УДК 681.3.088.8

Анализ влияния погрешности измерений на достоверность выборочных результатов измерений

Самаров Е.К., Ионченкова Я.Ю.

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

Accepted for publication

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В условиях серийного или массового производства контроль качества готовой продукции чаще всего осуществляется выборочным методом измерений. Такой подход применяется в основном для сокращения затрат или в ситуациях, когда проведение сплошного контроля невозможно. В рамках этого метода из производственной партии случайным образом отбирается определённое количество изделий, у которых затем измеряются параметры, отражающие качество. Полученные значения сравниваются с допустимыми нормами, определёнными нормативной документацией. Если количество изделий с несоответствующими показателями в выборке не превышает установленного порога, вся партия считается соответствующей требованиям. В противном случае партия признаётся браком, что может повлечь за собой значительные экономические издержки. Следовательно, анализ влияния погрешности измерений на достоверность выборочных результатов, безусловно, является актуальным.

Цель работы — исследовать влияние погрешности измерений на достоверность результатов выборочного контроля.

Методы. Предлагается использовать метод имитационного моделирования, с применением стохастической модели погрешности измерений.

Результаты. Моделирование процедуры контроля на компьютере позволило не только исследовать зависимость искомых рисков от среднеквадратических отклонений нормального распределения погрешности измерений, но и объем контролируемой выборки, которые обеспечат требуемое допустимое значение риска заказчика.

Выводы. Полученные в работе результаты показывают, что рассмотренные имитационные модели измерительного многопараметрического контроля позволяют не только исследовать влияние погрешности измерений на достоверность результатов выборочного контроля, но и разрабатывать эффективные планы контроля, основанные на экономико-математических моделях.

Ключевые слова: погрешность измерения; имитационное моделирование; объем контролируемой выборки.

Как цитировать

Самаров Е.К., Ионченкова Я.Ю. Анализ влияния погрешности измерений на достоверность выборочных результатов измерений // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 11.08.2025

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 16.09.2025

Принята к публикации/accepted for publication 28.09.2025

Accepted for publication

Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета | Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University
ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА | ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING
END: XTIFNH

Analysis of the impact of measurement errors on the accuracy of sample measurement results

Evgeny K. Samarov, Yana Yu. Ionchenkova

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

Accepted for publication

ABSTRACT

BACKGROUND. In the context of serial or mass production, the quality control of finished products is most often carried out using a sampling method of measurement. This approach is primarily used to reduce costs or in situations where continuous quality control is not possible. In this method, a certain number of products are randomly selected from a production batch, and their quality parameters are measured. The obtained values are then compared with the permissible standards specified in the regulatory documentation. If the number of products with non-conforming indicators in the sample does not exceed the established threshold, the entire batch is considered to meet the requirements. Otherwise, the batch is considered to be defective, which can lead to significant economic costs. Therefore, analyzing the impact of measurement errors on the accuracy of sample results is undoubtedly relevant.

AIM is to investigate the influence of measurement errors on the reliability of the results of sample control obtained by the method of simulation (statistical) modeling.

METHODS: For sample measurement control, it is proposed to use the method of simulation modeling, with the application of a stochastic model of measurement errors of the controlled parameters.

RESULTS: Modeling the control procedure on a computer allowed not only to investigate the dependence of the sought-for risks on the standard deviations (SD) of the normal distribution of measurement errors, but also to determine the size of the

controlled sample that would ensure the required acceptable risk level for the customer.

CONCLUSIONS: The results obtained in the work show that the considered simulation models of measuring multi-parameter control allow not only to investigate the influence of measurement errors on the reliability of the results of selective control, but also to develop effective control plans based on economic and mathematical models

Keywords: measurement error; simulation modeling; controlled sample size.

To cite this article

Samarov EK, Ionchenkova YaYu. Analysis of the impact of measurement errors on the accuracy of sample measurement results. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025

Accepted for publication

ВВЕДЕНИЕ

При массовом выпуске серийной продукции нередко применяют выборочный измерительный контроль качества готовых изделий, используемый для снижения затрат или при невозможности сплошного контроля, например, из-за повреждения подвергаемых контролю изделий.

В практике выборочного контроля часто применяется следующая методика. Если в исследуемой партии количество забракованных экземпляров не превышает предельного значения, то партия считается соответствующей требованиям заказчика, следовательно, выполняется допустимый риск заказчика $R_з^д$. Если в выборке число забракованных изделий оказывается выше установленного *браковочного числа*, партия признаётся несоответствующей и подлежит отклонению. В случае, если количество дефектных изделий находится между приемочным и браковочным числами, схема контроля может предусматривать дополнительные действия, например увеличение объёма выборки, проведение повторного отбора и повторного контроля и др. Такие элементы, как объём выборки, пороговые значения браковки и приёмки, а также последовательность действий при различных результатах контроля, формируют структуру статистического плана контроля качества [1–6]. Этот подход, базирующийся на методах математической статистики, формально не учитывает возможность ошибок при оценке пригодности изделий, предполагая точность измерений. Однако на практике измерения, выполняемые в процессе контроля, сопровождаются погрешностями, что может привести к ошибкам первого рода (отбраковка годного изделия) и второго рода (принятие бракованного изделия) [7]. В результате число изделий, признанных дефектными на основе измерений, не совпадает с реальным числом негодных, так же как и количество принятых изделий может не отражать фактическое число соответствующих требованиям. Это ставит под сомнение корректность применения существующих стандартов [2, 3] в ситуациях, где влияние

Accepted for publication

измерительных погрешностей существенно, особенно в условиях многопараметрического контроля.

ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НА ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты были получены для простой схемы выборочного контроля, при которой контролю подвергается случайная выборка изделий (из большой партии) и потребителю поступают как признанные годными изделия из выборки, так и не подвергающиеся контролю изделия.

Достоверность результатов контроля оценивалась через риски, присущие как заказчику ($R_{З}$), так и производителю ($R_{П}$). В данном контексте риск заказчика $R_{З}$ представляет собой среднюю долю дефектных изделий, ошибочно признанных годными и переданных потребителю. В свою очередь, риск производителя $R_{П}$ отражает ожидаемую долю качественных изделий, ошибочно отбраковываемых в процессе контроля [7]. Был проведён анализ ситуации, в которой качество изделия описывалось с помощью 30 ($I = 30$) независимых параметров X_i, каждый из которых подчиняется нормальному распределению с математическим ожиданием, совпадающим с его номинальным значением $X_{i.н}$, и стандартным отклонением σ_i. Значения параметров каждого изделия должны укладываться в допустимый диапазон $X_{i.н} \pm \Delta_i$ для всех i от 1 до 30. При этом вероятность выхода одного параметра за установленные пределы допусков составляла 0,27%. Для изделия в целом (при 30 подлежащих контролю независимых параметрах) вероятность негодности, хотя бы по одному параметру, составляла 7,795 [7].

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Чтобы решить поставленную задачу методом имитационного моделирования, необходимо принять стохастическую модель погрешности

Accepted for publication

измерений контролируемых параметров. Считают, что погрешность измерений каждого параметра — случайная величина со среднеквадратическим отклонением $\sigma_{И}$ (СКО). Обычно полагают, что распределения погрешности измерений одномодальное и симметричное. Если отсутствует дополнительная информация, то при моделировании контроля естественно использовать распределение, при котором риски $R_{З}$ и $R_{П}$ максимальны.

В табл. 1 представлены результаты оценки рисков со стороны потребителя и изготовителя, полученные для разных объемов проверяемой выборки, где НР — нормальное распределение; РР — равномерное распределение; ТР — треугольное распределение. Расчеты были выполнены для объема партии изделий $N = 10^6$. Для простоты было принято, что $X_{i.\,н} = 0$, $\sigma_i = \sigma = 1$, а $\Delta_i = \Delta = \pm 3$ (для $i = 1, \ldots, 30$).

Анализ представленных в табл. 1 результатов показывает, что наибольшие значения риска заказчика получены при равномерном распределении случайной погрешности измерений, так же как и наибольшие значения риска производителя (если $\sigma_{И} \leq 0{,}3$). Полученные результаты позволяют заключить следующее: при недостаточности исходных данных для построения достоверной модели погрешностей измерений, в качестве аппроксимации рационально использовать равномерно распределённую случайную величину.

Моделирование процедуры контроля на компьютере позволило исследовать зависимость искомых рисков от СКО нормально распределенной погрешности измерений.

На рис. 1 приведены зависимости $R_{З}(\sigma_{И})$ при объемах выборки, составляющих 100% (сплошной контроль) и 50% объема партии.

Результаты получены для двух СКО параметров: $\sigma_i = \sigma = 1$ и $\sigma_i = \sigma = 0{,}9$. СКО измерений $\sigma_{И}$ нормировано относительно СКО контролируемых параметров σ_i. Искомые графики получены при значениях СКО погрешности

Accepted for publication

измерений, равных 0; 0,1; 0,2; 0,3 и 0,4.

При отсутствии контроля («нулевом» объеме контролируемой выборки) было получено: если $\sigma_i = \sigma = 1$, то значение $R_з$ =7,78%, а если $\sigma_i = \sigma = 0{,}9$, то $R_з$ =2,56%, что соответствует средним долям негодных изделий в партии. При стопроцентной выборке и отсутствии измерительной погрешности (т. е. при нулевом значении ошибки), все изделия, признанные годными в процессе контроля, действительно соответствуют требованиям, и риск заказчика $R_з$ равен нулю.

Таблица 1. Оценки рисков заказчика и производителей

$\sigma_и$	Выборка, %	Риски заказчика $R_з$ для распределения			Риски производителя $R_п$ для распределения		
		НР	РР	ТР	НР	РР	ТР
0,1	0	7,78	7,74	7,79	0	0	0
	20	6,49	6,46	6,48	0,25	0,26	0,23
	40	5,15	5,19	5,14	0,47	0,51	0,48
	60	3,78	3,87	3,80	0,73	0,76	0,730,96
	80	2,38	2,45	2,39	0,94	1,02	1,22
	100	0,89	0,97	0,91	1,19	1,28	
0,2	20	6,64	6,64	6,64	0,59	0,61	0,59
	40	5,48	5,46	5,38	1,17	1,21	1,18
	60	4,13	4,26	4,17	1,75	1,83	1,77
	80	2,85	2,99	2,90	2,33	2,44	2,33
	100	1,51	1,64	1,54	2,89	3,03	2,92
0,3	20	6,79	6,78	6,74	1,08	1,09	1,09
	40	5,64	5,71	5,66	2,14	2,14	2,15
	60	4,49	4,59	4,48	3,25	3,21	3,24
	80	3,23	3,40	3,29	4,35	4,33	4,29

Accepted for publication

	100	1,94	2,13	1,98	5,39	5,40	5,38
0,4	20	6,81	6,88	6,81	1,79	1,74	1,77
	40	5,81	5,84	5,80	3,59	3,48	3,53
	60	4,73	4,84	4,71	5,39	5,17	5,28
	80	3,50	3,68	3,52	7,18	6,97	7,00
	100	2,28	2,49	2,33	9,02	8,65	8,82

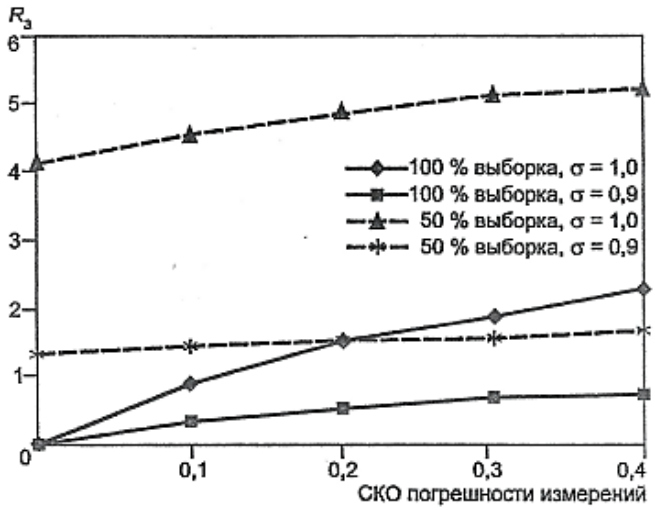

Рис. 1. Зависимость $R_з$ от СКО погрешности измерений при $\sigma = 1$ и 0,9.

Однако с увеличением СКО погрешности измерений возрастает вероятность необнаружения дефектных изделий, что, в свою очередь, приводит к увеличению риска заказчика.

Используя результаты, аналогичные приведенным на рис. 1, можно найти значение СКО погрешности измерений и объем контролируемой выборки, которые обеспечат требуемое допустимое значение $R_з^д$ (при известном значении СКО параметров). Эти результаты также позволяют сделать вывод, что наиболее эффективным способом снижения риска заказчика является снижение СКО контролируемых параметров изделий, т. е. совершенствование технологии производства.

Если объем контролируемой выборки значительно меньше 100%, то при

Accepted for publication

выборочном контроле по описанной схеме даже при отсутствии погрешности измерений (при $\sigma_{И} = 0$) риск заказчика может быть существенным. Этот риск обратно пропорционален объему контролируемой выборки (при $\sigma_i = \sigma = 1$ может достигать, как отмечено выше, 7,79%). Зависимость $R_{П} = f(\text{СКО})$, для различных объемов выборки, приведена на рис. 2.

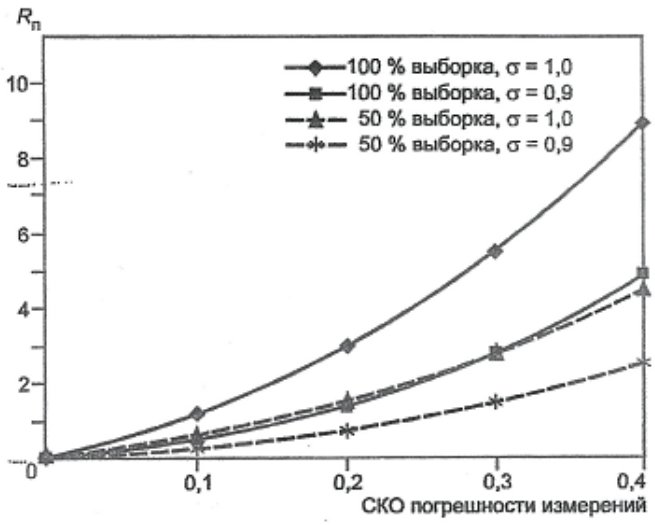

Рис. 2. Зависимость $R_{П} = f(\text{СКО})$ погрешности измерений.

Если погрешность измерений равна нулю, то $R_{П} = 0$ независимо от объема контролируемой выборки, так как ни одно изделие не будет ошибочно забраковано. Из рис. 2 можно оценить собственные потери производителя из-за ошибок контроля первого рода (при известной погрешности измерений и объеме контролируемой выборки). Отметим, что объем контролируемой выборки при моделировании можно принять любым в интервале 0–100%.

Если необходимо обеспечить заданное значение $R_з^д$, а улучшить технологию производства и повысить точность измерений при контроле технически невозможно (или экономически нецелесообразно), то имеется следующий выход. Можно принять более жесткий контрольный допуск $\Delta_k = k\Delta$ (k — коэффициент корреляции допуска, k <1) [5]. Если изделия будут браковаться при превышении любым контролируемым параметром значения

Accepted for publication

Δ_k, то риск заказчика снизится (но, очевидно, значительно возрастет риск производителя).

На рис. 3 и 4 представлены зависимости, аналогичные приведенным в [7], но полученные при Δ_k=2,7, т. е. k=0,9. Пусть $R_з^д$ =1%, $\sigma = 1$, $\sigma_и = 0{,}2$. Из рис. 3 и 4 следует, что значение $R_з \leq 1\%$ при объеме контролируемой выборки более 92% всей партии. При объеме выборки 100% $R_з = 0{,}13\%$, но при этом $R_п$ возрастает до 13–14%. При $\sigma_и = 0{,}1$ уже при объеме контролируемой выборки около 90% всей партии $R_з = 0{,}94\%$, а $R_п$ при этом составляет 10,6%.

Таким образом, при фиксированном значении СКО измерений можно, изменяя коэффициент k и размер контрольной выборки, достичь заданного уровня риска заказчика и допустимого уровня риска для производителя.

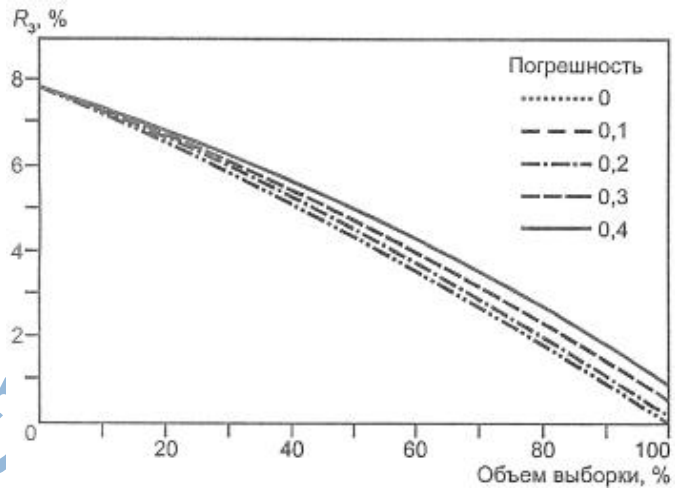

Рис. 3. Зависимость $R_з$ от объема выборки и СКО погрешности ($\Delta_k = 0{,}9\Delta$).

Access publication

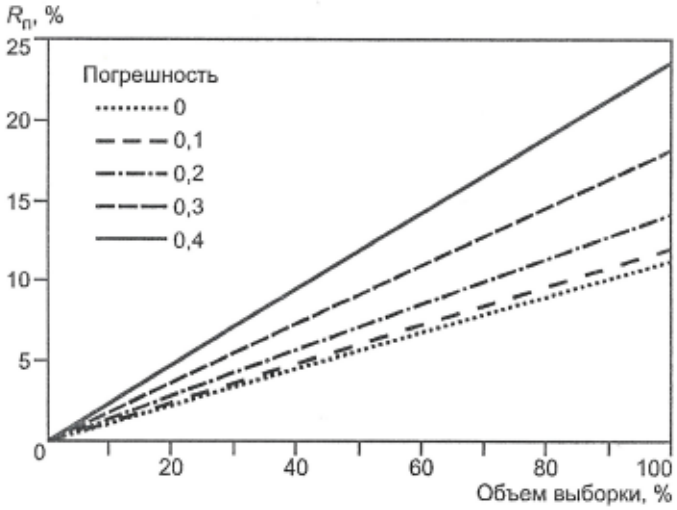

Рис. 4. Зависимости $R_п$ от объема выборки и СКО погрешности ($\Delta_k = 0,9\Delta$).

Имитационные модели представляется возможным использовать и при планировании более сложных схем выборочного контроля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотренные и проанализированные имитационные модели измерительного многопараметрического контроля позволяют исследовать влияние погрешности измерений на достоверность результатов выборочного контроля и разрабатывать эффективные планы контроля. Для оптимизации затрат, связанных с организацией и проведением выборочного контроля партии изделий, целесообразно разработать экономико-математическую модель, позволяющую это реализовать.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Самаров Е.К. — концепция и дизайн исследования; экспертная оценка, утверждение финальной версии; Ионченкова Я.Ю. — сбор и обработка материалов; поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; редактирование текста рукописи, создание изображений. Авторы одобрили версию для публикации, а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой ее части.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Accepted for publication

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре.

ADDITIONAL INFO

Authors' contribution. Samarov E.K. — concept and design of the study; expert assessment, approval of the final version; Ionchenkova Y.Y. — collection and processing of materials; search for publications on the topic of the article, writing the text of the manuscript; editing the text of the manuscript, creating images. All the authors approved the version of the draft to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality. In preparing this work, the authors did not use previously published material (text, illustrations, or data).

Generative AI. Generative AI technologies were not used in the preparation of this article.

Provenance and peer-review: This work was submitted to the journal on the authors' own initiative and processed under the standard procedure.

Accepted for publication

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лапидус В.А., Розно М.И., Глазунов А.В. и др. Статистический контроль качества продукции на основе принципа распределения приоритетов. М.: Финансы и статистика, 1991.

2. ГОСТ Р ИСО 3951-1-2015. Статистические методы. Приемочный

контроль качества по количественному признаку. Общие требования. Часть 1. Требования к одноступенчатым планам на основе предельно допустимого уровня несоответствий (AQL) при контроле последовательных партий по единственной характеристике и единственному AQL. М.: Стандартинформ, 2015.

3. ГОСТ Р 50779.53-98 Статистические методы. Приемочный контроль качества по количественному признаку для нормального закона распределения. Часть 1. Стандартное отклонение известно. М.: Стандартинформ, 1998.

4. Розно М.И. Обеспечение гарантии качества на стадиях создания продукции. Методы «встроенного качества» // Методы менеджмента качества. 2019. спецвыпуск. С.19-25. EDN: YSBHZZ

5. Лапидус В.А., Касторская Л.В., Серов М.Е., Воинова Е.Г. Гарантии качества продукции, процессов и СМК в вертикально интегрированных структурах // Методы менеджмента качества. 2018. № 5. С. 36-43. EDN: XMGXYD

6. Лапидус В.А., Касторская Л.В., Серов М.Е., Воинова Е.Г. Принципы и подходы управления в системе гарантии качества // Методы менеджмента качества. 2018. № 7. С. 36-42. EDN: XRUESL

7. Перспективное планирование качества продукции и план управления. APQP. Ссылочное руководство. Н. Новгород: ООО СМЦ «Приоритет», 2012.

REFERENCES

1. Lapidus VA, Rozno MI, Glazunov AV, et al. *Statistical Product Quality Control Based on the Priority Distribution Principle.* Moscow: Finansy i Statistika; 1991.

2. GOST R ISO 3951-1—2015. Statistical Methods. Quantitative Acceptance Quality Control. General Requirements. Part 1. Requirements for single-step plans based on the allowable level of nonconformity (AQL) when controlling consecutive batches based on a single characteristic and a single AQL. Moscow: Standartinform; 2015.

Accepted for publication

3. GOST R 50779.53-98 Statistical methods. Acceptance quality control by quantitative characteristics. General requirements. Part 1. Standard deviation is known. Moscow: Standartinform; 1998.

4. Rozno MI. Ensuring quality assurance at the stages of product creation. Methods of "built-in quality". *Methods of quality management*. 2019;special issue:19-25. EDN: YSBHZZ

5. Lapidus VA, Kastorskaya LV, Serov ME, Voinova EG. Quality Assurance of Products, Processes, and Quality Management Systems in Vertically Integrated Structures. *Quality Management Methods*. 2018;5:36-43. EDN: XMGXYD

6. Lapidus VA, Kastorskaya LV, Serov ME, Voinova EG. Principles and Approaches of Quality Assurance Management. *Quality Management Methods*. 2018;7:36-42. EDN: XRUESL

7. *Forward Planning of Product Quality and Management Plan. APQP. Reference Guide*. Nizhny Novgorod: LLC SMC "Priority"; 2012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Самаров Евгений Кимович*, д-р техн. наук; SPIN-код: 1077-2126; e-mail: omega511@mail.ru	**Evgeny K. Samarov,** Dr. Sci. (Engineering), SPIN-код: 1077-2126; e-mail: omega511@mail.ru
Ионченкова Яна Юрьевна; SPIN-код: 9326-9364; e-mail: ionchenkova_yana@mail.ru	**Yana Yu. Ionchenkova**; SPIN-код: 9326-9364; e-mail: ionchenkova_yana@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Accepted for publication