

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»

*На правах рукописи*

Королев Павел Сергеевич

**Разработка метода оценки надежности радиотехнических устройств  
космической аппаратуры с учетом влияния системы менеджмента  
качества**

**РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, профессор  
Жаднов Валерий Владимирович

Москва – 2021

## **Актуальность**

Риски проектов, связанные с предоставлением услуг космической связи с каждым годом в Российской Федерации (РФ) увеличиваются, что отрицательно сказывается на рентабельности страны в данной сфере. Этот факт подтверждается статистикой отказов радиотехнических устройств космической аппаратуры непилотируемых автоматических космических аппаратов в течение срока активного существования до 15 лет. В связи с регулярностью отказов не достигается установленный «нормативный бюджет надежности» к концу срока активного существования (САС) как отдельных типов радиотехнических устройств (РУ) и космической аппаратуры, так и самих непилотируемых автоматических космических аппаратов (АКА) в целом.

Существующие в РФ методы оценки надежности РУ, подтверждающиеся единичными показателями безотказности, сводятся к определению интенсивности отказов – « $\lambda$ -характеристик», которые зависят от электрических нагрузок электрорадиоизделий (ЭРИ), температурных условий окружающей среды, жесткости условий эксплуатации и других факторов, однако уточнение критериев, относящихся к мероприятиям обеспечения качества проектирования и производства не происходит. В действительности, таким критерием является «коэффициент качества производства», который призван учитывать уровень требований к разработке и изготовлению РУ. На практике данный коэффициент является интегральным и для космической отрасли принимает значение «0.2», тем самым снижая рассчитанную « $\lambda$ -характеристику» для всего РУ в 5 раз, следовательно, увеличивая вероятность безотказной работы. Но на деле, значения единичных показателей надежности (безотказности), полученные расчетным методом, не отражают реальной ситуации со статистикой отказов, полученной по результатам приемо-сдаточных испытаний, а также по итогу эксплуатации (или САС) и позволяют сделать вывод, что существующие методы их оценки дают завышенное значение целевого уровня показателей

надежности в силу того, что в них не учитываются факторы, отвечающие за обеспечение надежности, а в стратегии обеспечения надежности РУ присутствуют значимые недостатки (включая эффективность функционирования системы менеджмента качества организации-исполнителя).

Таким образом, существенное противоречие между теоретическим расчетом надежности и экспериментальным (реальной статистикой отказов РУ), а также недостаточной эффективностью функционирования системы менеджмента качества (СМК) порождает актуальность настоящего исследования для дальнейшего развития методов оценки надежности РУ космической аппаратуры непилотируемых АКА с учетом влияния СМК, т.е. системы управления организацией, в совокупности на выполнение необходимых мероприятий НТД при проектировании и производстве.

### **Постановка проблемы**

Высокая погрешность между расчетными данными показателей надежности (безотказности) и эксплуатационными РУ, а также частое наступление отказов в ходе эксплуатации до завершения САС обусловлена несколькими факторами: усложнение РУ космической аппаратуры; нарушения при выполнении обязательных мероприятий нормативно-технической документации (НТД), согласованных в техническом задании (ТЗ); низкое качество электрорадиоизделий, а также низкая эффективность функционирования системы менеджмента качества организации-исполнителя (в особенности невыполнение п.4.1 ГОСТ Р ИСО 9001-2015) и системы менеджмента надежности, как части СМК. Дело в том, что существующие математические модели оценки единичных показателей безотказности не учитывают данные факторы в виде коэффициентов, что накладывает определенные ограничения на точность получаемых величин, т.к. численное значение «коэффициента качества производства» регламентируется справочником «Надежность ЭРИ» и подразумевает

идеальное функционирование СМК с выполнением всех необходимых требований. Однако статистика отказов современных РУ космической аппаратуры свидетельствует об обратном, а высоконадежные (для которых получено экспериментальным путем значение «коэффициента качества производства», равное «0.2») завершили или завершают отведенный срок активного существования. Поэтому существует острая проблема несоответствия теоретических расчетов надежности и экспериментальных данных (реальной статистики отказов РУ), которая требует развития методов оценки надежности РУ, в частности, электронных модулей первого уровня (ЭМ1) с учетом многофакторности процессов на этапах проектирования и производства.

### **Цель и задачи исследования**

Повышение надежности радиотехнических устройств космической аппаратуры непилотируемых АКА благодаря обеспечению точности расчетной оценки единичных показателей безотказности на ранних этапах проектирования.

Для достижения поставленной цели в диссертационном исследовании решены следующие научные задачи:

1. Обзор и анализ предметной области оценки надежности РУ космической аппаратуры непилотируемых АКА, а также определение степени влияния СМК на качество выполнения обязательных мероприятий на этапах стадий жизненного цикла РУ с постановкой задачи исследования.

2. Разработка математической модели дифференциального «коэффициента качества производства», учитывающая многофакторность процессов и необходимых мероприятий НТД на стадиях жизненного цикла (ЖЦ) «проектирование» и «производство» РУ космической аппаратуры.

3. Разработка метода оценки надежности РУ космической аппаратуры, заключающийся в поэтапном контроле стадий ЖЦ

«проектирование» и «производство» ЭМ1 и позволяющий проводить оценку полноты выполнения необходимых мероприятий НТД на каждом этапе.

4. Разработка методики обеспечения надежности, позволяющая выявить достижимый уровень надежности РУ космической аппаратуры организацией-исполнителем по результатам проектирования и производства, а также имеющая возможность определять «слабые места» этапов стадий «проектирование» и «производство» для своевременного применения корректирующих действий, необходимых в задаче обеспечения требуемого (целевого) уровня надежности РУ.

5. Разработка алгоритма и реализация архитектуры программного обеспечения (ПО) для автоматизации этапов метода оценки надежности РУ космической аппаратуры.

6. Экспериментальная проверка предлагаемого в настоящем диссертационном исследовании метода оценки надежности и внедрение результатов исследования.

### **Степень разработанности проблемы**

Проблеме оценки надежности, а именно единичных показателей безотказности РУ космической аппаратуры непилотируемых АКА на этапах проектирования и производства, посвящено множество научных работ как в РФ, так и в других странах. Значительный вклад в развитие данной области для нашей страны внесли следующие известные лица: И.А. Ушаков, Б.А. Гнеденко Б.В., Козлов, Г.В. Дружинин, А.М. Половко, М.Р. Шура-Бура, А.Я. Резиновский, О.В. Абрамов, В.А. Каштанов, А.И. Медведев, В.В. Липаев, Ю.Н. Кофанов, В.В. Жаднов, а также другие советские и российские ученые. Однако методы, приведенные в существующих научных работах опираются только лишь на учет электрических, физических и других эксплуатационных факторов при оценивании « $\lambda$ -характеристик» – т.е. основываются на статистических данных ЭРИ, но не учитывают степень выполнения необходимых мероприятий согласно НТД, указанной в техническом задании и эффективность функционирования СМК для подтверждения

полноправного применения регламентированного численного значения «коэффициента качества производства» – т.е. не отражают многофакторную (дифференциальную) оценку качества проектирования и производства радиотехнических устройств.

Автоматизация оценки единичных показателей безотказности в настоящее время возможна с помощью следующего программного обеспечения: АСОНИКА-К-СЧ и Relex (модуль «Прогнозирование надежности»). Однако ни интегральный, ни дифференциальный «коэффициент качества производства» в указанных ПО не учитывается. Стоит отметить, что на данный момент, специализированного ПО для оценки «коэффициента качества производства» не существует по причине того, что отсутствует метод и методика его многофакторного определения. Также не учитывается качество проведения дополнительных испытаний ЭРИ, степень соответствия результатов техническому заданию и эффективность функционирования СМК организации-исполнителя при оценке надежности.

### **Личный вклад автора в разработку проблемы**

Личный вклад соискателя заключается в непосредственном участии в постановке задач диссертационного исследования и их решения. Автором лично предложены: новый метод оценки надежности, повышающий точность оценки единичных показателей безотказности и учитывающий многофакторность процессов проектирования и производства РУ космической аппаратуры с учетом СМК, тем самым значительно сокращая относительную погрешность между расчетными и экспериментальными данными для ЭМ1 класса приемо-передающих устройств; методика обеспечения надежности, улучшая эффективность достижения целевого уровня надежности благодаря мониторингу динамики изменения показателей надежности; новый подход к формированию вопросника для экспертной оценки полноты выполнения необходимых мероприятий нормативно-технической документации, базирующийся на строгой структуре (онтологический подход, представленный схемой композиции); подход к

оценке весовых коэффициентов требований НТД на основе нечеткой логики и критериев оценки качества требований, улучшающий процесс управления требованиями при их формировании. Автором самостоятельно разработаны архитектура, алгоритм ПО, пользовательский интерфейс и реализован конечный вид программного продукта для автоматизации процессов аудиторских проверок и анализа проектных процедур, а также процессов управления организацией при оценке надежности РУ космической аппаратуры.

В рамках диссертационного исследования автором получены 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616459 «АСОНИКА-К-КП 1.0» и 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620877 «Классификация требований ГОСТ, ОСТ для радиотехнических устройств на стадиях жизненного цикла».

Автором диссертации проведен анализ полученных результатов, сформулированы выводы по диссертационной работе.

### **Описание методологии исследования**

При решении поставленных задач использовались методы теории надежности, структурного анализа, онтологического исследования, математического моделирования, нечеткой логики и принятия решений, теории множеств, вероятности и математической статистики, а также методы объектно-ориентированного программирования.

### **Основные результаты, выносимые на защиту**

1. Математическая модель дифференциального «коэффициента качества производства», повышающая точность расчетной оценки показателей надежности, в частности, единичных показателей безотказности ЭМ1 класса приемно-передающих устройств и отличающаяся от известной тем, что учитывает коэффициенты, характеризующие эффективность выполнения необходимых мероприятий НТД, а также многофакторность процессов на стадиях ЖЦ «проектирование», «производство».

2. Метод оценки надежности РУ космической аппаратуры, который увеличивает вероятность влияния доработок на снижение количества отказов для ЭМ1 класса приемо-передающих устройств и отличается от известных тем, что включает в себя поэтапный контроль полноты выполнения необходимых мероприятий при проектировании и производстве.

3. Методика обеспечения надежности РУ космической аппаратуры, повышающая эффективность достижения целевого уровня надежности ЭМ1 для класса приемо-передающих устройств благодаря своевременному применению корректирующих действий на этапах проектирования, производства и отличающаяся от существующих тем, что имеет возможность прогнозировать динамику изменения оцениваемых показателей надежности.

4. Программное обеспечение для автоматизации оценки дифференциального «коэффициента качества производства» ЭМ1 по результатам стадий ЖЦ «проектирование» и «производство» с возможностью оценки «коэффициента качества производства» на каждом этапе ЖЦ и отличающееся от известных тем, что позволяет анализировать результаты аудиторских проверок, а также дает наглядное представление о достижимом уровне надежности.

### **Научная новизна**

1. Предложена математическая модель дифференциального «коэффициента качества производства» для РУ космической аппаратуры, позволяющая учесть эффективность выполнения необходимых мероприятий НТД на стадиях ЖЦ «проектирование» и «производство», включая эффективность функционирования СМК.

2. Разработан метод оценки надежности РУ космической аппаратуры, снижающий вероятность доработок на заключительных этапах стадий ЖЦ «проектирование» и «производство» благодаря применению онтологического подхода при формировании вопросника для экспертной оценки и последующего анализа результатов аудита, а также применения



критериев качества и нечеткой логики для оценки качества требований (мероприятий) НТД.

3. Разработана методика обеспечения надежности РУ космической аппаратуры, повышающая уровень проектной надежности благодаря своевременному применению корректирующих действий посредством строгой локализации невыполненных мероприятий НТД (нарушений) на этапах проектирования, производства и формированию механизма обратной связи – предупреждающих действий по обеспечению надежности.

4. Разработано программное обеспечение, улучшающее результативность проведения проектных процедур и процессов обеспечения надежности посредством наглядного представления уровня надежности по результатам анализа результативности проведенных мероприятий на этапах стадий ЖЦ «проектирование» и «производство».

### **Общие выводы исследования**

В рамках настоящего диссертационного исследования реализованы следующие научные задачи:

1. Выполнен обзор и анализ предметной области оценки надежности РУ космической аппаратуры непилотируемых АКА, а также определена степень влияния СМК на стадии жизненного цикла РУ.

2. Разработана математическая модель дифференциального «коэффициента качества производства», учитывающая многофакторность процессов и необходимых мероприятий НТД на стадиях ЖЦ «проектирование» и «производство» РУ космической аппаратуры.

3. Разработан метод оценки надежности РУ космической аппаратуры, заключающийся в поэтапном контроле стадий ЖЦ «проектирование», «производство» ЭМ1 уровня и позволяющий проводить оценку полноты выполнения необходимых мероприятий НТД на каждом этапе.

4. Разработана методика обеспечения надежности, позволяющая выявить достижимый уровень надежности РУ космической аппаратуры

организацией-исполнителем по результатам проектирования и производства, а также имеющая возможность определять «слабые места» этапов стадий «проектирование» и «производство» для своевременного применения корректирующих действий, необходимых в задаче обеспечения требуемого (целевого) уровня надежности РУ.

5. Разработан алгоритм и реализована архитектура программного обеспечения для автоматизации этапов метода оценки надежности РУ космической аппаратуры.

6. Экспериментально проверен предлагаемый в пункте 3 метод оценки надежности и внедрены результаты исследования в учебный процесс НИУ ВШЭ, а также в практику проектирования и производства российских предприятий и компаний.

На объекте исследования «модуль питания и управления» доказана целесообразность применения разработанного метода для достоверной оценки показателей надежности РУ (ЭМ1), которая отражает расчетным способом действительный уровень надежности. Также показана эффективность применения разработанной методики обеспечения надежности РУ (ЭМ1) на этапах стадий ЖЦ согласно принципам менеджмента качества. В первом случае отражается реальная ситуация с достигнутым уровнем надежности РУ (ЭМ1), а во втором, уровень надежности подвержен мониторингу для отслеживания динамики его изменения в задаче его достижения. Благодаря этому, еще на ранних этапах проектирования предоставляется возможность выявить и устранить обнаруженные нарушения в ходе выполнения требований НТД, что позволит гарантировать достижение целевого уровня надежности.

Также, зная эффективность функционирования СМК организации-исполнителя, можно предварительно оценить шансы на достижение целевого уровня надежности.

Тем самым, достигнута поставленная цель: повышение надежности радиотехнических устройств космической аппаратуры непилотируемых АКА

благодаря обеспечению точности расчетной оценки единичных показателей безотказности на ранних этапах проектирования.

Достижение целевого уровня надежности и, соответственно, качества РУ космической аппаратуры для РФ в космической отрасли приведет к повышению рейтинга и увеличению активов российских организаций. Также выполнение «нормативного бюджета надежности» позволит снизить риски проектов, связанных с предоставлением услуг космической связи, что положительно скажется на рентабельности страны в данной сфере.

Полученные результаты диссертационного исследования вошли в состав комплекса мероприятий по обеспечению надежности, осуществляемых организациями-исполнителями (предприятиями/компаниями-разработчиками). Отдельные положения работы используются в учебном процессе высших образовательных учреждений Российской Федерации.

#### **Список опубликованных статей, где отражены основные научные результаты диссертации**

##### **Работы, опубликованные автором в рецензируемых научных изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus:**

1. **Korolev P.**, Sosnin A., Ivanov I. Development of the Dependability and Quality Assessment Method for the Design of Wireless Devices (Разработка метода оценки надежности и качества при проектировании радиотехнических устройств), in: 2021 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). IEEE, 2021. P. 1-5. DOI: 10.1109 / SED51197.2021.9444504.
2. **Korolev P.**, Sedov K., Sosnin A. Dependability and Quality Satellite Telecommunication Equipment Improving at the Production Stage (Повышение надежности и качества телекоммуникационного оборудования спутниковой связи на этапе производства), in: 2020 Systems

of signals generating and processing in the field of on board communications. IEEE, 2020. P. 1-5. DOI: 10.1109 / IEEECONF48371.2020.9078617.

3. **Korolev P.** Development of the Methodology for Assessing the “Production Quality Factor” for the Failure Rate Model of Artificial Earth Satellites Electronic Means (Разработка методики оценки «коэффициента качества производства» для модели интенсивности отказов радиотехнических устройств искусственных спутников Земли), in: SYNCHROINFO 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. IEEE, 2020. P. 1-6. DOI: 10.1109 / SYNCHROINFO49631.2020.9166030.
4. **Polesskiy S., Korolev P., Ivanov I., Sedov K.** Development of Methods for Identifying Factors Affecting the Electronic Tools Reliability in the Design (Разработка методики выявления факторов, влияющих на надежность электронных средств при проектировании), in: 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). IEEE, 2019. P. 1-5. DOI: 10.1109 / SED.2019.8798447.

**Работы, опубликованные автором в рецензируемом научном издании, входящем в список рекомендованных журналов НИУ ВШЭ:**

5. **Королев П. С.** Комплексный метод оценки показателей безотказности радиотехнических устройств космической аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 4. С. 316-328. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-4-316-328.
6. **Королев П. С., Жаднов В. В.** Оценка «коэффициента качества производства» для модели интенсивности отказов радиотехнических приборов непилотируемых автоматических космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 3. С. 264-277. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-264-277.

### **Работы, опубликованные в других изданиях:**

7. **Королев П. С.** Способ оценки «коэффициента качества производства» радиотехнических устройств систем спутниковой связи // В кн.: Сборник трудов XV Международной отраслевой научно-технической конференции "Технологии информационного общества" Т. 1. ИД Медиа Паблишер, 2021. С. 111-113.
8. **Королев П. С.,** Кунижев И. Р. Анализ подходов к оценке надежности радиотехнических устройств непилотируемых космических аппаратов с использованием системы менеджмента качества // В кн.: Сборник трудов XIV Международной отраслевой научно-технической конференции "Технологии информационного общества" Т. 1. М.: ИД Медиа Паблишер, 2020. С. 167-169.
9. **Королев П. С.** Исследование причин низкой надежности и качества радиотехнических устройств космической аппаратуры на этапе проектирования // В кн.: Материалы конференции. Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского / Под общ. ред.: Е. А. Крук, С. А. Аксенов, С. М. Авдошин, У. В. Аристова, Г. Г. Бондаренко, Л. С. Восков, А. А. Елизаров, Ф. И. Иванов, А. Б. Лось, Н. С. Титкова. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2020. С. 140-141.
10. **Королев П. С.** Разработка программного обеспечения для оценки «коэффициента качества производства» радиотехнических устройств непилотируемых космических аппаратов // В кн.: Труды международного симпозиума НАДЕЖНОСТЬ и КАЧЕСТВО 2020 Т. 2. Пенза: Пензенский государственный университет, 2020. С. 291-294.
11. **Королев П. С.** Влияние коэффициента качества производства аппаратуры на оценку показателей надежности радиолокационного оборудования в RIAC-HDBK-217PLUS // В кн.: Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XVI Международной

научно-практической конференции / Отв. ред.: И. А. Иванов. Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2019. С. 439-441.

12. **Королев П. С.** Влияние системы менеджмента качества при разработке радиотехнических устройств в рамках концепции проектного обучения в МИЭМ НИУ ВШЭ // В кн.: Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского / Под общ. ред.: Е. А. Крук, С. А. Аксенов, С. М. Авдошин, У. В. Аристова, Г. Г. Бондаренко, Л. С. Восков, А. А. Елизаров, Э. С. Клышинский, А. Б. Лось, Н. С. Титкова. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2019. С. 147-148.

13. **Королев П. С.,** Лосева М. В. Исследование влияния коэффициента качества производства аппаратуры на оценку показателей надежности радиотехнических устройств систем связи // В кн.: Труды Международного симпозиума НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО. Т. 1. Пенза: Издательство ПГУ, 2019. С. 145-146.