 https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-4-9

Методология обнаружения и удаления аномальных значений в статистических исследованиях

Methodology for detecting and removing outliers in statistical studies

Сидняев Н.И.[1*], **Баттулга Э.**[1]
Nikolai I. Sidnyaev[1*], **Enkhjargal Battulga**[1]
[1]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация*
[1]*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*
[*]*Sidn_ni@mail.ru*

Сидняев Н.И.

Баттулга Э.

Резюме. *В статье приведена расчетная методика обнаружения и исключения аномальных значений. Показано, что ее эффективность зависит от объема априорной информации об исследуемом процессе. Предложенный метод использован для случаев, когда процесс стационарный и имеет гауссовский закон плотности распределения вероятности. При анализе нестационарных случайных процессов существующие методы и алгоритмы опираются на то, что аномальная составляющая является аддитивной и априорно известны характеристики аномальных значений. В работе использовалась теория статистических решений, которая позволяет формализовать алгоритмы проверок и выбрать критерий обнаружения аномальных значений. Предложены как параметрические, так и непараметрические методы. В первом случае необходимо располагать априорными сведениями как о функции полезной составляющей, так и о законе распределения аномальной составляющей процесса, а также и о его параметрах. Постулируется, что использование непараметрических методов обработки требует значительно меньше априорной информации, но их эффективность определяется параметрами обработки, которые, в свою очередь, зависят от функции полезной и закона распределения аномальной составляющих процесса. Отмечено, что выброс может в действительности оказаться одним из экстремальных значений распределения вероятности случайной величины. Изложены проблемы неопределенности информации по входным данным при расчетах классическими методами. Исследован характер влияния внешних факторов на надежность и степень учета факторов в существующих методах. Представлены методики оценки ресурса исследуемых объектов, среди которых важное место занимают методики, основанные на использовании контрольных карт. Показано, что размах оказывается более удобной для подсчета мерой рассеяния данных, чем стандартное отклонение. Нанесение на контрольную карту наряду с математическим ожиданием размаха выборки позволяет легче заметить аномальное изменение. Размах служит грубой мерой скорости изменения переменной, за которой ведется наблюдение, и его значение может выйти за контрольные пределы на карте размаха и подать сигнал аномалии значительно раньше, чем изменение среднего, которое при этом еще может находиться в заданных контрольных пределах.*

Abstract. *The paper presents a calculation method for detecting and eliminating outlying values. It is shown that its effectiveness depends on the amount of a priori information on the examined process. The proposed method is used for cases whereas the process is stationary and has a Gaussian probability density law. When analysing non-stationary random processes, the existing methods and algorithms rely on the fact that the outlying component is additive and the characteristics of the outlying values are known a priori. The work used the statistical decisions theory that allows formalising the verification algorithms and selecting a criterion for detecting outlying values. Both parametric and non-parametric methods were proposed. In the first case, it is required to have a priori information both on the function of the useful component and on the distribution law of the outlying component of the process, as well as its parameters. It is postulated that the use of non-parametric processing methods requires significantly less a priori information, but their effectiveness is defined by the processing parameters that, in turn, depend on the function of the useful and the distribution law of the outlying components of the process. It is noted that an outlier may prove to be one of the extreme values of the probability distribution of a random variable. The authors outline the problems of ambiguity of input data in case of classical computing. The paper examines the way the external factors affect the dependability and the degree to which such factors are taken into consideration in the existing methods. Methods for assessing the life of the examined items are presented, among which control chart-based methods hold a prominent place. It is shown that the range proves to be a more convenient measure for data dispersion calculation than the standard deviation.*

Plotting the range of sample on a control chart along with the expectation makes it easier to notice an anomaly. The range is a rough measure of the rate of change of the monitored variable and its value may exceed the control limits on the range chart and inform of an anomaly much earlier than the change in the mean that may still be within the specified control limits.

Ключевые слова: *статистика, методики, аномальность, выброс, обработка, контрольная карта.*
Keywords: *statistics, methods, anomaly, outlier, processing, control chart.*

Формат цитирования: *Сидняев Н.И., Баттулга Э. Методология обнаружения и удаления аномальных значений в статистических исследованиях // Надежность. 2024. №1. С. 4-9. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-4-9*
For citation: *Sidnyaev N.I., Battulga E. Methodology for detecting and removing outliers in statistical studies. Dependability 2024;1: 4-9. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-1-4-9*

Поступила: *20.04.2023* / **После доработки:** *25.01.2024* / **К печати:** *15.03.2024*
Received on: *20.04.2023* / **Revised on:** *25.01.2024* / **For printing:** *15.03.2024*

Введение

Традиционный подход к производству – это изготовление продукции и контроль ее качества, а также отбраковка единиц продукции, не соответствующих установленным требованиям. Данный подход не экономичен и часто приводит к большим потерям, так как построен на методе проверки уже готовой продукции. Более эффективна стратегия предупреждения потерь, позволяющая избежать производства непригодной продукции и предполагающая сбор информации о самих процессах, ее анализ и эффективные действия по отношению к полученным данным, а не к продукции. Одним из инструментов, позволяющих осуществить данную стратегию, является контрольная карта, то есть графическое средство, использующее статистические подходы, ее важность в управлении производственными процессами показана в работах [1–4]. Цель контрольных карт – обнаружить неестественные изменения в данных, полученных путем анализа повторяющихся процессов, и дать критерии для обнаружения отсутствия статистической управляемости. За время развития методов статистического контроля качества продукции, процессов и услуг было создано большое количество контрольных карт [2], большинство из которых показало свою эффективность. В работе использованы наиболее распространенные классические карты, приемочные контрольные карты и контрольные карты кумулятивных сумм [5–8].

Целью настоящей работы является модификация уже существующего метода обнаружения аномальных значений, которая заключается в выборе правила определения коэффициента при задании порогового значения.

Модификация предлагаемого в работе способа обнаружения аномальных значений предполагает введение адаптации порогового значения относительно коэффициента при априорно фиксированном значении вероятности ошибки первого рода. Подход к проблеме исследования существенно отличающихся наблюдений зависит от поставленных целей [8–10]. Так, например, если исследователя интересует вопрос, является ли некоторое значение аномальным, причем возможно, с целью исследования условий, которые могут приводить к подобным экстремальным наблюдениям, то с получением критерия для таких наблюдений и заканчивается рассмотрение. Если же, с другой стороны, исследователь хочет исключить выбросы для того, чтобы получить более точные оценки некоторых параметров совокупности, например, среднего значения, то его интересует не только критерий для аномальных наблюдений, но также и оценивание параметров, следующее за применением критерия. По этой причине возникает необходимость рассмотреть возможное смещение оценки и ее дисперсию, опираясь на использование критерия для выбросов. Если после применения этого критерия выборочные данные должны быть использованы для проверки гипотезы относительно некоторого параметра совокупности, то для исследователя представляется важным не только сам критерий для выявления выбросов, но также и мощность других критериев для проверки гипотезы [10–12]. Критерии для выбросов применяют, преследуя одну из следующих целей:

1. Выровнять наблюдения перед анализом (отбрасывание выбросов);
2. Убедиться, что аномальные значения присутствуют, что указывает на необходимость пересмотра процедуры получения данных;
3. Выделить наблюдения, которые могут представлять особый интерес именно из-за их экстремальности.

В статье кратко рассмотрены критерии первого типа. В случае классического подхода к решению задачи обнаружения аномальных точек необходимо предположить, что выборочные наблюдения производятся над случайной, нормально распределенной величиной, образовать соответствующую статистику для обнаружения выбросов, чувствительную к резким отклонениям такого рода, найти ее распределение при нулевой гипотезе, утверждающей, что все наблюдения принадлежат одной и той же нормально распределенной совокупности, и затем отвергнуть гипотезу, если окажется маловероятным, чтобы вычисления статистика появилась в случайной выборке. Построение таких статистик обычно основывается на том, что исследователь по выборке результатов эксперимента может заметить не согласующееся с остальными наблюдение. Статистики, лежащие в основе критерия обнаружения выбросов, которые называются статистиками экстремальных отклонений, содержат разность между экстремальным значением и выборочным средним значением, а также среднее квадратическое отклонение или его оценку, полученную по рассматриваемой выборке и (или) по независимой выборке. Теория и практические методы отбрасывания выбросов разработаны слабо [2], то есть отбрасывание аномальных значений на чисто статистической основе было и остается весьма опасной процедурой. Само их присутствие может являться доказательством того, что исследуемая совокупность в действительности отличается от предполагаемой.

1. Обнаружение и исключение аномальных значений

Рассмотрим критерий, предложенный в работе [2]. Пусть дана некоторая выборка наблюдений $X_1, X_2, \ldots, X_n$ ($n \geq 3$), которая по предположению является случайной выборкой для случайной величины X, распределенной по нормальному закону с параметрами μ_X и σ_X^2. Вычислим разности $Y_i = X_i - \bar{X}$, $i = 1, 2, \ldots, n$, где $\bar{X} = \sum_{i=1}^{n} \frac{X_i}{n}$. Если одно из значений X_i выделить, то выборочное среднее для оставшихся наблюдений будет равно:

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} \frac{X_j}{v} = \bar{X} - \frac{Y_i}{v},\ v = n - 1. \tag{1}$$

Если выделить несколько значений $X_{i_1}, X_{i_2}, \ldots, X_{i_r}$, то выборочное среднее для оставшихся наблюдений равно

$$\bar{X} - \frac{Y_{i_1}}{n-r} - \frac{Y_{i_2}}{n-r} - \ldots - \frac{Y_{i_r}}{n-r} = \bar{X} - \frac{Y_{i_1} + Y_{i_2} + \ldots + Y_{i_r}}{n-r}. \tag{2}$$

При использовании индекса M для обозначения наблюдения, которому соответствует максимальная разность $Y_M = X_M - \bar{X}$, правило, предложенное в работе [2], состоит в следующем (для случая, когда дисперсия σ_X^2 неизвестна): при заданном значении параметра c и выборочной дисперсии s_X наблюдение X_M отбрасывается, если $|Y_M| > c \cdot s_X$. В противном случае наблюдение X_M оставляется. Для выборок большого объема, если наблюдение X_M отброшено, оставшаяся выборка рассматривается как вновь полученная и для нее анализ можно продолжить. Каждый раз величина σ_X оценивается по наблюдениям, оставшимся после отбрасывания X_M. Величина c может изменяться с изменением объема выборки и ее можно выразить неявно через критерий, имеющий распределение Стьюдента t с $v - v_0 - 1$ степенями свободы уровня $1 - \alpha/2$:

$$\left[\frac{nc^2\left(v + v_0 - 1\right)}{v\left(v + v_0 - \frac{nc^2}{v}\right)}\right]^{1/2} \approx t_{1-\alpha/2}, \tag{3}$$

где $t_{1-\alpha/2}$ – квантиль распределения Стьюдента уровня $1 - \alpha/2$ для $v + v_0 - 1$ степеней свободы, а также можно использовать приближенное выражение, имеющее распределение Фишера F в явном виде:

$$c \approx \left(\frac{v}{n}\right)^{1/2} \left[\frac{3F_{1-q}}{1 + \left(\frac{3F_{1-q} - 1}{v + v_0}\right)}\right]^{1/2}, \tag{4}$$

где $v = n - 1$, v_0 – любое другое число дополнительных степеней свободы, которое связано с оценкой σ_X^2 по выборке объема, не равного n, F_{1-q} – квантиль распределения Фишера уровня $1 - q$.

С помощью выражения (4) можно провести проверку следующим образом. Если никакие значения не были отброшены, умножим допустимое относительное приращение σ_X^2, «премию», на величину v/n. Обозначим это произведение через уровень значимости q и найдем соответствующую верхнюю процентную точку для отношения дисперсий F_{1-q} при трех и $v + v_0 - 1$ степенях свободы. Вычислим значение c по выражению (4) и применим критерий для X_M. Например, если $n = 4$, $v = 3$ и $v/n = 0{,}75$, для положительного решения 0,02 имеем уровень значимости $q = 0{,}02 \cdot 0{,}75 = 0{,}015$. Ищем значение $F_{1-0{,}015}$ при 3 и 3 степенях свободы числителя и знаменателя соответственно. Оно равно $F_{1-q} = 9{,}28$. Тогда

$$c = \left(0,75\right)^{1/2} \left(\frac{3F_{0,95}}{1 + \left(3F_{0,95} - 1\right)/3}\right)^{1/2} = 1,449.$$

Наблюдение X_M следует отбросить, если $|Y_M| > 1{,}449 \cdot s_X$.

Рассмотрим ситуацию использования критерия для обнаружения выброса. Допустим, дан ряд значений: $X_1 = 23{,}2$, $X_2 = 23{,}4$, $X_3 = 23{,}5$, $X_4 = 24{,}1$, $X_5 = 25{,}5$. Проверим, является ли значение X_5 значительно выделяющимся и следует ли выбросить его из данной выборки? Для этого вычисляем $\bar{X} = 23{,}9$, а затем $Y_5 = X_5 - \bar{X} = 25{,}5 - 23{,}94 = 1{,}6$, $s_X = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \bar{X}\right)^2 n_i} = 0{,}77$, где $\sum_{i=1}^{n} n_i = 1$. Для $\alpha = 0{,}05$, $v = 4$ и $n = 5$ из выражения (3) имеем:

$$\left[\frac{5c^2 \cdot 3}{3\left(3 - 4c^2/3\right)}\right]^{1/2} = 2,776$$

и решаем уравнение относительно c, получаем $c = 1{,}449$. Согласно критерию $|1{,}6| > 1{,}449 \cdot 0{,}77 = 1{,}12$, наблюдение X_5 отбрасывается.

2. Принятие решения с использованием контрольных карт

Проверку гипотез можно применить весьма простым и практически удобным способом для контроля качества процесса. Контрольные карты представляют собой графические средства анализа, которые нетрудно подготовить и использовать в заводских рабочих условиях.

На рис. 1 показана типичная контрольная карта для выборочного среднего значения и указаны верхний и нижний контрольные пределы. До тех пор, пока статистика, откладываемая на этом графике, попадает между этими двумя границами, процесс считается под контролем. Правила принятия решения, используемые для фиксирования этих линий, могут быть основаны на предполагаемом виде распределения (обычно нормальном) для наблюдаемой случайной величины, или они выводятся с помощью непараметрического анализа. Если на графике статистика превысит контрольные пределы, принимается решение, что процесс «вышел из-под (статистического) контроля»; пересечение контрольных границ свидетельствует о ненормальной работе. Даже чрезмерное скопление точек по одну из сторон от центральной линии можно интерпретировать как некоторый сдвиг нормального хода процесса. Таким образом, контрольные карты можно использовать:

1. Как сигнал о том, что в процессе произошло некоторое изменение, так и в качестве оценки величины изменения, для которого требуется коррекция;

2. Исключительно как сигнал о том, что в процессе произошло некоторое изменение, чтобы исследователь принял соответствующие действия;

3. Для получения оценок числа случаев в прошлом, когда в процессе возникали отклонения, и установления на их основе причин, вызывающих эти отклонения;

4. Как меру качества обработки информации для классификации.

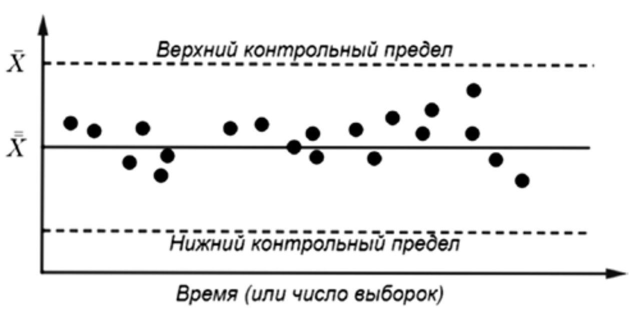

Рис. 1. Контрольная карта качества процесса

Из-за способа, с помощью которого на практике устанавливаются контрольные пределы, и в силу недостаточной информации о функции распределения вероятности случайной величины, рекомендуется избегать точных вероятностных формулировок. Как правило, на практике основная задача исследования состоит в получении однородной выборки. Следует отметить, что сложность использования контрольных карт для непрерывных производственных процессов возникает в силу того, что причины выхода процесса из-под контроля порой не очевидны, за исключением тех случаев, когда отклонения вызваны неправильной подачей материала, регулировкой управляющих переменных, неисправностью оборудования, нарушением действующих инструкций и т.д. В любом случае такие причины обычно исправляются еще до того, как их влияние обнаруживается на контрольных картах. Однако сдвиг уровня и (или) цикличные флуктуации в некотором процессе трудно приписать определенным причинам, которые могут быть связаны с ненаблюдаемыми переменными или с внешними условиями. Рассмотрим некоторые виды контрольных карт, различающиеся между собой статистиками, которые откладываются на графике:

1) контрольные карты (карты $\overline{X}$, R и s);

2) карты скользящих геометрических средних (скользящего экспоненциально взвешенного среднего);

3) карты накопленных сумм;

4) многомерные контрольные карты.

В равной степени полезны и многие другие типы карт, представленные в работах [5–10].

При разработке контрольных карт процесса, то есть при определении положения центральной линии и контрольных пределов, требуются некоторый анализ и исследование самого процесса. Допустим, что процесс и точки замеров четко определены, найден подходящий выборочный метод и выборочный интервал. Тогда нужно исследовать и саму процедуру получения выборки, чтобы точность данных, которые будут использоваться, была известна (и находилась на допустимо низком уровне). Для более тонких проверок требуются выборки большого объема, однако временной шаг может быть и такой, что выборка будет состоять лишь из одного показания.

3. Пример реализации контрольной карты

Контрольные карты для $\overline{X}$ были одним из первых методов статистического контроля качества [7]. Берется некоторая выборка случайной переменной с нормальным законом распределения со средним значением μ_X и дисперсией σ_X^2 [8]. Здесь показано, что влияние отклонений от нормального закона слабое, и таблицы поправочных коэффициентов, вычисляются и затем откладывается на графике, как показано на рис. 1. Для выбранного значения α (обычно $\alpha = 0{,}0027$, так что $1 - \alpha = 0{,}9973$) подсчитывают верхний и нижний контрольные пределы, используя $\sigma_{\overline{X}}$ или ее оценку, и наносят на карту по обе стороны от известного или оцененного значения μ_X. Если выборочное среднее попадает за контрольные пределы, делают вывод, что процесс «вышел из-под контроля». При этом очень важно решить, какое нужно выбрать значение α; чем уже полоса между контрольными пределами, тем чаще будет неоправданно звучать сигнал «выхода из-под контроля». Также важно решить, какой использовать объем выборки n. Обычно принимают $n = 5$. Вместе с $\overline{X}$ часто откладывают на графике вторую статистику, размах выборки R. Арифметическое среднее значение размаха $\overline{R}$ можно использовать в качестве оценки выборочной дисперсии, а арифметическое среднее величин $\overline{X}$, $\overline{\overline{X}}$ может служить оценкой среднего μ_X. Размах оказывается более удобной для подсчета мерой рассеяния данных, чем стандартное отклонение. Нанесение на контрольную карту наряду с $\overline{X}$ размаха выборки позволяет легче заметить аномальное изменение. Размах служит грубой мерой скорости изменения переменной, за которой ведется наблюдение. Его значение может выйти за контрольные пределы на карте размаха и подать сигнал тревоги значительно раньше, чем изменение среднего, которое при этом еще может находиться в заданных контрольных пределах.

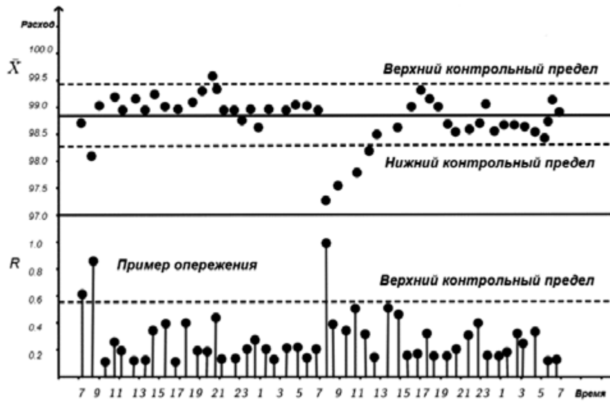

Рис. 2. Контрольные карты $\overline{X}$ и R (нижний контрольный предел для размаха не указан)

Если превышение одного из двух контрольных пределов не вызывает особого беспокойства или ущерба, а для другого предела справедливо обратное утверждение, то среднее значение для процесса можно сдвинуть так, чтобы более важный предел находился дальше от среднего значения, а другой предел при этом не учитывать. Если один из пределов оказывается больше физически допустимого предела для процесса, например, если некоторое значение в процентах меньше 0 или больше 100, то в таком случае контрольный предел приводят в соответствие с физическим пределом. Если один из пределов оказывается больше физически допустимого предела для процесса, например, если некоторое значение в процентах меньше 0 или больше 100, то в таком случае контрольный предел приводят в соответствие с физическим пределом (рис. 2).

На рис. 2 показана контрольная карта процесса, на которой приведены оба графика $\overline{X}$ и $\overline{R}$ Так, например, в 7 ч размах превысил контрольный предел, указывая на слишком быстрое падение производительности, приводящее к нарушению контрольных условий для $\overline{X}$ в 8 ч. Если причина этого изменения известна (например, регулировка температуры), то никакого вмешательства не требуется. Однако если причина неизвестна, то по карте не всегда легко решить, какую переменную следует регулировать и какие поправки необходимы. Если средний размах $\overline{R}$ используется для оценки дисперсии статистики, изображаемой графически, которая в свою очередь используется при установлении контрольных пределов, то составляются специальные таблицы, где записаны соответствующие постоянные A_2, на которые следует умножить $\overline{R}$, чтобы вычислить верхний и нижний (симметричные) контрольные пределы. Эти постоянные A_2 подбираются с помощью распределения для $(\overline{X} - \overline{\overline{X}}) / \overline{R}$. Если объем подгруппы $n = 5$, то $A_2 = 0{,}577$ и контрольные пределы тогда устанавливаются при $\overline{\overline{X}} \pm A_2\overline{R}$. Нулевая гипотеза для критерия, применяемого на контрольной карте, состоит в том, что математическое ожидание переменной $\overline{X}$ равно некоторому заданному значению μ_0. К сожалению, величины $\overline{\overline{X}}$ и $A_2\overline{R}$ дают достаточно точные оценки μ_X и $3\sigma_{\overline{X}}$, только если число последовательных выборок, используемых для получения этих оценок, слишком велико и равно по крайней мере 25.

Таким образом, если набрано лишь небольшое число подгрупп, пределы $\overline{\overline{X}} \pm A_2\overline{R}$ могут сильно отличаться от $\mu_X \pm 3\sigma_{\overline{X}}$. Одним из следствий этого различия является тот факт, что более 0,27% будущих значений $\overline{X}$ могут попасть за границы пределов $\overline{\overline{X}} \pm A_2\overline{R}$, если даже процесс находится под контролем.

В заключение можно отметить, что контрольная карта является инструментом для визуализации и оценки изменчивости процесса и его результатов. Изменчивость результатов процесса является главной причиной появления аномальных выбросов. Изменчивость результатов возникает вследствие изменчивости (вариации) факторов, определяющих ход процесса деятельности. Это, прежде всего, ошибки исходной информации, методов выполнения работ и используемого оборудования, навыков исследователей и приемов технологов, методов проверки результатов. Каждый производственный или технологический процесс обладает определенной изменчивостью, вследствие действия на него множества факторов может возникать аномальный выброс. В силу этого результаты процесса – продукция и ее характеристики качества – обладают определенной степенью непостоянства, то есть также подвержены изменчивости и варьируются в разных пределах в зависимости от силы воздействующих факторов. Исследование величины изменчивости (вариаций характеристик качества) с использованием контрольных карт создает возможность обнаружения и удаления аномальных значений в статистических исследованиях.

Библиографический список

1. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. М.: Наука, 1965. 524 с.

2. Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебное пособие. М.: Издательство Юрайт, ИД Юрайт, 2011. 399 с.

3. Морозов Д.В., Чермошенцев С.Ф. Методика повышения надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете при возникновении отказа в бортовой контрольно-проверочной аппаратуре // Надежность. 2019. № 1. С. 30-35.

4. Сидняев Н.И. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники / Н.И. Сидняев, Г.С. Садыхов, В.П. Савченко. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 382 с.

5. Morris S.F. Use and application of MIL-HDBK-217 // Solid Slate Technology. 1990. Vol. 33. No. 6. Pp. 65-69.

6. Сидняев Н.И. Математическое моделирование оценки надежности объектов сложных технических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2003. № 4. С. 24-31.

7. Brennom T.R. Should us MIL-HDBK-217 be 8888 // IEEE Trans. Reliab. 1988. Vol. 37. No. 5. Pp. 474-475.

8. Сидняев Н.И. Обзор и исследование физики отказов для оценки показателей надежности радиоэлектронных приборов современных РЛС // Физические основы приборостроения. 2017. Т. 6. № 2(23). С. 4-52.

9. Барлоу Р. Математическая теория надежности / Р. Барлоу, Ф. Прошан. М.: Советское радио, 1969. 488 с.

10. РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. Введ. 1991-01-01. М.: Гос. комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990.

11. Сидняев Н.И. Факторы космической погоды, влияющие на бортовые элементы низкоорбитальных космических аппаратов / Н.И. Сидняев, Л.А. Макриденко, В.Я. Геча, В.Н. Онуфриев / Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Труды Четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. С. 90-102.

12. Антонов С.Г., Климов С.М. Методика оценки рисков нарушения устойчивости функционирования программно-аппаратных комплексов в условиях информационно-технических воздействий // Надежность. 2017. № 1. С. 32-39.

References

1. Gnedenko B.V., Beliaev Yu.K., Soloviev A.D. [Mathematical methods in the dependability theory]. Moscow: Nauka; 1965. (in Russ.)

2. Sidnyaev N.I. [Experimental design theory and statistical data analysis: a study guide]. Moscow: ID Yurayt; 2011. (in Russ.)

3. Morozov D.V., Chermoshentsev S.F. Method of improving the functional dependability of the control systems of an unmanned aerial vehicle in flight in case of failure in the onboard test instrumentation. *Dependability* 2019;19(1):30-35.

4. Sidnyaev N.I., Sadykhov G.S., Savchenko V.P. [Models and methods of estimation of the residual operating life of electronics]. Moscow: Bauman MSTU Publishing; 2015. (in Russ.)

5. Morris S.F. Use and application of MIL-HDBK-217. *Solid Slate Technology* 1990;33(6):65-69.

6. Sidnyaev N.I. [Mathematic simulation of dependability estimation of complex technical systems]. *Problemy mashinostroyeniya i nadiozhnosti mashin* 2003;4:24-31. (in Russ.)

7. Brennom T.R. Should US MIL-HDBK-217 be 8888. *IEEE Trans. Reliab.* 1988;37(5):474-475.

8. Sidnyaev N.I. [Overview and research of physics of failure for the estimation of the dependability indicators of today's radar electronics]. *Physical Bases of Instrumentation* 2017;2(23):4-52. (in Russ.)

9. Barlow R., Proschan F. Mathematical theory of reliability. Moscow: Sovetskoye radio; 1969.

10. RD 50-690-89. [Guidelines. Dependability of technology. Methods of estimation of dependability indicators based on experimental data]. Moscow: State committee of the USSR for products quality management and standards; 1990. (in Russ.)

11. Sidnyaev N.I., Makridenko L.A., Gecha V.Ya., Onufriev V.N. [Factors of space weather affecting the airborne devices of low-orbiting spacecraft]. In: Electromechanical matters. VNIIEM studies. Proceedings of the Fourth International Science and Technology Conference Topical Issues of the Design of Space-Based Earth Remote Sensing Systems. Moscow: VNIIEM Corporation; 2016. Pp. 90-100. (in Russ.)

12. Antonov S.G., Klimov S.M. Method for risk evaluation of functional instability of hardware and software systems under external information technology interference. *Dependability* 2017;17(1):32-39.

Сведения об авторах

Сидняев Николай Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация, e-mail: Sidn_ni@mail.ru

Баттулга Энхжаргал – аспирантка, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация, e-mail: enhee_jrgl@yahoo.com

About the authors

Sidnyaev Nikolay Ivanovich, Doctor of Engineering, Professor, Head of Department, Bauman Moscow State Technical University, Russian Federation, Moscow, e-mail: Sidn_ni@mail.ru

Battulga Enkhzhargal, postgraduate student, Bauman Moscow State Technical University, Russian Federation, Moscow, e-mail: enhee_jrgl@yahoo.com

Вклад авторов

Сидняевым Н.И. предложена расчетная методика обнаружения и исключения аномальных значений. Разработанный метод использован для случаев, когда процесс стационарный и имеет гауссовский закон плотности распределения вероятности.

Баттулга Э. предложены как параметрические, так и непараметрические способы принятия решений с использованием контрольной карты.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.