

Метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 681.2:51-7

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-1-59-68>

Методическое обеспечение для применения метода мажоритарного резервирования измерительных каналов

Н. В. Минчев✉

Акционерное общество «Научно-производственная фирма "УРАН-СПб"»,
Санкт-Петербург, Россия

✉ minivik@mail.ru

Аннотация

Введение. Для опасных производств уровень надежности оборудования информационно-измерительных систем должен соответствовать требованию, что вероятность отказа является практически невозможным событием, т. е. равна приблизительно 10^{-6} . Для реализации данного требования существуют различные способы повышения уровня надежности, одним из которых является резервирование. Оно делится на несколько видов в зависимости от влияющих факторов, таких, как режим работы объекта, типы отказов, кратность и т. п. Мажоритарное резервирование в измерительной технике, в частности в измерительных каналах, используется редко, так как данный метод был разработан для повышения надежности в дискретных цифровых устройствах. До настоящего времени соответствующее математическое обеспечение для применения мажоритарного резервирования измерительных каналов аналоговых величин отсутствовало. Вследствие этого возникла необходимость в его разработке.

Цель работы. Разработка методического обеспечения для применения метода мажоритарного резервирования, позволяющего повысить достоверность результатов измерений.

Материалы и методы. Проанализированы отечественные и зарубежные источники информации за последние 40 лет, связанные с обработкой малых выборок при проектировании измерительных каналов для информационно-измерительных систем. Применен непараметрический ранговый критерий Манна–Уитни для обработки малых выборок, использовалось математическое моделирование, математический аппарат теории измерений и теории систем.

Результаты. Реализована модель измерительного модуля с избыточной структурой. Рассмотрены параметрические и непараметрические ранговые критерии. Разработан алгоритм, позволяющий выявить отказ канала измерительного модуля с избыточной структурой. Вычислительная сложность алгоритма оценивается полиномом второй степени.

Заключение. Рассмотренные возможности использования непараметрических ранговых критериев для работы с выборками малого объема, а также диагностические ситуации для различных комбинаций данных критериев позволяют принимать статистически обоснованное решение о состоянии измерительного канала. В перспективе планируется использовать данный метод при диагностическом контроле исправности оборудования технологических процессов, связанных с сжиганием топлива, а именно в котельных установках и установках термического уничтожения отходов.

Ключевые слова: мажоритарное резервирование, резервирование, измерительный канал температуры, модель измерительного канала, непараметрические критерии

Для цитирования: Минчев Н. В. Методическое обеспечение для применения метода мажоритарного резервирования измерительных каналов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 1. С. 59–68. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-59-68

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 07.10.2020; принята к публикации после рецензирования 25.11.2020; опубликована онлайн 25.02.2021



Methodological Support for Applying the Method of Majority Reservation in Measuring Channels

Nikadim V. Minchev ✉

Joint Stock Company Scientific and Production Company "URAN-SPb", St Petersburg, Russia

✉ minivik@mail.ru

Abstract

Introduction. For hazardous industries, the reliability of information and measuring equipment must ensure an almost complete absence of failure events, with their probability as low as 10^{-6} . This requirement can be satisfied using various approaches, one of which is reservation. Reservation methods are classified into several types depending on such factors, as the operating mode of an object, failure types, frequency rate, etc. Majority redundancy schemes are rarely used in measuring equipment, particularly in measuring channels, largely because this method was initially aimed at improving the reliability of discrete digital devices. Thus far, no mathematical support for applying the method of majority reservation in measuring channels of analogue values has been developed. This gap determined the relevance of this study.

Aim. To develop a methodological support for applying the method of majority reservation with the purpose of improving the level of measurement accuracy.

Materials and methods. Both Russian and foreign sources published over the past 40 years on the topic of processing small samples when designing measuring channels for information and measuring systems were reviewed. The nonparametric Mann-Whitney rank test was applied to process small samples. Other research methods included mathematical modelling, as well as the mathematical apparatus of measurement theory and systems theory.

Results. A measuring module with a redundant structure was simulated. Parametric and nonparametric rank criteria were considered. An algorithm allowing identification of the failure of a channel in a measuring module with a redundant structure was developed. The computational complexity of the developed algorithm is estimated by a polynomial of the second degree.

Conclusion. The use of nonparametric rank criteria for processing small samples, as well as diagnostic situations for various combinations of these criteria, supports statistically grounded decision on the state of measuring channels. In the future, this method will be applied for diagnostic control of the serviceability of technological equipment used in fuel combustion, namely in boiler plants and installations for thermal waste destruction.

Keywords: majority redundancy, redundancy, temperature measurement channel, measurement channel model, nonparametric criteria

For citation: Minchev N. V. Methodological Support for Applying the Method of Majority Reservation in Measuring Channels. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 1, pp. 59–68. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-59-68

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Submitted 07.10.2020; accepted 25.11.2020; published online 25.02.2021

Введение. Надежность – это свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортировки (ГОСТ 27.002–2015). Для опасных производств уровень надежности должен соответствовать требованию, что вероятность отказа является практически невозможным событием. Для выполнения или хотя бы приближения к возможно-

сти реализации данного требования существуют различные способы повышения уровня надежности, одним из которых является резервирование [1].

В свою очередь резервирование делится на несколько видов в зависимости от влияющих факторов, таких, как режим работы объекта, типы отказов, кратность и т. п. (ГОСТ 27.002–2015) [1].

Горячее резервирование с нечетной кратностью без восстановления, или другое, более рас-

пространенное, название – мажоритарное резервирование – это один из видов резервирования, при котором в рабочем режиме находится нечетное количество (не менее трех) однотипных элементов и результатом работы объекта принимается одинаковый результат работы большинства основных элементов. Данный вид резервирования в основном применяется в вычислительных устройствах и системах из-за простоты реализации мажоритарного элемента, а также из-за дискретности используемых переменных (ГОСТ 27.002–2015) [1].

Мажоритарное резервирование в измерительной технике, в частности в измерительных каналах, используется редко, так как измеряемая величина является аналоговой.

Статья посвящена разработке методического обеспечения для применения метода мажоритарного резервирования в измерительных каналах. Для достижения поставленной цели нужно решить следующие задачи:

- создать модель измерительного канала;
- проанализировать параметрические и непараметрические критерии;
- разработать алгоритм, позволяющий выявить отказ канала измерительного модуля с избыточной структурой.

Методы. В измерительном модуле (ИМ) избыточность предполагается за счет количества измерительных каналов (ИК) (ГОСТ 27.002–2015) [1]. На рис. 1 [2] представлен измерительный модуль температуры с избыточной структурой. Измерительный канал включает в себя:

- ПИП – первичный измерительный преобразователь;
- ИТ – источник тока;

- НП – нормирующий преобразователь;
- АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
- ВУ – вычислительное устройство;
- МЭ – мажоритарный элемент;
- И – индикатор.

Именованные значения физической величины (ФВ), получаемые от измерительных каналов, поступают на МЭ, внутри которого, в зависимости от метода, происходит проверка получаемых данных на допустимое расхождение относительно друг друга. Данная проверка проводится для того, чтобы выявить отказ в измерительном модуле. Под отказом понимается нарушение работоспособности объекта, при котором система или элемент перестает выполнять целиком или частично свои функции, другими словами – происходит сбой в работе устройства или системы [3]. Если возникает отказ, т. е. расхождение измеренных значений является значимым, то данный факт регистрируется, что отображается на индикаторе И.

На основании структурной схемы была создана модель измерительного модуля в среде программирования LabView. Структурная схема данной модели (рис. 2) включает в себя несколько основных блоков:

1. ПИП и ИТ – блок, имитирующий работу термопреобразователя сопротивления и источника тока.
2. Измерительный канал – блок, имитирующий работу НП, АЦП и часть ВУ, отвечающего за функцию обратного преобразования.
3. Коррекция – блок, имитирующий часть ВУ, отвечающего за коррекцию нелинейности полинома ПИП.
4. Мажоритарный элемент, принципы работы которого описаны далее.

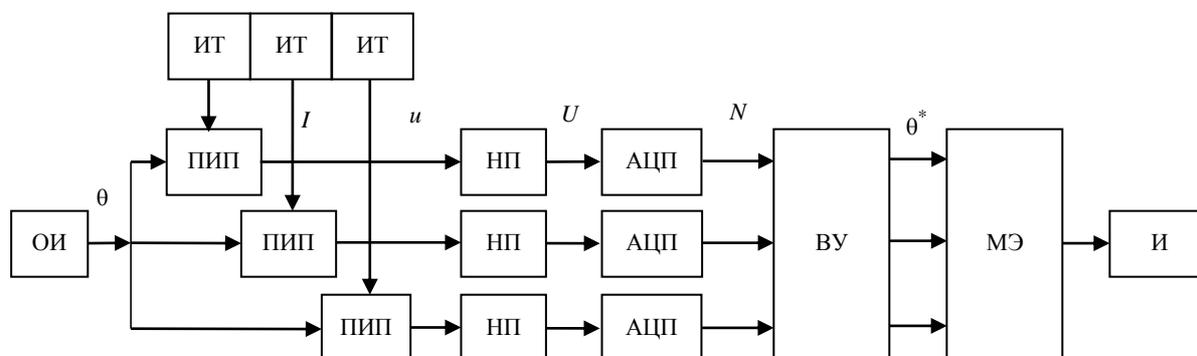


Рис. 1. Измерительный модуль температуры с избыточной структурой

Fig. 1. Temperature measuring module with redundant structure

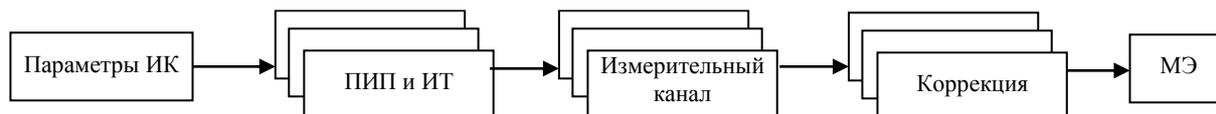


Рис. 2. Структурная схема модели измерительного модуля

Fig. 2. The block-diagram model measuring module

В данной модели могут быть заданы несколько основных параметров измерительного канала.

К ним относятся:

- градуировка;
- класс точности;
- максимальное входное напряжение АЦП (3.3 В);
- разрядность;
- смещение измеряемых значений (систематический дрейф);
- температурный коэффициент α ;
- тип терморезистора.

В свою очередь каждый из блоков модели представляет собой самостоятельную программу.

Блок ПИП и ИТ состоит из трех частей:

1. *Градуировка.* Данная часть выдает 2 основных параметра канала в зависимости от выбранной градуировочной шкалы (G), а именно номинальное сопротивление при $0\text{ }^\circ\text{C}$ (R_0) и ток источника (I), которые определены в ГОСТ 6651–2009. Математическая модель данной части записывается следующим образом:

$$\begin{cases} R_0(G) = r; \\ I(G) = I + 0.00005 + 0.00005[2\text{rand}(t) - 1], \end{cases}$$

где r – число, выбираемое из ряда [100, 500]; I – число, выбираемое из ряда [0.001, 0.0025]; $\text{rand}(t)$ – функция генератора случайных чисел в диапазоне (0; 1); t – номер итерации; $0.00005 + 0.00005[2\text{rand}(t) - 1]$ – аддитивная составляющая погрешности.

2. *Допуски и диапазоны измерений.* Данная часть выдает 3 параметра в зависимости от выбранного типа терморезистора (ТТ) и класса точности (C), а именно максимальную и минимальную температуру (θ_{\max} и θ_{\min}), а также мультипликативную составляющую погрешности (Δ) в предусмотренном классом точности диапазоне. Математическая модель данной части будет иметь вид

$$\begin{cases} \Delta(\text{ТТ}, C) = a[2\text{rand}(t) - 1] + b|\theta|; \\ \theta_{\min}(\text{ТТ}, C) = \theta_1; \\ \theta_{\max}(\text{ТТ}, C) = \theta_2, \end{cases}$$

где a и b – коэффициенты, значения которых определяются по табл. 2 (ГОСТ 6651–2009);

θ_1 – число, выбираемое из ряда [–196, –180, –100, –60, –50, –30, 0]; θ_2 – число, выбираемое из ряда [120, 150, 180, 200, 250, 300, 450, 500, 600, 660].

3. *Преобразование температура/сопротивление.*

Данная часть выдает 3 параметра в зависимости от выбранного типа терморезистора и параметра α , а именно сопротивление при максимальной и минимальной температурах (R_{\max} и R_{\min}), а также текущее сопротивление (R). Таким образом, математическая модель данной части имеет вид

$$R(T) = \begin{cases} R(\text{ТТ}, \alpha, \theta) = R_0 \left[\frac{1 + A\theta + B\theta^d (\theta + 6.7)^h +}{C\theta^f (\theta - 100)^g} \right]; \\ R_{\min}(\text{ТТ}, \alpha) = R_0 \left[\frac{1 + A\theta_{\min} + B\theta_{\min}^d (\theta_{\min} + 6.7)^h +}{C\theta_{\min}^f (\theta_{\min} - 100)^g} \right]; \\ R_{\max}(\text{ТТ}, \alpha) = R_0 \left[\frac{1 + A\theta_{\max} + B\theta_{\max}^d (\theta_{\max} + 6.7)^h +}{C\theta_{\max}^f (\theta_{\max} - 100)^g} \right], \end{cases}$$

где A, B, C – коэффициенты; d, h, f, g – показатели степени, значения которых указаны в соответствии с ГОСТ 6651–2009.

Блок измерительного канала включает математические модели трех устройств: нормирующего преобразователя, АЦП и части вычислительного устройства, выполняющего функцию обратного преобразования.

В качестве математической модели нормирующего преобразователя выступает следующая система:

$$U(R) = \begin{cases} u = RI; \\ k = U_{\max} / (R_{\max} I); \\ U = ku; \\ U_0 = kR_0 I; \\ U_{\min} = kR_{\min} I, \end{cases}$$

где u – измеряемое напряжение, получаемое с ПИП; k – нормирующий коэффициент; U – нормированное измеряемое напряжение, получаемое с НП; U_{\max} – максимальное входное напряжение АЦП (3.3 В); U_0 и U_{\min} – входные напряжения АЦП при R_0 и R_{\min} соответственно, также получаемые с НП.

Система, представляющая математическую модель АЦП, записывается следующим образом:

$$N(U) = \begin{cases} N_{\max} = 2^n - 1; \\ N = \frac{UN_{\max}}{U_{\max}}; \\ N_0 = \frac{U_0 N_{\max}}{U_{\max}}; \\ N_{\min} = \frac{U_{\min} N_{\max}}{U_{\max}}, \end{cases}$$

где n – разрядность АЦП; N_{\max} – максимальный код; N – выходной код; N_0 и N_{\min} – выходной код АЦП при U_0 и U_{\min} соответственно.

Математическая модель вычислительного устройства, отвечающего за функцию обратного преобразования, записывается в следующем виде:

$$\theta^*(N) = \begin{cases} \theta^* = \frac{|\theta_{\min}|(N - N_{\min})}{(N_0 - N_{\min})} + \theta_{\min}, & \theta_{\min} \leq \theta < 0; \\ \theta^* = \frac{|\theta_{\max}|(N - N_0)}{(N_{\max} - N_0)}, & 0 \leq \theta \leq \theta_{\max}. \end{cases}$$

Блок коррекции включает математическую модель части вычислительного устройства, отвечающего за уменьшение систематической составляющей погрешности вследствие нелинейности получаемых данных. Данная модель состоит из двух частей:

1. *Коррекция нелинейности полинома ПИП.* Данная часть выдает 2 параметра в зависимости от выбранного типа ТТ и параметра α , а именно постоянный коэффициент (K) и абсолютную погрешность (DC) при температуре в середине от-

рицательного (положительного) поддиапазона ($\theta_{\text{спд}}$). Математическая модель данной части имеет вид

$$\begin{cases} \theta_{\text{спд}} = \frac{\theta_{\text{ext}}}{2}; \\ [\theta_c] = \left[\frac{\theta_{\text{ext}}}{2}; \frac{\theta_{\text{ext}}}{2} - 1; \frac{\theta_{\text{ext}}}{2} + 1 \right]; \\ R_{ci}(\text{ТТ}, \alpha) = R_0 \left[1 + A\theta_{ci} + B\theta_{ci}^d; (\theta_{ci} + 6.7)^h + \right. \\ \left. + C\theta_{ci}^f; (\theta_{ci} - 100)^g \right]; \\ N_{ci} = \frac{kR_{ci}(\text{ТТ}, \alpha)I}{U_{\max}} N_{\max}; \\ \theta_i^* = \frac{|\theta_{\max}|(N_{ci} - N_{\min \text{ пд}})}{(N_{\max \text{ пд}} - N_{\min \text{ пд}})} + \theta_{\min}; \\ DC = \frac{\sum_{i=1}^3 (\theta_i^* - \theta_{ci})}{3}; \\ K = -\frac{DC}{\theta_{\text{спд}}^2}, \end{cases}$$

где θ_{ext} – максимальное по модулю значение температуры положительного (отрицательного) поддиапазона; $N_{\max \text{ пд}}$ и $N_{\min \text{ пд}}$ – максимальное и минимальное значения кода положительно (отрицательно) поддиапазона.

2. *Вычисление скорректированных значений.* Данная часть выдает скорректированные значения температуры θ_k^* . Математическая модель данной части может быть записана в виде

$$\begin{cases} F = K(\theta - \theta_c)^2 + DC; \\ \theta_k^* = \theta^* - F. \end{cases}$$

На сегодняшний день существует несколько методов мажоритарного резервирования, основанных на различных критериях, которые можно разделить на 2 группы:

- **Параметрические:**
 - среднее значение, которое может быть вычислено по формуле $\theta^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i^*$, где n – число каналов;
 - центральная переменная, т. е. выбор медианы из переменных θ^* ;

– средневзвешенное значение, которое вычисляется для трех переменных с помощью весовых коэффициентов по формуле

$$\theta^* = \left(\frac{\sum_{i=1}^3 w_i \theta_i^*}{\sum_{i=1}^3 w_i} \right).$$

Весовые коэффициенты рассчитываются по формуле

$$w_i = \frac{1}{1 + \prod_{i=1, j=1, i \neq j}^3 \frac{(\theta_i^* - \theta_j^*)^2}{\beta^2}},$$

где β – параметр, рассчитываемый по формуле [4]

$$\beta = \min_{i=1, j=1, i \neq j}^3 (\theta_i^* - \theta_j^*).$$

Основным недостатком для использования непараметрических критериев является требование о нормальности закона распределения измеряемой величины. Другим же недостатком является наличие требования к объему выборки, а именно 20–30 значений в одной выборке.

• Непараметрические [5]:

- критерий Манна–Уитни;
- критерий Краскелла–Уоллиса;
- критерий Колмогорова–Смирнова;
- критерий Вальда–Вольфовица;
- критерий Уилкоксона для зависимых совокупностей;
- критерий знаков.

Непараметрические критерии менее требовательны к закону распределения измеряемой величины, а также позволяют работать с выборками малого объема (от двух значений). Так как в описываемом случае предполагается работа с выборками малого объема, закон распределения которых неизвестен, далее будут использоваться непараметрические критерии.

В рассматриваемом случае выборки являются независимыми, их количество равно трем, что соответствует количеству измерительных каналов, и объем каждой выборки составит 10 значений в соответствии с результатом анализа критерия [6, 7]. В свою очередь, работа с независимыми выборками является значительным ограничением при использовании критерия Уилкоксона для зависимых совокупностей и критерия знаков, что отражено в табл. 1.

Вероятность появления одинаковых результатов измерения достаточно мала, вследствие этого серийные критерии, такие, как критерий Вальда–

Таблица 1. Сравнение непараметрических критериев
 Table 1. Comparison of nonparametric criteria

| Критерий | Тип выборок | Количество рассматриваемых выборок | Минимальный объем выборок |
|--|-------------|------------------------------------|---------------------------|
| Манна–Уитни | Независимые | 2 | 3:5 или 4:4 или 2:8 |
| Краскелла–Уоллиса | Независимые | 3 | 2:2:2 |
| Колмогорова–Смирнова | Независимые | 2 | 10:10 |
| Вальда–Вольфовица | Независимые | 2 | 4:6 |
| Уилкоксона для зависимых совокупностей | Зависимые | 2 | 6:6 |
| Знаков | Зависимые | 2 | 6:6 |

Вольфовица и критерий Колмогорова–Смирнова, не рассматриваются.

Критерий Краскелла–Уоллиса позволяет установить факт отличия выборки от генеральной совокупности, но не дает возможности идентифицировать отклоняющуюся выборку [5–11].

Исходя из вышеизложенного, в данной статье рассматривается критерий Манна–Уитни, который позволяет проверить гипотезу о принадлежности двух независимых выборок разного размера малого объема к одной совокупности. С другой стороны, при использовании критерия Манна–Уитни для попарной проверки выборок появляется возможность выявления отклоняющейся выборки. На основании этого был разработан алгоритм выявления отказа канала в измерительном модуле.

Алгоритм. Исходное состояние – нет ни одного значения в канале [6–8].

1. Накопление 10 значений с каждого канала в измерительном модуле (т. е. 30 значений).

2. Попарная проверка по критерию Манна–Уитни, т. е. проверка по данному критерию выборок с 1-го и 2-го; 1-го и 3-го; 2-го и 3-го каналов.

3. Если расхождение значимо в двух из трех либо во всех трех парах, зарегистрировать ситуацию как один из случаев в табл. 2 (0 – расхождение незначимо; 1 – расхождение значимо; в последнем случае ошибка регистрируется во всех трех каналах).

4. Вычислить процент ошибки для каждого канала по формуле $Eg = \frac{n_e}{n} 100$, где n_e и n – количество зарегистрированных случаев в соответствии с табл. 2 и общее количество измерений

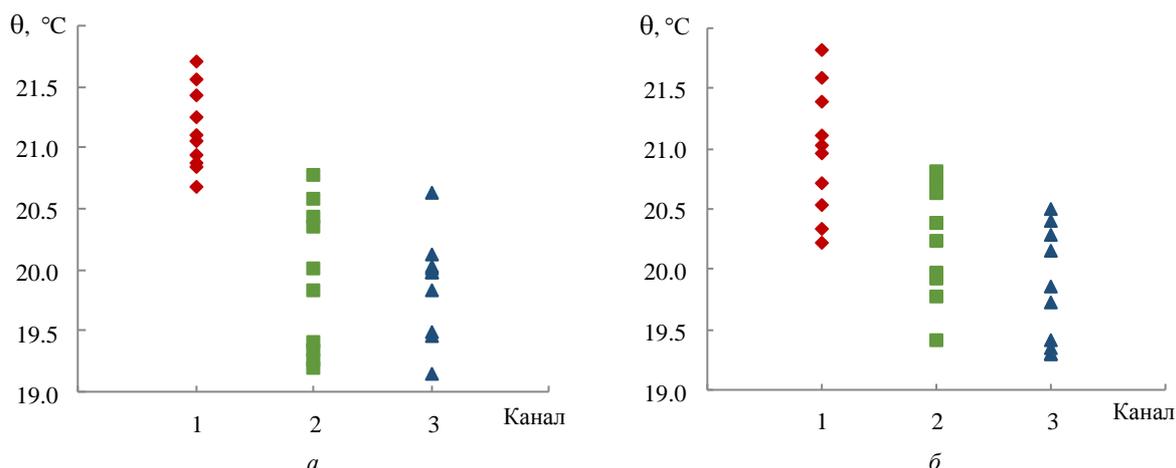


Рис. 3. Возможные случаи при проверке по критерию Манна–Уитни: а – 1-й случай из табл. 2 (2-й и 3-й случаи аналогичны); б – 4-й случай

Fig. 3. There may be cases when checking for the Mann–Whitney test: а – 1 case from table 2 (2 and 3 cases are similar); б – 4 case

в одном отличающемся канале. Пример возможных случаев, представленных в табл. 2, иллюстрируется на рис. 3.

Таблица 2. Возможные случаи при проверке по критерию Манна–Уитни

Table 2. There may be cases when checking for the Mann–Whitney test

| Отличающийся канал | Проверяемые выборки | | |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|
| | 1 и 2 | 1 и 3 | 2 и 3 |
| 1 | 1 | 1 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | 0 | 1 | 1 |
| Невозможно определить | 1 | 1 | 1 |

5. Сравнить вычисленный процент с допустимым [9, 10], который может быть получен из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} E_{гд} = -0.47n^3 + 0.92n^2 - 61.2n + 153.4, \\ 1 \leq n < 10; \\ E_{гд} = -0.5n + 25, & 10 \leq n \leq 25; \\ E_{гд} = -0.005n + 13.5, & 25 < n < 100; \\ E_{гд} = 8.5, & n \geq 100, \end{cases}$$

где $E_{гд}$ – допустимый процент ошибки. Данная система уравнений была получена экспериментальным путем при пропуске трех различных сигналов через модель с различными значениями уровня смещения сигнала относительно входного. (без смещения, ± 0.3 , ± 0.5 , ± 0.8 , ± 1 , ± 2 , ± 3 °C). Процент ошибки сигналов со смещениями меньше ± 0.3 °C при условии изменения сигналов в диапазоне 20...600 °C практически не отличается от про-

цента ошибки сигнала без смещения. На рис. 4 приведен график для одного из тестовых сигналов.

б. Вычисление значения измеряемой величины:

а) если $E_{г} \leq E_{гд}$, то можно считать, что все измерительные каналы находятся в рабочем состоянии, а погрешность – в допустимых пределах. Тогда значение измеряемой величины может быть вычислено как среднее по формуле:

$$\theta^* = \frac{1}{ch} \sum_{i=1}^k \theta_i^*$$

ле; k – общее количество измеренных значений в одном измерении: $k = ch \cdot V$ (V – объем выборки на каждый канал);

б) если $E_{г} > E_{гд}$, то можно считать, что один из каналов отличается, но нельзя считать его отказавшим, так как существует вероятность ошибки второго рода. Однако, исходя из мажоритарного принципа, значение измеряемой величины должно вы-

числяться по формуле: $\theta^* = \frac{1}{ch_p} \sum_{i=1}^{k_p} \theta_i^*$, где k_p –

количество измеренных значений в одном измерении от нескольких каналов, расхождение между которыми согласно критерию Манна–Уитни является незначимым (вычисляется аналогично k); ch_p – количество каналов, расхождение между которыми незначимо;

в) если $E_{г} > E_{гд}$ во всех каналах модели (строка 4 в табл. 2), то в большинстве случаев можно считать, что произошел полный отказ измерительного модуля [12, 13].

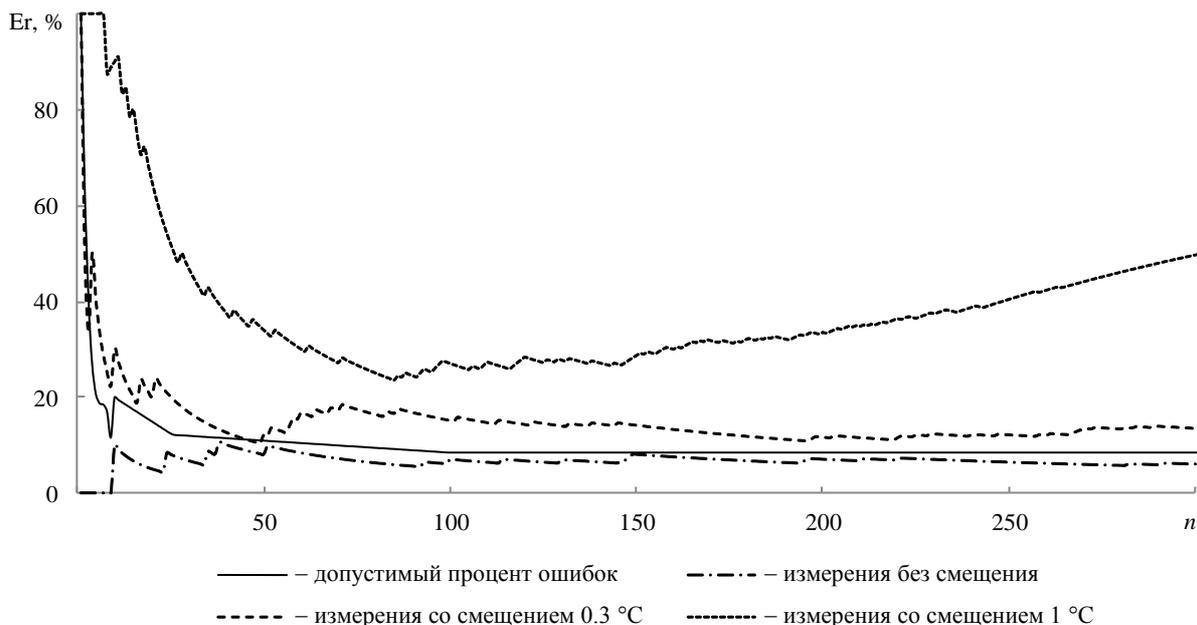


Рис. 4. График зависимости процента ошибок от количества измерений в одном модуле
 Fig. 4. Graph of the percentage of errors depending on the number of measurements in one module

Таблица 3. Возможные ситуации в работе модуля
 Table 3. Possible situations in the module operation

| № | Допустимый процент ошибки | Возможные ситуации |
|---|--|---|
| 1 | $E_r \leq E_{r_d}$ | Модуль полностью работоспособен, и значение измеряемой величины рассчитывается на основании значений всех каналов |
| 2 | $E_r > E_{r_d}$ в одном из каналов | Один из каналов отличается по проценту ошибки, и поэтому значение измеряемой величины рассчитывается на основании значений двух других каналов |
| 3 | $E_r > E_{r_d}$ в двух каналах | Если в двух каналах превышен допустимый процент ошибки и при этом выполняется п. 2 (согласно п. 2 один из каналов был исключен), то вторым исключаемым каналом следует считать тот, у которого расхождение с первым отличающимся каналом незначимо. Таким образом, значение измеряемой величины рассчитывается на основании значений оставшегося канала |
| 4 | $E_r > E_{r_d}$ во всех каналах | Модуль является полностью отказавшим, и значение измеряемой величины недостоверно |
| 5 | Если выполнены пп. 2 и 3 данной таблицы, после чего отказы перестали выявляться (отказ трех каналов) | |

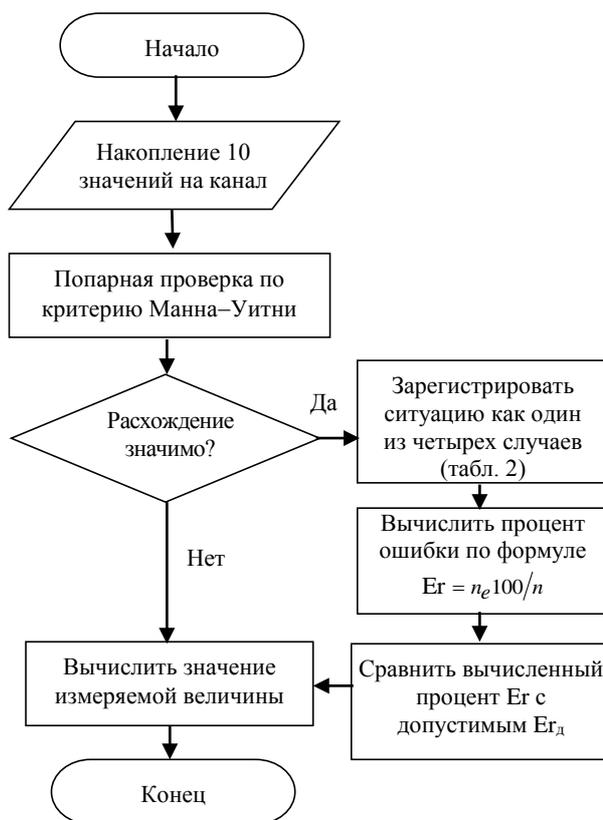


Рис. 5. Алгоритм выявления отказов каналов в модуле
 Fig. 5. Algorithm of channel failure detection in module

Результаты. При анализе результатов работы модели измерительного модуля с избыточной структурой была получена таблица возможных ситуаций при попарной проверке по критерию Манна–Уитни, а также система уравнений, позволяющая вычислить допустимый процент ошибки, что дает возможность выявить отличающийся канал и далее сформулировать возможные ситуации в работе модуля (табл. 3).

Выводы. Разработан алгоритм (рис. 5), предназначенный для выявления отказов каналов и анализа результатов, характеризующих вид отка-

за. Рассмотрены возможности использования непараметрических ранговых критериев для работы с выборками малого объема, а также диагностические ситуации, позволяющие принимать статистически обоснованное решение о состоянии измерительного модуля. В перспективе планируется использовать данный метод при диагностическом контроле исправности оборудования технологических процессов, связанных с сжиганием топлива, а именно в котельных установках и установках термического уничтожения отходов.

Список литературы

1. Иыуду К. А. Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем. М.: Высш. шк., 1989. С. 216.
2. Кутдусов Ф. Х., Рублев Т. А. Адаптивный мажоритарный элемент в системах автоматического управления. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnyy-mazhoritarnyy-element-v-sistemah-avtomaticheskogo-upravleniya> (дата обращения 10.12.2019)
3. Определение отказа, классификация отказов. URL: <https://helpiks.org/1-24348.html> (дата обращения 12.12.2019)
4. Lorzczak P. R., Caglayan A.K., Eckhardt D. E. A Theoretical Investigation of Generalized Voters for Redundant Systems // Proc. 19th FTCS. Chicago, Illinois, June 1989. P. 444–451.
5. Стариченко Б. Е. Обработка и представление данных педагогических исследований с помощью компьютера. Екатеринбург: Изд-во Урал. ГУ, 2004. С. 218.
6. Королев П. Г. Анализ развития дефектов железнодорожного полотна // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2018. № 9. С. 93–98.
7. Оценка дефектов железнодорожного полотна. Исследование критерия / П. Г. Королев, В. А. Костыря, С. А. Кук, О. А. Микус // XXI Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. SCM'2018. СПб., 23–25 мая 2018 г. С. 85–88.
8. Экспериментальные исследования системы динамического мониторинга рельсового пути / П. Г. Королев, Д. Ю. Ларионов, М. Т. Рузиева, М. Н. Шилов // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2014. № 10. С. 50–54.
9. Лемешко Б. Ю. Проверка гипотез о математических ожиданиях и дисперсиях в задачах метрологии и контроля качества при вероятностных законах, отличающихся от нормального // Метрология. 2004. № 3. С. 3–15.
10. Алексеев В. В., Королев П. Г., Утушкина А. В. Верификация контрольно-измерительных материалов и проверка знаний студентов // Вестн. ТГТУ. 2013. Т. 19, № 4. С. 890–896.
11. Siegel S., Tukey J. W. A nonparametric sum of ranks procedure for relative spread in unpaired samples // J. Amer. Statist. Assoc. 1960. Vol. 55. P. 429–455.
12. Инерциальная система MEMS-Based для диагностики железнодорожного пути / А. М. Боронахин, Л. Н. Подгорная, Е. Д. Бокхман, Н. С. Филипеня, Ю. В. Филатов, Р. Б. Шалимов, Д. Ю. Ларионов // Гироскопия и навигация. 2011. Т. 2, № 4. С. 261–268.
13. Алгоритм идентификации диагностических признаков по параметрам вибрации компрессорной установки / В. В. Алексеев, П. Г. Королев, В. С. Конова, И. В. Калякин, А. Г. Перкова // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2015. № 2. С. 162–167.

Информация об авторе

Минчев Никадим Викторович – инженер-метролог АО «НПФ "УРАН-СПб"», аспирант 3-го года обучения кафедры информационно-измерительных систем и технологий факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сферы научных интересов: метрология, программируемые логические контроллеры и их применение в автоматизации технологических процессов, приборостроение.

Адрес: Акционерное общество «Научно-производственная фирма "УРАН-СПб"», ул. Варшавская, д. 5А, лит. Л, оф. 105, Санкт-Петербург, 196128, Россия

E-mail: minivik@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9825-8178>

References

1. Iyudu K. A. Reliability, control and diagnostics of computing machines and systems. M., Higher School of Economics, 1989, p. 216. (In Russ.)
2. Kutdusov F. Kh., Rublev T. A. *Adaptivnyi mazhoritarnyi element v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya* Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnyy-mazhoritarnyy-element-v-sistemah-avtomaticheskogo-upravleniya> (accessed 10.12.2019) (In Russ.)
3. *Opređenje otkaza, klassifikacija otkazov*. Available at: <https://helpiks.org/1-24348.html> (accessed 12.12.2019) (In Russ.)
4. Lorzak P. R., Caglayan A. K., Eckhardt D. E. A Theoretical Investigation of Generalized Voters for Redundant Systems. Proc. 19th FTCS, Chicago, Illinois, June 1989, pp. 444–451.
5. Starichenko B. E. *Obrabotka i predstavlenie dannykh pedagogicheskikh issledovaniy s pomoshch'yu kompyutera* [Processing and presentation of pedagogical research data using a computer]. *Ekaterinburg, Ural. GU*, 2004, p. 214. (In Russ.)
6. Korolev P. G. Analysis of the development of railway track defects. *Izv. SPbGETU "LETI"*. 2018, no. 9, pp. 93–98. (In Russ.)
7. Korolev P. G., Kostyrya V. A., Kuk S. A., Mikus O. A. Railroad track damages assessment. Test research. *XXI Mezhdunar. conf. po myagkim vychisleniyam i izmereniyam. SCM'2018. SPb*, 23–25 may 2018. pp. 85–88.
8. Korolev P. G., Larionov D. Yu., Rzieva M. T., Shilov M. N. Experimental studies of the dynamic track monitoring system. *Izv. SPbGETU "LETI"*. 2014, no. 10, pp. 50–54. (In Russ.)
9. Lemeshko B. Yu. Testing hypotheses about mathematical expectations and variances in problems of Metrology and quality control under probabilistic laws that differ from the normal one. *Metrologiya* [Metrology]. 2004, no. 3, pp. 3–15. (In Russ.)
10. Alekseev V. V., Korolev P. G., Utushkina A. V. Test materials verification and students' examination. *Vest. TGTU*. [Bulletin of TSTU.]. 2013, vol. 19, no. 4, pp. 890–896. (In Russ.)
11. Siegel S. A nonparametric sum of ranks procedure for relative spread in unpaired samples. *J. Amer. Statist. Assoc.* 1960, vol. 55, pp. 429–455.
12. Boronakhin A. M., Podgornaya L. N., Bokkhaman E. D., Filipenya N. S., Filatov Yu. V., Shalimov R. B., Larionov D. Yu. MEMS-Based Inertial System for Railway Track Diagnostics. *SPb, Giroskopija i Navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 2011, vol. 2, no. 4, pp. 261–268. (In Russ.)
13. Alekseev V. V., Korolev P. G., Konovalova V. S., Kalyakin I. V., Perkova A. G. Diagnostic features identification algorithm according to vibration parameters of a compressor installation. *Izv. SPbGETU "LETI"*. 2015, vol. 2, pp. 162–167. (In Russ.)

Information about the author

Nikadim V. Minchev, metrologist engineer Joint-stock company research and Production Company "URAN-SPb", 3-year post-graduate student of the Department of information and measurement systems and technologies of the faculty of information and measurement and biotechnical systems of the Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: metrology, programmable logic controllers and their application in process automation, instrument engineering.
Address: Joint Stock Company Scientific and Production Company "URAN-SPb", off. 105, 5A/L Varshavskaya St., St Petersburg 196128, Russia
E-mail: minivik@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9825-8178>
