

**МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРОДУКЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ
И ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛЕЙ
НА ОСНОВЕ ТРЕБОВАНИЙ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА**

П. С. Королев*, С. Н. Полесский, В. Э. Цветков, А. А. Костюк

Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Москва, Россия

*pskorolev@hse.ru

Аннотация. Исследована задача сокращения разницы значений показателей надежности, в частности безотказности, продукции электронной и приборостроительной отраслей между прогнозными данными и реальными, полученными по результатам испытаний и эксплуатации. Показано, что на обеспечение целевого уровня надежности электронных модулей влияет эффективность функционирования системы менеджмента качества организации-исполнителя. Предложен метод, учитывающий качество выполнения обязательных процедур, и разработана структура опросника для экспертной оценки с возможностью онтологического исследования слабых и сильных сторон организации при реализации технологического процесса. Разработанный метод позволяет численно оценить степень выполнения процедур и операций на каждой стадии жизненного цикла, что дает возможность своевременной обратной связи для устранения выявленных по результатам аудита ошибок или нарушений с локализацией структуры организации и категории персонала. Введен новый дифференцированный коэффициент качества технологического процесса взамен интегрального коэффициента качества производства.

Ключевые слова: надежность, безотказность, коэффициент качества производства, коэффициент качества технологического процесса, экспертная оценка

Благодарности: публикация подготовлена в ходе проведения исследования (Проект № 24-00-024 „Развитие методов прогнозирования показателей надежности электронных модулей“) в рамках Программы „Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)“ в 2025 г.

Ссылка для цитирования: Королев П. С., Полесский С. Н., Цветков В. Э., Костюк А. А. Метод оценивания надежности продукции электронной и приборостроительной отраслей на основе требований системы менеджмента качества // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 4. С. 355–365. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-4-355-365.

**METHOD FOR EVALUATING THE RELIABILITY OF ELECTRONIC AND INSTRUMENT-MAKING PRODUCTS
BASED ON THE REQUIREMENTS OF A QUALITY MANAGEMENT SYSTEM**

P. S. Korolev*, S. N. Polesskiy, V. E. Tsvetkov, A. A. Kostiuk

HSE University, Moscow, Russia

*pskorolev@hse.ru

Abstract. The problem of reducing the difference in the values of reliability indicators of products in the electronic and instrument-making industries, in particular, failure-free operation, between the predicted data and the actual ones obtained from the results of testing and operation is considered. It is shown that the efficiency of the quality management system of the performing organization affects the provision of the target level of reliability of electronic modules. A method is proposed that takes into account the quality of the implementation of mandatory procedures and a questionnaire structure is developed for expert assessment with the possibility of ontological study of the organization's strengths and weaknesses in the implementation of the technological process. The developed method allows for a numerical assessment of the degree of implementation of procedures and operations at each stage of the life cycle, which enables timely feedback to eliminate errors or violations identified by the audit results with localization of the organization's structure and personnel category. A new differentiated quality coefficient of the technological process is introduced to replace the integral quality coefficient of production.

Keywords: reliability, failure-free operation, production quality factor, technological process quality factor, expert assessment

Acknowledgments: The publication was prepared during the research (Project No. 24-00-024 “Development of methods for forecasting reliability indicators of electronic modules”) within the framework of the Program “Scientific Foundation of the National Research University “Higher School of Economics” (NRU HSE)” in 2025.

For citation: Korolev P. S., Polesskiy S. N., Tsvetkov V. E., Kostiuk A. A. Method for evaluating the reliability of electronic and instrument-making products based on the requirements of a quality management system. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 4. P. 355–365 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-4-355-365.

Введение. Создание супернадежной продукции — приоритетная задача российской электронной и приборостроительной отраслей, в частности при проектировании систем автоматизации производства. Показатель надежности закладывается в техническом задании, при проектировании, обеспечивается на этапе производства и поддерживается в ходе эксплуатации. Однако методы обеспечения надежности электронных модулей (ЭМ) во многом устарели и не позволяют достоверно оценить показатели надежности на ранних стадиях разработки, начиная с ЭМ первого уровня (ЭМ1).

В настоящее время создание супернадежных ЭМ сводится к резервированию, особенно для аппаратуры длительного функционирования [1] или ответственного назначения [2, 3], поскольку уровень надежности электронной компонентной базы достиг своего предела [4]. Более того, возрастающие требования к массогабаритным характеристикам и условиям эксплуатации усложняют поиск оптимальных решений без потери целевой функции. Однако, как показывает статистика отказов ЭМ при эксплуатации [5, 6], заданный уровень надежности нередко не достигается.

Согласно международному стандарту ISO 9001:2015¹, организационная деятельность предприятия-исполнителя непосредственно влияет на стоимость, надежность, качество продукции. Эффективность системы менеджмента можно оценивать с использованием количественного, организационно-управленческого и рангового подходов, анализирующих расходы на управленческий аппарат, цели управления, структуру менеджмента и характеристики процесса. В российских организациях обеспечением надежности обычно занимается отдел контроля качества (иногда с сектором надежности), а в акционерном обществе или обществе с ограниченной ответственностью — директор по качеству; в европейских организациях эти полномочия возлагаются на отдел надежности.

При модернизации ЭМ, сопровождающейся ростом функционала, повышением ответственности задач и усложнением конструкторского форм-фактора, возрастает влияние человеческого фактора при обеспечении требований технического задания [7]. Между тем методы реализации принципов менеджмента качества (МК) по ISO 9001:2015 в РФ отсутствуют или устарели, что затрудняет объективную оценку эффективности системы менеджмента качества (СМК). Поэтому целью настоящей работы является повышение достоверности расчетной оценки показателей надежности ЭМ с учетом действующих принципов МК. Новизна исследования состоит в разработанном методе оценки надежности ЭМ1, который, во-первых, учитывает последовательность процедур и операций на стадиях ЖЦ, а во-вторых, детально оценивает полноту деятельности каждого отдела организации-исполнителя, обеспечивая обратную связь и своевременное устранение выявленных недостатков в технологическом процессе.

Специфика функционирования СМК организации при создании продукции электронной и приборостроительной отраслей. Каждый этап жизненного цикла (ЖЦ) при создании продукции сопровождается требованиями нормативно-технической документации (НТД) для правильного выполнения процедур и операций, в том числе требованиями СМК и системы менеджмента надежности (СМН)². СМК — это совокупность взаимодействующих структур организации, обеспечивающих разработку политики, целей и процессов в области качества для достижения поставленных руководством целей и эффективного управления организацией посредством планирования качества, его обеспечения и улучшения³ [8]. Основой для эффектив-

¹ ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. Дата введения 2015-11-01. М.: Стандартинформ, 2015. 32 с.

² ГОСТ Р МЭК 60300-1-2017. Менеджмент риска. Руководство по применению менеджмента надежности. Дата введения 2018-12-01. М.: Стандартинформ, 2018. 36 с.

³ ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь (с Поправкой). Дата введения 2015-11-01. М.: Стандартинформ, 2015. 49 с.

ного управления СМК организации являются принципы МК, утвержденные в международном руководящем документе ISO 9000:2015 — они создают базис для требований (рис. 1), указанных в ISO 9001:2015.



Рис. 1

Анализ рис. 1 позволяет констатировать, что в действующей версии ISO 9001:2015 утратил силу восьмой принцип МК „системный подход к менеджменту“ и не учитывается в требованиях; осуществлен переход от „принятия решений, основанных на свидетельствах“, а не „фактах“ и др. Все представленные на рис. 1 принципы МК определяют разработку СМК, ее внедрение и сертификацию как очень трудоемкую и ответственную задачу, но добиться эффективного функционирования СМК еще сложнее [9, 10]. Рассмотрим две основных интерпретации СМК в общей специфике управления организацией.

Международный подход рассматривает СМК как часть общей системы управления организацией [11], распространяющую цели, обязанности и принципы на всех участников „процессного подхода“ [12, 13]. Соответственно СМН должна тесно взаимодействовать с СМК. Руководящие документы ISO 9000/9001, признанные мировым сообществом, опираются на методы всеобщего управления качеством Total Quality Management (TQM).

В отечественной практике нередко встречается ошибочная трактовка принципов ISO 9000/9001 [8]: функции СМК сводятся лишь к обеспечению качества продукции и не охватывают всех участников процессного подхода, что противоречит требованиям ISO 9001. Аналогично СМН функционирует изолированно, занимаясь только надежностью ЭМ, что также не согласуется с логикой СМК. Комплексный анализ показал основные причины неэффективной работы СМК в сертифицированных российских организациях: формальное участие высшего руководства (нарушение второго и четвертого принципов МК), неполная реализация требований ISO 9001 из-за некомпетентности, фиктивное внедрение СМК, слабые контакты с потребителями

(седьмой принцип МК), недостаточные достоверность статистических данных и объем аудиторских проверок (шестой принцип МК).

Следовательно, для повышения надежности ЭМ необходимо строго соблюдать требования к управлению организацией, внедряя эффективную СМК и обеспечивая высокий уровень качества процедур и операций. При этом из-за недостатка статистических данных о показателях надежности ЭМ, согласно принципам МК, важно расширять объем экспертных оценок и организовывать поэтапный контроль полноты выполнения требований с обратной связью на всех стадиях жизненного цикла модулей.

Подходы к учету эффективности СМК при оценке надежности электронных модулей и их недостатки. Метод оценки единичных показателей надежности, основным из которых является λ -характеристика ЭМ1 (характеризует численное значение эксплуатационной интенсивности отказов), для разных стран [14] различается, в частности, учетом качества производства как инструмента оценки эффективности СМК. Приведем три наиболее популярных в научном сообществе метода.

I метод. Принятый в России метод оценки λ -характеристик основан на применении подходов, изложенных в справочнике „Надежность ЭРИ“ [15]. Оценка λ -характеристик ЭМ1 проходит в два этапа: на первом рассчитывается эксплуатационная интенсивность отказов ЭМ1 нового образца, на втором — оценивается коэффициент качества производства (K_a).

При полном и корректном выполнении требований НТД $K_a = 0,2$ (космическая аппаратура) или $K_a = 1$ (аппаратура специального назначения). Однако для других классов аппаратуры (других сфер применения аппаратуры) значение K_a не приводится.

Метод также имеет недостатки: во-первых, указанные численные значения K_a относятся к периоду до 2000-х гг., когда СМК считалась идеально функционирующей внутри организации (что сегодня недостижимо при существующем уровне реализации принципов МК); во-вторых, невозможно учесть постоянные изменения требований по улучшению качества [6]; в-третьих, отсутствует экспертная оценка (используются устаревшие статистические данные); в-четвертых, K_a не охватывает все стадии ЖЦ (весь технологический процесс). Следовательно, необходимо вводить последовательную экспертную оценку и применять онтологическое исследование процессов, чтобы оперативно выявлять и устранять слабые места на всех стадиях ЖЦ ЭМ1, соблюдая действующие принципы МК.

II метод. Принятый в США метод оценки λ -характеристик основан на применении подходов, изложенных в стандарте RIAC-HDBK-217Plus [5]. Уникальность метода состоит в учете рассчитанной интенсивности отказов по математическим формулам и интенсивности отказов, полученной по результатам реальных испытаний ЭМ1 для новой и предыдущей версий.

Оценка λ -характеристик происходит в три шага. На первом рассчитывается интенсивность отказов предшествующей версии ЭМ1, затем оценивается интенсивность отказов новой версии ЭМ1 и в конце оценивается теоретическое значение интенсивности отказов ЭМ1 с учетом экспертной оценки, отражающей уровень выполнения требуемых мероприятий согласно ISO 9001 и требованиям НТД, соответствующих категориям отказов, указанным в [5]. Проведение экспертной оценки требует сформированного перечня вопросов, содержащихся в опроснике. Структура опросника для получения экспертной оценки состоит из четырех элементов: категория отказов ЭМ1 [5], формулировка вопроса для эксперта, численное значение ответа эксперта и весовой коэффициент (важность). Однако такой подход имеет ряд недостатков: отсутствует иерархическая группировка вопросов по их важности (что затрудняет автоматизацию экспертной оценки), нет привязки к конкретной НТД (важно для процессного подхода на стадиях ЖЦ ЭМ1), категории отказов не связаны со стадиями ЖЦ (нарушается последовательность операций), не учтена направленность вопросов на продукт или персонал, весовые коэффициенты не корректируются с учетом назначения ЭМ (применяются усредненные значения), отсутствует автоматизированный анализ аудита и показателя K_a (что не позволяет руководству отслеживать динамику качества и надежности ЭМ1), не участвуют разработчик и внешний эксперт

(это ограничивает объективность прогноза). Наконец, оценка выполняется лишь после полной разработки ЭМ, без контроля отдельных этапов и без обратной связи.

III метод. Принятый во Франции метод оценки λ -характеристик подробно описан в стандарте „FIDES“ [16] и частично рассмотрен в [17]. Оценка λ -характеристик ЭМ1 происходит по выражению:

$$\lambda_{\text{ЭМ1}} = K_{\text{п}} K_{\text{с}} \lambda_{\text{в}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{ЭМ1}}$ — эксплуатационная интенсивность отказов ЭМ1; $K_{\text{п}}$ — коэффициент, учитывающий влияние качества производства; $K_{\text{с}}$ — коэффициент, учитывающий качество всех процессов, от создания спецификации до эксплуатации и обслуживания; $\lambda_{\text{в}}$ — интенсивность отказов совокупности ЭРИ при воздействии внешних факторов.

Коэффициент $K_{\text{п}}$ отражает специфику обеспечения качества ЭМ1 на этапе производства, учитывая квалификацию персонала и контрольные испытания надежности корпусов и их активных частей. Коэффициент $K_{\text{с}}$ оценивает степень готовности организации-исполнителя к контролю процессов на всех стадиях ЖЦ ЭМ1 для обеспечения надежности и частично аналогичен K_a . Его значение лежит в диапазоне от 1 до 8.

Первое преимущество этого метода заключается в дискретном учете периода воздействия различных факторов на протяжении времени работы (фаз), более точно описывающем условия эксплуатации. Второе преимущество заключается в усовершенствованной экспертной системе, применяемой на всех стадиях ЖЦ (с распределенными долями для каждой стадии) для обеспечения надежности ЭМ1, а также в системе рекомендаций.

Структура опросника для экспертной оценки технологического процесса имеет пять элементов: стадия ЖЦ ЭМ1 согласно первоисточнику [16], рекомендация для выполнения, формулировка вопроса для эксперта, отметка о степени выполнения рекомендации, весовой коэффициент вопроса (важность). Причем одна и та же рекомендация может присутствовать в опроснике для разных стадий ЖЦ, при этом весовой коэффициент для такой рекомендации различен для каждой стадии ЖЦ.

Однако и данный метод не удовлетворяет действующим принципам МК. В опроснике отсутствует указание на конкретную НТД; отсутствует описание направленности вопросов согласно источнику [14]; отсутствует автоматизация анализа результатов аудита, отсутствует оценка полноты выполнения операций и процедур структурами организации-исполнителя. Также детализация опросника недостаточна для онтологического исследования.

Критерий	Метод		
	I	II	III
Экспертная оценка	—	+	+
Наличие рекомендаций	—	—	+
Наличие структуры опросника для полного онтологического исследования	—	—	—
Указание на конкретную НТД при формулировке вопроса/ рекомендации	—	—	—
Охват всего технологического процесса — всех стадий ЖЦ	—	+	+
Последовательная оценка качества технологического процесса (по стадиям ЖЦ)	—	—	+
Оценка уровня (полноты) выполнения процедур и операций на стадиях ЖЦ	—	—	+
Подготовка к аудиту — наличие для аудита исключительно имеющих отношение к ЭМ1 вопросов	—	—	+
Наличие направленности вопросов (продукт/ персонал)	—	—	—
Оценка уровня осуществления деятельности структурами организации-исполнителя	—	—	—
Калибровка весовых коэффициентов вопросов	—	—	+
Обратная связь	—	—	—
Корреляция между ответами задействованных лиц для аудита	—	—	—
Автоматизация аудита	—	—	—
Дифференцированная оценка качества технологического процесса	—	+	+

Все три метода обладают недостатками, что делает неэффективной СМК организации как инструмент, а создаваемую продукцию электронной и приборостроительной отраслей — недостаточно надежной. Сравнительный анализ рассмотренных методов представлен в таблице, отражающей проблему отсутствия в России общего подхода, позволяющего оценивать уровень качества технологического процесса на всех стадиях ЖЦ для обеспечения надежности ЭМ1 и других уровней ЭМ.

Разработка метода, учитывающего уровень качества технологического процесса, для оценки надежности продукции электронной и приборостроительной отраслей. Для удовлетворения принципам МК, в частности четвертому, пятому и шестому (см. рис. 1), необходимо применять онтологический подход к исследованию эффективности функционирования СМК организации-исполнителя. В связи с этим предлагается структура опросника (рис. 2) для проведения экспертизы оценки.

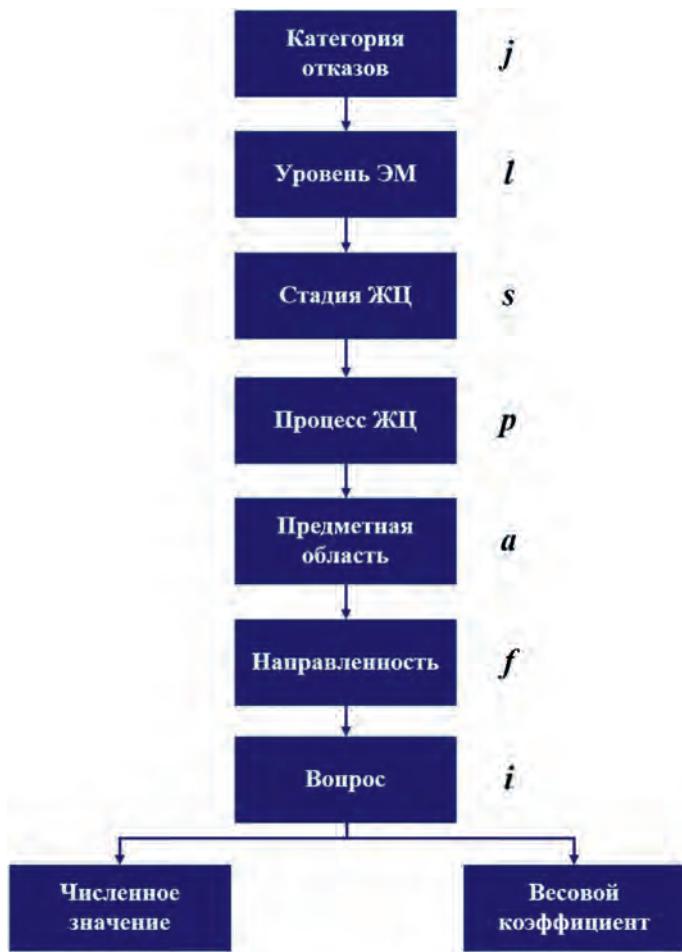


Рис. 2

База вопросов взята из [5] и переведена на русский язык. Первостепенной в структуре опросника является категория отказов согласно официальной статистике центра исследования надежности [5]. Ниже следует уровень ЭМ. Далее, чтобы удовлетворить в явном виде четвертому принципу МК (см. рис. 1), необходимо добавить стадию ЖЦ согласно российскому стандарту⁴. Для идентификации процесса жизненного цикла в ходе выполнения процессов и процедур введен уровень „процесс ЖЦ“ согласно российскому стандарту⁵, который затрагивает

⁴ ГОСТ Р 53791-2023. Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Дата введения 2024-01-01. М.: Стандартинформ, 2024. 12 с.

⁵ ГОСТ Р 57193-2016. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. Дата введения 2017-11-01. М.: Стандартинформ, 2017. 100 с.

второй принцип МК (см. рис. 1). Следующий уровень включает предметную область, что дает возможность взаимосвязи со структурами организации-исполнителя и в явном виде удовлетворяет пятому принципу МК (см. рис. 1), поскольку позволяет отслеживать степень выполнения необходимых мероприятий каждым ее отделом или сектором. Уровень „направленность“ необходим для локализации слабых и сильных сторон персонала внутри структур организации-исполнителя, что частично затрагивает второй принцип МК (см. рис. 1). Направленность может иметь отношение как к персоналу, так и к продукту (ЭМ1). Заключительным уровнем в структуре опросника является сам вопрос, который характеризуется весовым коэффициентом и ответом (выражен числом). Пример опросника представлен на рис. 3 для категории отказов „Несовершенство управления повышением надежности“.

Вопрос	Численное значение G	Вес W	Направленность	Предметная область	Процесс ЖЦ	Стадия ЖЦ	Уровень ЭМ	Категория отказов
Существует ли инфраструктура поддержки на местах, способная влиять на необходимые изменения?	Да = 1 Нет = 0	10	Продукт	Техподдержка	Организационное обеспечение	Проведение ОКР	Все	Несовершенство управления повышением надежности
Существует ли эффективная система передачи сообщений об отказах и анализе внесения исправлений (FRACAS) для развернутой системы?	Да = 1 Нет = 0	8	Продукт	FRACAS	Техническое управление	Производство и испытания	3	Несовершенство управления повышением надежности
Каков процент отказов в процессе эксплуатации ЭМ, для которых определена первопричина?	G = % / 100	8	Продукт	Анализ	Технический	Производство и испытания	Все	Несовершенство управления повышением надежности
Проводится ли анализ для определения повторяющихся ошибок?	Да = 1 Нет = 0	6	Продукт	Риски/ опыт	Технический	Производство и испытания	Все	Несовершенство управления повышением надежности
Определены ли потенциальные корректирующие действия, связанные с проектированием, производством или управлением системой?	Да = 1 Нет = 0	6	Продукт	Техподдержка	Техническое управление	Обоснование разработки	3	Несовершенство управления повышением надежности
Проводятся ли консультации с первоначальными разработчиками или производственным персоналом по поводу возможных внесений исправлений?	Да = 1 Нет = 0	4	Персонал	Техподдержка	Организационное обеспечение	Проведение ОКР	Все	Несовершенство управления повышением надежности
Адекватно ли протестированы системы, чтобы убедиться, что изменения были сделаны правильно и не привели к другим дефектам или повреждениям?	Да = 1 Нет = 0	5	Продукт	Риски/ опыт	Технический	Производство и испытания	3	Несовершенство управления повышением надежности

Рис. 3

Отметим, что вопросы в опроснике отсортированы по убыванию весового коэффициента W в рамках категории отказов j . Степень выполнения L каждого уровня иерархии структуры опросника $x(j, l, s, p, a, f)$ оценивается по выражению:

$$L_{x(j, l, s, p, a, f)} = \frac{\sum_{i=1}^n PosQues}{MaxQues}, \quad (2)$$

где $PosQues$ — число положительных ответов на вопросы; $MaxQues$ — общее число вопросов i для уровня x в опроснике.

Такой подход дает наглядное представление о слабых и сильных сторонах организации в рамках технологического процесса. На рис. 4 визуализирована степень выполнения рекомендаций в рамках технологического процесса для фиксированной категории отказов и уровня ЭМ.



Рис. 4

Рис. 4 отражает ситуацию, когда при разработке технического задания были допущены либо ошибки, либо не учтены обязательные аспекты, либо выбран недобросовестный поставщик, и все это привело к недостаткам при проведении опытно-конструкторских работ (ОКР), отрицательно повлияло на производство и испытания, а также модернизацию и последующую эксплуатацию ЭМ1. Зеленый цвет принадлежит $L = 1$, салатовый — $L \geq 0,9$ и $L < 1$, желтый — $L \geq 0,75$ и $L < 0,9$, оранжевый — $L \geq 0,6$ и $L < 0,75$, красный — $L \geq 0,45$ и $L < 0,6$, бордовый — $L \geq 0,3$ и $L < 0,45$. Также отметим, что данная визуализация приведена для аудиторской проверки по результатам выполнения исполнителем полного цикла мероприятий технологического процесса. Это не позволило своевременно выявить и устранить недостатки во время выполнения процедур на стадии жизненного цикла „Проектирования ОКР“ и отрицательно сказалось на уровне надежности выпущенного ЭМ1. Поэтому для предлагаемого в настоящей работе метода необходимо ввести обратную связь после каждой стадии ЖЦ для устранения выявленных проблемных процедур при обеспечении надежности.

Также предлагается ввести коэффициент качества технологического процесса K_{TP} взамен коэффициента качества производства K_a , он может быть оценен по аналогии с методом III [19]:

$$K_{\text{TP}} = e^{\delta_1 \left(\delta_2 - \frac{\sum_{i=1}^n G_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right)} = e^{\delta_1 \left(\delta_2 - \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right)}, \quad (3)$$

где $\delta_1 = 2,01$; $\delta_2 = 0,2$ для ЭМ1 в составе космической аппаратуры, $\delta_2 = 1$ — для аппаратуры специального назначения, но для аппаратуры горной, нефтегазовой и других видов промышленности (назначения) данный коэффициент требует экспертного уточнения и валидации; A — коэффициент, отражающий полноту экспертизы; G — коэффициент, характеризующий ответ на вопрос из экспертного опросника численным значением; n — общее число вопросов в базе данных (450 шт.).

Часть вопросов в базе данных (около 25 %) имеют общий характер, отражающий состояние системы управления организацией (СМК) при вновь создаваемом ЭМ, поэтому для такого класса вопросов регулярность экспертизы при необходимости может быть снижена (при создании нескольких ЭМ за данный период). Остальные 75 % вопросов носят индивидуальный характер и требуют обязательной проверки при вновь создаваемом ЭМ1. На рис. 5 показана типовая зависимость коэффициента качества технологического процесса от результатов аудиторской проверки для разных видов аппаратуры.

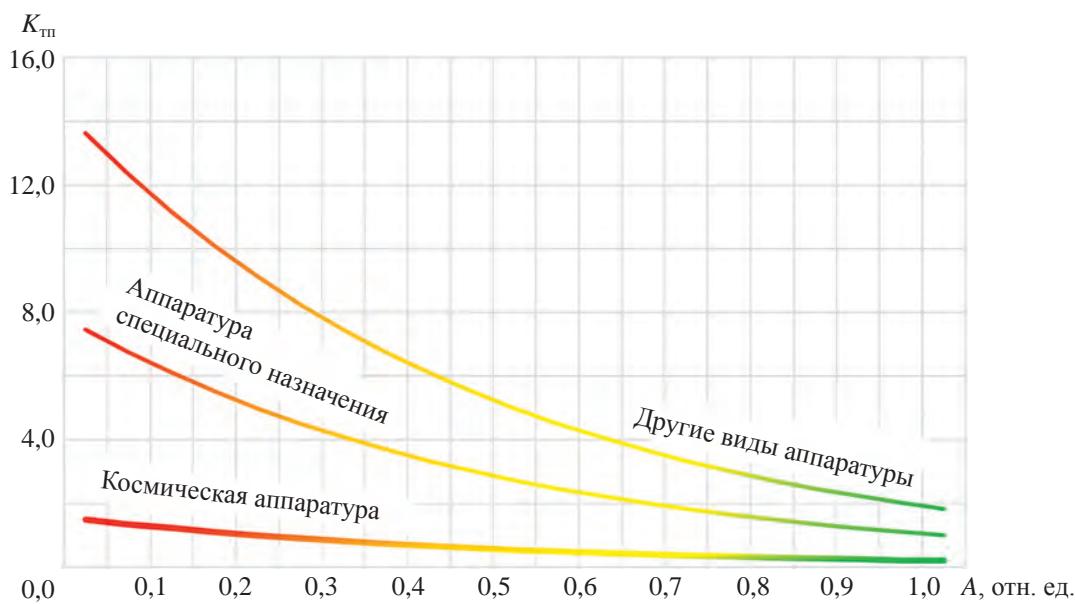


Рис. 5

Следует отметить, что в идеальном случае $A = 1$ и в соответствии с формулой (3) значения K_{tp} будут равны 0,2, 1 и 1,83 (последнее требует дальнейшего уточнения в ходе исследования). Иными словами, идеально функционирующая СМК, включая СМН, позволяет разработать надежный, с точки зрения целевых показателей, ЭМ1: согласно [15], надежность (безотказность) аппаратуры космического назначения при идеальной СМК возрастает в пять раз относительно спрогнозированной согласно условиям эксплуатации $\lambda_{\text{ЭМ1}}$; для аппаратуры специального назначения надежность останется неизменной; а для других видов аппаратуры надежность сокращается приблизительно в два раза.

Заключение. Рассмотренные в работе подходы к оценке надежности ЭМ нуждаются в улучшении, поскольку обновляются принципы менеджмента качества ISO и международные требования к функционированию СМК. Метод [15] требует полной разработки экспертной системы для оценки качества технологического процесса при обеспечении надежности ЭМ1 согласно принципам МК (см. рис. 1). Предложенный в работе метод позволяет вовлечь в исследование реальной эффективности функционирования СМК организации-исполнителя руководителей для принятия управлеченческих решений на основе предоставляемых данных о степени выполнения мероприятий НТД каждой структурой организации. Однако метод требует дальнейшего распределения весовых коэффициентов каждому мероприятию НТД, содержащемуся в опроснике; требуется совершенствование структуры опросника для более детализированного онтологического исследования; необходима разработка программного обеспечения для работы с экспертной системой и анализом результатов аудита; необходимо продумать методологию прохождения аудита.

Использование коэффициента качества производства, который учитывает уровень требований исключительно к проектированию и производству, нецелесообразно в силу его интегральности и учета не всех стадий ЖЦ ЭМ1. Предложенный коэффициент качества технологического процесса позволяет устранить указанные недостатки за счет дифференцированного подхода и учета всего технологического процесса, поскольку упущение важных аспектов на предыдущих стадиях может привести к неприемлемым последствиям при проектировании и производстве и увеличить риски, связанные с отказами ЭМ1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Севастьянов Н. Н. Управление надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации // Космонавтика и ракетостроение. 2017. Т. 96, № 3. С. 133–148.
2. Юрков Н. К. Современное состояние исследований в области создания высоконадежной бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4(36). С. 5–12.
3. 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.
4. Севастьянов Н. Н., Андреев А. И. Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации. Томск: ТГУ, 2015. 266 с.
5. RIAC-HDBK-217Plus. Handbook of 217PlusTM reliability prediction models. USA: RIAC, 2006. 170 p.
6. 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.
7. Дивеев А. И., Шмалько Е. Ю., Жаднов В. В. Поиск закона изменения надежности электронных модулей методом символьной регрессии // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1(13). С. 32–38.
8. Садвокасов Б. С., Темербаева Ж. А. Разработка и внедрение системы менеджмента качества на предприятии // Вестник науки. 2020. № 4(25). С. 62–69.
9. Халзанов Д. П. Система менеджмента качества, разработка и внедрение // Бизнес-образование в экономике знаний. 2022. № 2(22). С. 55–57.
10. Семашина Ю., Курушина А. Проблемы и этапы внедрения СМК на предприятия // Роль технического регулирования и стандартизации в эпоху цифровой экономики: сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. Екатеринбург: Ажур, 2020. С. 172–176.
11. Миньковская М. В., Радионова А. С. Роль руководителя в системе менеджмента качества // Экономика промышленности. 2012. № 1-2(57-58). С. 388–396.
12. Menshikova M., Piunova Y., and Makhova M. Digital Transformation in the Quality Management System // 2019 Intern. Conf. "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS). Sochi, Russia, 2019. P. 42–46. DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928438.
13. Aleksandrova S., Vasiliev V., Aleksandrov M. Information Systems and Technologies in Quality Management // 2020 Intern. Conf. Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). Yaroslavl, Russia, 2020. P. 173–175. DOI: 10.1109/ITQMIS51053.2020.9322959.
14. 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.
15. Надежность ЭРИ 2006: Справочник. М.: МО РФ, 2006. 641 с.
16. FIDES Guide 2009 Edition: A Reliability Methodology for Electronic Systems. 2010. 465 p.
17. Peyghami S., Wang Z. Blaabjerg F. A Guideline for Reliability Prediction in Power Electronic Converters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2020. Vol. 35, N 10. P. 10958–10968. DOI: 10.1109/TPEL.2020.2981933.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Павел Сергеевич Королев

— канд. техн. наук; НИУ ВШЭ, Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова; доцент; E-mail: pskorolev@hse.ru

Сергей Николаевич Полесский

— канд. техн. наук; НИУ ВШЭ, Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова; доцент; E-mail: spolessky@hse.ru

Вячеслав Эдуардович Цветков

— аспирант; НИУ ВШЭ, Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова; E-mail: vtsvetkov@hse.ru

Алексей Андреевич Костюк

— магистрант; НИУ ВШЭ, Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова; E-mail: aakostyuk@edu.hse.ru

Поступила в редакцию 08.08.24; одобрена после рецензирования 22.01.25; принятая к публикации 27.02.25.

REFERENCES

1. Sevastyanov N.N. *Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2017, no. 3(96), pp. 133–148. (in Russ.)
2. Yurkov N.K. *Reliability & Quality of Complex Systems*, 2021, no. 4(36), pp. 5–12. (in Russ.)
3. 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.)
4. Sevastyanov N.N., Andreev A.I. *Osnovy upravleniya nadezhnostyu kosmicheskikh apparatov s dlitel'nymi srokami ekspluatatsii* (Fundamentals of Reliability Management of Long-Life Spacecraft), Tomsk, 2015, 266 p. (in Russ.)
5. RIAC-HDBK-217Plus. *Handbook of 217PlusTM reliability prediction models*, USA, RIAC, 2006, 170 p.
6. Artyukhova M.A., Zhadnov V.V., Poleskiy S.N. *Components and Technologies*, 2014, no. 4(153), pp. 204–207. (in Russ.)
7. Diveev A.I., Shmalko E.Yu., Zhadnov V.V. *Reliability & Quality of Complex Systems*, 2016, no. 1(13), pp. 32–38. (in Russ.)
8. Sadvokasov B.S., Temerbayeva Zh.A. *Vestnik nauki*, 2020, no. 4(25), pp. 62–69. (in Russ.)
9. Khalzanov D.P. *Biznes-obrazovaniye v ekonomike znanij*, 2022, no. 2(22), pp. 55–57. (in Russ.)
10. Semashina Yu., Kurushina A. *Rol' tekhnicheskogo regulirovaniya i standartizatsii v epokhu tsifrovoy ekonomiki* (The Role of Technical Regulation and Standardization in the Era of the Digital Economy), II International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Ekaterinburg, 2020, pp. 172–176. (in Russ.)
11. Min'kovskaya M.V., Radionova A.S. *Ekonomika Promyshlennosti*, 2012, no. 1-2 (57-58), pp. 388–396. (in Russ.)
12. Mensikova M., Piunova Y., and Makhova M. *Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, 2019 International Conference, Sochi, Russia, 2019, pp. 42–46, DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928438.
13. Aleksandrova S., Vasiliev V., Aleksandrov M. *Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, 2020 International Conference, Yaroslavl, Russia, 2020, pp. 173–175, DOI: 10.1109/ITQMIS51053.2020.9322959.
14. 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.)
15. *Nadezhnost' ERI 2006: Spravochnik* (Reliability of ERI 2006: Handbook), Moscow, 2006, 641 p. (in Russ.)
16. *FIDES Guide 2009 Edition: A Reliability Methodology for Electronic Systems*, 2010, 465 p.
17. Peyghami S., Wang Z. Blaabjerg F. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, no. 10(35), pp. 10958–10968, DOI: 10.1109/TPEL.2020.2981933.

DATA ON AUTHORS

Pavel S. Korolev

— PhD, Associate Professor; HSE University, Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics; E-mail: pskorolev@hse.ru

Sergey N. Polesskiy

— PhD, Associate Professor; HSE University, Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics; E-mail: spolessky@hse.ru

Viacheslav E. Tsvetkov

— Post-Graduate Student; HSE University, Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics; E-mail: vtsvetkov@hse.ru

Aleksei A. Kostyuk

— Master Student; HSE University, Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics; E-mail: aakostyuk@edu.hse.ru

Received 08.08.24; approved after reviewing 22.01.25; accepted for publication 27.02.25.