость результатов диссертации.

В первой главе рассмотрены процессы обеспечения надежности бортовых цифровых систем управления воздушным судном, выделен ряд проблем, влияющих на безотказность БЦСУ, проанализированы отказы элементов и устройств БЦСУ, установлена взаимосвязь причин дефектов БЦСУ и факторов их интенсифицирующих, рассмотрены основные принципы, модели и методики многофакторных испытаний по контролю надежности, а также программные комплексы, автоматизирующие процессы обеспечения надежности.

Обеспечение заданного уровня надежности по безотказности элементов и устройств БЦСУ воздушного судна связано со следующими проблемами:

- применение программно-логических интегральных схем, процессоров и микросхем памяти зарубежного производства, надежность которых в условиях длительной эксплуатации неизвестна;

- внедрение конструктивных решений, направленных на снижение массо-габаритных характеристик изделия, которые в совокупности дают высокую плотность монтажа и многослойность печатных плат, что приводит к повышенным режимам нагрузки на элементы при функционировании в условиях эксплуатации;

- отсутствие отработки и опыта при внедрении новых технологических процессов при монтаже новых типов корпусов микросхем, составляющих основу вычислительного ядра БЦСУ.

Например, за 2018-2020 гг. эксплуатирующими организациями зафиксирован 341 отказ цифрового блока концентратора данных (БКД), содержащего в своем составе модули вычисления данных, формирования сигналов и преобразования сигналов, разработанных на базе программно-логических интегральных схем и схем памяти компании Altera, а также выполненных на многослойных печатных платах с количеством слоев свыше 18. Анализ отказов, связанных с элементами и устройствами БЦСУ, представлен на рисунке 1.

Одновременное воздействие широкополосной случайной вибрации и циклического изменения температуры является наиболее эффективным, позволяющим выявить до 70-90% всех дефектов и интенсивно форсирующим физико-химические процессы кумулятивного накопления повреждений в изделиях цифровой техники.

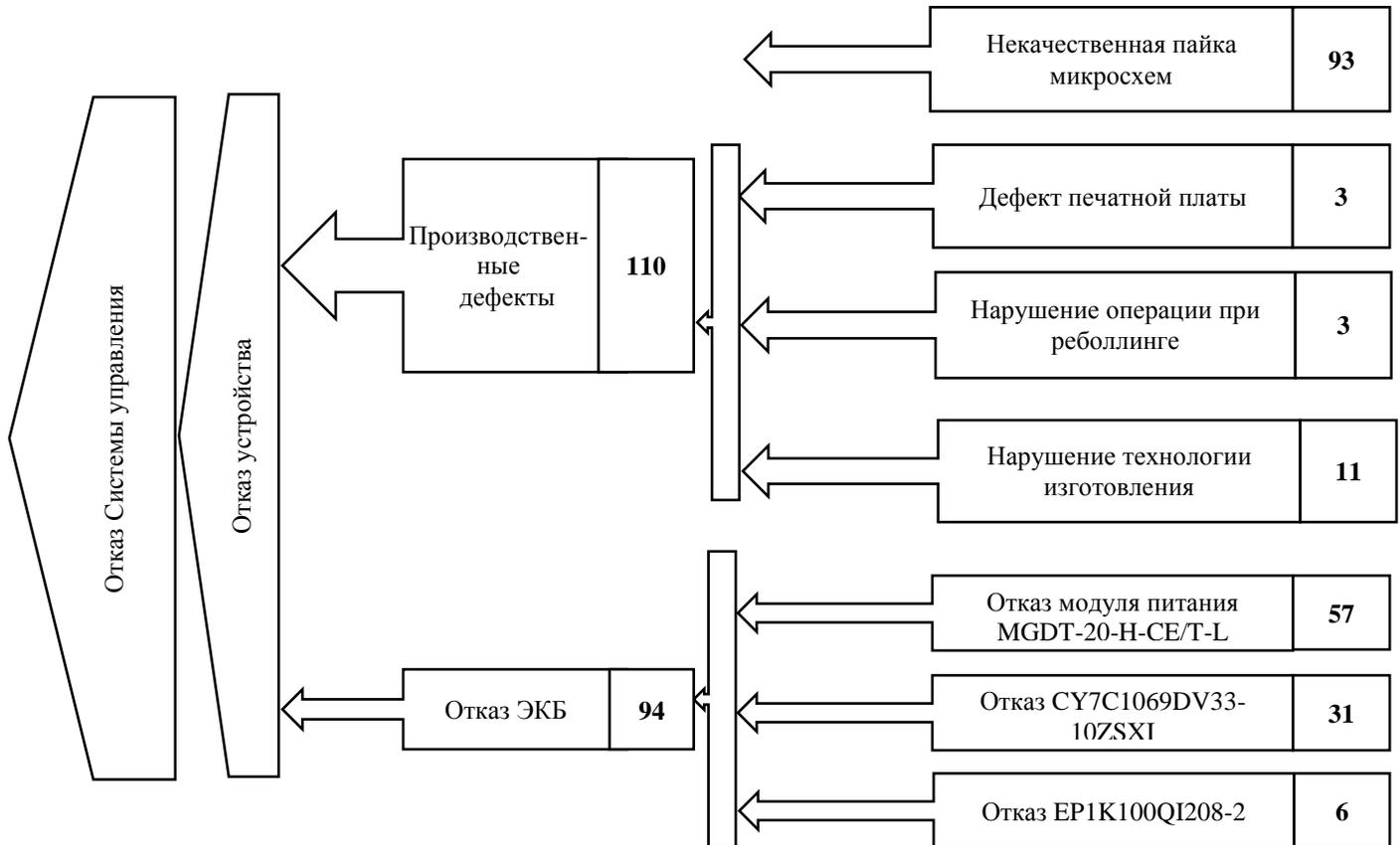


Рисунок 1 - Классификация наиболее повторяющихся дефектов эксплуатации элементов и устройств системы управления SSJ-100 (RRJ-95) за 2018-2020 гг.

Проанализированы основные принципы, модели и методики многофакторных испытаний: отмечено, что модели, используемые в действующих методиках, не позволяют установить связь причин дефектов и этапов их возникновения при эксплуатации воздушного судна, что может не обеспечивать выявление таких категорий дефектов в ходе испытаний на безотказность. Обращается внимание на появление нового испытательного оборудования, имитирующего воздействия многоосной широкополосной вибрации, ранее не применяемой в многофакторных эквивалентно-циклических испытаниях на безотказность. Проанализированные программные комплексы обеспечения надежности БЦСУ не реализуют полноценно процессы, позволяющие использовать результаты многофакторных эквивалентно-циклических испытаний.

Во второй главе разрабатывается модель и методика многофакторных эквивалентно-циклических испытаний (МФЭЦИ) на безотказность элементов и устройств БЦСУ (рисунок 2). Методика состоит из восьми этапов, изображенных по левой стороне и полученных в ходе выполнения каждого этапа результата, изображенных с правой стороны.

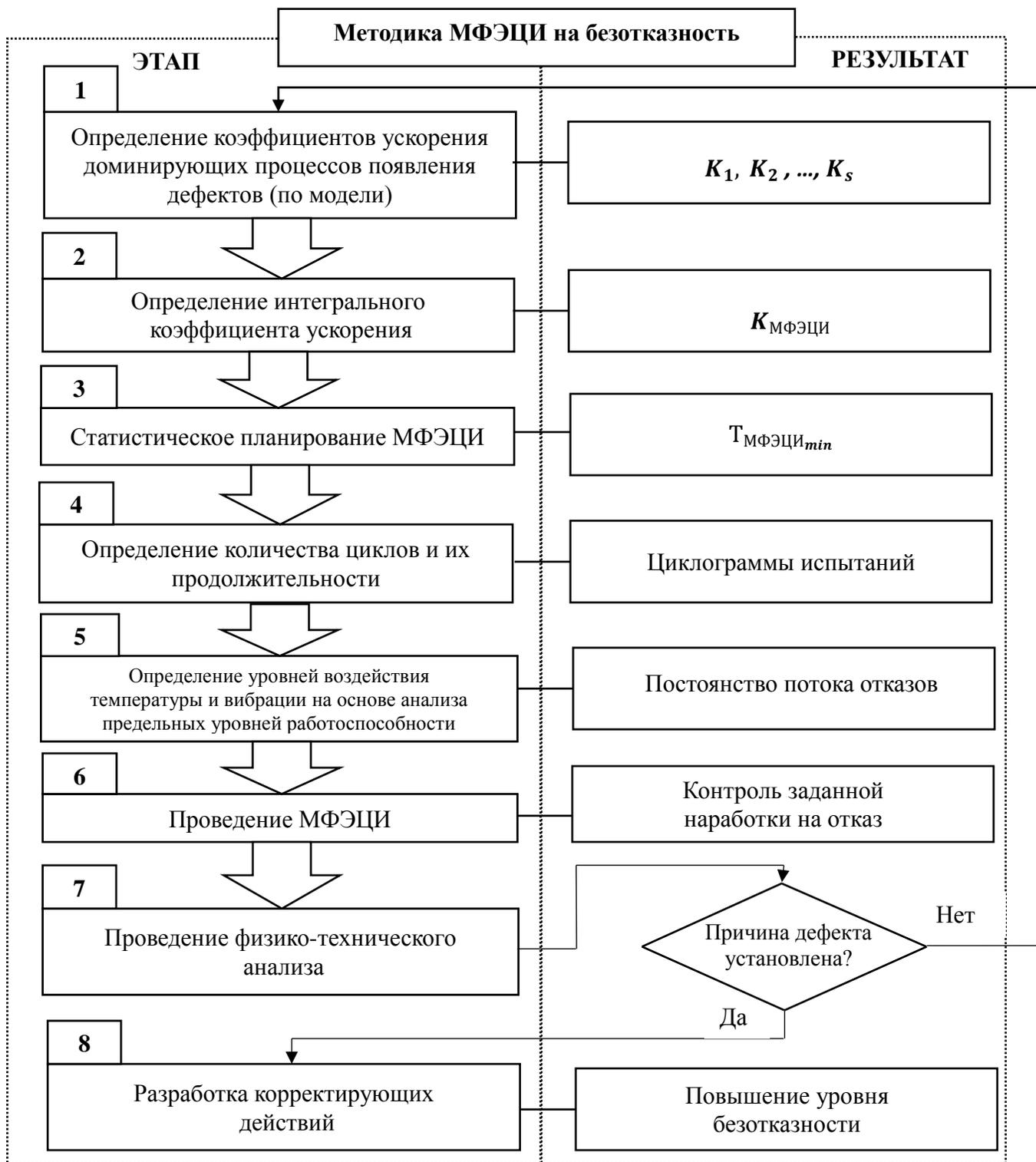


Рисунок 2-Методика МФЭЦИ на безотказность элементов и устройств БЦСУ

Все эквивалентно-циклические испытания (ЭЦИ) базируются на принципе эквивалентности времени и условиям эксплуатации, при этом время испытаний меньше заданной наработки объекта испытаний. Методика МФЭЦИ направлена на то, чтобы сформировать проявление необходимых, заранее определенных групп дефектов,

интенсивность которых носит доминирующий характер по сравнению с другими отказами изделия.

Согласно требованиям установленным в ОСТ 1 01204-2012 для многофакторных испытаний на безотказность БЦСУ продолжительность $T_{\text{МФЭЦИ}}$ определяется временем наиболее продолжительного фактора воздействия по следующей формуле:

$$T_{\text{МФЭЦИ}} = \max\{T_k\}_S. \quad (1)$$

Следовательно, коэффициент ускорения k -го воздействующего фактора из множества S -факторов, имеющего максимальную продолжительность, будет иметь значение интегрального коэффициента многофакторных испытаний

$$K_{\text{МФЭЦИ}} = K_K. \quad (2)$$

С другой стороны, коэффициент ускорения многофакторных испытаний, согласно справочникам по надежности и ряда нормативных документов, представляет собой произведение коэффициентов ускорения K_{y_j} каждого j -фактора из S -множества

$$K_y = \prod_{j=1}^S K_{y_j}. \quad (3)$$

Для повышения достоверности оценок надежности ЭКБ, например, таких как полупроводниковые микросхемы, применяется следующая формула для расчета коэффициента ускорения

$$K_y = \sum_{i=1}^N d_i \prod_{j=1}^S K_{y_{ji}}. \quad (4)$$

где d_i – относительная доля вероятности отказа изделий определяется по формуле

$$d_i = \frac{q_i}{\sum_i q_i} = \frac{q_i}{D} \text{ или } d_i = \frac{\lambda_{ii}}{\sum_i \lambda_{ii}}, \quad (5)$$

где q_i – число отказов изделий, вследствие воздействия j -го фактора воздействия;

D – общее число отказов; λ_{ii} – интенсивность отказов, вследствие j -го фактора воздействия, а $\sum_{j=1}^N d_j = 1$.

Но для элементов и систем управления воздушным судном в ходе проводимых испытаний с продолжительностью, рассчитанной с коэффициентом ускорения по формуле (4), не учитывается этап эксплуатации, при котором возникает этот дефект, что предполагает режим испытаний не эквивалентный скоростям кумулятивных процессов накопления повреждений, что в конечном итоге дает неверную оценку безотказности элементов и устройств БЦСУ воздушным судном. Коэффициент ускорения $K_{\text{МФЭЦИ}}$ испытаний представляет собой в общем виде отношение средней наработки на отказ $T_{\text{ТР}}$ к продолжительности МФЭЦИ $T_{\text{МФЭЦИ}}$, или обратное отношение интенсивностей отказов

$$K_{\text{МФЭЦИ}} = \frac{T_{\text{ТР}}}{T_{\text{МФЭЦИ}}} = \frac{\lambda_{\text{МФЭЦИ}}}{\lambda_{\text{Э}}}. \quad (6)$$

Поэтому, предполагая, что интенсивность отказов в эксплуатации $\lambda_{\text{Э}}$ зависит от того режима, в котором изделие применяется (фактически, от стадии жизненного цикла), вводим дополнительный параметр, который физически будет обозначать влияние режима эксплуатации на проявление дефекта, интенсифицируемого одним из форсирующих факторов в ходе испытаний.

Примем, что интенсивности отказов $\lambda_{И}$ при испытаниях и $\lambda_{Э}$ в эксплуатации соответственно равны:

$$\lambda_{\text{МФЭЦИ}} = \sum_{j=1}^S d_j \lambda_{\text{МФЭЦИ}j} \text{ и } \lambda_{Э} = \sum_{k=1}^N d_k \lambda_{Эk}, \quad (7)$$

где S – воздействующие факторы при испытаниях,

N – режимы эксплуатации БЦСУ с высокой интенсивностью отказов.

Вводится дополнительный параметр - относительная доля вероятности отказа изделий d_k вследствие условий, определенных k -й стадией режима эксплуатации, тогда продолжительность МФЭЦИ:

$$T_{\text{МФЭЦИ}} = \frac{T_{Э}}{K_y} = \frac{\lambda_{И}}{\lambda_{Э}} = \frac{\sum_{j=1}^S d_j \lambda_{Иj}}{\sum_{i=1}^N d_i \lambda_{Иi}} \cdot T_{\text{ТР}} = \frac{T_{\text{НР}}}{\sum_{k=1}^N d_k} \cdot \sum_{j=1}^M d_j \prod_{i=1}^S K_{ij}, \quad (8)$$

$$\text{при этом } K_{\text{МФЭЦИ}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N d_k} \cdot \sum_{j=1}^M d_j \prod_{i=1}^S K_{ij},$$

где $d_k = \frac{q_k}{\sum_k q_k} = \frac{q_k}{R} = \frac{\lambda_{Иj}}{\sum_i \lambda_{Иj}}$, q_k – число отказов изделий на k -этапе эксплуатации, R – общее число отказов в эксплуатации, $\lambda_{Эk}$ – интенсивность отказов, вследствие воздействий режимов k -го этапа эксплуатации, а $\sum_{k=1}^N d_k = 1$.

Введённые весовые коэффициенты (d_j и d_k) определяются на основе обобщения данных об отказах исследуемых элементов и устройств систем управления воздушным судном и их конструктивно-технологических аналогов на различных этапах жизненного цикла и испытаний.

При этом должно быть выполнено следующее условие для формулы (8): доля отказов при воздействии j -фактора d_j должна стремиться к d_j^{max} , а доля отказов на этапе k -жизненного цикла $d_k \rightarrow d_k^{\text{max}}$ при этом, исходя из экономической целесообразности испытаний (при малых долях продолжительность испытаний многократно увеличивается), должно быть выполнено следующее соотношение $0,1 \leq d_j \leq 1$ и $0,1 \leq d_k \leq 1$.

Отказы (дефекты), интенсифицируемые воздействующим фактором, должны выявляться при испытаниях на воздействие факторов, оказывающих влияние на безотказность с долей не менее 10 % и не менее 10 % должны фиксироваться в эксплуатации на определенных стадиях жизненного цикла.

На втором этапе МФЭЦИ проанализированы основные модели воздействующих факторов, имеющие апробированные экспериментальные данные и установлена связь с дефектами элементов и устройств в эксплуатации, что позволило определить коэффициенты ускорения при воздействии циклического изменения температуры (ЦИТ) по модели Норриса-Ландзберга с учетом коэффициентов, предложенных исследователями P. Lall, A. Shirgaokar, D. Agunachalam (9), и многоосной широкополосной случайной вибрации на основе энергетической теории Хубера-Мизеса (10):

$$K_{y_{\text{Темп}i}} = \left(\left(\frac{\Delta T_{Иi}}{\Delta T_{Эi}} \right)^a \cdot \left(\frac{\vartheta_{Иi}}{\vartheta_{Эi}} \right)^{-b} \cdot e^{c \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{max}Эi}} - \frac{1}{T_{\text{max}Иi}} \right)} \right), \quad (9)$$

где i – стадия жизненного цикла; a, b, c – эмпирические коэффициенты; $\Delta T_{Иi}, \Delta T_{Эi}$ – диапазон температуры изменения во время испытаний и эксплуатации соответственно; $\vartheta_{Иi}, \vartheta_{Эi}$ – скорость изменения температуры во время испытаний и эксплуатации соответственно

$$K_{у_шсвi} = \frac{(S_{И_{XXi}} + S_{И_{YYi}} + S_{И_{ZZi}} + 3(S_{И_{\Theta i}} + S_{И_{\Psi i}} + S_{И_{\Phi i}}))^b}{(S_{Э_{XXi}} + S_{Э_{YYi}} + S_{Э_{ZZi}})^b}, \quad (10)$$

где $S_{И_{XXi}}, S_{И_{YYi}}, S_{И_{ZZi}}, S_{И_{\Theta i}}, S_{И_{\Psi i}}, S_{И_{\Phi i}}$ – спектральная плотность виброускорения в ходе испытаний по каждой из осей X, Y и Z их составляющие соответственно; $S_{Э_{XXi}}, S_{Э_{YYi}}, S_{Э_{ZZi}}$ – спектральная плотность виброускорения в ходе эксплуатации по каждой из осей X, Y и Z ; b – эмпирический коэффициент для материала и способа нагружения (показатель наклона линии долговечности).

На следующем этапе выполняется планирование контрольных МФЭЦИ в соответствии с ОСТ 1 01204-2012, на основе последовательного метода контроля (Вальда), по заданным значениям риска поставщика и потребителя, браковочного и приемочного значения контролируемого показателя гипотеза о том, что наработка на отказ не ниже предварительно установленного (заданного) уровня либо подтверждается, либо отвергается.

На график наносятся точки, исходя из количества отказов m объекта испытаний за время продолжительности МФЭЦИ с учетом интегрального коэффициента ускорения, согласно принятым уравнениям линий несоответствия и соответствия.

При нулевом количестве отказов в соответствии с планом испытаний В-6 определяется минимальная продолжительность МФЭЦИ

$$T_{\text{МФЭЦИ}_{\min}} \leq \frac{2T_{\alpha}}{1,443n \cdot K_{\text{МФЭЦИ}}}, \quad (11)$$

где T_{α} – приемочное значение средней наработки на отказ и повреждение, n – количество испытываемых образцов.

Заданный уровень безотказности считают подтвержденным, если за минимальное время испытаний отсутствуют отказы или произошло запланированное количество отказов, определенных в соответствии с оперативной характеристикой плана испытаний.

Заданный уровень безотказности считают неподтвержденным, если количество отказов больше запланированного.

На четвертом этапе определяют количества циклов в зависимости от этапов жизненного цикла, на которых была выявлена высокая интенсивность отказов, связанных с воздействующими факторами, интенсифицируемыми в ходе испытаний.

Для стадии «Входной контроль» (входной контроль, отработка на борту) количество циклов испытаний $N_{\text{МФЭЦИ}_{\text{вхк}}} = 1$.

Для стадии «Функционирование на борту ВС» (взлет-посадка, полет, руление, набор высоты, снижение и пр.) количество циклов испытаний:

$$N_{\text{Функцшсв}} = N_{\text{Функцт}} = \frac{N_{\text{Э_Функ}}}{K_{\text{МФЭЦИ}}} = \frac{(T_{\text{СС}}/T_{\text{НР}})T_{\text{ТР}} \cdot N_{\text{в/п}}}{K_{\text{МФЭЦИ}}}. \quad (12)$$

Продолжительность одного цикла испытаний

$$T_{\text{ФункцТ1}} = T_{\text{ФункцВ1}} = \frac{T_{\text{МФЭЦИ}}}{N_{\text{ФункцТ}}} = \frac{T_{\text{МФЭЦИ}}}{N_{\text{ФункцВ}}} . \quad (13)$$

Для стадии «Простой и регламентные работы» (уровень ШСВ постоянный) количество циклов испытаний

$$N_{\text{РеглТ}} = \frac{N_{\text{ЭРегл}}}{K_{\text{МФЭЦИ}}} = \frac{T_{\text{ТР}}(T_{\text{СС}}/T_{\text{НР}}) \sum_{i=1}^{12} N_{x_i}}{K_{\text{МФЭЦИ}}} . \quad (14)$$

Продолжительность испытаний определяется по формуле

$$T_{\text{РеглТ1}} = \tau_0 + \tau_n . \quad (15)$$

Общее количество циклов испытаний

$$N_{\text{МФЭЦИ}} = N_{\text{МФЭЦИВхк}} + N_{\text{ФункцШСВ}} + N_{\text{РеглТ}} . \quad (16)$$

Общая продолжительность испытаний

$$T_{\text{МФЭЦИ}} = T_{\text{ФункцТ1}} + T_{\text{РеглТ1}} , \quad (17)$$

где τ_n , τ_0 – время достижения нагрева и охлаждения установившейся температуры в наиболее массивном элементе изделия; $T_{\text{СС}}$ – назначенный срок службы, год; $T_{\text{НР}}$ – назначенный ресурс, час; $T_{\text{ТР}}$ – средняя наработка на отказ и повреждение, час; $N_{\text{в/п}}$ – среднегодовое количество взлетов и посадок; N_{x_i} – среднемесячное количество колебаний суточной температуры в течении года при хранении ВС в умеренно-холодном климатическом районе в неотопливаемом помещении.

Испытательные уровни воздействия определяются с помощью процедур отбраковочных испытаний в HALT-камере, устанавливая предельные значения работоспособности при воздействии каждого из факторов, что позволило исключить этап предварительных исследований, который присутствует в большинстве методик на безотказность. Выявленные в ходе проведения отбраковочных процедур отказы позволяют оценить с помощью критерия Пирсона гипотезу о постоянстве потока отказа объекта испытаний.

Этап анализа результатов МФЭЦИ путем проведения физико-технического анализа образцов после испытаний на наличие признаков деградиационных процессов проводится различными методами спектроскопии, металлографии, дефектоскопии, дефектометрии, интроскопии и др.

На заключительном этапе принимается решение о необходимости разработки корректирующих действий, направленных на повышение безотказности по отдельной методике.

Применение методики МФЭЦИ элементов и устройств бортовых цифровых систем управления воздушным судном на безотказность позволяет помимо получения оценки уровня безотказности по средней наработке на отказ, обеспечить достижение дефектного состояния изделия, аналогичного длительной эксплуатации в составе воздушного судна.

В третьей главе представлены результаты экспериментальной работы в части проведения многофакторных эквивалентно-циклических испытаний в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 1 01204-2012 и предложенной методикой МФЭЦИ.

В качестве объекта испытания был выбран цифровой блок БКД, отказы которого носили системный характер с типовыми дефектами ЭКБ, наиболее распространённой в авиационной отрасли.

Подтверждение гипотезы о том, что наработка на отказ не ниже заданного уровня проводится на основе последовательного метода контроля, по заданным значениям риска поставщика и потребителя, браковочного и приемочного значения контролируемого показателя и выбранным планом испытаний (таблица 1).

Таблица 1 - Планирования МФЭЦИ на безотказность

Наименование	Продолжительность испытаний, ч						
	0	1	2	3	4	5	6
Число отказов m	0	1	2	3	4	5	6
Линия соответствия	846	1268	1691	2114	2536		
Линия несоответствия	–	–	–	422	846	1268	1691

Заданный уровень безотказности считают подтвержденным, если за минимальное время испытаний отсутствуют отказы или произошло запланированное количество отказов, при этом время испытаний будет увеличиваться; заданный уровень безотказности считают неподтвержденным, если количество отказов превышено.

В ходе испытаний по ОСТ 1 01204-2012 заданный показатель безотказности по наработке на отказ в 20000 ч был подтверждён без выявления дефектов, а в ходе МФЭЦИ были обнаружены два дефекта с подтверждённой наработкой в 7000 ч, при этом начальная продолжительность испытаний была меньше продолжительности испытаний по отраслевому стандарту (таблица 2). Дефекты, выявленные в ходе МФЭЦИ близки по эквивалентному времени наработки на отказ в эксплуатации.

Таблица 2 - Сравнение методов испытаний по продолжительности

Изделие БКД	$K_{\text{МФЭЦИ}}$	Начальная продолжительность испытаний при безотказной работе, ч	Подтвержденный показатель, ч
ОСТ 1 01204-2012	19,704	1015	20000
МФЭЦИ	23,64	846	

На график наносятся точки, исходя из количества отказов m объекта испытаний за время продолжительности МФЭЦИ с учетом интегрального коэффициента ускорения, согласно принятым уравнениям линий несоответствия и соответствия.

Заданный уровень безотказности считают подтвержденным, если за минимальное время испытаний отсутствуют отказы или произошло запланированное количество отказов, определенных в соответствии с оперативной характеристикой плана испытаний.

Заданный уровень безотказности считают неподтвержденным, если количество отказов больше запланированного.

В данном случае, при использовании модели (10), общая продолжительность испытаний сократилась на 26 % по сравнению с продолжительностью испытаний методом ОСТ 1 01204-2012.

В целях подтверждения разработанной методики для трех различных образцов: после ЭЦИ, после наработки более 4000 ч и МФЭЦИ, был проведен металлографический анализ с рентгеноскопией паяных соединений шариковых выводов микросхемы ПЛИС, смонтированной на плате.

В качестве критерия оценки результатов испытаний выбран деградационный процесс паяного соединения микросхем в BGA-корпусах, являющийся одной из основных причин отказов элементов и устройств бортовых систем управления воздушным судном. Для трех образцов проведен металлографический анализ качества паяных соединений шариковых выводов микросхем в BGA-корпусах, смонтированной на плате блока концентратора данных (таблица 3).

Таблица 3 - Анализ качества паяных соединений шариковых выводов микросхем в BGA-корпусах блока концентратора данных БЦСУ

Образец	Наименование	Примечание
№1	EP2S60F1020I4N	После ЭЦИ по ОСТ1 01204-2012
№2	EP3C55F484I7N	Эксплуатация (4212 ч, отказ по причине пайки)
№3	EP2S30F672I4N	После МФЭЦИ по настоящей методике

Как видно на рисунке 3 для образцов №2 и №3 заметно образование трещины между выводом и контактной площадкой печатной платы, что говорит об аналогичных дефектах деградационного процесса паяного соединения.

Был проведен срез паяных соединений шариковых выводов крайнего ряда микросхем. Анализ паяных соединений проводился на установке рентгеновского контроля ХВИМ 130. Качество пайки шариковых выводов оценивалось по стандарту IPC-7095 «Конструирование и внедрение процессов сборки с применением BGA».

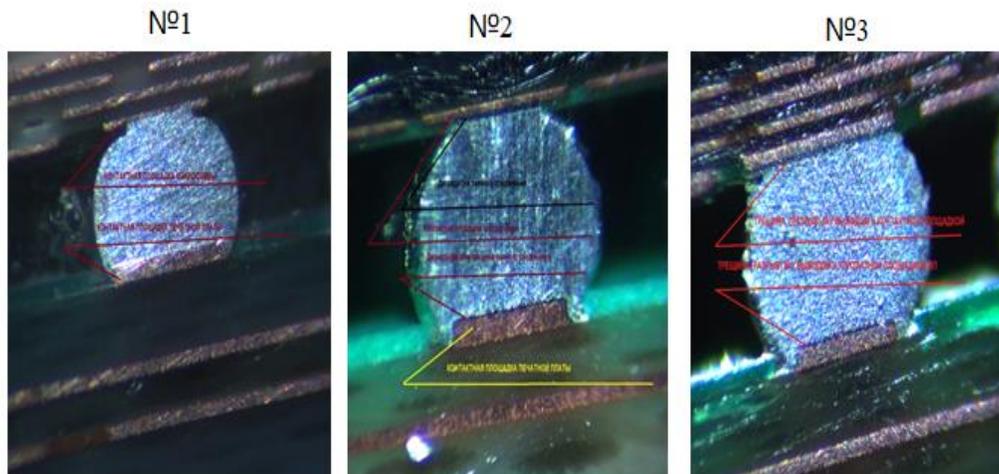
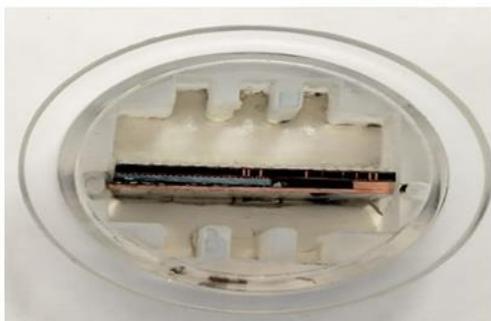


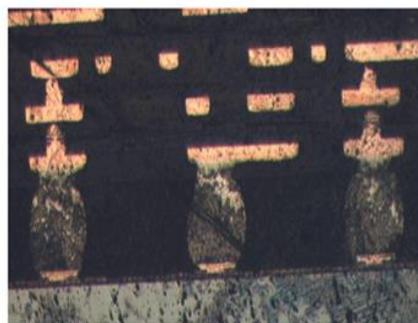
Рисунок 3 - Качество паяных соединений шариковых выводов микросхем в BGA-корпусах блока концентратора данных БЦСУ

На рисунке 4 изображены BGA-шары ПЛИС EP2S60 (ALTERA), которые соединяют кристалл микросхемы с корпусом. В верхней его части наблюдается светлый слой металла и вытянутость, что говорит о возможной деградации паяного соединения. Светлая часть может быть обусловлена диффузией металорезиста медной поверхности и бессвинцового шара припоя. Либо же наоборот это говорит о недостаточной температуре при пайке и недостигнутой эвтектике материала.

Образец №1 (до установки на плату)



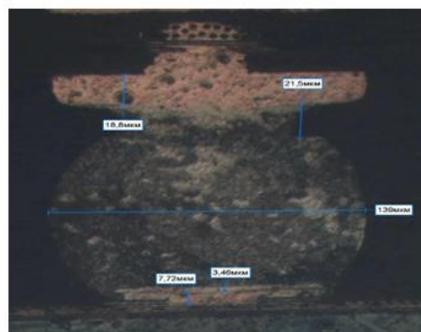
Образец №2 (после МФЭЦИ)



Увеличение 400х



Отклонений не обнаружено (пустот, коррозии, внедрения иных материалов)



Возможная деградация паяного соединения

Рисунок 4 - Анализ паяных соединений шариковых выводов микросхемы EP2S60 (ALTERA)

Анализ проводился на базе микроскопа ЛВ-34 (ЛОМО) и комплекса программно-аппаратного анализа микроструктуры поверхности твердых тел Thixomet.

По результатам проведенного анализа сделан вывод о достаточной эффективности методики с предложенной обобщенной моделью МФЭЦИ для выявления дефектов элементов и устройств систем управления воздушным судном.

Также были установлены следующие причины отказов БЦСУ:

1. Некачественная пайка бессвинцовых микросхем в BGA-корпусах (EP2S60F1020I4 Altera, EP3C55F484I7 Altera), что составляет 38 % от общего количества отказов.

2. Механическое разрушение межплатного соединения в модуле питания MGDТ-20-Н-СЕ/Т-Л Gaia Converter, что составляет 27 % от общего количества отказов.

3. Контрафактный выпуск микросхем СУ7С1069DV33-10ZSXI, что составляет 14 % от общего количества отказов.

В четвертой главе разрабатывается методика и программный комплекс по формированию программы корректирующих действий в целях обеспечения надежности БЦСУ.



Рисунок 5 - Методика по формированию программы корректирующих действий и оценке их эффективности

Методика по формированию программы корректирующих действий и оценке их эффективности, отличающаяся введением обязательных итераций в виде процедур отбраковочных испытаний для многократной классификации выявленных дефектов, представлена на рисунке 5.

Результаты МФЭЦИ устройств системы управления общесамолетным оборудованием самолета МС-21 и комплекса бортового оборудования Ми-171А2, полученные за 2018-2020 с применением методики по формированию программы корректирующих действий по исключению типовых отказов для блока концентратора данных системы управления воздушным судном привело к снижению дефектов по разрушению паяного соединения микросхем в BGA-корпусах с 38 % до 1 %; дефектов модуля питания MGDT-20-H-CE/T-L с 27% до 0 %; дефектов микросхем CY7C1069DV33-10ZSXI с 14 % до 0 %. По результатам проведенной качественной оценки корректирующих действий, с 2021 года наблюдается общее снижение количества отказов блока концентратора данных БЦСУ (2018 г. – 111, 2019 г. – 135, 2020 г. – 95, 2021 г. – 43) в 2,2 раза по сравнению с 2020 г. и в 3,13 по сравнению с 2019 г.

Для обработки результатов испытаний предложен новый программный комплекс поддержки процессов обеспечения надежности БЦСУ ВС в эксплуатации на базе методики многофакторных эквивалентно-циклических испытаний на безотказность, схематично изображенный на рисунке 6.

На всех этапах жизненного цикла проводятся МФЭЦИ на безотказность (Головной модуль 1) в целях подтверждения и контроля заданных показателей безотказности по наработке на отказ. Вся полученная в ходе МФЭЦИ информация накапливается в электронной базе системы управления данными об изделии PDM (Product Data Management) и содержит классификационные признаки элементов и характеристики надежности БЦСУ. Модуль 2 формирования корректирующих действий, используя библиотеку конструктивных и технологических паттернов и организационно-экономический комплекс по организации управления, производства и труда, формирует программу корректирующих действий. Модуль 3 формирования вариантов внедрения корректирующих действий определяет этап жизненного цикла, на котором, исходя из технико-экономической целесообразности, возможно внедрение корректирующих действий. Модуль 4 мониторинга подконтрольной партии эксплуатации представляет собой электронное дело изделие как систематизированную совокупность данных, формируемую в автоматизированной системе управления данными об изделии на всех стадиях жизненного цикла. Модуль 5, по статистической оценке, корректирующих действий базируется на программах анализа статистических данных по отказам в эксплуатации, их оценке и сравнении до внедрения корректирующих действий и после. Модуль 6 завершает цикл поддержки процессов обеспечения надежности БЦСУ воздушным судном в эксплуатации. Основой модуля является итоговое проведение качественного и количественного анализа внедренных корректирующих действий и оценка их результативности с позиции повышения надежности, при отрицательном результате действия модулей 2-5 повторяются.

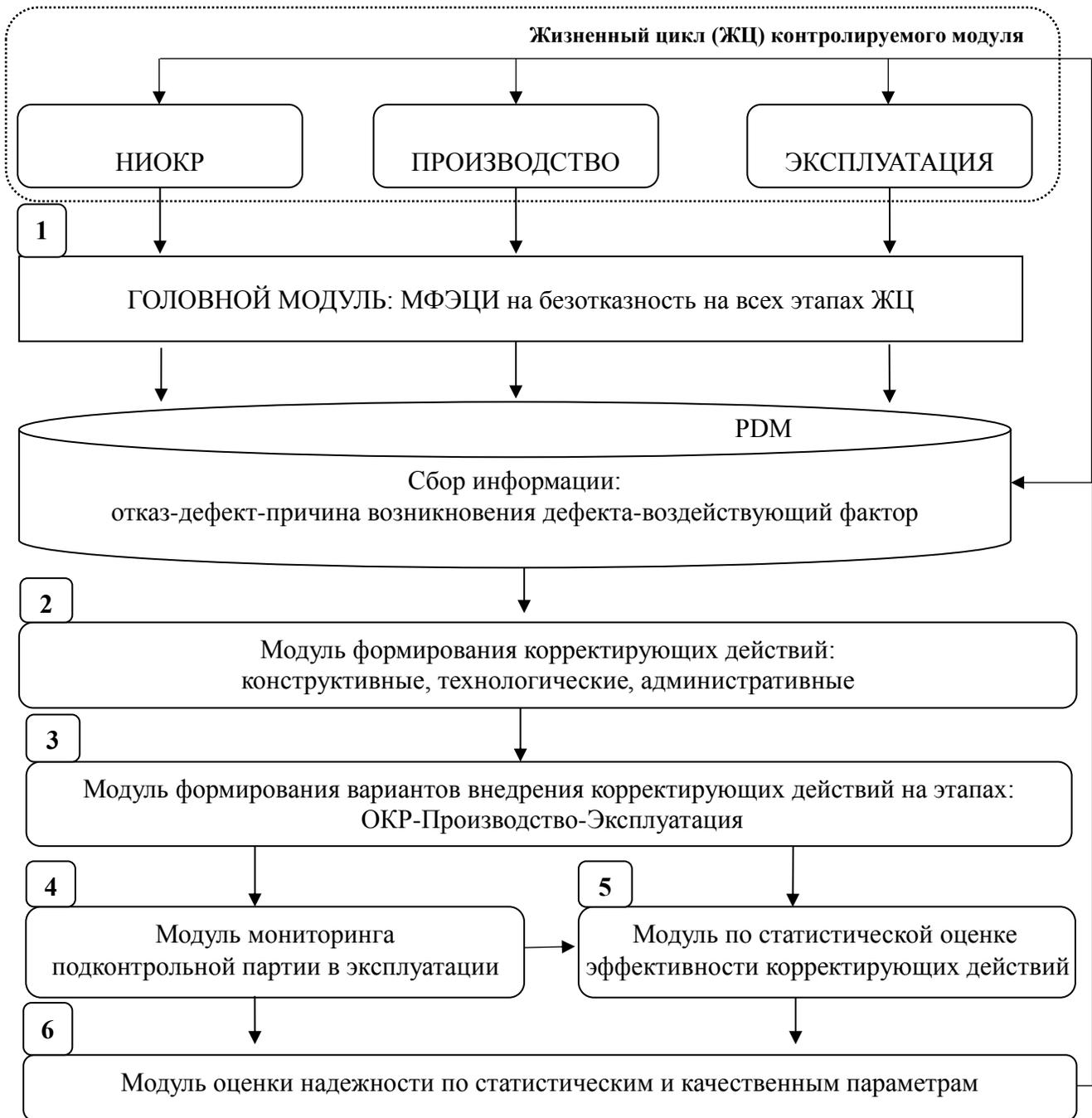


Рисунок 6 – Схема поддержки инженерных решений с помощью программного комплекса обеспечения надежности БЦСУ на всех этапах жизненного цикла

Процесс перехода от анализа данных по эксплуатации воздушного судна к повышению надежности изображен на рисунке 7. Предложенный алгоритм можно использовать с разными исходными данными, но полученными в ходе МФЭЦИ. Алгоритм состоит из конкретных действий, следующих в определенном порядке, действие алгоритма определено при выполнении каждого модуля и снижает вероятность ошибки при корректирующих действиях до минимального значения.

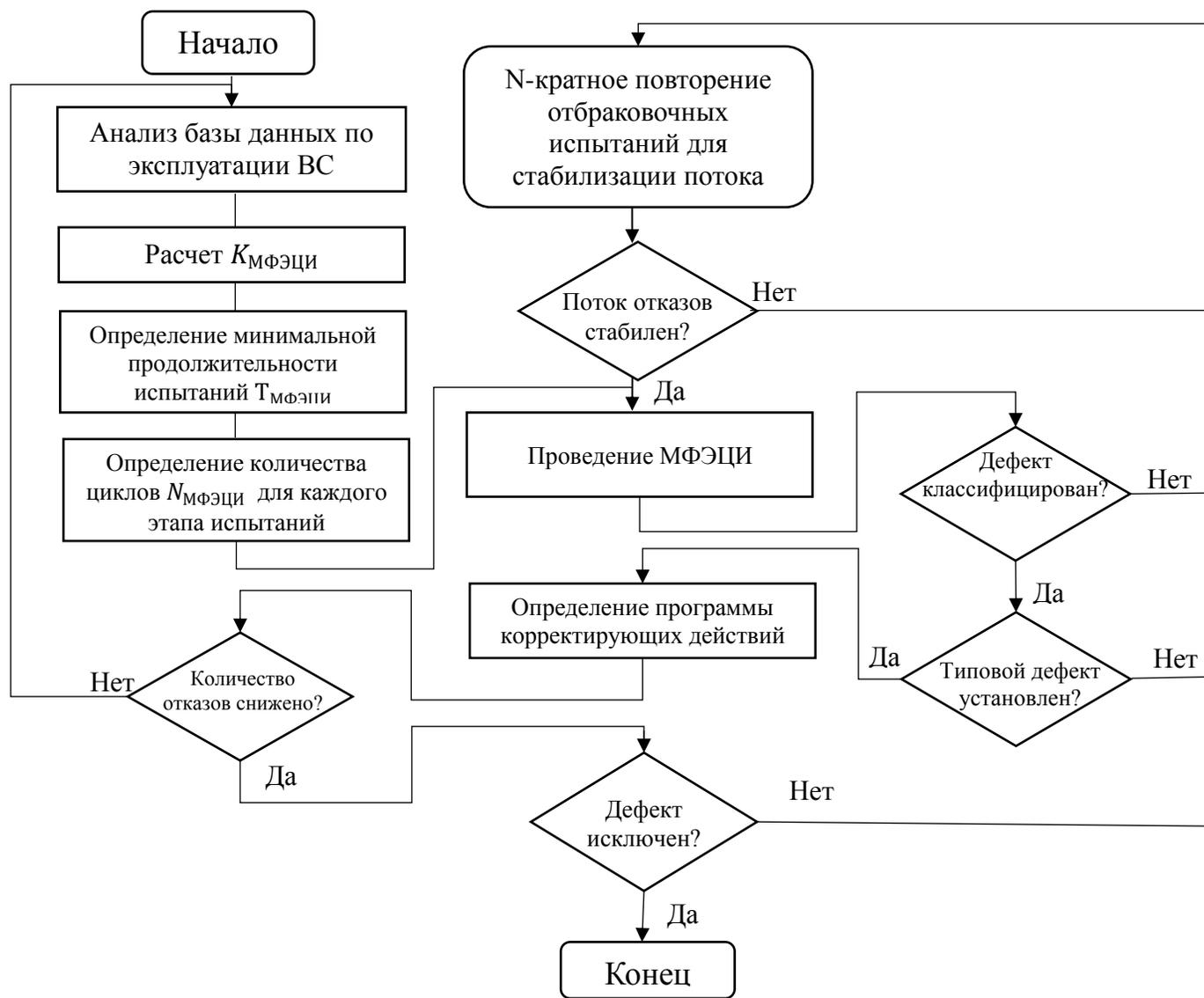


Рисунок 7 - Алгоритм повышения надежности бортовых цифровых систем управления воздушным судном в эксплуатации

Для определения эффективности предложенного программного комплекса и алгоритма повышения надежности бортовых цифровых систем управления воздушным судном в эксплуатации был проведен сравнительный анализ по трудоемкости выполняемых действий при исследовании отказов, включающий в себя определение причин систематических дефектов, разработку корректирующих действий и оценку их эффективности с учетом различных автоматизирующих процесс систем, общее сокращение времени составило 22 % по сравнению с затрачиваемым предприятиями промышленности процессам, направленных на повышение надежности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Итогом работы является повышение уровня безотказности бортовых цифровых систем управления воздушным судном на основе новой методики многофакторных эквивалентно-циклических испытаний на безотказность для выявления дефектов и методики по формированию программы корректирующих действий и оценке их эффективности, объединённых программным комплексом на базе нового алгоритма.

К основным результатам относятся:

1. Модель и методика многофакторных эквивалентно-циклических испытаний на безотказность элементов и устройств бортовых цифровых систем управления воздушным судном, которые отличаются тем, что первоначально моделью обобщается ранее полученная информация о дефектах, выявленных на разных стадиях жизненного цикла эксплуатации изделия, и их зависимость от испытательных воздействующих факторов, обеспечивая тем самым уровень режимов испытаний эквивалентный режимам эксплуатации при форсировании воздействия факторов. Затем комплексным испытательным воздействием факторов тепловой и механической энергии на элементы и устройства бортовых цифровых систем управления воздушным судном формируются новые режимы испытаний бортового авиационного оборудования, тем самым обеспечивая достижение дефектного состояния изделия, аналогичного длительной эксплуатации в составе воздушного судна.

2. Экспериментальные исследования, позволившие установить причины возникновения дефектов в процессе длительной эксплуатации элементов и устройств бортовой цифровой системы управления воздушного судна, на примере блока концентратора данных системы управления самолета, такие как бессвинцовая пайка микросхем в BGA-корпусах, пайка кристалла внутри микросхем, нарушения технологии производства печатных плат.

Разработаны нормативные документы для научно-производственной деятельности АО «УКБП», утверждённые независимой инспекцией Федерального агентства воздушного транспорта министерства транспорта Российской Федерации:

- РМ 134-2017 по порядку исследования отказов комплектующих электрорадиоизделий, произошедших на стадии производства и эксплуатации серийных изделий.

- РМ 190-2021 по оценке технической эффективности проведения отбраковочных испытаний, технологической приработки и технологической тренировки изделий различного структурного уровня.

- РМ 200-2021 по методике проведения отбраковочных испытаний (технологической приработки), исследовательских испытаний с целью выявления причин отказов, испытаний на надёжность (безотказность) изделий различного структурного уровня, с использованием процедур HALT/HASS.

3. Разработана методика по формированию программы корректирующих действий на основании проведенных многофакторных испытаний и проведена оценка ее эффективности на примере внедрения корректирующих действий по исключению типовых отказов элементов и устройств бортовых систем управления воздушным судном, что привело к снижению дефектов по разрушению паяного соединения микросхем в BGA-корпусах с 38 % до 1 %; дефектов модуля питания MGDТ-20-Н-СЕ/Т-L с 27 % до 0 %; дефектов микросхем СУ7С1069DV33-10ZSXI с 14 % до 0 % и общему повышению уровня безотказности. По результатам качественной оценки, мероприятия, проводимые в целях повышения безотказности блока БКД, эффективны, в 2021 году наблюдается общее снижение количества отказов (2018 г. – 111, 2019 г. – 135, 2020 г. – 95, 2021 г. – 43) в 2,2 раза по сравнению с 2020 г. и в 3,13 по сравнению с 2019 г.

4. Разработан программный комплекс на основе алгоритма повышения надежности бортовых цифровых систем управления воздушным судном, отличающийся тем, что достигнутый уровень надежности основан на физическом снижении доли систематических дефектов в изделии по которым приняты корректирующие действия, а не исключительно на статистической оценке надежности по результатам эксплуатации. Это позволяет повысить эффективность процессов исключения систематических групп отказов в эксплуатации, обеспечивая поэтапное повышение надежности за счет автоматизации процедур получения и обработки информации о дефектах в результате многофакторных эквивалентно-циклических испытаний и корректирующих действий по их исключению. Применение алгоритма привело к сокращению времени, затрачиваемого предприятием на повышение надежности, на 22%.

Перспективами развития темы диссертационной работы могут быть исследования:

- применения альтернативного математического аппарата для разработки модели многофакторных испытаний (нечеткая математика, интервальная математика, грубые множества Павлака и др.);
- накопленных баз данных по отказам на предмет выявления скрытых закономерностей с помощью методов интеллектуального анализа данных;
- влияния составляющих многоосной случайной вибрации на процессы накопления усталости и образования дефектов в элементах цифровых систем управления.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК, WOS, SCOPUS

1. Комиссаров А.В., Виноградов А.Б. Методика управления качеством бортового оборудования изделий авиационной и наземной техники. Известия Самарского научного центра РАН. Том 18, №4(3). – 2016. – С. 571 - 577.
2. Комиссаров А.В., Виноградов А.Б. Проблематика методов определения показателей надежности бортового радиоэлектронного оборудования авиационной техники. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 19. № 1-2. – 2017. – С. 346-351.

3. Комиссаров А.В., Шишкин В.В., Зайцев С.А., Коженков В.А., Захаров Д.С. Основные методы оценки надежности бортового радиоэлектронного оборудования современных гражданских судов перед этапом серийного производства. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 20. № 4-3 (84). – 2018. – С. 319-325.

4. Комиссаров А.В., Коженков В.А., Зайцев С.А., Захаров Д.С., Шишкин В.В. Разработка методики многофакторных эквивалентно-циклических испытаний на основе процедур HALT для оценки долговечности БРЭО. Автоматизация в промышленности №5.– 2019.– С. 56 - 61.

5. Комиссаров А.В., Каразеев С.В., Киселев С.К., Пивоваров О.О. Исследование влияния положения кварцевого маятникового акселерометра АК-15 в пространстве на показание термодатчика. Автоматизация в промышленности. № 10. – 2019. – С. 7-9.

6. Комиссаров А.В., Каразеев С.В., Валитов Р.Р., Шишкин В.В. Методика проведения многофакторных эквивалентно-циклических испытаний для оценки показателей надежности БРЭО на стадии научно-исследовательских опытно-конструкторских работ. Автоматизация в промышленности. № 4. – 2020. – С. 36-39.

7. Комиссаров А.В., Шишкин В.В., Коженков В.А., Степашкина Е.В. Разработка методики определения коэффициента ускорения многофакторных эквивалентно-циклических испытаний на основе процедур HALT для оценки долговечности и безотказности БРЭО. XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Т. 9. № 4 (52). – 2020. – С. 57-61.

8. Комиссаров А.В., Каразеев С.В., Киселев С.К., Валитов Р.Р., Урлапов О.В. Вычисление скорости летательного аппарата с помощью доплеровского измерителя. Автоматизация в промышленности. № 11.– 2020. – С. 58-60.

9. Komissarov A.V., Trushnikov V.E, Grishin M. V. Development of multivariate equivalent cyclic tests of HALT-based aviation radio equipment for assessing reliability. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. SibTrans-2019.

КОМИССАРОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И УСТРОЙСТВ БОРТОВЫХ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОФАКТОРНЫХ ЭКВИВАЛЕНТНО-ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Автореферат

Подписано в печать 18.07.2022. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,63.

Тираж 100 экз. Заказ №_____.

ИПК «Венец». 432027, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32