

ISSN 2500—0381

Электронная версия

ISSN 0021—3454

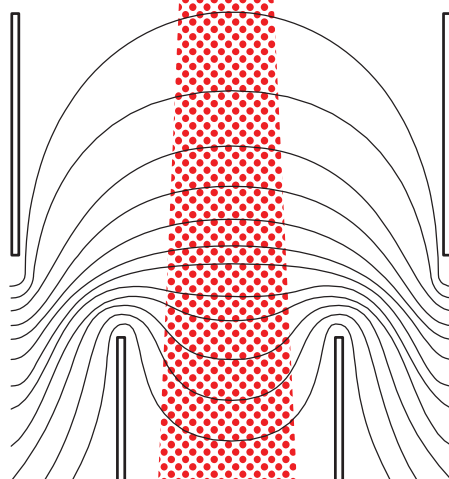
Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
**П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е**  
НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ **3**

Т. 63  
2020



Journal of Instrument **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., НТЦ Орион, 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, 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., СПИИРАН, 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*  
*Е. Б. ЯКОВЛЕВ (зам. главного редактора), проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 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 *И. М. Игошина*

Набор, верстка: *М. В. Герасимова*

Перевод: *Ю. И. Копилевич*

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, 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 03.06.2020 г.*

---

*Отпечатано в учреждении „Университетские телекоммуникации“*

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

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

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Арсеньев В. Н., Петухов А. Б., Ядренкин А. А. Методика уточнения априорных вероятностей состояний сложной системы по экспериментальным данным ..... 199
- Зиатдинов С. И., Осипов Л. А. Спектр гармонического колебания при частотной модуляции случайным сигналом..... 206

### ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Савельев Д. О., Черный С. П., Соловьев В. А. Повышение точности компенсации нелинейных элементов систем управления ..... 213

### ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Антонец И. В., Борисов Р. А. Датчик статического и полного давления на основе линейки фотоэлектронных приемников..... 222
- Шуть Г. А., Пузырев Е. И., Васильева А. В., Васильев А. С., Некрылов И. С., Ахмеров А. Х., Тимофеев А. Н. Комплексная система эндоскопирования для контроля эрозийного износа лопаток паровых турбин ..... 228
- Умаралиев Н., Матбабаев М. М., Эргашев К. М. Установка для изучения оптоэлектронного датчика влажности воздуха ..... 237

### ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

- Булавин В. Ф., Булавина Т. Г., Яхричев В. В., Степанов А. С. Цифровой формат подготовки приборостроительного производства. Ч. I. Конструкторский этап ..... 242
- Булавин В. Ф., Булавина Т. Г., Яхричев В. В., Степанов А. С. Цифровой формат подготовки приборостроительного производства. Ч. II. Технологический этап..... 250

### НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

- Заричняк Ю. П., Ходунков В. П. О реализуемости многозначных мер тепловых величин в метрологии ..... 257
- Королев П. С., Жаднов В. В. Оценка „коэффициента качества производства“ для модели интенсивности отказов радиотехнических приборов непилотируемых автоматических космических аппаратов..... 264
- Бжихатлов И. А., Громов В. С. Исследование колебаний платформы двуногого шагающего робота ..... 278

# JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 63

MARCH 2020

№ 3

## CONTENTS

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS, COMPUTER TECHNIQUE

- Arseniev V. N., Petuhov A. B., Yadrenkin A. A.** Method for Refining A Priori Probabilities of a Complex System States from Experimental Data ..... 199
- Ziatdinov S. I., Osipov L. A.** Harmonic Oscillation Spectrum Under Frequency Modulation by a Random Signal..... 206

### DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Savelyev D. O., Cherny S. P., Solovyov V. A.** Improving the Accuracy of Compensation for Nonlinear Elements of Control Systems ..... 213

### OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Antonets I. V., Borisov R. A.** Static and Total Pressure Sensor Based on the Line of Photoelectric Receivers..... 222
- Shut' G. A., Puzyrev A. V., Vasileva A. V., Vasilev A. S., Nekrylov I. S., Akhmerov A. K., Timofeev A. N.** Integrated Endoscopy System for Monitoring Erosion Wear of Steam Turbine Blades ..... 228
- Umaraliyev N., Matbabayev M. M., Ergashev K. M.** Installation for Studying an Optoelectronic Humidity Sensor..... 237

### INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

- Bulavin V. F., Bulavina T. G., Yakhrichev V. V., Stepanov A. S.** Digital Format for Preparation of Instrument Production. Part I. Design Stage ..... 242
- Bulavin V. F., Bulavina T. G., Yakhrichev V. V., Stepanov A. S.** Digital Format for Preparation of Instrument Production. Part II. Technological Stage ..... 250

### SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

- Zarichnyak Yu. P., Khodunkov V. P.** On the Feasibility of Multi-Valued Measures of Thermal Quantities in Metrology..... 257
- Korolev P. S., Zhadnov V. V.** Estimation of the „Production Quality Factor“ for the Model of Failure Rate of Radio Equipment of Unmanned Automatic Spacecraft ..... 265
- Bzhikhatlov I. A., Gromov V. S.** Research of Biped Robot Platform Oscillation ..... 278

## ОЦЕНКА „КОЭФФИЦИЕНТА КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДСТВА“ ДЛЯ МОДЕЛИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ НЕПИЛОТИРУЕМЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

П. С. КОРОЛЕВ, В. В. ЖАДНОВ

*Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, 101000, Москва, Россия  
E-mail: pskorolev@hse.ru*

Представлена методика оценивания „коэффициента качества производства“, разработанная для расчета интенсивности отказов радиотехнических приборов непилотируемых автоматических космических аппаратов. Отличительная особенность предлагаемой методики заключается в учете мероприятий, регламентированных не только нормативно-технической документацией на создание, производство и эксплуатацию радиотехнических приборов, но и системой менеджмента качества. Методика реализуется путем применения структурированного подхода к формированию вопросника для последующей экспертной оценки внешнего и внутреннего аудита. Приведены формулы, позволяющие получить численное значение „коэффициента качества производства“, что поможет повысить точность расчетов характеристик безотказности радиотехнических приборов непилотируемых автоматических КА на этапе проектирования.

**Ключевые слова:** надежность, безотказность, коэффициент качества производства, радиотехнический прибор, автоматический космический аппарат, искусственный спутник Земли

**Введение.** Повышение конкурентоспособности и рентабельности в сфере предоставления услуг космической связи в современных условиях достижимо благодаря разработке непилотируемых автоматических космических аппаратов (АКА) со сроком активного существования 15 лет и более. К таким АКА предъявляются высокие требования по обеспечению показателей надежности на стадии проектирования, приведенные, например, в перечне нормативно-технической документации (НТД) и гос. стандартах<sup>1</sup>.

Актуальные статистические данные [1] свидетельствуют о фактах произошедших отказов АКА. Так, для искусственных спутников Земли (ИСЗ) указываются отказавшие радиотехнические приборы (РП), но причины отказов не приводятся. Отсюда следует, что по открытым данным<sup>2</sup> практически невозможно определить категорию отказа [2]. Анализ статистических данных [1] для России позволяет сделать вывод, что отказ приходится на каждый пятый ИСЗ в течение срока активного существования — это означает, что целевой уровень надежности не достигается.

Отказы непилотируемых АКА в ходе эксплуатации в большинстве случаев возникают из-за отказов в электронике [1]. Основная причина возникновения отказов РП (более 50 %) — низкое качество электрорадиоизделий (ЭРИ) [3, 4]. Несмотря на многочисленные научные публикации (см., например, [3—8]), направленные на решение задач обеспечения надежности РП непилотируемых АКА, сложившаяся ситуация свидетельствует о недостатках работ на ранних этапах проектирования.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 56526-2015, ГОСТ РО 1410-001–2009, ГОСТ Р 56516-2015 (Положение „РК — ...“).

<sup>2</sup> ГОСТ 27.002-2015.

Важную роль при проектировании приобретает система менеджмента качества (СМК), т.е. система управления процессами предприятия, и входящая в СМК система менеджмента надежности (СМН)<sup>1</sup>. Для учета влияния указанных систем на качество выполнения требований к разработке и изготовлению РП в модель интенсивности отказов введен „коэффициент качества производства“ ( $K_A$ ) [2], что особенно актуально для частных негосударственных компаний-производителей малых спутников со сроком активного существования от 2 до 10 лет [9]. Подобного рода компании, как правило, разрабатывают РП непилотируемых АКА, не используя НТД, соответственно в этом случае неизвестно, какие именно значения примет коэффициент  $K_A$ , т.е. какой уровень надежности РП может быть достигнут. В этой связи в настоящей статье, целью которой является повышение достоверности оценки надежности радиотехнических приборов непилотируемых АКА на этапах проектирования, представлена разработанная методика оценивания „коэффициента качества производства“, позволяющая учитывать требования нормативно-технической документации и системы менеджмента качества.

**Обзор существующих решений.** Оценка единичных показателей надежности РП непилотируемых АКА проводится при их проектировании для подтверждения принципиальной возможности обеспечения целевого уровня этих показателей и является одним из обязательных мероприятий, предусмотренных гос. стандартом<sup>2</sup>. Для оценки характеристик безотказности РП непилотируемых АКА при проектировании применяются расчетные методы, основанные на трех основных подходах.

Первый подход, связанный с оценкой безотказности РП (электронных модулей 1-го уровня), ориентирован на методику<sup>3</sup>, которая базируется на методе „ $\lambda$ -характеристик“. Методика сводится к последовательному выполнению нескольких этапов, что показано на рис. 1 в виде IDEF0-диаграммы (блоки А1—А3, А5).

Исходными данными для численной оценки интенсивности отказов является техническое задание (ТЗ) на объект исследования, где приведены требования к условиям применения и другим показателям, а также требования к целевому уровню единичных показателей надежности (в данном случае — безотказности). Выполнение первого этапа (блок А1, рис. 1) необходимо, чтобы оценить принципиальную возможность обеспечения заданных требований по надежности. Непосредственное влияние на результат выполнения этого этапа оказывает СМК организации-исполнителя. В случае положительного решения по результатам отчета о выполнении этапа исполнителем разрабатывается программа обеспечения надежности (ПОН)<sup>4</sup>. Основанием для разработки ПОН (см. рис. 1, блок А2) является ТЗ, поэтому в программе устанавливается ряд мероприятий, которые направлены на обеспечение надежности РП с указанием этапов и видов работ для соответствующей стадии жизненного цикла. После этого выбирается метод оценивания характеристик безотказности (блок А3 на рис. 1) в соответствии с методикой<sup>3</sup>. На заключительном этапе (блок А5 на рис. 1) оценивается интенсивность отказов РП ( $\lambda_{РП}$ ) согласно выражению

$$\lambda_{РП} = \sum_{n=1}^N \lambda_n, \quad (1)$$

где  $\lambda_n$  — интенсивность отказов ЭРИ,  $N$  — количество ЭРИ в РП.

<sup>1</sup> ГОСТ ISO 9001-2011, ГОСТ Р ИСО 9001-2015, ГОСТ Р 56518-2015.

<sup>2</sup> ГОСТ РВ 20.39.302-98.

<sup>3</sup> ОСТ 4Г 0.012.242.

<sup>4</sup> ГОСТ РВ 27.1.02-2005, Р 50-109-89.

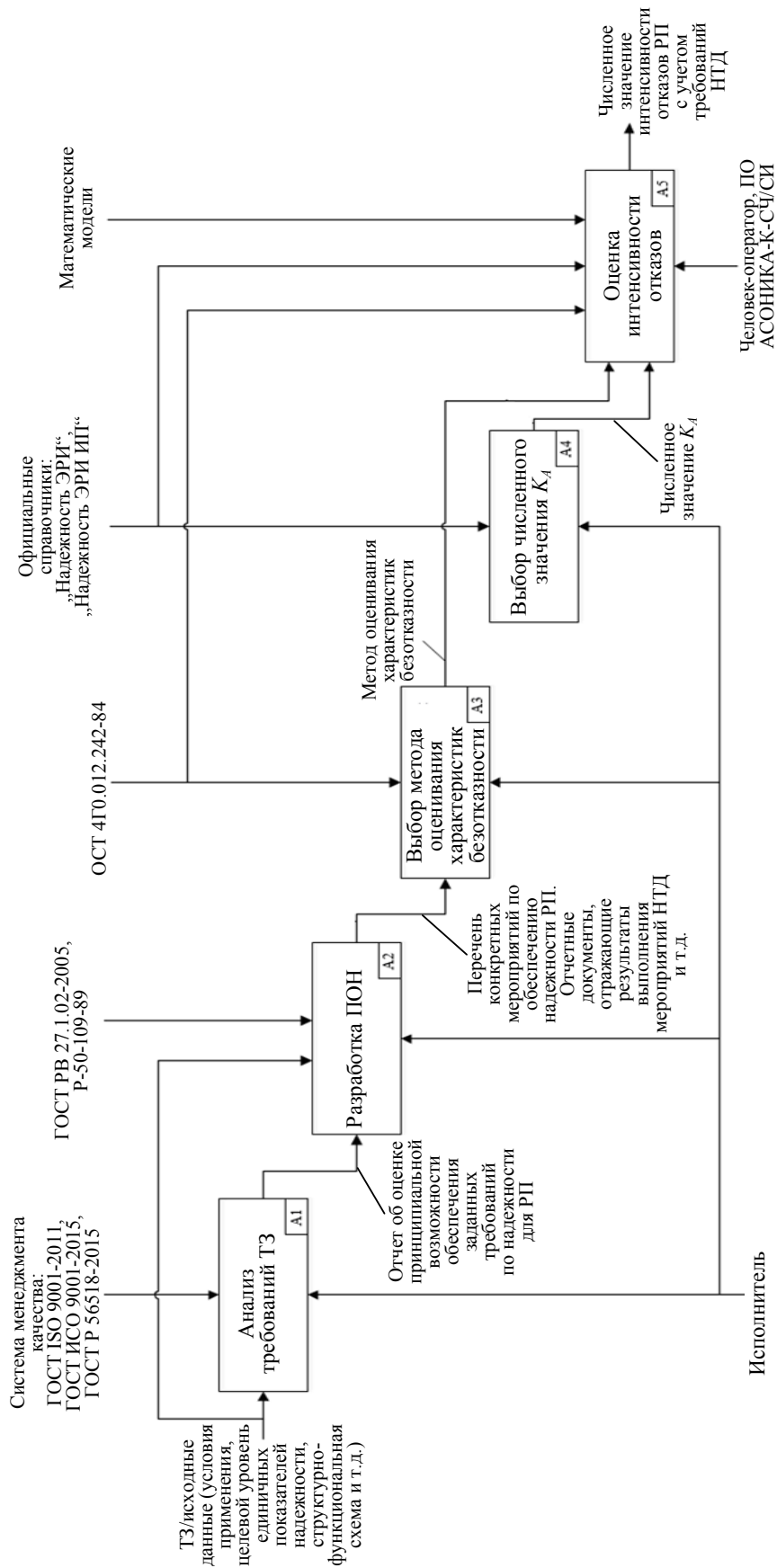


Рис. 1

Недостаток рассмотренного подхода заключается в том, что направленные на повышение качества мероприятия, регламентированные гос. стандартами (см. сноску<sup>1</sup> на стр. 265) и указанные также в работах [5, 10], не позволяют учесть их влияние на оценку  $\lambda_{РП}$ .

Однако в обеспечение указанной выше методики для численной оценки интенсивностей отказов ( $\lambda$ -характеристик) ЭРИ должны использоваться официальные справочники [9, 11], что обеспечивает выполнение требований гос. стандарта\*.

Второй подход основан именно на использовании официальных справочников [9, 11]. Методика, описывающая применение данного подхода показана также на рис. 1 (блоки А1—А5). Данная методика отличается от рассмотренной выше тем, что в нее включен блок А4 „Выбор численного значения  $K_A$ “. Согласно [9, 11] „коэффициент качества производства“ может принимать всего два значения:

- для комплекса государственных военных стандартов (КГВС) „Мороз-6“ значение  $K_A = 1$ ;
- для положения „РК — ...“ —  $K_A = 0,2$ .

Эти значения  $K_A$  используются для оценки  $\lambda_{РП}$  (блок А5 на рис. 1):

$$\lambda_{РП} = K_A \sum_{n=1}^N \lambda_n . \tag{2}$$

Недостаток второго подхода заключается в том, что приведенные в справочниках [9, 11] значения  $K_A$  являются интегральной оценкой, и, кроме того, как и при первом подходе, не учитываются постоянные изменения мероприятий, направленных на повышение качества.

Статистика отказов, приведенная в работах [1, 3, 4], свидетельствует о том, что и второй подход не позволяет достичь целевого уровня надежности разрабатываемых РП непилотируемых АКА. Анализ данных, приведенных на рис. 2, показывает, что для США отказ приходится на каждые 22 ИСЗ, для Китая — на каждые 60 ИСЗ, а для России — на каждые 5 ИСЗ, откуда следует, что Россия по этому показателю уступает как Китаю, так и США.

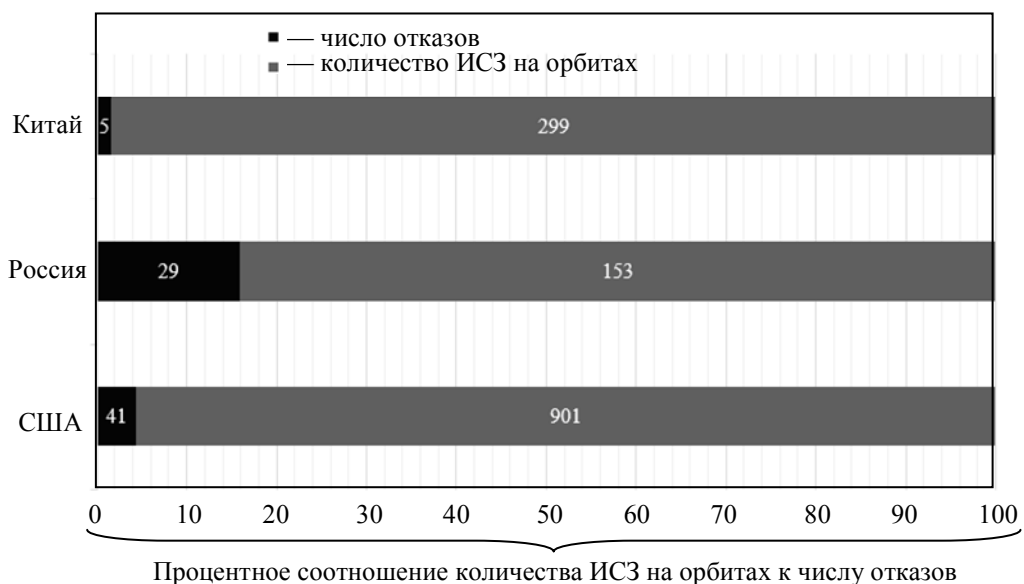


Рис. 2

Третий подход рассмотрен в работах [2, 12]. Методику, описывающую данный подход, можно также представить в виде IDEF0-диаграммы (рис. 3).

\* ГОСТ 27.301-95.



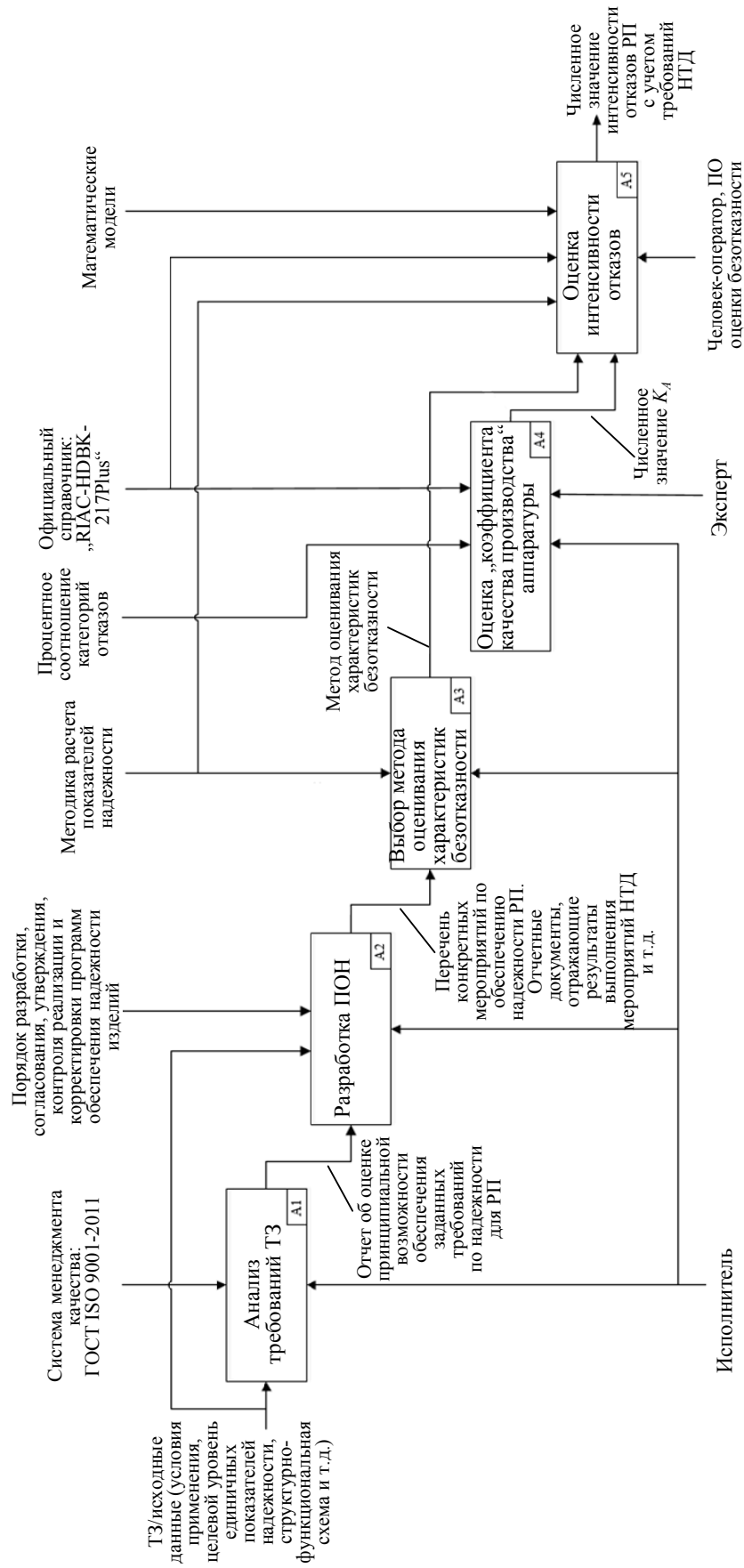


Рис. 3

Рассмотрим блок А4 (см. рис. 3). В данном случае оценка  $K_A$  представлена в виде математической модели

$$K_A = \Pi_P \cdot \Pi_{IM} \cdot \Pi_E + \Pi_D \cdot \Pi_G + \Pi_M \cdot \Pi_{IM} \cdot \Pi_E \cdot \Pi_G + \Pi_S \cdot \Pi_G + \Pi_I + \Pi_N + \Pi_W, \quad (3)$$

где каждый коэффициент  $\Pi_i$  характеризует определенную категорию отказов:  $\Pi_P$  — отказы комплектующих элементов;  $\Pi_{IM}$  — отказы в начальный период (в период гарантийного срока);  $\Pi_E$  — отказы из-за влияния внешней среды;  $\Pi_D$  — конструктивные отказы;  $\Pi_G$  — отказы, обусловленные несовершенством управления надежностью;  $\Pi_M$  — производственные отказы;  $\Pi_S$  — отказы, обусловленные несовершенством системы управления;  $\Pi_I$  — эксплуатационные отказы;  $\Pi_N$  — отказы, обусловленные несовершенством методов контроля;  $\Pi_W$  — деградиационные отказы.

Значение  $K_A$  в модели (3) зависит не только от статистических оценок, но и от экспертных, которые рекомендованы в [12] для удовлетворения требованиям СМН, входящей в СМК. Математические модели, необходимые для учета экспертной оценки, также рассмотрены в работе [2]. Интенсивность отказов  $\lambda_{РП}$  оценивается по выражению (2).

Однако в математической модели коэффициента  $K_A$ , согласно [12], во-первых, учитывается ряд коэффициентов, которые не относятся к РП непилотируемых АКА, — это коэффициент  $\Pi_{IM}$  (так как для АКА характерен срок активного существования), а также коэффициент  $\Pi_G$  (так как в модель уже входит коэффициент  $\Pi_S$ ), и, во-вторых, необходимые для учета коэффициенты отсутствуют вовсе, например коэффициент, учитывающий недостатки схемных решений, а именно такие отказы характерны для российских ИСЗ [4] (см. рис. 4).



Рис. 4

В связи с указанными недостатками рассмотренных выше подходов возникает необходимость уточнения расчетной оценки „коэффициента качества производства“ РП непилотируемых АКА путем разработки соответствующей методики на основе стандарта [12] с учетом не только Положения „РК — ...“, но и системы менеджмента качества.

**Методика оценивания „коэффициента качества производства“.** Структура предлагаемой методики приведена на рис. 5 в виде IDEF0-диаграммы.

Первый этап (блок А1) предполагает анализ видов отказов РП непилотируемых АКА для формирования категорий отказов в процентном соотношении от общего количества (рис. 6, представлена статистика, приведенная в работах [12, 13]). Поэтому объектом исследования на данном этапе является статистика отказов РП непилотируемых АКА. Для контроля достоверности обрабатываемых данных используется система анализа отказов и корректирующих действий (FRACAS). Для автоматизации и повышения эффективности этапа рекомендуется применять соответствующее программное обеспечение (ПО).

Второй этап (блок А2 на рис. 5) необходим для анализа перечня НТД, действующей при создании, производстве и эксплуатации РП непилотируемых АКА. В результате выполнения этого этапа формируется перечень требований НТД для проведения следующей операции (блок А3 на рис. 5).

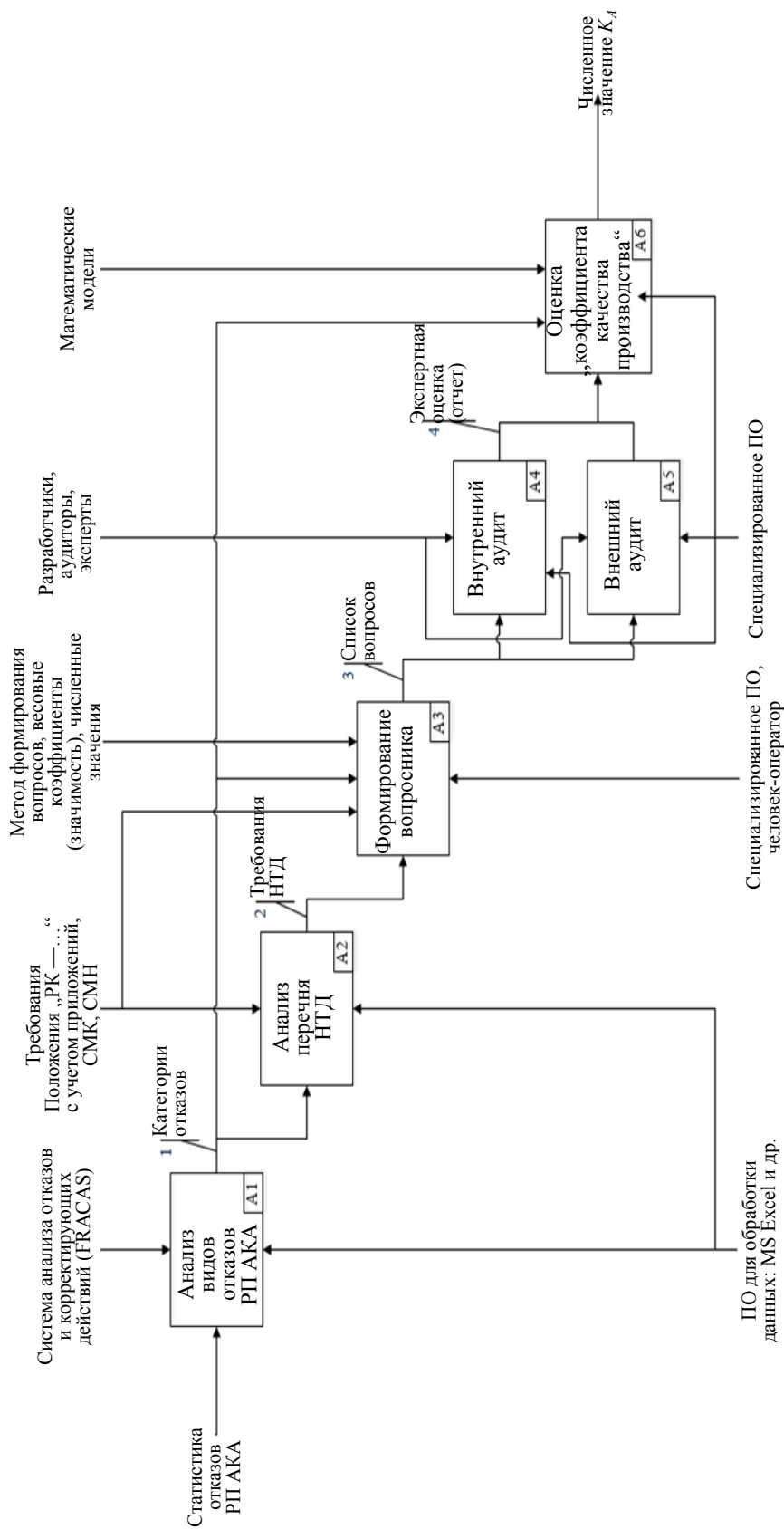


Рис. 5



Рис. 6

Третий этап (блок А3) нужен для формирования вопросника (см. таблицу), чтобы осуществить контроль выполнения необходимых действий, регламентированных в НТД (результат выполнения второго этапа).

Вопросник имеет классификацию по категориям отказов (результат выполнения первого этапа). Действительно, каждой категории отказов соответствует определенный перечень НТД. В свою очередь, НТД состоит из разделов (графа 1 в таблице), имеющих определенную направленность (графа 6). Также, для большей конкретики, направленность можно охарактеризовать классификацией (графы 7, 8). В этом случае каждый вопрос будет иметь строгую иерархию.

Вопросы имеют следующие виды направленности: персонал (руководство, разработчики и др.), продукт (сборочная единица, деталь, изделие и др.), процесс (процессы жизненного цикла системы)<sup>1</sup>. В таблице дано схематичное представление вопросника для категории отказов, связанной с несовершенством системы управления<sup>2</sup>.

Построение вопросника по такому принципу (структурированный подход к формированию вопросов) позволяет выявить конкретные преимущества и недостатки организации-исполнителя при проектировании РП непилотируемых АКА по результатам численной оценки  $K_d$ .

Список вопросов (порядковый номер вопроса обозначается через  $i$ ) соответствует категориям отказов  $j$ ; каждому вопросу присваивается весовой коэффициент (значимость)  $G_{ij}$  и численное значение  $\gamma_{ij}$  в зависимости от ответа на вопрос при выполнении четвертого и пятого этапов методики (блоки А4, А5 на рис. 5). На этих этапах предполагается проведение аудита для выявления корректности выполнения необходимых действий и удовлетворения требований, приведенных в НТД. Реализация этапов осуществляется как разработчиками РП непилотируемых АКА, имеющими непосредственное отношение к процессу проектирования (блок А4), так и внешними аудиторами/экспертами. Для автоматизации выполнения четвертого и пятого этапов используется специализированное ПО. Результат данных этапов — экспертная оценка, которая используется при выполнении следующего этапа (блок А6 на рис. 5).

<sup>1</sup> Классификация продуктов — согласно ГОСТ 2.101-2016, классификация процессов — согласно ГОСТ Р 57193-2016.

<sup>2</sup> ГОСТ Р 56518-2015, ГОСТ Р 57193-2016.

Раздел		НТД: ГОСТ Р 56518-2015				Направленность	Классификация	
		Номер	Вопрос Содержание	Весовой коэффициент G	Численное значение $\gamma_{ij}$		Группа	Подгруппа
1		2	3	4	5	6	7	8
Ответственность и полномочия			Определено ли подразделение (служба), ответственное за: 1) управление качеством, 2) организацию работ по совершенствованию СМК на всех этапах ЖЦП, 3) контроль и анализ степени соответствия СМК установленным требованиям и ожиданиям заказчика	3	1, если выполнены пп. 1—3; 0,6, если выполнены 2 пункта из 3; 0,3, если выполнен 1 пункт из 3; 0, если не выполнены пп. 1—3	Процесс	Организационное обеспечение проекта	Управление качеством
		1	Проинформированы ли руководители, несущие ответственность за проведение корректирующих действий, о продукции или процессах, не соответствующих требованиям	3	1, если „да“; 0, если „нет“			
		2	Высшее руководство определило цели для соответствующих уровней управления, подразделений, служб при реализации политики в области качества	5	1, если „да“; 0, если „нет“			
Планирование		1	Высшее руководство сохраняет целостность системы менеджмента качества при планировании и внедрении в нее изменений	7	1, если „да“; 0, если „нет“	Процесс	Техническое управление	Планирование проекта
		2						
		...						

Продолжение таблицы

Раздел		НТД: ГОСТ Р 56518-2015				Численное значение $\gamma_{ij}$	Направленность	Классификация	
		Номер	Вопрос	Весовой коэффициент $G$	Группа			Подгруппа	
Инфраструктура	1	2	3	4	5	6	7	8	
		2	3	4	5	6	7	8	
	1	Организация устанавливает и обеспечивает надзор за средствами технологического оснащения: 1) осуществляет периодическую оценку их технического состояния, включая контроль на технологическую точность, 2) проводит тестирование программного обеспечения, применяемого при автоматизированном проектировании, изготовлении и контроле (испытаниях) продукции, 3) осуществляет соответствующее техническое обслуживание	7	1, если выполнены пп. 1—3; 0,6, если выполнены пункты из 3; 0,3, если выполнен пункт из 3; 0, если не выполнены пп. 1—3	Процесс	Организационное обеспечение проекта	Управление инфраструктурой		
	2	Организация разработала планы действий, предусматривающие возможность выполнения требований заказчика в нештатных ситуациях, для минимизации последствий таких ситуаций при выполнении контрактных (договорных) обязательств	5	1, если „да“; 0, если „нет“					
	...								

Шестой этап является заключительным и позволяет количественно оценить значение „коэффициента качества производства“  $K_A$  по математической модели

$$K_A = \frac{K_A^*}{\sum_j \frac{\xi_j}{100} \cdot K_j}, \quad (4)$$

где  $\xi_j$  — процент отказов для  $j$ -й категории отказов;  $K_A^*$  — „коэффициент качества производства“, принимающий значения согласно справочнику [9];  $K_j$  — коэффициент, характеризующий категорию отказа.

Коэффициент  $K_j$  оценивается согласно следующим выражениям:

$$C_{mnkl} = \frac{\sum_{i=1}^{Q_{\max}} \gamma_{imnkl} \cdot G_{imnkl}}{\sum_{i=1}^{Q_{\max}} G_{imnkl}},$$

где  $C_{mnkl}$  — коэффициент, характеризующий  $m$ -ю классификацию вопросов  $i$  для каждой из направленностей  $n$ , входящих в разделы  $k$ , которые, в свою очередь, входят в состав НТД  $l$ ;  $Q_{\max}$  — максимальное количество вопросов  $i$  для каждой классификации  $m$ ;

$$F_{nkl} = \frac{\sum_{m=1}^{C_{\max}} C_{mnkl} \cdot GC_{mnkl}}{\sum_{m=1}^{C_{\max}} GC_{mnkl}},$$

где  $F_{nkl}$  — коэффициент, характеризующий  $n$ -ю направленность вопросов  $i$  для каждого раздела  $k$ , входящего в состав НТД  $l$ ;  $C_{\max}$  — максимальное количество классификаций  $m$  для каждой направленности  $n$ ;  $GC_{mnkl}$  — весовой коэффициент (значимость) каждой классификации  $m$ ;

$$R_{kl} = \frac{\sum_{n=1}^{F_{\max}} F_{nkl} \cdot GF_{nkl}}{\sum_{n=1}^{F_{\max}} GF_{nkl}},$$

где  $R_{kl}$  — коэффициент, характеризующий  $k$ -й раздел вопросов  $i$  для каждого состава НТД  $l$ ;  $F_{\max}$  — максимальное количество направленностей  $n$  для каждого раздела  $k$ ;  $GF_{nkl}$  — весовой коэффициент (значимость) каждой направленности  $n$ ;

$$N_l = \frac{\sum_{k=1}^{R_{\max}} R_{kl} \cdot GR_{kl}}{\sum_{k=1}^{R_{\max}} GR_{kl}},$$

где  $N_l$  — коэффициент, характеризующий  $l$ -й состав НТД, в которую входят вопросы  $i$ ;  $R_{\max}$  — максимальное количество разделов  $k$  для каждого состава НТД  $l$ ;  $GR_{kl}$  — весовой коэффициент (значимость) каждого раздела  $k$ ;

$$K_j = \frac{\sum_{l=1}^{N_{\max}} N_l \cdot GN_l}{\sum_{l=1}^{N_{\max}} GN_l},$$

где  $N_{\max}$  — максимальное количество НТД  $l$ , относящееся к категории отказов  $j$ ;  $GN_l$  — весовой коэффициент (значимость) каждого состава НТД  $l$ .

Таким образом, полученное численное значение  $K_j$  используется в выражении (4) для уточнения интенсивности отказов РП непилотируемых АКА, а также других РП, разрабатываемых для различных условий применения.

**Заключение.** Рассмотрены подходы, направленные на оценку интенсивности отказов РП непилотируемых АКА. Как показало исследование, первые два подхода не позволяют получить количественную оценку интенсивности отказов с учетом СМК, что является их существенным недостатком. Третий подход учитывает либо лишние коэффициенты в модели оценки „коэффициента качества производства“, либо вовсе не учитывает коэффициенты, необходимые для РП непилотируемых АКА.

Для решения этой проблемы разработана методика оценивания „коэффициента качества производства“, отличительной особенностью которой является применение структурированного подхода к формированию вопросника согласно действующей НТД с учетом СМК для последующей экспертной оценки как при внешнем аудите, так и внутреннем. Представленная методика позволяет своевременно выявлять преимущества и недостатки конкретного мероприятия, утвержденного программой обеспечения надежности и указанного в определенном разделе НТД. Применение „коэффициента качества производства“ поможет повысить точность расчетов характеристик безотказности РП непилотируемых АКА на этапе проектирования, а использование методики — повысить достоверность оценки достижения целевого уровня показателей их надежности.

Применение разработанной методики позволит также оценить достижимый уровень показателей надежности РП для выпускаемых частными негосударственными компаниями-производителями малых спутников (например, типа СириусСат) со сроком активного существования от 2 до 10 лет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отказы ракетно-космической техники. [Электронный ресурс]: <[https://www.ecoruspace.me/orbital\\_failures.html](https://www.ecoruspace.me/orbital_failures.html)>, 10.10.2019.
2. Артюхова М. А., Жаднов В. В., Полесский С. Н. Оценка показателей надежности электронных средств с учетом многофакторного коэффициента качества производства // Компоненты и технологии. 2014. Т. 153, № 4. С. 204—207.
3. Тюлевин С. В. Анализ отказов элементов бортовых радиоэлектронных средств // Наука и инновации в современном мире: техника и технологии: Сб. Одесса, 2017. С. 7—31.
4. Севастьянов Н. Н., Андреев А. И. Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации: Учеб. пособие. Томск: ТГУ, 2015. 266 с.
5. Севастьянов Н. Н. Управление надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации // Космонавтика и ракетостроение. 2017. Т. 96, № 3. С. 133—148.
6. 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.
7. Рудаков В. Б., Бурцев А. С., Филоненко П. А., Мироничев В. А. Математические модели надежности радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов негерметичного исполнения // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 7. С. 566—575. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-566-575.
8. Гончаров В. В., Бакланов В. И., Бурцев А. С., Филоненко П. А., Ерофеева Т. Г., Турчин М. Н. Технология оценки надежности элементов радиоэлектронной аппаратуры, длительно функционирующей в условиях космического пространства // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 7. С. 612—617. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-612-617.
9. Надежность ЭРИ 2006: Справочник. М.: МО РФ, 2006. 641 с.



10. Королев П. С. Влияние системы менеджмента качества при разработке радиотехнических устройств в рамках концепции проектного обучения в МИЭМ НИУ ВШЭ // *Материалы Межвуз. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е. В. Арменского*. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2019. С. 147—148.
11. Надежность ЭРИ ИП 2006: Справочник. М.: МО РФ, 2006. 52 с.
12. RIAC-HDBK-217Plus. Handbook of 217Plus™ Reliability Prediction Models. USA: RIAC, 2006. 170 p.
13. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. *Космическая электроника*. М.: Техносфера, 2015. Кн. 2. 696 с.

#### Сведения об авторах

- Павел Сергеевич Королев** — аспирант; НИУ ВШЭ, департамент электронной инженерии; преподаватель; E-mail: pskorolev@hse.ru
- Валерий Владимирович Жаднов** — канд. техн. наук, доцент; НИУ ВШЭ, департамент электронной инженерии; E-mail: vzhadnov@hse.ru

Поступила в редакцию  
31.01.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** 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.

### ESTIMATION OF THE "PRODUCTION QUALITY FACTOR" FOR THE MODEL OF FAILURE RATE OF RADIO EQUIPMENT OF UNMANNED AUTOMATIC SPACECRAFT

P. S. Korolev, V. V. Zhadnov

Higher School of Economics, 101000, Москва, Россия  
E-mail: pskorolev@hse.ru

A method for evaluating the "production quality factor", developed for calculating the failure rate of radio engineering devices of unmanned automatic space vehicles, is presented. A distinctive feature of the proposed method is accounting for activities regulated not only by normative-technical documentation on the creation, production and exploitation of electronic devices, but also by a system of quality management and applying a structured approach to the development of the questionnaire for subsequent expert assessment of the external and internal audit. It is anticipated that application of formulas derived to obtain a numerical value of the "production quality factor" may increase the accuracy of calculations of the reliability characteristics of radio engineering devices of unmanned automatic spacecraft at the design stage.

**Keywords:** dependability, reliability, production quality factor, electronic device, automatic spacecraft, artificial earth satellite

#### REFERENCES

1. [https://www.ecoruspace.me/orbital\\_failures.html](https://www.ecoruspace.me/orbital_failures.html).
2. Artyukhova M.A., Zhadnov V.V., Poleskiy S.N. *Components & Technologies*, 2014, no. 4(153), pp. 204–207. (in Russ.)
3. Tyulevin S.V. *Nauka i innovatsii v sovremennom mire: tekhnika i tekhnologii*, Odessa, 2017, pp. 7–31. (in Russ.)
4. Sevast'yanov N.N., Andreyev A.I. *Osnovy upravleniya nadezhnost'yu kosmicheskikh apparatov s dlitel'nymi srokami ekspluatatsii: uchebnoye posobiye* (Basics of Managing the Reliability of Spacecraft with Long Life: a Training Manual), Tomsk, 2015, 266 p. (in Russ.)
5. Sevast'yanov N.N. *Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2017, no. 3(96), pp. 133–148. (in Russ.)
6. Patraev V.E., Maksimov Yu.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 8(51), pp. 5–12. (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. Goncharov V.V., Baklanov V.I., Burtsev A.S., Filonenko P.A., Erofeeva T.G., Turchin M.N. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 7(61), pp. 612–617. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-612-617. (in Russ.)
9. *Nadezhnost' ERI 2006: spravochnik* (Reliability ERI 2006: A Guide), Moscow, 2006, 641 p. (in Russ.)
10. Korolev P.S. *Mezhvuzovskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh spetsialistov im E.V. Armenskogo* (E.V. Armensky Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Specialists), Moscow, 2019, pp. 147–148. (in Russ.)
11. *Nadezhnost' ERI IP 2006: spravochnik* (Reliability ERI IP 2006: a guide), Moscow, 2006, 52 p. (in Russ.)

- Russ.)
12. RIAC-HDBK-217Plus. *Handbook of 217Plus™ reliability prediction models*, USA, RIAC, 2006, 170 p.
  13. Belous A.I., Solodukha V.A., Shvedov S.V. *Kosmicheskaya elektronika* (Space Electronics), Book 2, Moscow, 2015, 696 p. (in Russ.)

**Data on authors**

- Pavel S. Korolev** — Post-Graduate Student; Higher School of Economics, Department of Electronic Engineering; Lecturer; E-mail: pskorolev@hse.ru
- Valery V. Zhadnov** — PhD, Associate Professor; Higher School of Economics, Department of Electronic Engineering; E-mail: vzhadnov@hse.ru

**For citation:** Korolev P. S., Zhadnov V. V. Estimation of the "production quality factor" for the model of failure rate of radio equipment of unmanned automatic spacecraft. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 3. P. 264—277 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-264-277