

ISSN 2500—0381

Электронная версия

ISSN 0021—3454

Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е

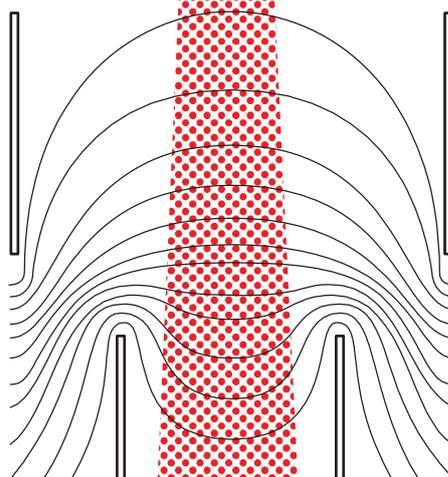
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ **4**

Т. 64  
2021

Journal of **I**nstrument **E**ngineering



## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*проф. А. А. БОБЦОВ*

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*А. П. АЛЕШКИН, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия*  
*В. В. ГРИГОРЬЕВ, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*  
*И. П. ГУРОВ, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*  
*В. В. ЕФИМОВ, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия*  
*Т. А. ИСМАИЛОВ, проф., ДГТУ, Махачкала, Россия*  
*В. М. МУСАЛИМОВ, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*  
*В. О. НИКИФОРОВ, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*  
*А. А. ПЫРКИН (зам. главного редактора), проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*  
*В. Я. РАСПОПОВ, проф., ТГУ, Тула, Россия*  
*Л. А. СЕВЕРОВ, проф., ГУАП, Санкт-Петербург, Россия*  
*Б. В. СОКОЛОВ, проф., СПбФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия*  
*В. С. ТИТОВ, проф., ЮЗГУ, Курск, Россия*  
*В. С. ТОМАСОВ, доц., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*  
*И. Б. ФЕДОРОВ, акад. РАН, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия*  
*Н. Б. ФИЛИМОНОВ (зам. главного редактора), проф., МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия*  
*В. Б. ШЛИШЕВСКИЙ, проф., СГГА, Новосибирск, Россия*  
*А. С. ЮЩЕНКО, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия*

## ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

*С. В. АБЛАМЕЙКО, акад. НАН Беларуси, БГУ, Минск, Беларусь*  
*Р. М. АЛГУЛИЕВ, акад. НАН Азербайджана, Институт информационных технологий НАНА, Баку, Азербайджан*  
*Т. ЗЕЕГЕР, проф., Университет Зигена, Зиген, Германия*  
*Т. ОРЛОВСКА-КОВАЛЬСКА, проф., Университет Технологий, Вроцлав, Польша*  
*Э. РОМЕРО-КАДАВАЛ, проф., Университет Экстремадура, Бадайоз, Испания*  
*Р. СТЖЕЛЕЦКИ, проф., Институт Электротехники в Варшаве, Гдыня, Польша*

Ответственный секретарь *М. В. Лебецкая*

Редактор *Л. Г. Позднякова*

Набор, верстка: *М. В. Герасимова*

Перевод: *Ю. И. Копилевич*

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А, Университет ИТМО

Телефон/факс: (812) 232-02-95, E-mail: [pribor@mail.ifmo.ru](mailto:pribor@mail.ifmo.ru)

[http:// pribor.ifmo.ru/](http://pribor.ifmo.ru/)

---

*Подписано в печать 12.05.2021 г.*

---

*Отпечатано в учреждении „Университетские телекоммуникации“*

*Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А*

*Телефон: (812) 915-14-54, E-mail: [Prudentov@tibir.ru](mailto:Prudentov@tibir.ru)*

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Кузнецов В. И., Калашников С. Д. Применение метода виртуальных измерений зенитных расстояний звезд при решении задачи ориентации ..... 245
- Жирабок А. Н., Зуев А. В., Филаретов В. Ф., Шумский А. Е. Идентификация дефектов на основе скользящих наблюдателей с ослабленными условиями существования ..... 255

### ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Симонов П., Абрамчук М. В., Бжихатлов И. А. Определение оптимального числа пар контактов для конструкции контактного кольца ..... 264
- Силаев А. А., Марусина М. Я., Закемовская Е. Ю. Повышение эффективности функционирования электродвигателей мехатронных систем в широком диапазоне частот вращения ..... 270

### ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Авиев А. А., Енин В. Н. Динамическая модель оптико-электронной системы измерения параметров виброподставки в лазерном гироскопе ..... 276
- Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Инвариантность принципов изофотометрии в компьютерном моделировании интерферограммы ..... 288
- Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Майоров Е. Е., Коцкович В. Б., Пушкина В. П., Хохлова М. В. Спектрофотометрия основных дезинфицирующих веществ в ультрафиолетовом диапазоне длин волн ..... 294

### ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

- Николаев А. Д., Помпеев К. П. Совершенствование лазерной головки за счет изменения топологии деталей ее корпуса и способа крепления коллиматора ..... 300
- Федорович С. Н. Моделирование процесса доводки сферического ротора шарового гироскопа ..... 307

### НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

- Королев П. С. Комплексный метод оценки показателей безотказности радиотехнических устройств космической аппаратуры ..... 316
- Воднева Л. Ю., Воднев А. А., Коротков О. Б., Лопачев С. Н., Скорых В. А., Перепелкина С. Ю. Многоместный аппарат с конвейерным магнитным приводом для определения кинетики растворимости фармацевтических форм ..... 328

# JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 64

APRIL 2021

№ 4

## CONTENTS

### INSTRUMENTS AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Kuznetsov V. I., Kalashnikov S. D.** Application of the Method of Virtual Measurements of Stars Zenith Distances in Solving the Orientation Problem..... 245
- Zhirabok A. N., Zuev A. V., Filaretov V. F., Shumsky A. E.** Fault Identification Based on Sliding Mode Observers with Relaxed Existence Conditions ..... 255

### ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Simonov P., Abramchuk M. V., Bzhikhatlov I. A.** Determining the Optimal Number of Contact Pairs for a Slip Ring Design..... 264
- Silaev A. A., Marusina M. Ya., Zakemovskaya E. Yu.** Improving the Efficiency of the Functioning of Electric Motors of Mechatronic Systems in a Wide Range of Ro-tational Frequencies..... 270

### OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Aviev A. A., Enin V. N.** Dynamic Model of an Optoelectronic System for Measuring the Parameters of a Vibration Support in a Laser Gyroscope ..... 276
- Kirillovsky V. K., Tochilina T. V.** Invariance of the Isophotometry Principles in Computer Simulation of Interferogram ..... 288
- Arefiev A.V., Guliev R. B., Maiorov E. E., Kotskovich V. B., Pushkina V. P., Khokhlova M. V.** Spectrophotometry of Basic Disinfectants in the Ultraviolet Wavelength Range..... 294

### TECHNOLOGY OF INSTRUMENT MANUFACTURING

- Nikolaev A. D., Pompeev K. P.** Improvement of a Laser Head by Changing the Topology of its Body Parts and the Collimator Mounting Method ..... 300
- Fedorovich S. N.** Modeling the Process of Finishing the Spherical Rotor of a Ball Gyroscope ..... 307

### SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

- Korolev P. S.** A Comprehensive Method for Assessing the Reliability of Radio-Technical Devices of Spacecraft Equipment..... 316
- Vodneva L. Yu., Vodnev A. A., Korotkov O. B., Lopaev S. N., Skorykh V. A., Perepelkina S. Yu.** Multi-Chamber Apparatus with a Conveyor Magnetic Drive for Determining the Kinetics of Dissolution of Pharmaceutical Forms..... 328

## КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

П. С. КОРОЛЕВ

*Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,  
109028, Москва, Россия  
E-mail: pskorolev@hse.ru*

Представлен метод оценивания показателей безотказности радиотехнических устройств космической аппаратуры на этапе проектирования, учитывающий следующие факторы: эффективность функционирования системы менеджмента качества организации-исполнителя; соответствие результатов проектирования требованиям технического задания; качество проведения дополнительных испытаний электрорадиоизделий; качество реализации необходимых мероприятий, содержащихся в нормативно-технической документации. Усовершенствована методика уточнения значения „коэффициента качества производства“, входящего в математическую модель интенсивности отказов. Преимущество методики заключается в постоянном контроле необходимых мероприятий, содержащихся в нормативно-технической документации, при проектировании радиотехнических устройств. Показана эффективность применения нового метода при оценивании целевого уровня показателей надежности радиотехнических устройств космической аппаратуры.

**Ключевые слова:** *надежность, безотказность, коэффициент качества производства, радиотехническое устройство, космическая аппаратура, непилотируемый автоматический космический аппарат*

**Введение.** Ракетно-космическая отрасль Российской Федерации (РФ) в настоящий момент и в ближайшем будущем должна обеспечить конкурентоспособность и рентабельность в предоставлении услуг космической связи на мировом рынке в самых важных сферах человеческой деятельности, согласно Федеральной космической программе РФ на 2016—2025 гг. [1]. Это подтверждается политикой государства в области космической деятельности на период до 2030 г. и в дальнейшей перспективе [2]. Документы [1, 2] утверждены указом Президента РФ, в них указана необходимость поддержания минимально необходимого состава орбитальной группировки непилотируемых автоматических космических аппаратов (АКА) нового поколения, в частности, искусственных спутников Земли (ИСЗ) со сроком активного существования (САС) 15 лет и более\* [2—5], решающих комплексные задачи связи [6—9].

---

\* ГОСТ Р 56526-2015. Требования надежности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования. М.: Стандартинформ, 2016. 55 с.

Однако ужесточение требований к показателям надежности непилотируемых АКА\*\* связано с регулярными отказами радиотехнических устройств (РУ) [10, 11], высокими темпами роста функциональной и аппаратной сложности, а также комплексированием задач в ходе эксплуатации.

В работе [11] исследованы причины отказов непилотируемых АКА в течение САС, которые в основном связаны с отказами радиотехнических устройств. На основе анализа отказов РУ [11] предполагается, что в РФ проблема достижения целевого уровня единичных показателей надежности РУ вызвана отсутствием должного контроля необходимых мероприятий (согласно НТД), которые следует выполнять на всех стадиях жизненного цикла. Другая проблема связана с некорректным оцениванием показателей надежности РУ. Выполнение требований учитывает „коэффициент качества производства“  $K_A$ , численное значение которого регламентируется в официальных справочниках [12, 13]. Действительно, всемирный опыт показывает, что в целом по промышленности около 80 % всех дефектов, выявленных в процессе производства и эксплуатации, связаны с недостаточным качеством процессов проектирования и подготовки производства. Соответственно организация-исполнитель с функционирующей системой менеджмента качества (СМК), отвечающей требованиям\*\*\* и Положению „РК – ...“, обязана выполнять все необходимые требования НТД и технического задания (ТЗ), согласованные исполнителем и заказчиком. Поэтому непосредственное влияние на эффективность использования численного значения  $K_A$ , регламентированного [12, 13], оказывает СМК организации, т.е. система управления всей организацией [14—18]. Однако статистика отказов [9] свидетельствует о наличии недостатков в системе менеджмента надежности (СМН), программе обеспечения надежности (ПОН) РУ космической аппаратуры, а также в стратегии управления организацией. Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы является повышение достоверности численной оценки целевого уровня показателей надежности (в частности, единичных показателей безотказности), а также снижение рисков проектов, связанных с предоставлением услуг космической связи.

**Постановка задачи.** Для достижения поставленной цели необходимо разработать комплексный метод численной оценки показателей безотказности РУ непилотируемых АКА на этапе проектирования, учитывающий:

- уровень требований к разработке и изготовлению,
- контроль мероприятий, согласно требованиям НТД, на всех стадиях жизненного цикла,
- эффективность системы управления организацией,
- выполнение требований ТЗ,
- проведение дополнительных испытаний электрорадиоизделий (ЭРИ).

**Проекты с повышенным уровнем технического риска.** Работоспособность большинства непилотируемых АКА до 15 лет и более обеспечивается благодаря значительной аппаратной избыточности (резервированию) бортовых систем, что влечет существенные недостатки, связанные с лишней массой непилотируемого АКА, его дороговизной, сложностью проведения имитационного моделирования при оценке надежности. В совокупности все вытекающие последствия приводят к трудностям в обеспечении рентабельности дорогостоящих проектов по созданию непилотируемых АКА, в частности, ИСЗ длительного функционирования на геостационарной орбите (ГСО) с САС до 15 лет для предоставления услуг космической связи — это проекты с повышенным уровнем технического риска [19].

---

\*\* ГОСТ РО 1410-001-2009. Системы и комплексы космические. Порядок задания требований, оценки и контроля надежности. М.: Стандартинформ, 2011. 60 с.; ГОСТ Р 56516-2015. Порядок и правила обеспечения контроля надежности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования. М.: Стандартинформ, 2015. 27 с.

\*\*\* ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015. 24 с.

Обеспечить рентабельность таких проектов с минимизацией технических рисков возможно, только когда в организациях правильно функционирует СМК, включая СМН. Согласно работе [20], с 1960 по 1999 гг. в СССР/РФ значения коэффициентов рисков отказов непилотируемых АКА как возрастали, так и сокращались в течение всего указанного периода по десятилетиям:

$$K_{\text{риск}} = \frac{N_{\text{отк}}}{N_{\text{орб}} - N_{\text{отк}}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{отк}}$  — число отказавших непилотируемых АКА;  $N_{\text{орб}}$  — общее число непилотируемых АКА, находящихся на ГСО.

Подобная тенденция наблюдалась и с 2000 по 2009 г. Однако в 2010—2019 гг.  $K_{\text{риск}}$  возрастает с каждым годом [10]. На рис. 1 представлено изменение коэффициентов риска отказов ИСЗ, эксплуатирующихся на ГСО ( $K_{\text{риск}}$  рассчитан согласно выражению (1)).

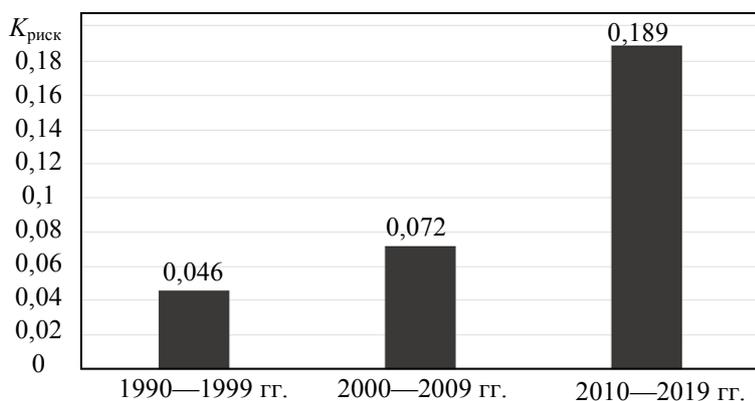


Рис. 1

Стоит обратить внимание: для 2020 г.  $K_{\text{риск}} = 2,5$ , что в 13 раз превышает значения  $K_{\text{риск}}$  предшествующего десятилетия [10]. Причиной отрицательной динамики  $K_{\text{риск}}$  является завершение эксплуатации высоконадежных непилотируемых АКА. Поэтому одним из способов преодоления кризисного состояния космической отрасли в РФ является повышение качества деятельности организаций-исполнителей (предприятий) путем совершенствования функционирования СМК [18], что положительно скажется на надежности и качестве разрабатываемых РУ для космической аппаратуры непилотируемых АКА.

**Подходы к оценке показателей безотказности.** В работе [11] проведен анализ подходов к оценке показателей надежности, в частности, единичных показателей безотказности РУ непилотируемых АКА. Эта оценка проводится при проектировании РУ для подтверждения принципиальной возможности обеспечения целевого уровня этих показателей и является одним из обязательных мероприятий, предусмотренных ГОСТ РВ 20.39.302-98.\*\*\*\*

Рассмотрев иерархическую структуру непилотируемого АКА (например, ИСЗ), можно выделить основные уровни: 1 — непилотируемый АКА; 2 — космическая аппаратура (СЧ); 3 — радиотехнические устройства; 4 — ЭРИ.

Математическая модель оценки такого показателя безотказности, как эксплуатационная интенсивность отказов РУ  $\lambda_{\text{ру}}$ , согласно ГОСТ РВ 20.39.302-98, затрагивает только 3-й и 4-й уровни иерархической структуры непилотируемого АКА:

$$\lambda_{\text{ру}} = K_A \sum_{n=1}^N \lambda_n, \quad (2)$$

\*\*\*\* ГОСТ РВ 20.39.302-98. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования к программам обеспечения надежности и стойкости к воздействию ионизирующих и электромагнитных излучений. М.: Стандартинформ, 1998. 22 с.

где  $\lambda_n$  — интенсивность отказов ЭРИ;  $N$  — количество ЭРИ в радиотехническом устройстве;  $K_A$  — „коэффициент качества производства“, принимающий значение „1“ для КГВС „Мороз-6“ и значение „0,2“ для Положения „РК – ...“.

Определив недостатки подходов и их методик, авторы работы [11] предложили методику оценки  $K_A$  из модели (2), отличительной особенностью которой является применение онтологического подхода к формированию вопросника согласно действующей НТД с учетом сертифицированной СМК для последующей экспертной оценки (как внутреннего, так и внешнего аудита). На рис. 2 приведена IDEF5-диаграмма формирования вопросника [11] на примере категории отказов „несовершенство системы управления“.

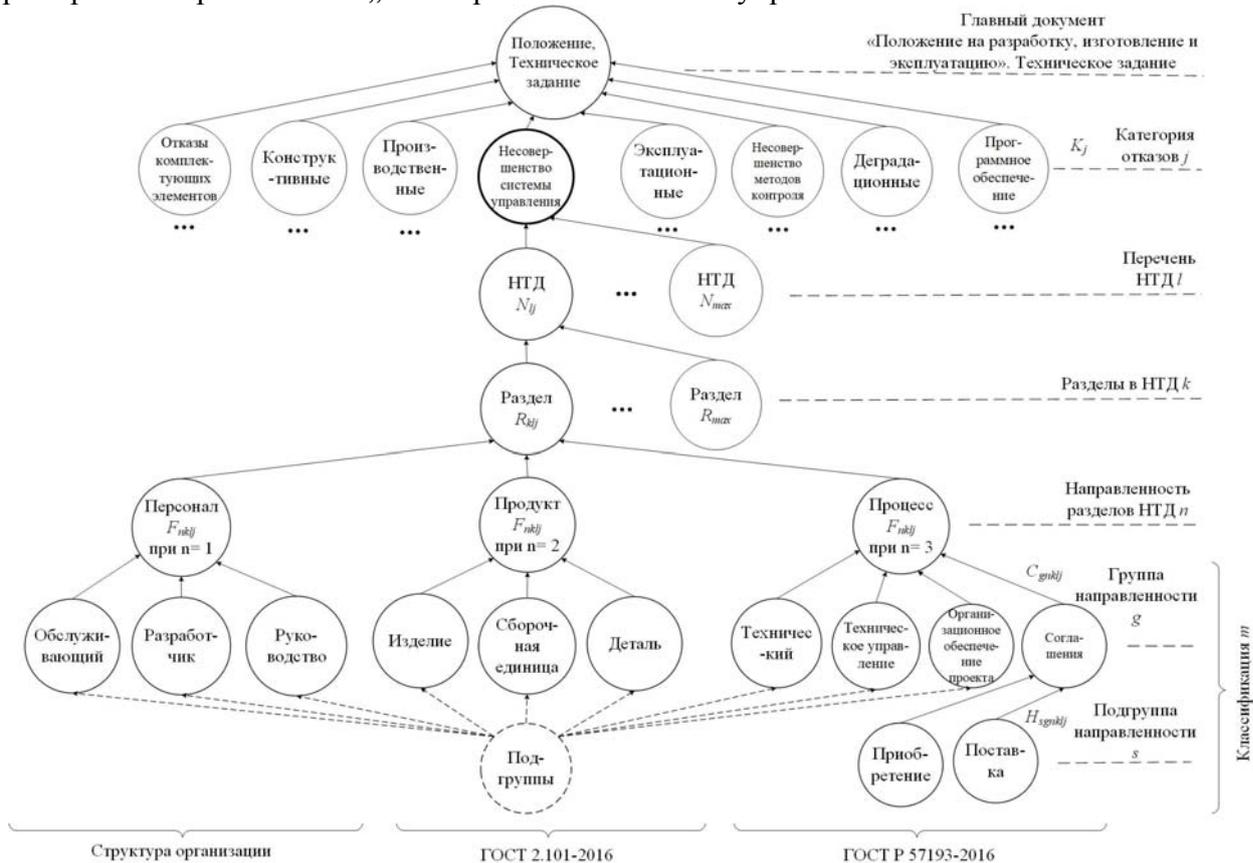


Рис. 2

Однако выявлены недостатки методики: отсутствие в математической модели расчетной оценки  $K_A$  коэффициентов, учитывающих внутренний и внешний аудиты; отсутствие учета в расчетной оценке коэффициента корреляции  $r$  ответов экспертов/аудиторов и разработчиков РУ; отсутствие описания методов определения весовых коэффициентов и численных значений каждого из требований (вопросов). Поэтому необходимо усовершенствование методики.

**Методика расчетной оценки „коэффициента качества производства“.** Методика уточнения расчетной оценки „коэффициента качества производства“ РУ приведена на рис. 3 в виде функциональной модели, выполненной согласно графическому стандарту IDEF0.

Первые три этапа (блоки А1—А3 на рис. 3) указаны в работе [11], там же приведен пример вопросника (для А3). Однако для А3 стоит рассмотреть метод выбора весовых коэффициентов (значимости)  $G$  и численных значений для каждого из требований (вопросов)  $\gamma$ , приведенных в конкретной НТД.

Чтобы поэтапно внедрить процесс управления качеством требований в организацию, например, можно использовать процессную модель на основе уровней зрелости Capability Maturity Model Integration (СММІ) версии 1.3 или 2.0. Это позволит постепенно совершенст-

воват процесс управления требованиями, что поспособствует получению более качественных требований.

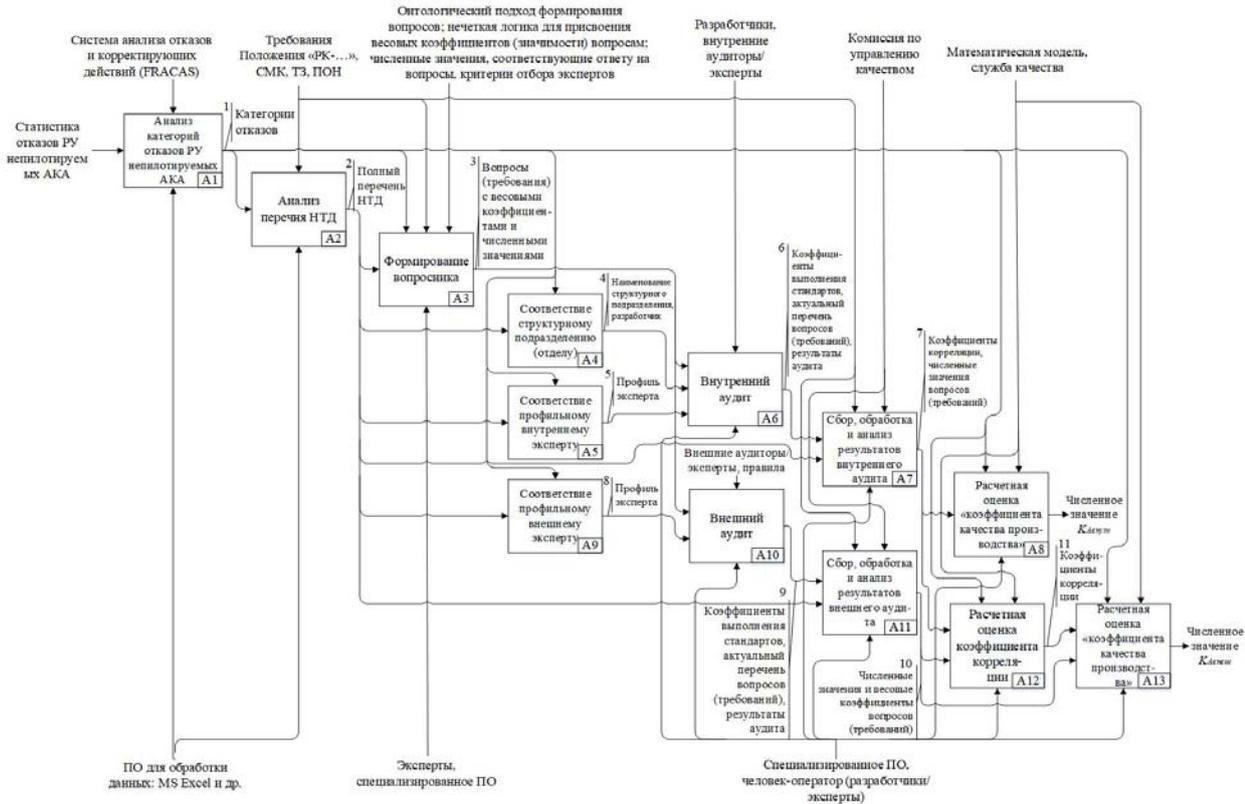


Рис. 3

Так как в РФ указанная выше модель СММІ с целью формирования требований не применяется, то для определения весового коэффициента  $G$  можно применить следующие критерии качества: ранжирование (важность), сложность, правильность, однозначность, непротиворечивость, проверяемость и понимаемость. Вопросник для конкретной НТД  $l$  включает список вопросов (требований) с порядковым номером  $i$  и категорией отказа  $j$ , к которой относится НТД.

Весовой коэффициент  $G_{ijl}$  предлагается оценивать с помощью математического аппарата нечеткой логики по причине нечетких и приближенных рассуждений при формировании требований человеком (нечеткая экспертная система). Функция принадлежности  $MF(x)$  для каждого критерия качества имеет трапецидальный вид, потому что при таком представлении не требуется большого объема данных и достаточно просто модифицировать параметры (модальные значения) на базе измеряемых значений входных и выходных величин критериев. Каждый критерий качества — лингвистическая переменная, которая сформирована базовыми терм-множествами  $T$ , состоящими из трех нечетких переменных: „низкий“, „средний“, „высокий“. Область рассуждений задается в виде  $x = [a; d]$  при  $a = 0, d = 10$ :

$$MF(x) = \begin{cases} 1 - \frac{b-x}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 1, & b \leq x \leq c, \\ 1 - \frac{x-c}{d-c}, & c \leq x \leq d, \\ 0, & x \notin [a; d]. \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 4 продемонстрировано описание лингвистической переменной „Ранжирование“.

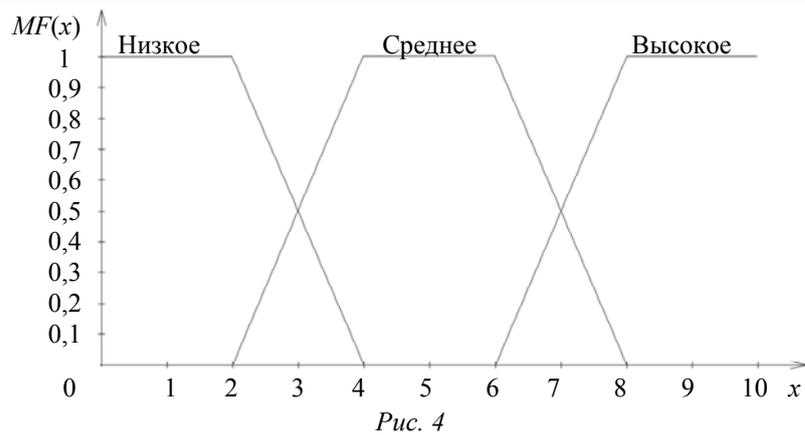


Рис. 4

Нечеткий логический вывод осуществляется благодаря классической системе Мамдани, наиболее приближенной к логическому мышлению человека. Стоит отметить, что после настройки системы экспертами требуется корректировка правил нечеткого логического вывода на основе статистических данных, получаемых в процессе функционирования [21]. В самом начале необходим хотя бы один эксперт (профильный для каждой НТД), чтобы присвоить весовые коэффициенты  $G_{ijl}$ , используя предложенные функции принадлежности (трапецеидальный вид) для каждого критерия качества, соответствующего требованиям (вопросам). Для этого рекомендуется специализированное программное обеспечение (ПО). Пользовательский интерфейс такого ПО продемонстрирован на рис. 5: эксперт может выбрать НТД, направленность, далее — вопрос (требование) и выставить численные значения критериям качества из области рассуждений  $x = [0; 10]$ . В результате при нажатии на кнопку „оценить“ реализуется алгоритм Мамдани для расчета весового коэффициента  $G_{ijl}$ .

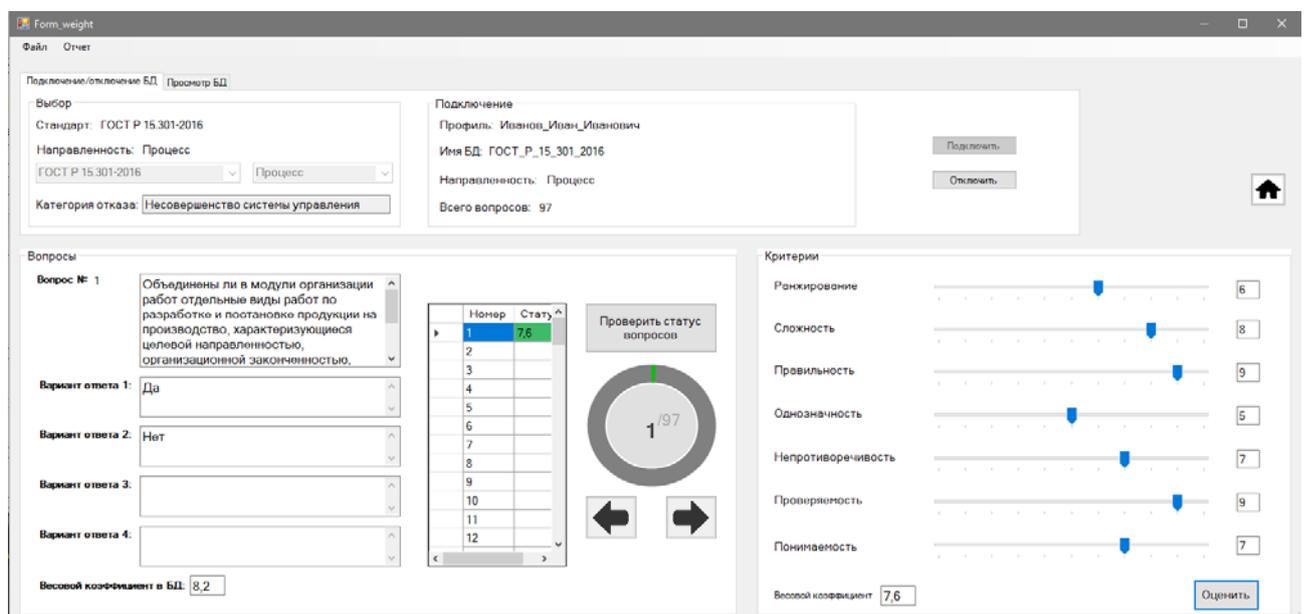


Рис. 5

Функции принадлежности для весового коэффициента также имеют трапецеидальный вид (3), однако область рассуждений и базовые терм-множества  $T$  имеют другие граничные условия, чтобы максимальное значение  $G_{ijl}$  не превышало 10.

Дальнейшая корректировка функций принадлежности  $MF(x)$  для каждой лингвистической переменной с базовыми терм-множествами  $T$  будет происходить по результатам сбора данных от нескольких экспертов и вычисляться согласно методам обработки экспертных оценок [22]. Для большей достоверности рассчитываемых показателей, в частности весовых коэффициентов  $G_{ijl}$ , отбор экспертов должен проводиться на основе следующих критериев:

публикационная и патентная активность; практический опыт в прикладной области на технической, управленческой или производственной должностях; опыт принятия решений, а также присутствие в ключевых советах и объединениях организации.

Присвоение численных значений  $\gamma_{ijl}$  требованиям (вопросам) зависит от меры пропорциональности вариантам ответов. Например, если на вопрос типа „Выполнено ли ...?“ имеется всего два варианта ответа, при положительном ответе присваивается  $\gamma = 1$ , а при отрицательном — 0. Однако следует учитывать, что смысл вопроса может быть обратным, тогда  $\gamma$  присваивается инверсное значение. Если на вопрос типа „Сколько из перечисленных пунктов выполнено ...?“ имеется три или четыре варианта ответа,  $\gamma$  присваивается значение от „0“ до „1“ (нижняя и верхняя границы выполненных пунктов), пропорциональное количеству выполненных пунктов. Для реализации блока А3 (рис. 3) необходимы эксперты и специализированное ПО.

Блок А4 (см. рис. 3) нужен для определения профиля разработчика (инженер-схемотехник, инженер-конструктор и т.д.) или структурного подразделения, к которому он относится, чтобы определить соответствующий перечень НТД при подготовке к внутреннему аудиту (блок А6 на рис. 3). Схожая процедура необходима и для выбора профильного внутреннего эксперта (блок А5 на рис. 3) — для этого требуется проведение совета директоров или служба качества самостоятельно может принять решение о назначении такого рода эксперта.

Следующая стадия — проведение внутреннего аудита (блок А6 на рис. 3). Рассмотрим А6 и А7 на примере одного профиля. Внутренний аудит состоит из двух этапов: проверка экспертом, который помимо ответов на вопросы отметит те требования, которые посчитает необходимыми для соблюдения и последующего контроля — отсюда и возникает необходимость введения коэффициента, отвечающего за уровень выполнения конкретной НТД  $L_{НТД} = 0—1$ . Обычно на практике  $L_{НТД} = 0,6—0,8$ , поскольку не все требования, содержащиеся в НТД, необходимо выполнить при реализации РУ непилотируемых АКА согласно ТЗ (уникальность разработок). После внутреннего аудита эксперта к анкетированию с актуальным списком вопросов приступает разработчик (второй этап).

На основе полученных результатов от обоих лиц (блок А7 на рис. 3) вычисляется коэффициент корреляции Пирсона  $r_{внут}$  ответов (выборка) для каждой НТД  $l$ , которая подвергалась аудиту:

$$r_{внут} = \frac{\sum_{i=1}^{Q_{\max}} (\gamma_{внут.эк_i} - \bar{\gamma}_{внут.эк}) (\gamma_{разр_i} - \bar{\gamma}_{разр})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{Q_{\max}} (\gamma_{внут.эк_i} - \bar{\gamma}_{внут.эк})^2 \sum_{i=1}^{Q_{\max}} (\gamma_{разр_i} - \bar{\gamma}_{разр})^2}}, \quad (4)$$

где  $\gamma_{внут.эк_i}$  — численные значения ответов на вопросы внутреннего профильного эксперта;  $\bar{\gamma}_{внут.эк}$  — среднее значение ответов на вопросы внутреннего профильного эксперта;  $\gamma_{разр_i}$  — численные значения ответов на вопросы разработчика;  $\bar{\gamma}_{разр}$  — среднее значение ответов на вопросы разработчика;  $Q_{\max}$  — максимальное число вопросов  $i$  для НТД  $l$  (рис. 2).

Далее определяется критический коэффициент корреляции  $r_{внут.кр}$  ответов разработчиков и внутренних экспертов. Если  $-r_{внут.кр} > r_{внут} > r_{внут.кр}$ , тогда  $r_{внут}$  является значимым — связь выявлена (расхождение мнений незначительно) и результаты ответов используются для оценки внутреннего „коэффициента качества производства“  $K_{Авнут}$  службой качества (блок А8 на рис. 3) согласно математической модели:

$$K_{\text{Авнут}} = \frac{K_A^*}{\sum_j \frac{\xi_j}{100} \cdot K_j}, \quad (5)$$

где  $\xi_j$  — доля отказов для  $j$ -й категории;  $K_A^*$  — коэффициент качества производства, согласно справочнику [12];  $K_j$  — коэффициент, характеризующий категорию отказа и оценивающийся согласно выражениям, приведенным в работе [11]. Пример работы ПО, использующего выражение (5), приведен на рис. 6.

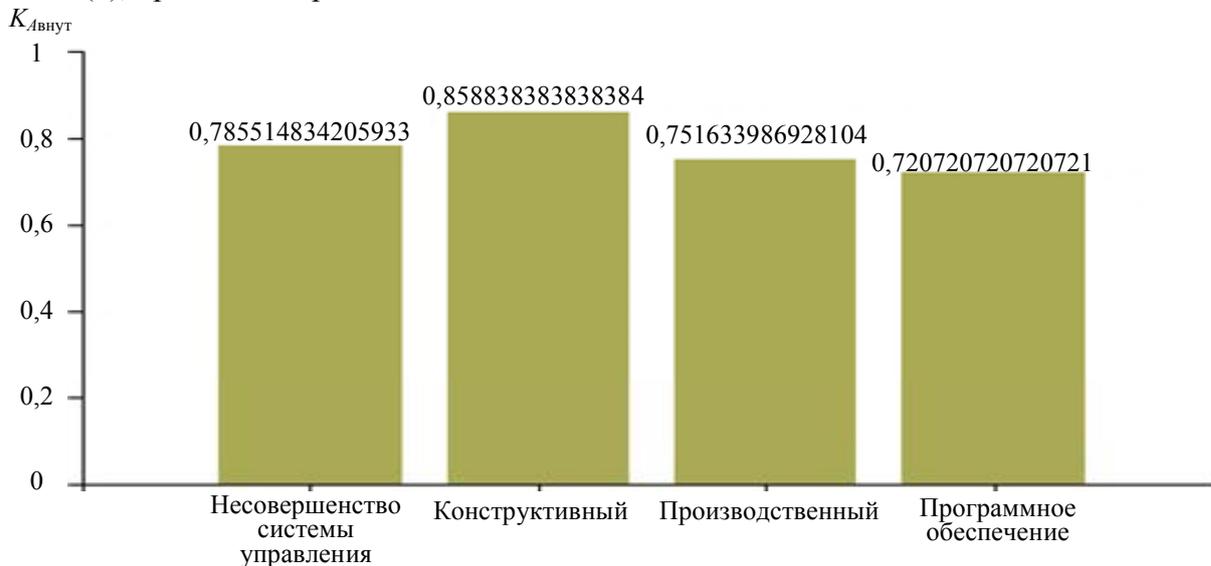


Рис. 6.

Из рис. 6 видно, что присутствуют недостатки в выполнении мероприятий для каждой из приведенных категорий отказов, поскольку в идеальном случае присваивается „1“.

Если условие  $-r_{\text{внут.кр}} > r_{\text{внут}} > r_{\text{внут.кр}}$  не выполняется, проводится повторный внутренний аудит по той НТД, в которой выявлен данный факт.

Очередная стадия — внешний аудит (блок А10 на рис. 3). Этот этап обязателен для большей достоверности оценки „коэффициента качества производства“, поскольку аудит проводится независимой организацией. Поэтому предварительно необходимо подготовить список профилей внешних экспертов (блок А9 на рис. 3). Блоки А11—А13 идентичны А7—А8 на рис. 3. Стоит заметить, что вводятся подобные основные коэффициенты для расчетной оценки по математическим моделям (4), (5):  $r_{\text{внеш}}$  — выборочный коэффициент корреляции для внешних экспертов;  $r_{\text{внеш.кр}}$  — критический коэффициент корреляции ответов внутренних и внешних экспертов;  $K_{\text{Авнеш}}$  — „коэффициент качества производства“, полученный по результатам внешнего аудита.

Для реализации блоков А6—А8, А10—А13 (рис. 3) необходимы оператор (эксперты и разработчики, представители службы качества организации), а также специализированное ПО.

Разработанная методика уточненной оценки „коэффициента качества производства“ ( $K_{\text{Авнут}}$  и  $K_{\text{Авнеш}}$ ) позволяет решить первые две поставленные задачи: учет уровня требований к разработке и изготовлению; контроль мероприятий согласно требованиям НТД на всех стадиях жизненного цикла (регламентируется Положением на разработку и техническим заданием).

**Комплексный метод оценки показателей безотказности.** Качество РУ космической аппаратуры непосредственно зависит от эффективности функционирования СМК организации-исполнителя. Следовательно, для оценки эффективности системы управления организацией  $R_{\text{СМК}} \in [0; 1]$  необходимо разработать определенные критерии. В статье [23] приведены данные критерии, соответствующие ГОСТ Р ИСО 9001-2015 с возможностью численной оценки как критериев, так и  $R_{\text{СМК}}$ .

Очень важным фактором является выполнение требований технического задания. Именно в нем указываются все необходимые параметры, характеристики, условия эксплуатации и другая информация о разрабатываемом объекте. Поэтому обязательно следует определять соответствие отчетности по результатам разработки РУ требованиям ТЗ. Для этого введем коэффициент  $K_{ТЗ} \in [0; 1]$ , который отражает степень соответствия полученных результатов согласованным требованиям со стороны заказчика и со стороны представителя службы качества организации-исполнителя.

Обязательной процедурой перед комплектованием радиотехнических устройств ЭРИ является проведение дополнительных испытаний, а именно входной контроль, диагностический неразрушающий контроль, отбраковочные испытания, разрушающий физический анализ ЭРИ и др. Действительно, существенная часть отказов связана непосредственно с отказами ЭРИ. Основная задача дополнительных испытаний — индивидуальная отбраковка тех ЭРИ, которые имеют скрытые дефекты изготовления. Стоит отметить, что ЭРИ категорий качества „ОС“ и „ВП“ перед установкой в РУ непилотируемых АКА подвергаются дополнительным испытаниям в объеме, который согласовывается с ФГУ 22 „ЦНИИ МО РФ“. Следовательно, необходимо численно оценить качество проведения дополнительных испытаний ЭРИ. Для этого введем коэффициент  $K_{Ди} \in [0; 1]$ , отражающий эффективность дополнительных испытаний всех классов ЭРИ (каким образом из партии отбраковываются ЭРИ). Величина зависит  $K_{Ди}$  от оборудования, видов испытаний и методов их проведения, а также от факта дополнительных проверок. Если в результате аудиторской проверки выявлено, что все соответствует установленному порядку, тогда  $K_{Ди} = 1$ . В ином случае величина  $K_{Ди}$  будет зависеть от результата аудиторской проверки дополнительных испытаний.

Отсюда следует, что комплексный метод оценки показателей безотказности должен учитывать все описанные факторы для достижения поставленной цели. Поэтому математическая модель (2), используемая для оценки эксплуатационной интенсивности отказов, приобретает вид:

$$\lambda_{ру} = \left( \frac{K_{Авнут} + K_{Авнеш}}{2} \right) \frac{1}{R_{СМК}} \frac{1}{K_{ТЗ}} \frac{1}{K_{Ди}} \sum_{n=1}^N \lambda_n. \quad (6)$$

Достоверность разработанного метода подтверждена несколькими организациями-исполнителями, занимающимися разработкой РУ непилотируемых АКА. Полученные численные значения эксплуатационной интенсивности отказов РУ  $\lambda_{ру}$  отражены в таблице.

| Организация-исполнитель | Наименование РУ                   | Расчетное значение $\lambda_{ру}$ , 1/ч, по модели |                      | Экспериментальное значение $\lambda_{ру}$ , 1/ч |
|-------------------------|-----------------------------------|--|----------------------|---|
|                         |                                   | (2)  | (6)                  |   |
| N1                      | Частотно-селективный ограничитель | $3,52 \cdot 10^{-7}$                               | $9,03 \cdot 10^{-6}$ | $7,18 \cdot 10^{-6}$                            |
| N2                      | Блок питания                      | $4,11 \cdot 10^{-8}$                               | $8,14 \cdot 10^{-7}$ | $2,78 \cdot 10^{-7}$                            |
| N3                      | Усилитель мощности                | $1,40 \cdot 10^{-7}$                               | $1,01 \cdot 10^{-6}$ | $1,24 \cdot 10^{-6}$                            |

Сравнив расчетные значения  $\lambda_{ру}$  с экспериментальными (см. таблицу), можно сделать следующий вывод: математическая модель (6) больше приближена к реальности и отражает действительную ситуацию с эксплуатационной интенсивностью отказов радиотехнических устройств космической аппаратуры. Так, для организации N3 при проектировании усилителя мощности коэффициенты модели (6) равны:  $K_{Авнут} = K_{Авнеш} = 0,5$ ;  $K_{ТЗ} = 1$ ;  $R_{СМК} = 0,7$ ;  $K_{Ди} = 0,5$ . Информативным показателем также является вероятность безотказной работы  $P_{ру}$ , которая устанавливается на конец САС. Для данной ситуации  $P_{ру} = 0,98$  на конец САС 15 лет по модели (2), а по (6)  $P_{ру} = 0,87$ . Накопленная статистика отказов для усилителей мощности

свидетельствует, что  $P_{PY} = 0,82$ . Поэтому уже к концу САС 5 лет „нормативному бюджету надежности“  $P_{PY} \approx 0,95$  данный тип РУ не соответствует.

Таким образом, математическая модель (6) на этапах проектирования позволяет уточнить показатели безотказности РУ космической аппаратуры (интенсивность отказов, нагрузка на отказ, вероятность безотказной работы), разрабатывающихся для различных условий применения.

**Заключение.** В статье исследован повышенный коэффициент риска проектов, связанных с предоставлением услуг космической связи. Данная проблема обусловлена необходимостью достижения целевого уровня показателей надежности радиотехнических устройств космической аппаратуры при их проектировании и производстве.

Автоматизация методики уточнения численного значения „коэффициента качества производства“ позволит повысить эффективность как внутреннего, так и внешнего аудита для вычисления реального значения  $K_d$  благодаря своевременному выявлению преимуществ и недостатков мероприятий нормативно-технической документации, утвержденных ПОН.

Комплексный метод оценки единичных показателей безотказности РУ космической аппаратуры позволяет благодаря многофакторности повысить точность расчетов на этапе проектирования.

Полученные в трех организациях-исполнителях значения эксплуатационной интенсивности отказов для разных типов РУ свидетельствуют о повышении, благодаря предложенному методу, достоверности численной оценки целевого уровня показателей надежности, в частности, единичных показателей безотказности.

Своевременное выявление недостатков и последующее их устранение приведут к снижению рисков проектов, связанных с предоставлением услуг космической связи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральная космическая программа России на 2016—2025 годы [Электронный ресурс]: <<https://www.roscosmos.ru/22347/>> (11.11.2020).
2. Основные положения государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу [Электронный ресурс]: <<https://legalacts.ru/doc/osnovnye-polozhenija-osnov-gosudarstvennoi-politiki-rossiiskoi-federatsii/>> (05.11.2020).
3. *Севастьянов Н. Н., Андреев А. И.* Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации: учебное пособие. М.—Томск: ТГУ, 2015. 266 с.
4. *Патраев В. Е., Максимов Ю. В.* Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 5—12.
5. *Макарова Д. Ю.* Развитие частного бизнеса в ракетно-космической отрасли: тенденции и перспективы // Экономический анализ: теория и практика. 2015. № 25(424). С. 57—71.
6. *Лопота В. А., Ермаков П. Н., Фролов И. В.* Перспективы развития автоматических космических систем и космических аппаратов // Вестн. Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. „Машиностроение“. 2011. № 1. С. 5—16.
7. *Рудаков В. Б., Бурцев А. С., Филоненко П. А., Мироничев В. А.* Математические модели надежности космических аппаратов радиоэлектронной аппаратуры негерметичного исполнения // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 7. С. 566—575. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-566-575.
8. *Ширяев Н. А., Водолажская Ю. В.* Космический комплекс „Канопус-В“ // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2016. № 1-2(5). С. 109—111.
9. *Горбунов А. В., Ильина И. Ю., Саульский В. К.* Состояние и перспективы развития космических комплексов „Канопус-В“ и „Метеор-М“ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. № 4. С. 14—19. DOI: 10.17238/issn2409-0239.2015.4.14.
10. Отказы ракетно-космической техники [Электронный ресурс]: <[https://www.ecospace.me/orbital\\_failures.html](https://www.ecospace.me/orbital_failures.html)> (10.12.2020).

11. Королев П. С., Жаднов В. В. Оценка „коэффициента качества производства“ для модели интенсивности отказов радиотехнических приборов непилотируемых автоматических космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 3. С. 264—277. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-264-277.
12. Надежность ЭРИ 2006: Справочник. М.: МО РФ, 2006. 641 с.
13. Надежность ЭРИ ИП 2006: Справочник. М.: МО РФ, 2006. 52 с.
14. Усик Н. И., Белоруков А. Э., Василенок А. В. Важность системы менеджмента качества на предприятиях // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. „Экономика и экологический менеджмент“. 2016. № 4. С. 70—77.
15. Маколов В. И. Проблемы менеджмента качества российских организаций в современных условиях // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2015. № 26(311). С. 16—25.
16. Миньковская М. В., Радионова А. С. Роль руководителя в системе менеджмента качества // Экономика промышленности. 2012. № 1—2(57—58). С. 388—396.
17. Тверская И. В., Саргсян Л. А. Качество управления предприятием — важное стратегическое направление инновационной экономики // Век качества. 2016. № 1. С. 20—28.
18. Ивашина М. М., Нацыпаева Е. А., Попова Л. Ф. Риск-ориентированный подход как направление совершенствования системы менеджмента качества промышленных предприятий // Экономический журнал. 2018. № 2(50). С. 26—39.
19. Севастьянов Н. Н., Верхотуров В. И. Управление техническими рисками в проектах создания КА спутниковых систем связи // Вестн. МАИ. 2005. Т. 12, № 2. С. 91—100.
20. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. Космическая электроника. Кн. 1. М.: Техносфера, 2015. 696 с.
21. Голосовский М. С., Богомолов А. В., Теремов Д. С. Алгоритм настройки системы нечеткого логического вывода типа Мамдани // Вестн. Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Математика. Механика. Физика. 2018. Т. 10, № 3. С. 19—29. DOI: 10.14529/mmph180303.
22. Павлов А. Н., Соколов Б. В. Методы обработки экспертной информации: Учеб.-метод. пособие. СПб: ГУАП, 2005. 42 с.
23. Korolev P. S., Sedov K. D., Sosnin A. I. Dependability and Quality Satellite Telecommunication Equipment Improving at the Production Stage // Systems of signals generating and processing in the field of on board communications. IEEE, 2020. P. 1—5. DOI: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078617.

#### Сведения об авторе

**Павел Сергеевич Королев**

— Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, департамент электронной инженерии; преподаватель; Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова; аспирант; E-mail: pskorolev@hse.ru

Поступила в редакцию  
08.02.2021 г.

**Ссылка для цитирования:** Королев П. С. Комплексный метод оценки показателей безотказности радиотехнических устройств космической аппаратуры // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 4. С. 316—327.

#### A COMPREHENSIVE METHOD FOR ASSESSING THE RELIABILITY OF RADIO-TECHNICAL DEVICES OF SPACECRAFT EQUIPMENT

**P. S. Korolev**

HSE University, 109028, Moscow, Russia  
E-mail: pskorolev@hse.ru

A method is presented for evaluating reliability indicators of electronic devices of spacecraft equipment at the design stage. The method accounts for the following factors: the effectiveness of the quality management system of the implementing organization; compliance of the design results with the requirements of the terms of reference; the quality of additional tests of electrical and radio products; the quality of implementation of the necessary measures contained in the regulatory and technical documentation. The method of refining the numerical value of the "production quality factor", which is included in the mathematical model of the failure rate, is improved. The advantage of the method is the continuous moni-

toring of the necessary measures contained in the regulatory and technical documentation, when designing radio engineering devices. The effectiveness of the new method in assessing the target level of reliability indicators of radio engineering devices of space equipment is shown.

**Keywords:** dependability, reliability, production quality factor, electronic device, spacecraft equipment, unmanned automatic spacecraft

#### REFERENCES

1. <https://www.roscosmos.ru/22347/>, 11.11.2020. (in Russ.)
2. <https://legalacts.ru/doc/osnovnye-polozheniya-osnov-gosudarstvennoi-politiki-rossiiskoi-federatsii/>, 05.11.2020. (in Russ.)
3. Sevast'yanov N.N., Andreyev A.I. *Osnovy upravleniya nadezhnost'yu kosmicheskikh apparatov s dlitel'nymi srokami ekspluatatsii* (Fundamentals of Reliability Management for Long-Life Spacecraft), Tomsk, 2015, 266 p. (in Russ.)
4. Patraev V.E., Maksimov Yu.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 8(51), pp. 5–12. (in Russ.)
5. Makarova D.Yu. *Ekonomicheskij analiz: teoriya i praktika*, 2015, no. 25(424), pp. 57–71. (in Russ.)
6. Lopota V.A., Ermakov P.N., Frolov I.V. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering, 2011, no. 1, pp. 5–16. (in Russ.)
7. Rudakov V.B., Burtsev A.S., Filonenko P.A., Mironichev V.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 7(61), pp. 566–575. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-566-575. (in Russ.)
8. Shirayev N.A., Vodolazhskaya Yu.V. *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy*, 2016, no. 1-2(5), pp. 109–111. (in Russ.)
9. Gorbunov A.V., Ilyina I.Yu., Saulsky V.K. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2015, no. 4, pp. 14–19. DOI: 10.17238/issn2409-0239.2015.4.14. (in Russ.)
10. [https://www.ecoruspace.me/orbital\\_failures.html](https://www.ecoruspace.me/orbital_failures.html), 10.12.2020. (in Russ.)
11. Korolev P.S., Zhadnov V.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 3(63), pp. 264–277. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-264-277. (in Russ.)
12. *Nadezhnost' ERI 2006: spravochnik* (Reliability ERI 2006: A Guide), Moscow, 2006, 641 p. (in Russ.)
13. *Nadezhnost' ERI IP 2006: spravochnik* (Reliability ERI IP2006: A Guide), Moscow, 2006, 52 p. (in Russ.)
14. Usik N.I., Belorukov A.E., Vasilenok A.V. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya "Ekonomika i ekologicheskij menedzhment"*, 2016, no. 4, pp. 70–77. (in Russ.)
15. Makolov V.I. *Natsional'nyye interesy: priority i bezopasnost'*, 2015, no. 26(311), pp. 16–25. (in Russ.)
16. Min'kovskaya M.V., Radionova A.S. *Ekonomika promyshlennosti*, 2012, no. 1–2(57–58), pp. 388–396. (in Russ.)
17. Tverskaya I.V., Sargsyan L.A. *Vek kachestva*, 2016, no. 1, pp. 20–28. (in Russ.)
18. Ivashina M.M., Natsypayeva E.A., Popova L.F. *Ekonomicheskij zhurnal*, 2018, no. 2(50), pp. 26–39. (in Russ.)
19. Sevast'yanov N.N., Verkhoturov V.I. *Vestnik MAI*, 2005, no. 2(12), pp. 91–100. (in Russ.)
20. Belous A.I., Solodukha V.A., Shvedov S.V. *Kosmicheskaya elektronika* (Space Electronics), Book 1, Moscow, 2015, 696 p. (in Russ.)
21. Golosovskiy M.S., Bogomolov A.V., Terebov D.S. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*, 2018, no. 3(10), pp. 19–29. DOI: 10.14529/mmph180303. (in Russ.)
22. Pavlov A. N., Sokolov B. V. *Metody obrabotki ekspertnoy informatsii* (Methods for Processing Expert Information), St. Petersburg, 2005, 42 p. (in Russ.)
23. Korolev P.S., Sedov K.D., Sosnin A.I. *Systems of signals generating and processing in the field of on board communications*, IEEE, 2020, pp. 1–5, DOI: 10.1109/ IEECONF48371.2020.9078617.

#### Data on author

**Pavel S. Korolev** — HSE University, School of Electronic Engineering, Lecturer; Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Post-Graduate Student; E-mail: pskorolev@hse.ru

**For citation:** Korolev P. S. A comprehensive method for assessing the reliability of radio-technical devices of spacecraft equipment. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 4. P. 316–327 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-4-316-327