

Научная статья

УДК 629.7


URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182561>

ОПТИМИЗАЦИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ НАДЕЖНОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ ЕДИНИЧНОГО И МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Марат Шамильевич Насибулин¹, Валерий Борисович Рудаков² 

^{1,2} НИИ КС им. А.А. Максимова – филиал ГКНПЦ им. М.В. Хруничева,

Королев, Московская область, Россия

^{1,2} info.niiks@khrunichev.ru 

Аннотация. Космическая техника (КТ), изделия которой являются уникальными, дорогостоящими и эксплуатируются в экстремальных условиях, обязана соответствовать заявленным требованиям к техническим параметрам и выполнить все поставленные перед ней задачи в космическом пространстве. При отказе любого элемента, составляющего систему КТ, задачи не будут выполнены, возможны потери и жертвы. Во избежание подобных ситуаций при производстве КТ необходимо уделять пристальное внимание контролю надежности как системы в целом, так и ее отдельных элементов.

Контроль надежности, как и любое другое мероприятие в процессе создания КТ, требует оптимизации. Чем больше проверок надежности, тем выше будут затраты, но ниже вероятность отказа КТ. Однако, как и при любом производстве, необходимо оптимизировать расходы на поддержание нужного уровня качества, то есть четко понимать, когда возможная минимизация затрат не будет сказываться на достоверности проведенного контроля надежности системы КТ.

Данную задачу возможно решить с помощью математического аппарата теории вероятностей. Поскольку контроль параметров и надежности систем КТ носит выборочный характер, а измерения имеют погрешности, необходимо математически определить такой объем контроля (выборки), порядок проведения и прекращения контроля, при которых вероятность ошибок, возникающих при контроле и влияющих на принятие решений по его результатам, будет минимальной.

В статье предложен новый подход к проведению входного контроля при производстве сложных систем КТ: на первом этапе осуществляется контроль технических параметров системы КТ, влияющих на надежность, и лишь затем проводится контроль выполнения заданных требований к ее надежности, с учетом полученной на первом этапе информации о состоянии параметров системы.

Двухэтапный подход позволяет оптимизировать достоверность контроля надежности системы КТ, то есть повысить вероятность принятия правильных решений о выполнении заданных требований к надежности системы КТ.

Ключевые слова: космическая техника, система КТ, производство КТ, контроль параметров системы КТ, надежность системы КТ, риски 1-го и 2-го рода, экономические затраты, экономические потери

Для цитирования: Насибулин М.Ш., Рудаков В.Б. Оптимизация достоверности контроля надежности космической техники в условиях единичного и мелкосерийного производства // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 3. С. 61–71. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182561>

Original article

OPTIMIZATION OF THE SPACE TECHNOLOGY RELIABILITY CONTROL VERACITY UNDER CONDITIONS OF SINGLE AND SMALL-SCALE PRODUCTION

Marat Sh. Nasibulin¹, Valerii B. Rudakov² ✉

^{1,2} A.A. Maksimov Space Systems Research Institute – branch of Khronichev State Research and Production Space Center, Korolev, Moscow region, Russia
^{1,2} info.niiks@khronichev.ru ✉

Abstract

Permanent complication of the space technology systems production process associated with the range of tasks extension in the outer space and the increasing requirements to the technical parameters and reliability of these systems require economic costs increase for the space technology systems production and control. Besides, the space technology production specifics consist in the small-scale production, characterized by the lack of statistical information for reliable confirming the high requirements in the documentation for the technical parameters and reliability of the space technology, which makes complicates application of conventional control methods.

The article proposes methodological foundations for fidelity optimizing of statistical control of the space technology reliability under conditions of the small-scale production, ensuring the requirements of scientific novelty and practical significance while the space technology work out.

The problem of the step-by-step economically optimal control of complex space technology systems while their production is under consideration.

At the first stage, monitoring of the system technical parameters, which affect reliability, is being performed.

The performed analysis revealed the following specifics of the technical parameters of space technology systems monitoring after their manufacturing:

- nominal values and corresponding tolerances are specified in the technical documentation for each parameter of the system;
- while each parameter monitoring probabilistic errors occur, which may result in taking a proper parameter (staying within the tolerance limits) for an improper one, and defective parameter (out of the tolerance limits) for the proper one.

These errors are stipulated by errors of the parameters measuring means. When controlling parameters sampling (nomenclature) of a particular system, probabilistic errors occur as well from the aggregate of its parameters, which are associated with previous errors and which already relate to the system as a whole. The case of the entire set of system parameters control is a special one when the nomenclature of controlled parameters coincides with their aggregate.

At the second stage, monitoring of the specified requirements to the system reliability fulfillment is being performed.

The information about the state of the system parameters should be herewith accounted for when its reliability monitoring.

Reliability control of the space technology system is being performed as follows: acceptance tests of the system are conducted for a certain period of time, and according to their results, the probability of trouble-free operation is being determined. Further, this characteristic is being compared with the specified requirements, and if the requirements are met, the system is being accepted valid, otherwise the system is being discarded (system completion, re-inspection, etc. are performed).

The results allow proceeding directly to the optimal reliability determining of statistical control of the space technology systems reliability, with account for the results of the previous control of its technical parameters, which corresponds to the optimal plans of their control. This will lead to the reliability increase of system reliability control, which is especially important under conditions of the small-scale production.

For the first time, mathematical dependencies for the optimal reliability of system reliability control determining with account for the results of previous control of its technical parameters have been developed.

Keywords: space technology (ST), ST system, ST production, ST system parameters control, ST system reliability, first and second kind risks, economic costs, economic losses

For citation: Nasibulin M.Sh., Rudakov V.B. Optimization of the Space Technology Reliability Control veracity under Conditions of Single and Small-Scale Production. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 3, pp. 61-71. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182561>

Введение

Контроль надежности любой сложной и наукоемкой техники играет важнейшую роль при ее разработке, производстве и эксплуатации.

Космическая техника (КТ) в силу ее высокой стоимости и сложности разработки, испытаний и производства, уникальности наукоемких образцов, повышенных требований к надежности, экстремальных условий эксплуатации особенно нуждается в стабильной системе, позволяющей достичь максимальной достоверности статистического контроля надежности при единичном и мелкосерийном производстве.

Процесс производства систем КТ постоянно усложняется, что связано с внедрением новых технологий для выполнения более широкого спектра задач в космическом пространстве, повышением требований, предъявляемых к техническим параметрам и надежности таких систем. Затраты на производство и проведение контроля систем КТ увеличиваются. Экономическая целесообразность имеет громадное значение практически на всех этапах процесса производства любой продукции, и КТ не является исключением. Также необходимо учитывать, что производство систем КТ – мелкосерийное, а производство систем, выполняемых по коммерческим заказам – единичное, в связи со спецификой выполняемых задач. То есть условия производства систем КТ характеризуются недостатком статистической информации для достоверного подтверждения высоких требований, предъявляемых в документации к их техническим параметрам и надежности. В этих условиях использование традиционных методов контроля вызывает значительные трудности.

Проблема контроля качества и надежности КТ нашла отражение в трудах многих российских ученых, например Шевченко С.Н. [1–4], Богданова Ю.В., Ульянова С.В., Пузаня Д.А. [5], Гечи В.Я., Барбула Р.Н., Сидняева Н.И., Бутенко Ю.И. [6], Дорохина Ю.Н., Круглова И.А., Кругловой Ю.В. [7], Колобова А.Ю., Петрова Ю.А. [8], Кривопалова Д.М., Давыдова А.Е., Барбула Р.Н. [9], Кудрявцева С.В., Розовенко В.М. [10], Ламзина В.В., Ламзина В.А. [11], Макарова В.М. [12, 13], Милованова В.А. [14], Соцкова И.А. [15]. За рубежом вопросу контроля надежности КТ также уделяют пристальное внимание как ученые [16, 17], так и практики [18]. Однако в этих исследованиях вопросы достовер-

ности контроля выполнения заданных требований не затрагивались.

Следует обратить внимание, что в технической документации на создание систем КТ, как правило, задается математическая величина вероятности безотказной работы системы при заданной доверительной вероятности, которой определяется достоверность контроля выполнения заданных требований. Однако задание конкретного значения доверительной вероятности в каждом практическом случае не всегда является однозначным.

Авторы данной статьи исходят из принципа определения статистической достоверности – достоверность определяется на основе статистических расчетов рисков 1-го и 2-го рода и является аналогом доверительной вероятности.

Цель статьи – оптимизация достоверности статистического контроля для исключения вероятности принятия неправильных решений, которые могут привести к отказам КТ при ее эксплуатации в космическом пространстве. Рассматривается двухуровневая иерархическая структура: сначала проводится контроль технических параметров системы, влияющих на надежность, а на втором этапе проводится контроль выполнения заданных требований к ее надежности при приемо-сдаточных испытаниях, с учетом полученной на первом этапе информации о состоянии параметров системы.

В настоящий момент при входном производственном контроле систем КТ используется несколько подходов: выборочный контроль по ГОСТам и другим нормативным документам; сплошной контроль только основных параметров систем. При этом статистическая информация, накопленная по результатам предшествующего контроля элементов, узлов и агрегатов, не учитывается, из-за чего снижается достоверность контроля надежности КТ и увеличиваются риски ее отказа.

Разработанный авторами двухэтапный метод позволяет снизить риски принятия неправильных решений, касающихся надежности систем КТ, при оптимальных технологических и экономических затратах, то есть позволяет повысить оптимальную достоверность контроля надежности системы КТ, вероятность принятия правильных решений о выполнении заданных требований к надежности системы КТ, которая соответствует оптимальным планам их контроля на предприятии-изготовите-

ле, что особенно важно в условиях единичного и мелкосерийного производства уникальных и дорогостоящих изделий.

Предложенный метод находится в стадии научной разработки и пока на практике не применяется.

Такой подход может быть использован при оптимизации планирования и проведения различных видов приемочного контроля сложных систем КТ по иерархии их производства, а также при разработке документов (отраслевых и государственных стандартов, регламентов), устанавливающих порядок организации и методологию проведения контроля при производстве сложных объектов ракетно-космической техники.

Данная статья является составной частью системного исследования [20–23], проводимого авторами.

1. Контроль технических параметров системы КТ

Контроль параметров систем КТ в условиях производства в общем случае носит выборочный характер и проводится различными средствами, которые имеют определенные погрешности измерений. Эти погрешности приводят к ошибкам при контроле, из-за которых могут быть приняты неправильные решения по его результатам, что может повлечь за собой серьезные экономические потери, величина которых определяется тем, на каком этапе производства сложной системы КТ эти ошибки обнаружены. Появление таких ошибок носит вероятностный характер и должно учитываться с помощью математического аппарата теории вероятностей.

В зависимости от тех правил, в соответствии с которыми организован контроль, говорят о том или ином плане его проведения. То есть задача планирования статистического контроля заключается в определении совокупности правил, которые устанавливают объем контроля (выборки), а также порядок проведения и прекращения контроля.

В работе [22] было указано, что высокие требования, предъявляемые к системам КТ в части их технических параметров, вызывают необходимость использования при контроле статистических планов вида $(n, \alpha, \beta, c = 0)$ с приемочным числом (контрольный норматив) $c = 0$, которое не допускает ни одного отклонения технических параметров от заданных допусков и ни одного отказа при контроле надежности системы. Другими характеристиками плана контроля здесь являются:

n – объем контроля, который при контроле технических параметров имеет смысл количества (номенклатуры) параметров, подлежащих контролю;

α – безусловная вероятность ошибки 1-го рода (забраковать годный параметр, который находится

в заданном допуске);

β – безусловная вероятность принять дефектный параметр (вышедший за пределы заданного допуска).

При этом риски 1-го и 2-го рода α и β характеризуют вероятности принятия ошибочных решений при контроле технических параметров и обусловлены погрешностями средств их измерения.

На практике, как правило, контроль параметров проводится с использованием технических средств, по результатам контроля определяется, находится ли каждый параметр в заданном допуске или он вышел за его пределы.

Проведенный анализ [22] показал, что специфика контроля технических параметров систем КТ после изготовления заключается в следующем:

– для каждого параметра системы в технической документации заданы номинальные значения и соответствующие допуски;

– при контроле каждого параметра возникают вероятностные ошибки, в результате которых годный параметр (находящийся в пределах допуска) можно принять за дефектный (вышедший за пределы допуска), а дефектный – за годный. Эти ошибки обусловлены погрешностями средств измерения параметра;

– при контроле выборки (номенклатуры) параметров конкретной системы из всей совокупности ее параметров также возникают вероятностные ошибки, которые связаны с предыдущими ошибками и которые уже относятся к системе в целом.

Наблюдается следующая взаимосвязанная иерархия вероятностных ошибок: ошибки при контроле каждого технического параметра и ошибки при контроле номенклатуры параметров системы КТ из их совокупности. Вероятности этих ошибок характеризуются соответствующими рисками 1-го и 2-го рода.

Для учета этой взаимосвязанной иерархии определим некоторые понятия.

Условимся под *годным* понимать параметр, находящийся в пределах заданного допуска, под *дефектным* – параметр, вышедший за пределы допуска.

Годной будем считать систему, у которой годны (находятся в пределах допусков) все параметры и, соответственно, *дефектной* – систему, у которой дефектен хотя бы один параметр.

Предположим, что показатель работоспособности системы КТ полностью определяется совокупностью N_c независимых друг от друга параметров $\{x_r\}$, $r = 1, N_c$. На каждый параметр в технической документации на систему в целом задано его номинальное значение и допуск (двухсторонний или односторонний).

Тогда для готовой системы КТ [19] оптимальный план контроля ее технических параметров

$x_c^*, \alpha_c^*, \beta_c^*, c = 0$ можно определить, минимизируя целевую функцию, которая включает в себя потери, связанные с принятием ошибочных решений, и затраты на контроль.

Эта целевая функция [20, 22] вытекает из анализа статистической структуры контроля, теоретически обоснована и имеет следующий вид:

$$C_c = C_{1c}\alpha_c + C_{2c}\beta_c + \sum_{r=1}^{x_c} C_{1r}, \quad (1)$$

где $C_{1c}\alpha_c$ – математическое ожидание экономических потерь за счет браковки годной системы;

$C_{2c}\beta_c$ – математическое ожидание экономических потерь за счет приемки дефектной системы;

x_c – неизвестная номенклатура параметров системы КТ, подлежащих обязательному контролю, из совокупности параметров N_c ;

C_{1r} – математическое ожидание затрат на контроль r -го параметра системы, $r = 1, N_c$.

Риски 1-го и 2-го рода α_c и β_c включают в себя метрологические характеристики параметров и погрешности средств их измерения для системы в целом и определяются по формулам [19]:

$$\alpha_c = \prod_{r=1}^{N_c} \frac{\alpha_{\Pi r}}{\alpha_{yr}} \left[1 - \prod_{r=1}^{x_c} (1 - \alpha_{yr}) \right]; \quad (2)$$

$$\beta_c = \prod_{r=1}^{x_c} \left[\frac{\alpha_{\Pi r}}{\alpha_{yr}} (1 - \alpha_{yr}) + \beta_{\Pi r} \right] - \prod_{r=1}^{N_c} \frac{\alpha_{\Pi r}}{\alpha_{yr}} \prod_{r=1}^{x_c} (1 - \alpha_{yr}), \quad (3)$$

где $\alpha_{\Pi r}$, $\beta_{\Pi r}$ и α_{yr} – метрологические риски, которые возникают при контроле каждого r -го параметра системы [20] и определяются по заданным в документации значениям допусков на каждый из N_c параметров системы и их номинальным значениям, с использованием таблиц [24] при известных плотностях распределений технических параметров и ошибок их измерений средствами контроля.

В работах [12, 22] показано, что в зависимости от изменения величины x_c номенклатуры контролируемых параметров риски 1-го и 2-го рода изменяются в противоположных направлениях: с увеличением x_c риск 1-го рода увеличивается, а риск 2-го рода уменьшается. Следовательно, целевая функция (1) имеет минимум при определенном значении $x_c = x_c^*$ номенклатуры технических параметров системы КТ, подлежащей обязательному контролю. Этому же значению соответствуют оптимальные риски, которые определяются на основе (2) и (3).

В работе [12] установлено следующее свойство рисков 1-го и 2-го рода.

Если система принимается без контроля либо контроль уже проведен и система принята для дальнейшего использования в соответствии с ее назначением, то:

- риск 1-го рода α становится равным нулю;
- риск 2-го рода β совпадает с вероятностью того, что система является дефектной (не удовлетворяет заданным требованиям к техническим параметрам).

Это замечательное свойство позволяет учесть результаты предшествующего контроля технических параметров, как будет показано ниже, при планировании приемочного контроля надежности системы КТ после ее изготовления на предприятии.

Проведенные исследования позволили разработать алгоритм определения величины x_c^* . Основное содержание этого алгоритма заключается в следующем [12, 21, 22]:

1. По заданным в документации значениям допусков на каждый из N_c параметров и их номинальным значениям, с использованием таблиц [24], определяются безусловные и условные метрологические риски 1-го и 2-го рода $\alpha_{\Pi r}$, $\beta_{\Pi r}$ и α_{yr} , возникающие при контроле каждого r -го параметра системы, $r = 1, N_c$, при известных плотностях распределений технических параметров и ошибок их измерений средствами контроля.

2. Вычисляется значение C_c^0 целевой функции (1) в точке $x_c = 0$, т. е. когда ни один параметр системы из совокупности N_c параметров не контролируется, по формуле

$$C_c^0 = C_{2c}\beta_c = C_{2c} \left[1 - \prod_{r=1}^{N_c} P(A_r) \right],$$

где $P(A_r) = \alpha_{\Pi r}/\alpha_{yr}$ – вероятность того, что r -й параметр системы является годным (находится в пределах заданного допуска).

3. Определяются значения C_c^r целевой функции (1) для каждого r -го параметра отдельно. Эти значения C_c^r вычисляются для всей совокупности параметров N_c .

4. Среди всех N_c параметров системы КТ в число параметров x_c , подлежащих обязательному контролю, включают только те параметры, для которых выполняются неравенства: $C_c^0 > C_c^r$, для всех $r = 1, N_c$, где C_c^0 – значение целевой функции при $x_c = 0$, т. е. когда ни один параметр из N_c не контролируется; r – номер контролируемого параметра из совокупности N_c параметров системы; C_c^r – значение целевой функции системы КТ при контроле r -го параметра.

Физический смысл такого подхода заключается в том, что, поскольку параметры независимы, на

контроль выводятся только те параметры, контроль которых приводит к уменьшению значений целевой функции экономических потерь (1).

Полученное значение номенклатуры x_c контролируемых параметров системы КТ будет оптимальным $x_c = x_c^*$, ему соответствуют оптимальные значения рисков α_c^* и β_c^* , которые вычисляются на основе формул (2) и (3):

$$\alpha_c^* = \prod_{r=1}^{N_c} \frac{\alpha_{\Pi r}}{\alpha_{yr}} \left[1 - \prod_{r=1}^{x_c^*} (1 - \alpha_{yr}) \right]; \quad (4)$$

$$\beta_c^* = \prod_{r=1}^{x_c^*} \left[\frac{\alpha_{\Pi r}}{\alpha_{yr}} (1 - \alpha_{yr}) + \beta_{\Pi r} \right] - \prod_{r=1}^{N_c} \frac{\alpha_{\Pi r}}{\alpha_{yr}} \left[1 - \prod_{r=1}^{x_c^*} (1 - \alpha_{yr}) \right], \quad (5)$$

т. е., определяется оптимальный план контроля технических параметров системы КТ $x_c^*, \alpha_c^*, \beta_c^*, c = 0$, который включает в себя: оптимальную номенклатуру технических параметров, подлежащих обязательному контролю, оптимальные риски 1-го и 2-го рода и приемочное число плана контроля $c = 0$ [22].

Риски 1-го и 2-го рода (4) и (5), как известно [21], связаны с достоверностью контроля формулой

$$D_c^* = 1 - (\alpha_c^* + \beta_c^*), \quad (6)$$

которая представляет собой вероятность принятия правильного решения при контроле технических параметров.

2. Контроль надежности системы КТ

Как отмечалось, контроль надежности системы КТ является следующим этапом. После успешного контроля технических параметров системы проводятся приемо-сдаточные испытания системы КТ, в процессе которых контролируется выполнение заданных требований к ее надежности.

Рассмотрим наиболее общий случай биномиального контроля надежности [13, 23], при котором требования к показателю надежности системы задаются в технической документации в виде вероятности безотказной работы $P_{\text{ТР}}$ за заданное время t_3 .

Введем следующие определения [22].

Годной будем считать систему, для которой выполняется условие $P \geq P_{\text{ТР}}$.

Если $P < P_{\text{ТР}}$, то система является *дефектной*. Здесь P – истинное значение показателя надежности.

Контроль надежности системы КТ осуществляется следующим образом: проводятся приемо-сдаточные испытания системы в течение определенного времени, по их результатам на-

ходится вероятность безотказной работы. Далее эта характеристика по установленным правилам сравнивается с заданными требованиями, и если требования выполняются, то система принимается как годная, в противном случае система бракуется (проводятся доработка системы, повторный контроль и др.).

При этом контроль надежности, так же как и контроль технических параметров, осуществляется с использованием статистических планов вида $(n, \alpha_n, \beta_n, c = 0)$ с приемочным числом $c = 0$, которое не допускает ни одного отказа при контроле. Здесь индекс «н» означает надежность.

То есть характеристиками планов контроля являются [22, 23]:

n – объем контроля (количество циклов контроля за заданное время и т. д.), α_n – безусловная вероятность ошибки 1-го рода (забраковать годную систему, удовлетворяющую требованиям к надежности), β_n – безусловная вероятность ошибки 2-го рода (принять дефектную систему, не удовлетворяющую требованиям к надежности).

Риски 1-го и 2-го рода α_n и β_n характеризуют безусловные вероятности принятия ошибочных решений при контроле надежности системы и обусловлены стохастическим характером проявления отказов как случайных событий и ограниченным объемом контроля, в том числе и времени испытаний.

Тогда для готовой системы КТ [23] оптимальный план контроля ее надежности $x_c^*, \alpha_c^*, \beta_c^*, c = 0$, можно определить, минимизируя целевую функцию, которая включает в себя потери, связанные с принятием ошибочных решений, и затраты на контроль надежности. Эта целевая функция вытекает из анализа статистической структуры контроля надежности и имеет следующий вид [20–22]:

$$C_n = C_{1n} \alpha_n + C_{2n} \beta_n + C_{1Kn} n, \quad (7)$$

где $C_{1n} \alpha_n$ – математическое ожидание потерь из-за браковки годной системы, т. е. удовлетворяющей заданным требованиям к надежности (α_n – безусловная вероятность забраковать годную систему, т. е. риск 1-го рода);

$C_{2n} \beta_n$ – математическое ожидание потерь из-за приемки дефектной системы, т. е. не удовлетворяющей заданным требованиям к надежности (β_n – безусловная вероятность принять дефектную систему, т. е. риск 2-го рода);

C_{1n}, C_{2n}, C_{1Kn} – средние потери и затраты (математические ожидания) на контроль системы в течение времени испытаний;

n – объем контроля, подлежащий определению (количество циклов контроля системы, связанное с временем ее испытаний, и т. д.).

Для биномиального плана контроля риски 1-го и 2-го рода, входящие в (7), представляют собой безусловные вероятности, которые определяются на основе использования распределения, которое сопряжено биномиальному плану контроля и которым является бета-распределение. Они имеют следующий вид [20, 23]:

$$\alpha_H = \int_{P_{TP}}^1 (1 - P^n) f(P) dP = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_{P_{TP}}^1 (1 - P^n) P^{b-1} (1 - P)^{a-1} dP; \quad (8)$$

$$\beta_H = \int_0^{P_{TP}} P^n f(P) dP = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_0^{P_{TP}} P^{n+b-1} (1 - P)^{a-1} dP, \quad (9)$$

где $\Gamma(\dots)$ – полная гамма-функция или интеграл Эйлера второго рода;

P_{TP} – заданное значение вероятности безотказной работы системы;

P – истинное значение показателя надежности системы, трактуется как случайная величина (в байесовском смысле), имеющая плотность бета-распределения

$$f(P) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} P^{b-1} (1 - P)^{a-1}. \quad (10)$$

Здесь использован известный результат [21, 23]: сопряженным распределением по отношению к биномиальному плану контроля является априорное бета-распределение.

Параметры a и b априорного бета-распределения определяются по накопленной статистической информации о надежности по формулам [19]:

$$a = N_{\Sigma} (1 - \hat{P}) + 1; \quad (11)$$

$$b = (N_{\Sigma} \hat{P} + 1), \quad (12)$$

где \hat{P} – реализовавшаяся оценка максимального правдоподобия показателя надежности системы, $\hat{P} = 1 - m_{\Sigma}/N_{\Sigma}$;

m_{Σ} – количество отказавших систем, определенное по предварительно накопленной информации о результатах контроля и испытаний совокупности N_{Σ} систем-аналогов на предшествующих этапах контроля (или количество отказов одной системы при N_{Σ} испытаниях). При этом если накопленная информация о надежности статистически неоднородна, то привлекаются методы обработки такой

информации, изложенные, например, в [19]. Поэтому значения m_{Σ} и N_{Σ} в общем случае могут быть нецелочисленными. Для их определения, наряду с самой оценкой максимального правдоподобия, используется и среднее квадратическое отклонение случайной величины P относительно реализовавшейся оценки

$$\sigma_P[P] = \frac{1}{N_{\Sigma} + 2} \sqrt{\frac{(1 + N_{\Sigma} \hat{P})(1 + N_{\Sigma} - N_{\Sigma} \hat{P})}{N_{\Sigma} + 3} (2\hat{P} - 1)^2}.$$

В работе [22] показано, что риски 1-го и 2-го рода в зависимости от объема контроля n изменяются в противоположных направлениях, поэтому целевая функция (7) должна иметь минимум, которому соответствует оптимальный статистический план контроля надежности системы КТ $x_c^*, \alpha_c^*, \beta_c^*, c = 0$. Разработан алгоритм определения оптимальных планов контроля надежности.

В работе [23] на основе известной процедуры усечения плотности распределения (10) и формул (8), (9) получены выражения для усеченных рисков 1-го и 2-го рода, которые имеют более широкую область практического применения:

$$\alpha_H = \int_{P_{TP}}^{P_2} (1 - P^n) f(P) dP = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_{P_{TP}}^{P_2} (1 - P^n) P^{b-1} (1 - P)^{a-1} dP \quad (13)$$

$$\beta_H = \int_{P_1}^{P_{TP}} P^n f(P) dP = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_{P_1}^{P_{TP}} P^{n+b-1} (1 - P)^{a-1} dP, \quad (14)$$

где P_1 и P_2 определяются по формулам

$$P_1 = m[P_1] = \frac{b}{b+a} \frac{I_{P_{TP}}(b+1, a)}{I_{P_{TP}}(b, a)}; \quad (15)$$

$$P_2 = m[P_2] = \frac{b}{b+a} \frac{[1 - I_{P_{TP}}(b+1, a)]}{[1 - I_{P_{TP}}(b, a)]}; \quad (16)$$

$m[P_1]$ и $m[P_2]$ – математические ожидания; плотность бета-распределения усечена по области $[P_1, P_2]$, а $I_{P_{TP}}(\dots)$ – неполная бета-функция [19].

Выражения (15) и (16) получены на основе представления гипотетического множества изделий (гипотетическая генеральная совокупность), которое условно было разделено на два подмножества: подмножество изделий, удовлетворяющих

требованиям к надежности (годное подмножество), где P_2 является математическим ожиданием; подмножество изделий, не удовлетворяющих требованиям к надежности (дефектное подмножество), где P_1 является математическим ожиданием.

При этом риски 1-го и 2-го рода, соответствующие оптимальному плану контроля надежности системы с учетом (13)–(16), определяются по формулам:

$$\alpha_n^* = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_{P_{TP}}^{P_2} (1 - P^{n^*}) P^{b-1} (1 - P)^{a-1} dP; \quad (17)$$

$$\beta_n^* = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_{P_1}^{P_{TP}} P^{n^*+b-1} (1 - P)^{a-1} dP, \quad (18)$$

где P_1 и P_2 вычисляются по выражениям (15) и (16), а величины a и b – по формулам (11) и (12).

Риски 1-го и 2-го рода, возникающие при контроле надежности системы КТ, так же как и в случае контроля технических параметров (выражение (6)), связаны с достоверностью контроля формулой

$$D_n^* = 1 - \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \left\{ \int_{P_{TP}}^{P_2} (1 - P^{n^*}) P^{b-1} \times \right. \\ \left. \times (1 - P)^{a-1} dP + \int_{P_1}^{P_{TP}} P^{n^*+b-1} (1 - P)^{a-1} dP \right\}, \quad (19)$$

которая представляет собой вероятность принятия правильного решения при контроле надежности системы.

Изложенные результаты [21] позволяют непосредственно перейти к определению оптимальной достоверности статистического контроля надежности систем КТ с учетом результатов предшествующего контроля ее технических параметров, которая соответствует оптимальным планам их контроля.

Конкретизируем задачу согласно работе [21]. Пусть после изготовления некоторой системы КТ проводится контроль некоторой оптимальной номенклатуры x_c^* ее технических параметров, подлежащих обязательному контролю и влияющих на надежность системы, из совокупности N_c независимых друг от друга параметров $\{x_r\}$, $r = \overline{1, N_c}$, на которые в технической документации заданы допуски. При этом, если какой-либо параметр или группа параметров не находится в пределах заданного допуска, система подвергается регулировке, повторному контролю, доработкам и т. д. Но в конечном итоге система принимается как годная для дальнейшего контроля выполнения заданных требований к ее надежности РТР при приемо-сдаточных испытаниях.

Введем в рассмотрение следующие случайные события [21].

A_{Π} – система является годной (все параметры системы находятся в пределах заданных допусков); \bar{A}_{Π} – противоположное событие (дефектная система, у которой дефектен хотя бы один параметр);

B – система по результатам контроля будет принята для дальнейшего проведения контроля ее надежности; \bar{B} – противоположное событие (система будет забракована).

По определению безусловных рисков 1-го и 2-го рода [23]:

$$\alpha_c = P(A_{\Pi})P(\bar{B} / A_{\Pi}); \quad (20)$$

$$\beta_c = P(\bar{A}_{\Pi})P(B / \bar{A}_{\Pi}). \quad (21)$$

Среди введенных событий по условию задачи [21] событие B является достоверным, поскольку система по результатам контроля ее параметров принята и вероятность этого события $P(B) = 1$. При этом событие \bar{B} является невозможным, поэтому $P(\bar{B}) = 0$, поскольку система принята. В результате имеем $P(\bar{B} / A_{\Pi}) = 0$ и $P(B / \bar{A}_{\Pi}) = 1$, откуда следует (20), что $\alpha_c = 0$ и $\beta_c = P(A_{\Pi})$, или с учетом выражения (21) риск 2-го рода будет определяться формулой (5)

$$\beta_c^* = \prod_{r=1}^{x_c^*} \left[\frac{\alpha_{\Pi r}}{\alpha_{yr}} (1 - \alpha_{yr}) + \beta_{\Pi r} \right] - \\ - \prod_{r=1}^{N_c} \frac{\alpha_{\Pi r}}{\alpha_{yr}} \prod_{r=1}^{x_c^*} (1 - \alpha_{yr}).$$

Таким образом, по результатам контроля технических параметров системы КТ после ее принятия по оптимальному плану для дальнейшего контроля выполнения заданных требований к надежности могут реализоваться только два события [21]: либо событие \bar{A}_{Π} с вероятностью β_c^* , либо событие A_{Π} с вероятностью $(1 - \beta_c^*)$.

Перейдем к следующему этапу контроля системы КТ – контролю ее надежности – и рассмотрим момент t_k окончания контроля.

По-прежнему будем считать годной систему, удовлетворяющую заданным требованиям к надежности, а дефектной – не удовлетворяющую заданным требованиям. Учитывая эти определения, введем в рассмотрение следующие события:

A_n – система с точки зрения ее надежности является годной; \bar{A}_n – противоположное событие;

B – система по результатам контроля ее надежности будет принята; \bar{B} – противоположное событие.

По определению риски 1-го и 2-го рода, возникающие при контроле надежности, связаны с вероятностями наступления следующих событий:

$$\alpha_n = P(A_n \bar{B}) \text{ и } \beta_n = P(\bar{B} A_n). \quad (22)$$

Поскольку этапы контроля технических параметров системы КТ и контроля ее надежности независимы друг от друга, то возможные события A_{Π} с вероятностью $(1 - \beta_c^*)$ и \bar{A}_{Π} с вероятностью β_c^* , как результат предшествующего параметрического контроля системы, могут наступить вместе со следующими сложными событиями: $A_{\Pi} A_n B$; $A_{\Pi} A_n \bar{B}$; $\bar{A}_{\Pi} A_n B$; $\bar{A}_{\Pi} A_n \bar{B}$. Эти события образуют полную группу, поэтому сумма вероятностей их наступления

$$P(A_{\Pi} A_n B) + P(A_{\Pi} A_n \bar{B}) + P(\bar{A}_{\Pi} A_n B) + P(\bar{A}_{\Pi} A_n \bar{B}) = 1. \quad (23)$$

Другие события $\bar{A}_{\Pi} A_n B$; $\bar{A}_{\Pi} A_n \bar{B}$; $\bar{A}_{\Pi} A_n B$ и $A_{\Pi} \bar{A}_n \bar{B}$ являются тождественными событиями, то есть одно событие влечет за собой другое (или является следствием), а именно: наступление событий $\bar{A}_{\Pi} A_n B$ и $\bar{A}_{\Pi} A_n \bar{B}$; влечет за собой наступление события $A_{\Pi} A_n B$; (или реализация события $\bar{A}_{\Pi} A_n B$; включает в себя события $\bar{A}_{\Pi} A_n B$ и $\bar{A}_{\Pi} A_n \bar{B}$; наступление событий $\bar{A}_{\Pi} A_n B$ и $A_{\Pi} A_n \bar{B}$ влечет за собой наступление события $A_{\Pi} A_n B$.

Это объясняется следующим. Если хотя бы один параметр системы дефектный, то система тоже является дефектной (не удовлетворяет требованиям к надежности). То есть событие «параметр дефектный» влечет за собой событие «система дефектная», и наоборот, если система является дефектной (не удовлетворяет требованиям к надежности), то хотя бы один параметр системы является дефектным. Именно поэтому выполняется равенство (23), которое включает в себя полную группу событий.

Выводы

Реализация сложного события ($A_{\Pi} A_n \bar{B}$) и сложного события ($\bar{A}_{\Pi} \bar{A}_n B$) относится к рискам 1-го и 2-го рода в соответствии с их определениями. Отсюда, с учетом независимости этапов контроля параметров и надежности системы, получаем следующие выражения для рисков 1-го и 2-го рода:

$$\alpha^* = P(A_{\Pi}) \alpha_n^* = (1 - \beta_c^*) \alpha_n^*; \quad (24)$$

$$\beta^* = P(\bar{A}_{\Pi}) \beta_n^* = \beta_c^* \beta_n^* \quad (25)$$

или, учитывая выражения (24) и (25), а также (17) и (18), получаем

$$\alpha^* = (1 - \beta_c^*) \alpha_n^* = (1 - \beta_c^*) \times \left\{ \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_{P_2}^{P_{TP}} (1 - P^{n^*}) P^{b-1} (1 - P)^{a-1} dP \right\}; \quad (26)$$

$$\beta^* = \beta_c^* \beta_n^* = \beta_c^* \left\{ \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \times \int_{P_1}^{P_{TP}} P^{n^*+b-1} (1 - P)^{a-1} dP \right\}, \quad (27)$$

где величина оптимального риска 2-го рода β_c^* , соответствующего оптимальному плану контроля технических параметров системы КТ, определяется на основе формулы (5) с использованием методов метрологии; вероятности P_1 и P_2 , определяющие пределы интегрирования для оптимальных усеченных рисков 1-го и 2-го рода, соответствующих оптимальному плану контроля надежности системы КТ, вычисляются по формулам (15) и (16).

Тогда, на основе формул (6) и (19), (26) и (27), достоверность контроля надежности системы КТ с учетом результатов предшествующего контроля ее технических параметров, соответствующая оптимальным планам их контроля, будет равна

$$D^* = 1 - (\alpha^* + \beta^*) = 1 - \left[(1 - \beta_c^*) \alpha_n^* + \beta_c^* \beta_n^* \right] \quad (28)$$

или

$$D^* = 1 - \left\{ (1 - \beta_c^*) \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \times \int_{P_2}^{P_{TP}} (1 - P^{n^*}) P^{b-1} (1 - P)^{a-1} dP + \beta_c^* \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_{P_1}^{P_{TP}} P^{n^*+b-1} (1 - P)^{a-1} dP \right\}. \quad (29)$$

Выражение (29) представляет собой оптимальную достоверность, то есть вероятность принятия правильных решений о выполнении заданных требований к надежности системы КТ с учетом результатов предшествующего контроля ее технических параметров, которая соответствует оптимальным планам их контроля на предприятии-изготовителе.

Поскольку величины β_c^* и $(1 - \beta_c^*)$, входящие в выражения (28) и (29), меньше единицы, то можно сделать важный вывод: проведение предшествующего контроля технических параметров систем КТ повышает достоверность контроля их надежности в условиях единичного и мелкосерийного производства.

Список источников

1. Шевченко С.Н. Интервальное оценивание надежности космических аппаратов в процессе наземной экспериментальной отработки // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2021. № 1(51). С. 21–23.

2. Шевченко С.Н. Метод оценки и прогнозирования надежности ракет в условиях совмещения этапов их экспериментальной отработки // Космонавтика и ракетостроение. 2021. № 4(121). С. 61–65.
3. Шевченко С.Н. Методы оптимального планирования экспериментальной отработки межконтинентальных баллистических ракет и ракет космического назначения. — М.: Сам полиграфист, 2022. — 47 с.
4. Шевченко С.Н. Методы оценки и подтверждения показателей надежности систем ракетной и ракетно-космической техники по результатам ускоренных и форсированных испытаний. — М.: Передовые специальные технологии и материалы, 2019. — 75 с.
5. Богданов Ю.В., Ульянов С.В., Пузань Д.А. Способ оценки вероятностей аварий изделий ракетно-космической техники с использованием стохастических сетевых моделей возникновения и развития аварийных ситуаций. Патент RU 2723575 С1. Бюл. № 17, 16.06.2020.
6. Геча В.Я., Барбул Р.Н., Сидняев Н.И., Бутенко Ю.И. Методология оценки надежности космических аппаратов при проектной и конструкторской проработке // Надежность. 2019. Т. 19. № 2. С. 3–8. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-2-3-8
7. Дорохин Ю.Н., Круглов И.А., Круглова Ю.В. Обеспечение качества изделий ракетно-космической техники. Проблемные вопросы организации входного контроля и предложения по их решению. 2021. URL: <https://tmnpro.ru/node/652>
8. Колобов А.Ю., Петров Ю.А. Методика оценки вероятности безотказной работы разгонных блоков по результатам эксплуатации с использованием предварительной информации // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 4/62. С. 75–79.
9. Кривопалов Д.М., Давыдов А.Е., Барбул Р.Н. Методика оценки показателей надежности по результатам летных испытаний и эксплуатации // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2023. Т. 193. № 2. С. 7–13. URL: <https://jurnal.vniiem.ru/text/193/7-13.pdf>
10. Кудрявцев С.В., Розовенко В.М. К вопросу создания информационно-диагностической системы контроля технического состояния образцов космической техники // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 1(59). С. 74–79. DOI: 10.26162/LS.2023.59.1.009
11. Ламзин В.В., Ламзин В.А. Методика комплексной оценки рациональных параметров и программы развития космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 62–77. DOI: 10.34759/vst-2021-4-62-77
12. Макаров В.М. Модель и алгоритм иерархического контроля технических параметров автоматических космических аппаратов при автономных и комплексных испытаниях // Информационно-технологический вестник. 2019. № 2(20). С. 34–49.
13. Макаров В.М. Рациональные статистические планы контроля надежности изделий ракетно-космической техники при их отработке // Космонавтика и ракетостроение. 2019. № 2(107). С. 104–117.
14. Милованов В.А. Проведение расчетов надежности космических аппаратов с использованием статистических закономерностей проявления отказов приборов, блоков и узлов в процессе эксплуатации // Космическая техника и технологии. 2021. № 4(35). С. 53–65.
15. Соцков И.А. Выбор проектных параметров разгонного блока при его экспериментальной отработке // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 62–69. DOI: 10.34759/vst-2023-2-62-69
16. Фортескую П., Старка Дж., Суинерда Г. (ред.). Разработка систем космических аппаратов / Перевод с английского Гульельмо Альетти и др. — М.: Альпина Паблишер, 2015. — 764 с.
17. Ramgopal K.R. Reliability and Quality Assurance of Space Systems // IETE Technical Review. 1993. Vol. 10. No. 5, pp. 515–516. DOI: 10.1080/02564602.1993.11437379
18. NASA Reliability Preferred Practices for Design & Test. A scientific study of the problems of digital engineering for space flight systems, with a view to their practical solution. — NASA Office of Logic Design. NASA Technical Memorandum 4322, 2010.
19. Волков Л.И., Рудаков В.Б. Статистический контроль иерархических систем. — М.: СИП РИА, 2002. — 355 с.
20. Рудаков В.Б., Мороз А.П. Статистический контроль надежности систем ракетно-космической техники с последовательной структурой на этапе наземной отработки // Информационно-технологический вестник. 2021. № 4(30). С. 49–61. DOI: 10.21499/2409-1650-30-4-49-61
21. Рудаков В.Б., Макаров М.И. Повышение достоверности контроля надежности систем ракетно-космической техники при наземной отработке на основе учета результатов предшествующего контроля их технических параметров // Информационно-технологический вестник. 2022. № 3(33). С. 106–117.
22. Насибулин М.Ш., Рудаков В.Б. Анализ статистических структур контроля технических параметров и надежности для оптимизации планов выборочного контроля космической техники в условиях мелкосерийного производства // Информационно-технологический вестник. 2023. № 3(37). С.103–117.
23. Макаров М.И., Мироничев В.А., Рудаков В.Б. Математическая модель иерархического контроля надежности бортовых систем космических аппаратов с изменяющейся структурой при их наземной отработке // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2019. Т. 6. № 3. С. 66–75.
24. Сычев В.И., Храменков В.Н., Шкутин А.Д. Основы метрологии военной техники. — М.: Воениздат, 1993. — 396 с.

References

1. Shevchenko S.N. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2021, no. 1(51), pp. 21-23.
2. Shevchenko S.N. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2021, no. 4(121), pp. 61-65.
3. Shevchenko S.N. *Metody optimal'nogo planirovaniya eksperimental'noi otrabotki mezhkontinental'nykh ballisticheskikh raket i raket kosmicheskogo naznacheniya* (Methods of optimal planning of experimental testing of intercontinental ballistic missiles and space rockets). Moscow, Sam poligrafist, 2022, 47 p.
4. Shevchenko S.N. *Metody otsenki i podtverzhdeniya pokazatelei nadezhnosti sistem raketnoi i raketno-kosmicheskoi tekhniki po rezul'tatam uskorennykh i forsirovannykh ispytaniy* (Methods for evaluating and confirming reliability indicators of rocket and rocket and space technology systems based on the results of accelerated and accelerated tests). Moscow, Peredovye spetsial'nye tekhnologii i materialy, 2019, 75 p.
5. Bogdanov Yu.V., Ul'yanov S.V., Puzan' D.A. *Patent RU 2723575 C1*, 16.06.2020
6. Gecha V.Ya., Barbul R.N., Sidnyaev N.I., Butenko Yu.I. *Nadezhnost'*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 3-8. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-2-3-8
7. Dorokhin Yu.N., Kruglov I.A., Kruglova Yu.V. *Obespechenie kachestva izdelii raketno-kosmicheskoi tekhniki. Problemnye voprosy organizatsii vkhodnogo kontrolya i predlozheniya po ikh resheniyu*. 2021. URL: <https://tmnpo.ru/node/652>
8. Kolobov A. Yu., Petrov Yu.A. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2023, no. 4/62, pp. 75-79.
9. Krivopalov D.M., Davydov A.E., Barbul R.N. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM*, 2023, vol. 193, no. 2, pp. 7-13. URL: <https://jurnal.vniiem.ru/text/193/7-13.pdf>
10. Kudryavtsev S.V., Rozovenko V.M. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2023, no. 1(59), pp. 74-79. DOI: 10.26162/LS.2023.59.1.009
11. Lamzin V.V., Lamzin V.A. Integrated assessment technique for the earth remote probing spacecraft rational parameters and development program. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 62-77. DOI: 10.34759/vst-2021-4-62-77
12. Makarov V.M. *Informatsionno-tekhnologicheskii vestnik*, 2019, no. 2(20), pp. 34-49.
13. Makarov V.M. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2019, no. 2(107), pp. 104-117.
14. Milovanov V.A. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2021, no. 4(35), pp. 53-65.
15. Sotskov I.A. The upper stage project parameters selection while its experimental work-out. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 62-69. DOI: 10.34759/vst-2023-2-62-69
16. Fortescue P., Swinerd G., Stark J. (eds) *Spacecraft systems engineering*. 4th ed. John Wiley & Sons, Ltd, 2011, 1728 p.
17. Ramgopal K.R. Reliability and Quality Assurance of Space Systems. *IETE Technical Review*, 1993, vol. 10, no. 5, pp. 515-516. DOI: 10.1080/02564602.1993.11437379
18. *NASA Reliability Preferred Practices for Design & Test. A scientific study of the problems of digital engineering for space flight systems, with a view to their practical solution*. NASA Office of Logic Design. NASA Technical Memorandum 4322, 2010.
19. Volkov L.I., Rudakov V.B. *Statisticheskii kontrol' ierarkhicheskikh system* (Statistical control of hierarchical systems), Moscow, SIP RIA, 2002, 355 p.
20. Rudakov V.B., Moroz A.P. *Informatsionno-tekhnologicheskii vestnik*, 2021, no. 4(30), pp. 49-61. DOI: 10.21499/2409-1650-30-4-49-61
21. Rudakov V.B., Makarov M.I. *Informatsionno-tekhnologicheskii vestnik*, 2022, no. 3(33), pp. 106-117.
22. Nasibulin M.Sh. Rudakov V.B. *Informatsionno-tekhnologicheskii vestnik*, 2023, no. 3(37), pp. 103-117.
23. Makarov M.I., Mironichev V.A., Rudakov V.B. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2019, vol. 6, no. 3, pp. 66-75.
24. Sychev V.I., Khramenkov V.N., Shkitin A.D. *Osnovy metrologii voennoi tekhniki* (Fundamentals of military equipment metrology). Moscow, Voenizdat, 1993, 396 p.

Статья поступила в редакцию 21.02.2024; одобрена после рецензирования 27.05.2024; принята к публикации 29.05.2024.
The article was submitted on 21.02.2024; approved after reviewing on 27.05.2024; accepted for publication on 29.05.2024.