

Алгоритмы тестового метода повышения точности измерения неэлектрических величин

¹*ТАРАНОВ Александр Викторович, к.т.н., доцент, energy_kstu@mail.ru,

¹ДВУЖИЛОВА Светлана Николаевна, старший преподаватель, dvugilova93@mail.ru,

¹БОКИЖАНОВ Газиз Иман-Медынович, старший преподаватель, gaziz1952@bk.ru,

¹НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Представлена классификация методов повышения точности измерений физических величин. Рассмотрены структурные схемы многоканальных измерительных систем. Предложена математическая модель измерительного устройства в виде полинома. Представлена реализация алгоритмов тестового метода повышения точности измерений неэлектрических величин в двух- и многоканальных измерительных системах. Обоснована возможность использования в алгоритмах только аддитивных тестов без применения мультипликативных тестов.

Ключевые слова: измерительная система, измерительное устройство, канал измерения, статическая функция преобразования, неинформативные факторы, математическая модель измерительного устройства, погрешность измерения, неэлектрические величины, дифференциальный метод измерения, вычислительное устройство, аддитивный тест, мультипликативный тест.

Введение

Конструктивные методы повышения точности результатов измерения путем повышения точности измерительных устройств, которые заключаются в отработке конструкций отдельных элементов, подборе материалов и отработке технологии, в настоящее время практически исчерпаны. Наиболее перспективными методами повышения точности измерений являются методы, основанные на введении в систему избыточности, что позволяет получить дополнительную информацию не только об измеряемой величине, но и о погрешностях измерений, и тем самым исключить эти погрешности из результата измерения [1].

Основными эффективными методами повышения точности измерений являются следующие:

- итерационные методы;
- методы, основанные на использовании эталонных мер;
- тестовые методы.

В общей погрешности измерения можно выделить две составляющие [1]:

- 1) коррелированная составляющая погрешности, объединяющая практически все систематические, прогрессирующие и относительно медленно меняющиеся случайные погрешности;
- 2) некоррелированная составляющая погрешности, объединяющая все некоррелированные случайные погрешности типа «белого шума».

Применение итерационного метода позволяет уменьшить коррелированную составляющую погрешности измерения, в то время как некоррелированная составляющая погрешности усиливается. Аналогичная ситуация наблюдается и для метода, основанного на использовании эталонных мер. Кроме того, недостатком метода эталонных мер является необходимость периодического отключения от входа измерительного устройства измеряемой величины и подключения эталонной меры. При этом надо учитывать, что в реальных условиях на измеряемую величину могут оказывать влияние неинформативные факторы, которые невозможно смоделировать с помощью эталонных мер.

Тестовые методы являются наиболее перспективными для реализации в измерительных системах для измерений как электрических, так и неэлектрических величин. Сущность тестовых методов повышения точности измерений заключается в определении параметров статической функции преобразования (СФП) с помощью преобразований тестов [2] и основана на введении в измерительную цепь дополнительных тестов – аддитивных в виде $x + \theta$ (x – измеряемая величина, θ – величина теста такой же физической природы, что и измеряемая величина) и мультипликативных в виде Kx (K – независимый от x коэффициент преобразования). Количество тестов будет зависеть от степени полинома, которым может быть

описана СФП измерительного устройства.

Поскольку тесты функционально связаны с измеряемой величиной, то результаты тестов необходимо обработать с использованием заданного алгоритма, а получив реальные параметры статической функции преобразования (СФП), найти значение измеряемой величины. Значения реальных параметров всегда будут отличаться от их номинальных значений в силу того, что измерительное устройство работает при воздействии на него всего спектра неинформативных факторов, свойственных процессу измерения в реальных условиях эксплуатации.

При реализации тестового метода обязательным условием является сочетание аддитивных и мультипликативных тестов, причем оптимальным считается использование $(n-1)$ теста одного вида и одного теста другого вида [3]. При измерении электрических величин введение в измерительную систему тестов обоих видов не вызывает никаких проблем, что нельзя сказать об использовании тестового метода при измерении неэлектрических величин. Основная проблема заключается в том, что реализовать мультипликативные тесты в системе измерения неэлектрической величины практически не представляется возможным.

С практической точки зрения важным является вопрос получения алгоритма тестового метода повышения точности результата измерения с использованием только аддитивных тестов без применения мультипликативных тестов.

Методы исследования

В основе предложенных подходов по определению алгоритмов тестового метода повышения точности измерений использован аналитический метод исследования математической модели измерительного устройства (ИУ) в виде полинома n -й степени.

Аналитические исследования алгоритмов тестового метода

Существует ряд подходов по применению аддитивных тестов, которые применимы для

устройств, построенных на основе дифференциального метода измерения или с использованием обратного преобразования. Однако создать точный обратный преобразователь для неэлектрической величины не менее сложно, чем создать точный прямой преобразователь, а дифференциальный метод измерения охватывает только небольшую часть возможных подходов к измерению неэлектрических величин.

Суть дифференциальных методов измерения сводится к использованию двух идентичных измерительных устройств ИУ1 и ИУ2, на которые возмущающие неинформативные факторы воздействуют в одинаковом направлении, а измеряемая величина x – в противоположных. ИУ1 измеряет величину x , а ИУ2 – величину $(-x)$ (рисунок 1).

В [2] представлен алгоритм определения входной величины x при описании СФП полиномом второго порядка в виде $y = a_1 + a_2x + a_3x^2$. При этом процесс измерения состоит из четырех тактов, по результатам выполнения которых определяются параметры СФП a_1, a_2, a_3 и входная величина x .

В случае, если СФП описывается полиномом первого порядка в виде $y = a_1 + a_2x$, то при реализации тестового метода в процессе измерения достаточно проведения трех тактов для определения параметров a_1, a_2 и измеряемой величины x . В первых двух тактах преобразуются величины x и $(-x)$, а при выполнении третьего такта возможны два варианта.

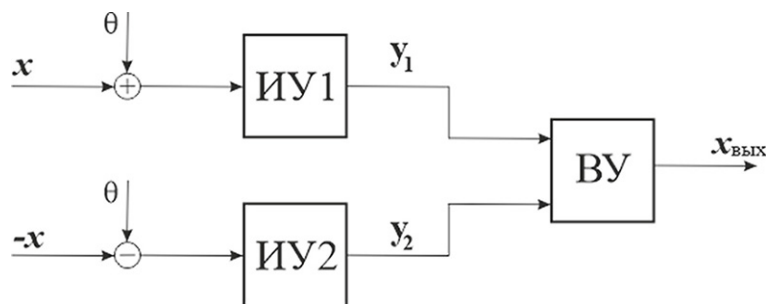
В первом варианте ко входу ИУ1 подключается тест $(x + \theta)$, а во втором варианте ко входу ИУ2 подключается тест $(-x - \theta)$.

Для первого варианта система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} y_1(1) = a_1 + a_2x, \\ y_2(2) = a_1 + a_2(-x), \\ y_1(3) = a_1 + a_2(x + \theta), \end{cases} \quad (1)$$

где $y_1(1)$ – показания ИУ1 на первом такте; $y_1(2)$ – показания ИУ2 на втором такте; $y_1(3)$ – показания ИУ1 на третьем такте.

Решение системы уравнений (1) дает следующий тестовый алгоритм:



ИУ1, ИУ2 – измерительные устройства, ВУ – вычислительное устройство

Рисунок 1 – Структурная схема измерительной системы для реализации дифференциального метода измерения

$$x = \frac{\theta}{2} \cdot \frac{y_1(1) - y_2(2)}{y_1(3) - y_1(1)}. \quad (2)$$

Для второго варианта система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} y_1(1) = a_1 + a_2x, \\ y_2(2) = a_1 + a_2(-x), \\ y_2(3) = a_1 + a_2(-x - \theta), \end{cases} \quad (3)$$

откуда

$$x = \frac{\theta}{2} \cdot \frac{y_1(1) - y_2(2)}{y_2(2) - y_2(3)}. \quad (4)$$

Значение измеряемой величины x может быть получено как полусумма значений (2) и (4).

В общем виде математические модели ИУ можно описать в виде полинома n -й степени:

$$y = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3 + \dots + a_nx^{n-1}.$$

При равенстве нулю любого из параметров математической модели ИУ, за исключением a_n , тестовый алгоритм повышения точности может быть получен с помощью только аддитивных тестов [2].

Рассмотрим получение тестового алгоритма для ИУ, математические модели которого могут быть представлены неполным полиномом первой степени в виде $y = a_2x$ и неполным полиномом второй степени в виде $y = a_2x + a_3x^2$. Параметр полинома a_1 будем связывать с первичной аддитивной погрешностью ИУ, которая может быть устранена при проведении операции по установке нулевого значения ИУ при первоначальной калибровке. Структурная схема реализации тестового алгоритма для одиночного ИУ представлена на рисунке 2.

Для ИУ с СФП в виде неполного полинома первой степени $y = a_2x$ процесс измерения величины x будет состоять из двух тактов, по результатам которых получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} y(1) = a_1 + a_2x, \\ y(2) = a_1 + a_2(x + \theta). \end{cases} \quad (5)$$

Решения системы (5) дает простейший тестовый алгоритм:

$$x = \theta \cdot \frac{y(1)}{y(2) - y(1)}. \quad (6)$$

Если СФП представлена неполным полиномом $y = a_2x + a_3x^2$, то процесс измерения будет со-

стоять из трех тактов, по результатам выполнения которых определяются два параметра a_2 , a_3 и входная величина x , причем используются два разных по величине аддитивных теста θ_1 и θ_2 . В результате проведения тестов получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} y(1) = a_2x + a_3x^2, \\ y(2) = a_2(x + \theta_1) + a_3(x + \theta_1)^2, \\ y(3) = a_2(x + \theta_2) + a_3(x + \theta_2)^2. \end{cases} \quad (7)$$

Решая систему уравнений (7), получаем следующее выражение:

$$y(2) \cdot \frac{\theta_2 \cdot x}{x + \theta_1} - y(3) \cdot \frac{\theta_1 \cdot x}{x + \theta_2} - y(1) \cdot (\theta_2 - \theta_1) = 0. \quad (8)$$

Преобразовав выражение (8), получаем уравнение второго порядка относительно измеряемой величины x :

$$Ax^2 + Bx + C = 0, \quad (9)$$

где $A = y(2)\theta_2 - y(3)\theta_1 - y(1) \cdot (\theta_2 - \theta_1)$;

$$B = y(2)\theta_2^2 - y(3)\theta_1^2 - y(1) \cdot (\theta_2^2 - \theta_1^2);$$

$$C = y(1) \cdot (\theta_1 - \theta_2) \cdot \theta_1 \theta_2.$$

Тестовый алгоритм основан на нахождении корней квадратного уравнения (9). Для выбора значения x из двух полученных корней их необходимо сравнить со значением, полученным для СФП в виде неполного полинома первой степени $y = a_2x$. Значение полученного корня уравнения (9), резко отличающегося от значения x , полученного для полинома первой степени, отбрасывается и в качестве тестового алгоритма используется второй корень уравнения (9).

В общем виде тестовый алгоритм можно представить в виде следующей функции:

$$x = f[y(1), y(2), y(3), \theta_1, \theta_2]. \quad (10)$$

С увеличением степени n полинома математической модели ИУ тестовый алгоритм будет только усложняться. Поэтому для нахождения измеряемой величины потребуются использование специализированного программного обеспечения.

К примеру, для нахождения измеряемой величины x , если СФП представлена полиномом третьей степени $y = a_2x + a_3x^2 + a_4x^3$, необходимо проведение четырех тактов с использованием аддитивных тестов $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ для получения системы из четырех уравнений. Тестовый алгоритм для определения измеряемой величины будет являть-

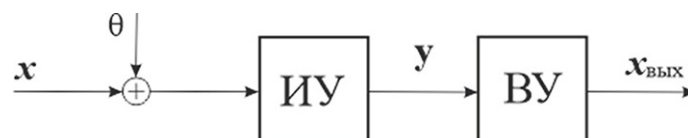


Рисунок 2 – Структурная схема ИУ

ся уравнением третьего порядка. В практической деятельности для получения простых тестовых алгоритмов в большинстве случаев стараются ограничиваться полиномом не выше второй степени.

Один из подходов повышения точности измерения неэлектрических величин и уменьшения некоррелированной составляющей погрешности заключается в статистической обработке результатов измерений многоканальных ИС. При этом представляют интерес особенности реализации аддитивных тестов в таких ИС. На рисунке 3 представлена структурная схема ИС с двумя каналами измерения ИУ1 и ИУ2.

Для двухканальной ИС будем представлять СФП каналов измерения в виде неполных полиномов первого порядка $y_1 = a_2 x$ и $y_2 = a_2^* x$, причем значения параметров a_2 и a_2^* в общем случае не равны своим номинальным значениям и друг другу, т.е. $a_2 \neq a_2^*$.

В случае, если оба ИУ не влияют друг на друга и являются независимыми, то можно использовать ранее рассмотренный подход применительно к одиночному ИУ при определении тестового алгоритма.

Процесс измерения состоит из двух тактов. В первом такте измеряемая величина x преобразуется в выходные величины $y_1(1)$ и $y_2(1)$. Во втором такте ко входу ИУ1 подключается тест $x + \theta_1$, который преобразуется в величину $y_1(2)$, а ко входу ИУ2 подключается тест $x + \theta_2$, который преобразуется в величину $y_2(2)$.

В результате двух тактов преобразования получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1(1) = a_2 x, \\ y_2(1) = a_2^* x, \\ y_1(2) = a_2 (x + \theta_1), \\ y_2(2) = a_2^* (x + \theta_2). \end{cases} \quad (11)$$

Решая систему уравнений (10) относительно измеряемой величины x , получаем два тестовых алгоритма, связывающих значения тестов θ_1, θ_2 и выходные величины y , фиксируемые на тактах измерения, с измеряемой величиной x :

$$\begin{aligned} x' &= \frac{y_1(1) \cdot \theta_1}{y_1(2) - y_1(1)}, \\ x'' &= \frac{y_2(1) \cdot \theta_2}{y_2(2) - y_2(1)}. \end{aligned}$$

Считая, что $x = (x' + x'') / 2$, получаем общий тестовый алгоритм для ИС с двумя каналами измерения:

$$x = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{y_1(1) \cdot \theta_1}{y_1(2) - y_1(1)} + \frac{y_2(1) \cdot \theta_2}{y_2(2) - y_2(1)} \right]. \quad (12)$$

При использовании в процессе измерения одинаковых тестов ($\theta_1 = \theta_2 = \theta$) значение измеряемой величины определяется выражением:

$$x = \frac{\theta}{2} \cdot \left[\frac{y_1(1)}{y_1(2) - y_1(1)} + \frac{y_2(1)}{y_2(2) - y_2(1)} \right]. \quad (13)$$

Для любой многоканальной ИС с m каналами измерения общий тестовый алгоритм можно записать как [4]:

$$x = \frac{\theta}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{y_i(1)}{y_i(2) - y_i(1)}. \quad (14)$$

Если СФП каналов измерения двухканальной ИС представляются в виде неполных полиномов второго порядка $y_1 = a_2 x + a_3 x^2$ и $y_2 = a_2^* x + a_3^* x^2$, то процесс измерения будет состоять из трех тактов [5]. В первом такте измеряемая величина x преобразуется в выходные величины $y_1(1)$ и $y_2(1)$. Во втором такте ко входу ИУ1 подключается тест $x + \theta_1$, который преобразуется в величину $y_1(2)$, а ко входу ИУ2 подключается тест $x + \theta_1$, который преобразуется в величину $y_2(2)$. В третьем такте ко входу ИУ1 подключается тест $x + \theta_2$, который преобразуется в величину $y_1(3)$, а ко входу ИУ2 подключается тест $x + \theta_2$, который преобразуется в величину $y_2(3)$ [6].

С учетом того, что в общем случае параметры каналов измерения ИУ1 и ИУ2 могут отличаться друг от друга ($a_2 \neq a_2^*, a_3 \neq a_3^*$), получаем два значения измеряемой величины x . По аналогии с (10) эти значения определяются следующими тестовыми алгоритмами [7]:

$$\begin{aligned} x' &= f_1[y_1(1), y_1(2), y_1(3), \theta_1, \theta_2], \\ x'' &= f_2[y_2(1), y_2(2), y_2(3), \theta_1, \theta_2]. \end{aligned}$$

Общий тестовый алгоритм по определению измеряемой величины будет иметь следующий вид [8]:

$$x = \frac{1}{2} \{ f_1[y_1(1), y_1(2), y_1(3), \theta_1, \theta_2] + f_2[y_2(1), y_2(2), y_2(3), \theta_1, \theta_2] \}. \quad (15)$$

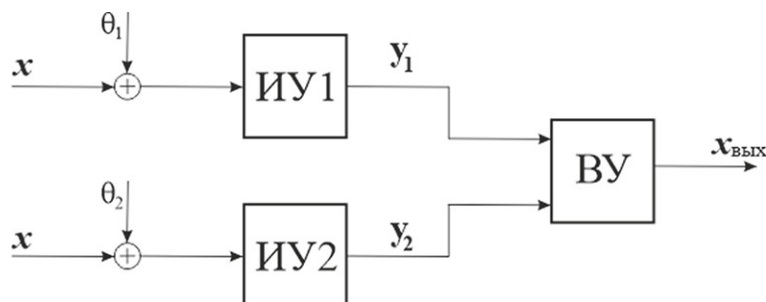


Рисунок 3 – Структурная схема измерительной системы с двумя каналами измерения

Для многоканальной измерительной системы имеем:

$$x = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_i[y_i(1), y_i(2), y_i(3), \theta_1, \theta_2]. \quad (16)$$

Научные результаты

По результатам исследований получены алгоритмы тестового метода повышения точности измерения неэлектрических величин с использованием аддитивных тестов. Алгоритмы получены при представлении математической модели ИУ в виде неполных полиномов первого и второго порядка для двухканальной и многоканальной ИС.

Заключение

Представленные алгоритмы тестового метода повышения точности измерений с использованием аддитивных тестов позволяют определить измеряемую величину без использования мультипликативных тестов при соблюдении ряда

условий. Измерения могут проводиться в определенном начальном диапазоне изменения величины при допущении равенства нулю свободного члена полинома СФП, который можно связать с аддитивной погрешностью ИУ и устранить на этапе калибровки. При значительной нелинейности СФП весь диапазон измеряемой величины разбивается на отдельные участки, в пределах которых СФП проводится кусочно-линейная аппроксимация. При этом СФП на этих участках будет описываться уже полным полиномом первого порядка в виде $y = a_1 + a_2x$. Однако для нахождения значения измеряемой величины при использовании полинома первого порядка потребуется применение не только аддитивных, но и мультипликативных тестов, которые при измерении неэлектрических величин практически являются нереализуемыми. Поэтому при выборе конкретного диапазона измеряемой величины должна ставиться задача предварительной оценки нелинейности СФП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бромберг Э.М., Куликовский К.Л. Тестовые методы повышения точности измерений. М.: Энергия, 1978.
2. МИ 2301-2000. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений.
3. Бондаренко, Л.Н. Анализ тестовых методов повышения точности измерений / Л.Н. Бондаренко, Д.И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 1 (7). – С. 15-20.
4. Кузнецов В.А. Тестовый метод повышения точности измерения плотности проточным плотномером // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. – 2014. – № 1 (14). – С. 50-54.
5. Гельман, М.М. Автоматическая коррекция систематических погрешностей в преобразователях напряжения – код / М.М. Гельман, Г.Г. Шаповал. – М.: Энергия, 1974. – 88 с.
6. Полякова О.В. Методы и способы повышения точности измерений. Часть первая // Главный метролог. – 2018. – № 5.
7. Канке А.А., Кошечкина И.П. Метрология, стандартизация и сертификация: Учебник. – М.: Издательство Форум, 2010. – 416 с.
8. Николаев Ю.А., Жаутиков Б.А., Таранов А.В., Мехтиев А.Д. Экспериментальное исследование неравномерности загрузки скипа шахтной пневмоподъемной установки // Труды университета. Выпуск 1. – Караганда: Издательство КарГТУ, 2006. – С. 64-67.

Электрлік емес шамаларды өлшеудің дәлдігін арттыруға арналған сынақ әдісінің алгоритмдері

¹*ТАРАНОВ Александр Викторович, т.ғ.к., доцент, energy_kstu@mail.ru,

¹ДВУЖИЛОВА Светлана Николаевна, аға оқытушы, dvugilova93@mail.ru,

¹БӨКІЖАНОВ Ғазиз Иман-Медынұлы, аға оқытушы, gaziz1952@bk.ru,

¹«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Физикалық шамаларды өлшеудің дәлдігін арттыру әдістерінің классификациясы берілген. Көп арналы өлшеу жүйелерінің құрылымдық сұлбалары қарастырылады. Көпмүше түріндегі өлшеуіш құрылғының математикалық моделі ұсынылған. Екі және көп арналы өлшеу жүйелерінде электрлік емес шамаларды өлшеудің дәлдігін арттыру үшін сынақ әдісінің алгоритмдерін жүзеге асыру ұсынылған. Алгоритмдерде мультипликативті тесттерді қолданбай тек аддитивті тесттерді қолдану мүмкіндігі негізделген.

Кілт сөздер: өлшеу жүйесі, өлшеу құрылғысы, өлшеу арнасы, статикалық түрлендіру функциясы, ақпаратсыз факторлар, өлшеу құралының математикалық моделі, өлшеу қателігі, электрлік емес шамалар, дифференциалды өлшеу әдісі, есептеу құрылғысы, аддитивті сынақ, мультипликативті сынақ.

Algorithms of the test Method for Increasing the Accuracy of Measuring Non-electric Quantities

¹***TARANOV Alexandr**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, energy_kstu@mail.ru,

¹**DVUZHILOVA Svetlana**, Senior Lecturer, dvugilova93@mail.ru,

¹**BOKIZHANOV Gaziz**, Senior Lecturer, gaziz1952@bk.ru,

¹NPJSC «Abyljas Saginov Karaganda Technical University», Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,

*corresponding author.

Abstract. A classification of methods for increasing the accuracy of measurements of physical quantities is presented. Structural diagrams of multichannel measuring systems are considered. A mathematical model of the measuring device in the form of a polynomial is proposed. The implementation of test method algorithms for increasing the accuracy of measurements of non-electric quantities in two- and multi-channel measuring systems is presented. The possibility of using only additive tests in algorithms without the use of multiplicative tests is substantiated.

Keywords: measuring system, measuring device, measurement channel, static conversion function, non-informative factors, mathematical model of the measuring device, measurement error, non-electric quantities, differential measurement method, computing device, additive test, multiplicative test.

REFERENCES

1. Bromberg E.M., Kulikovskij K.L. Testovye metody povysheniya tochnosti izmerenij. Moscow: Energiya, 1978.
2. MI 2301-2000. Obespechenie effektivnosti izmerenij pri upravlenii tekhnologicheskimi processami. Metody i sposoby povysheniya tochnosti izmerenij.
3. Bondarenko, L.N. Analiz testovyh metodov povysheniya tochnosti izmerenij / L.N. Bondarenko, D.I. Nefed'ev // Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'. – 2014. – No. 1 (7). – pp. 15-20.
4. Kuznecov V.A. Testovyy metod povysheniya tochnosti izmereniya plotnosti protochnym plotnomerom // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: tekhnicheskie nauki. – 2014. – No. 1 (14). – pp. 50-54.
5. Gel'man, M.M. Avtomaticheskaya korrekciya sistematicheskikh pogreshnostej v preobrazovatelyah napryazhenie – kod / M.M. Gel'man, G.G. SHapoval. – Moscow: Energiya, 1974. – 88 p.
6. Polyakova O.V. Metody i sposoby povysheniya tochnosti izmerenij. CHast' pervaya // Glavnyj metrolog. – 2018. – No. 5.
7. Kanke A.A., Koshevaya I.P. Metrologiya, standartizaciya i sertifikaciya: Uchebnik. – Moscow: Publ. Forum, 2010. – 416 p.
8. Nikolaev YU.A., ZHautikov B.A., Taranov A.V., Mekhtiev A.D. Eksperimental'noe issledovanie neravnomernosti zagruzki skipa shahtnoj pnevmopod"emnoj ustanovki // Trudy universiteta. Vypusk 1. – Karaganda: Publ. KarGTU, 2006. – pp. 64-67.