

Научная статья

УДК 681.5.011

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-7-27-31>

Оптимизация процесса воспроизведения, сбора, передачи, обработки и отображения результатов измерений с использованием Национального эталона единицы напряжения – вольт

Вадим Васильевич Попко^{1✉}, Диана Валентиновна Сентемова², Марина Анатольевна Ярмолевич³

^{1, 2, 3} Белорусский государственный институт метрологии (БелГИМ), Минск, Республика Беларусь

¹vadim.popko@belgim.by✉, <https://orcid.org/0000-0002-6804-3336>

²sentemova@belgim.by, <https://orcid.org/0000-0002-4840-5897>

³yarmolovich@belgim.by, <https://orcid.org/0000-0001-7656-1195>

Аннотация. Рассмотрены вопросы автоматизации калибровки эталонных средств измерений напряжения постоянного тока. Разработана, исследована и внедрена в производственный процесс автоматическая система калибровки. Автоматическая система представляет собой программно-аппаратный комплекс, содержащий средства измерений из состава Национального эталона единицы напряжения – вольт и дополнительные модули. Автоматическая система создана на основе современного языка программирования «Python» с привлечением опыта метрологов. Проведено исследование результатов калибровки эталонных мер напряжения постоянного тока. Полученные результаты калибровки (приписанное действительное значение с расширенной неопределённостью) проанализированы в автоматическом и ручном режимах, а также с помощью системы «supraVOLTcontrol», реализующей эффект Джозефсона. Автоматическая система применена при исследовании интегральной неустойчивости (нелинейности) цифрового вольтметра, при этом получена существенная минимизация трудозатрат. Разработанная автоматическая система калибровки позволяет сократить трудоёмкость и продолжительность выполнения измерений, обеспечивает гибкость и способность к перестроению в зависимости от вопросов, возникающих при исследованиях.

Ключевые слова: автоматическая система калибровки, интегральная нелинейность, оптимизация, одноплатный компьютер Raspberry Pi, скрипты (программы) Python

Для цитирования: Попко В. В., Сентемова Д. В., Ярмолевич М. А. Оптимизация процесса воспроизведения, сбора, передачи, обработки и отображения результатов измерений с использованием Национального эталона единицы напряжения – вольт // Измерительная техника. 2021. № 7. С. 27–31. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-7-27-31>

Optimization of the process of reproduction, collection, transmission, processing and display of measurement results of the National voltage unit standard – volt

Vadim V. Popko^{1✉}, Diana V. Sentemova², Maryna A. Yarmalovich³

Belarussian state institute of metrology (BelGIM), Minsk, Belarus

¹vadim.popko@belgim.by✉, <https://orcid.org/0000-0002-6804-3336>

²sentemova@belgim.by, <https://orcid.org/0000-0002-4840-5897>

³yarmolovich@belgim.by, <https://orcid.org/0000-0001-7656-1195>

Abstract. Considered options for automating the calibration. An automatic calibration system has been developed, investigated and introduced into the production process, which is a software and hardware complex consisting of measuring instruments from the composition of the National standard of voltage unit – volt and additional modules. The automatic system was created on the basis of the modern programming language “Python” with the involvement of the experience of metrologists. A study of the results of calibration of reference voltage measures was carried out: the obtained results of the calibration of the DC voltage (assigned real value with expanded uncertainty) were analyzed in automatic and manual modes and using the “supraVOLTcontrol” system, which implements the Josephson effect. The automatic system was used in the study of the integral instability (nonlinearity) of a digital voltmeter, while a significant minimization of labor costs was obtained. The developed automatic calibration system allows to reduce labor intensity and duration of measurements, provides flexibility and ability to rebuild depending on emerging issues during research.

Keywords: automatic calibration system, integral nonlinearity, optimization, single-board computer Raspberry Pi, scripts (programs) Python

Введение. В настоящее время заметно возросло количество областей человеческой деятельности, в которых требуются достоверные измерения электрического напряжения. Создание новых и модернизация существующих производств, пересмотр существующих методов измерений, необходимость увеличения количества измерений и автоматизации обработки полученных результатов с отображением значимой для анализа информации о влияющих величинах требуют постоянного усовершенствования и оптимизации процесса измерений электрического напряжения. Для решения возникающих задач в Белорусском государственном институте метрологии (БелГИМ) создан и успешно эксплуатируется Национальный эталон единицы напряжения – вольты (далее – НЭ). Основой НЭ является система supraVOLTcontrol (Supracon, Германия), предназначенная для воспроизведения и измерения напряжения постоянного тока в диапазоне $-10...+10$ В. Принцип действия системы основан на квантовом эффекте Джозефсона. Также в состав НЭ входит комплект эталонного оборудования для расширения измерительных возможностей до 1000 В.

Цель статьи – исследовать варианты автоматизации измерений, разработать и внедрить в производственный процесс

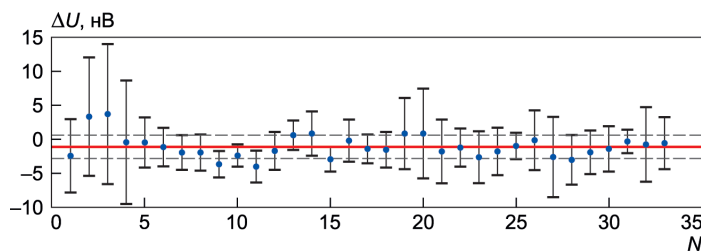


Рис. 1. Результаты ключевых сличений по уровню напряжения 10 В транспортируемого эталона ВНИИМ и эталона БелГИМ; ΔU – разность напряжений; N – номер измерения

Fig. 1. Results of key comparisons at the voltage level of 10 V of the transported VNIIM standard and the BelGIM standard; ΔU – voltage difference; N – measurement number

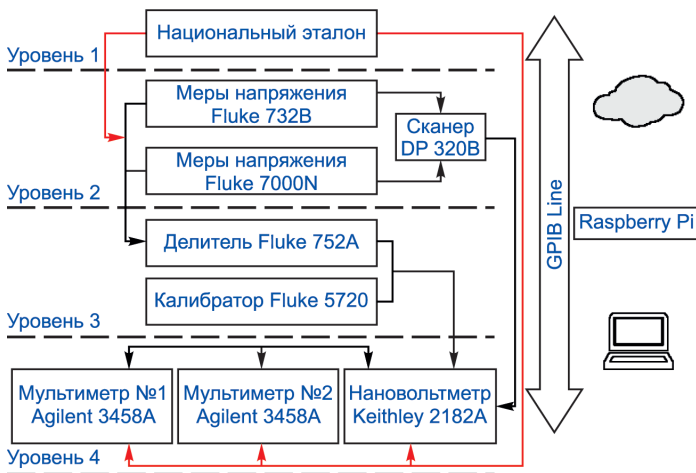


Рис. 2. Схема подключения средств измерений при воспроизведении и измерении единицы напряжения постоянного тока

Fig. 2. Connection diagram of measuring instruments during reproduction and measurement of a DC voltage unit

автоматическую систему калибровки эталонного оборудования из состава НЭ и прецизионных средств измерений (СИ) напряжения постоянного тока.

Постановка задачи проекта. Передачу единицы можно условно разделить на четыре уровня. Для обеспечения качества передачи единицы на каждом из уровней применяются различные методы, технические решения и навыки, поэтому для получения достоверных результатов измерений и обработки данных необходима разная продолжительность времени.

Для реализации первого уровня передачи единицы вольты в рамках ключевого сличения BIPM.EM-K10.b проведены прямые сличения первичных эталонов Российской Федерации Государственного первичного эталона единицы электрического напряжения ГЭТ 13-01 и Международного бюро мер и весов (далее – эталон МБМВ). В результате сличений получено опорное значение единицы напряжения постоянного тока. На втором уровне через двухсторонние ключевые сличения COOMET.EM.BIPM-K10.b (тема KOOMET 542/RU/11) установлена эквивалентность единицы напряжения постоянного тока, воспроизводимой ГЭТ 13-01, и НЭ. Сличения проходили в два этапа. На первом этапе предварительно исследованы два эталона для выявления и устранения помех, влияющих на качество и точность измерений, на втором этапе проведены основные исследования и последующая обработка результатов. В качестве опорного значения напряжения постоянного тока использовали значение эталона МБМВ, которое принимали неизменным во времени. В рамках данных сличений впервые в мировой метрологической практике успешно применены созданные во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева транспортируемые эталоны, реализующие эффект Джозефсона. Результаты ключевых сличений по уровню напряжения 10 В транспортируемого эталона представлены на рис. 1.

Так как реализующая эффект Джозефсона система является коммерческим продуктом фирмы Supracon (Германия), то в процессе организации и проведения измерений участники сличений столкнулись с рядом неудобств из-за закрытости исходного кода в программном обеспечении, что привело к невозможности подстройки определённых параметров при измерениях и их корректировки с учётом исследованных влияющих величин. Программное обеспечение Supracon создано на платформе LabView, что требует установки дополнительных тяжёлых библиотек и драйверов, а это значительно снижает производительность компьютера и в результате создаёт неудобства для развертывания нового рабочего места. Кроме того, большое количество устанавливаемых библиотек приводит к проблемам совместимости различных версий программного обеспечения. В связи с указанными проблемами принято решение разработать собственное аппаратное и программное решение для измерений и последующей передачи и обработки результатов.

Методы (теоретические основы) автоматизации. Основой решения описанной выше задачи стал компактный одноплатный компьютер Raspberry Pi (Raspberry Pi Foundation, Великобритания), к его достоинствам относятся низкая энергозатратность, малые габаритные размеры, бесшумная работа, автономность. Данный компьютер при внешнем питании 5 В позволяет подключать СИ напряжения постоянного тока с помощью распространенных интерфейсов передачи данных – GPIB, LAN, USB

и RS-232, а также различные внешние датчики контроля температуры окружающей среды, относительной влажности воздуха, атмосферного давления или датчики напряжения и частоты питающей сети.

В качестве операционной системы авторы настоящей статьи использовали свободно распространяемое программное обеспечение Raspberry Pi OS на базе Linux-систем. Для связи с СИ напряжения постоянного тока дополнительно был установлен дистрибутив linux-gpiib. Управление СИ осуществлялось с помощью интерпретируемого объектно-ориентированного языка программирования высокого уровня Python – одного из наиболее распространённых в крупных университетах, инженерных и научных центрах. Простота, лёгкость освоения синтаксиса и удобочитаемость программного кода в сочетании с большой универсальностью и широкими возможностями применения делает Python удобным и популярным языком программирования для автоматизации. Это позволяет людям, не имеющим практических навыков программирования, разрабатывать программные решения для автоматизации рутинных задач. Преимущества Python не ограничиваются простотой использования. Скрипты (программы) Python можно запускать кроссплатформенно в любой операционной системе. Python – чрезвычайно мощный и широко используемый язык для анализа данных и сложных математических вычислений.

Согласно схеме метрологической прослеживаемости, начиная со второго уровня управление СИ напряжения постоянного тока осуществляется на базе компьютера, который обеспечивает круглосуточный доступ к СИ по цепочке интерфейсов Ethernet – GPIB. Реализованная схема подключения показана на рис. 2. Подключение к компьютеру производится через командную строку по IP-адресу и протоколу SSH на любом компьютере или смартфоне. Для этого необходимо ввести команду `ssh username@ip-address`, а затем заранее установленный пароль, который служит защитой от несанкционированного доступа. Далее командой Python «имя_файла» запускается заранее подготовленный скрипт для управления СИ.

Таким образом, на втором уровне метрологической прослеживаемости единица напряжения постоянного тока передаётся от НЭ вторичным эталонам – мерам напряжения Fluke 732B (Fluke Corporation, США) и Fluke 7000N (Fluke Corporation, США), которые ежедневно сличаются между собой с использованием

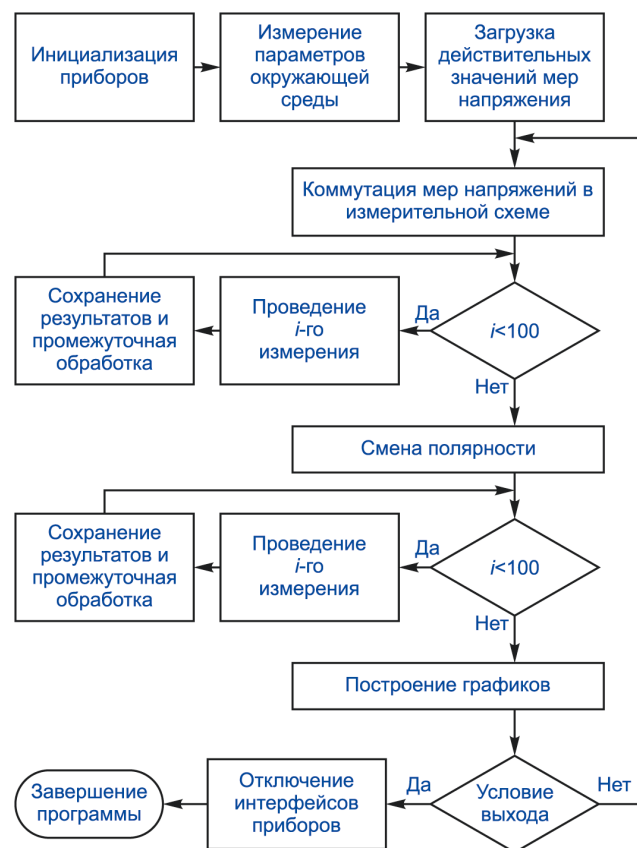


Рис. 3. Блок-схема работы программного модуля

Fig. 3. Block diagram of the software module

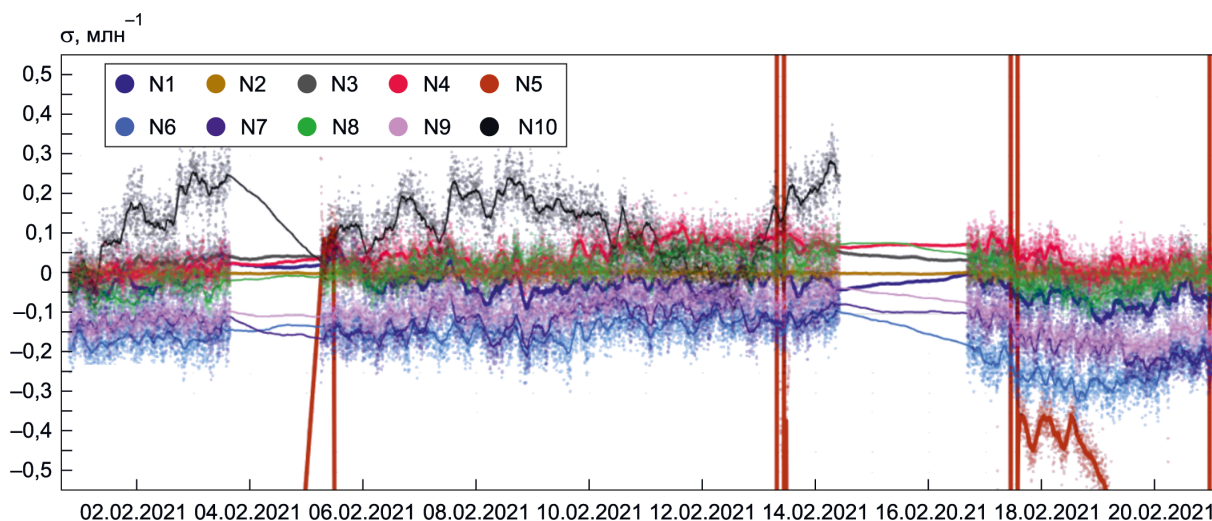


Рис. 4. График результатов измерения при исследовании стабильности десяти мер напряжения Fluke 732B (N1–N10) и контроля условий измерений

Fig. 4. Graph of measurement results when investigating the stability of ten Fluke 732B DC voltage standards (N1–N10) and monitoring the measurement conditions

сканера DataProof 320B (DATA PROOF, США) с низкой термоэлектродвижущей силой (термоэдс) в качестве переключателя полярности и нановольтметра Keithley 2182A (Keithley Instruments, Inc., США) в качестве нуль-индикатора. Это позволяет отслеживать ежедневный дрейф данных мер напряжений. Реализованная процедура измерений приведена на рис. 3.

Подготовленный скрипт на Python проводит инициализацию СИ напряжения по номеру GPIB-порта, фиксирует параметры окружающей среды, проводит измерения с использованием действительных значений мер напряжений, предварительно приписанных на основании результатов исследования с использованием системы Supracon. Далее при заданных условиях по времени или количеству измерений скрипт коммутирует меры напряжения между собой и производит 100 измерений при положительной полярности, даёт команду сканеру о смене полярности и выполняет 100 измерений при отрицательной полярности, при этом все измеренные значения сохраняются в файл формата csv на сервере. Затем происходит обработка и визуализация результатов измерений путём построения графика (рис. 4). На графике рис. 4 наблюдаются ярко выраженные выбросы в конкретный момент измерений одной из мер напряжения, что свидетельствует о нестабильности этой меры. Дополнительно программа строит график контроля условий проведения измерений.

На третьем уровне метрологической прослеживаемости единица передаётся от вторичных эталонов рабочим эталонам –

от мер напряжения калибратору Fluke 5720A (Fluke Corporation, США) с использованием прецизионного делителя напряжения Fluke 752A (Fluke Corporation, США) и нановольтметра Keithley 2182A в качестве нуль-индикатора. На этом этапе измерения проводятся в полуавтоматическом режиме, так как в делителе Fluke 752A отсутствует возможность удалённого управления. Это учтено программно. Сначала программа указывает на необходимость подготовительных работ, таких как балансировка делителя и установка нуля нановольтметра, затем программа инициализирует СИ, имеющие интерфейс GPIB, и требует от пользователя переключить пределы на делителе и сменить полярность на мере напряжения. Все измерения также фиксируются в файле формата csv, здесь же рассчитывается действительное значение напряжения калибратора исходя из действительного значения меры и установленного коэффициента деления на делителе, который сохраняется на сервере.

На четвертом уровне метрологической прослеживаемости единица напряжения методом непосредственной оценки передаётся от калибратора Fluke 5720A прецизионным мультиметрам Agilent 3458A (Agilent Technologies, Incorporated, США) и нановольтметру Keithley 2182A. Важным параметром этих мультиметров является исследование интегральной нестабильности (интегральной нелинейности – INL). В промышленности INL используется в качестве показателя эффективности в системах цифроаналогового (ЦАП) и аналого-цифрового преобразований (АЦП). В источниках ЦАП – это мера отклонения между идеальным выходным значением и фактическим измеренным выходным значением для определённого входного цифрового сигнала. В АЦП – это отклонение между идеальным пороговым значением входа и измеренным пороговым уровнем определённого выходного цифрового сигнала. Обычно передаточная функция с интегральной нелинейностью аппроксимируется прямой линией методом наименьших квадратов. Часто аппроксимирующей прямой просто соединяют наименьшее и наибольшее значения. Интегральную нелинейность определяют путём сравнения напряжений, при которых происходят кодовые переходы. Данные измерения выполняются после компенсации других основных составляющих суммарной погрешности, таких как смещение и усиление. Интегральная нелинейность является ключевым фактором, который определяет точность измерения неизвестного сигнала, после того как все другие составляющие суммарной погрешности учтены и исправлены. Обычно для исследования INL требуется большое количество измерений с заданными параметрами шага и диапазона, это трудоёмкий и долгий процесс. Разработанная авторами настоящей статьи программа

позволяет провести это исследование полностью в автоматическом режиме и отобразить результат на графике (Метрология и исследования [сайт]. URL: <http://www.xdevs.com>).

Результаты. Разработанная автоматическая система настроена и использована для калибровки эталонного оборудования из состава НЭ, а также для калибровки вторичных

Таблица 1

Бюджет неопределённости результатов калибровки одной меры напряжением 10 В

Источник неопределённости	Тип u_c	Значения u_c в разных режимах калибровки, В	
		ручной	автоматический
Неопределённость меры напряжения из сертификата калибровки	B	$0,062 \cdot 10^{-6}$	$0,062 \cdot 10^{-6}$
Нелинейность цифрового мультиметра	B	$0,058 \cdot 10^{-6}$	$0,058 \cdot 10^{-6}$
Термоэдс системы supraVOLTcontrol	B	$0,040 \cdot 10^{-6}$	$0,040 \cdot 10^{-6}$
Повторяемость результатов	A	$6,52 \cdot 10^{-8}$	$6,52 \cdot 10^{-8}$
Воспроизводимость результатов	A	$2,32 \cdot 10^{-7}$	$2,32 \cdot 10^{-7}$
Стандартная неопределённость, В		$2,59 \cdot 10^{-7}$	$2,59 \cdot 10^{-7}$
Расширенная неопределённость, В ($P=95\%$, $k=2$)		$5,17 \cdot 10^{-7}$	$5,17 \cdot 10^{-7}$

Таблица 2

Результаты калибровки мер напряжения Fluke 732B, полученные различными способами

Fluke 732B	Автоматический режим, В	Ручной режим, В	SupraVOLTcontrol, В
Мера № 1	$10,000002901 \pm 4,16 \cdot 10^{-7}$	$10,000002724 \pm 5,18 \cdot 10^{-7}$	$10,000002911 \pm 1,24 \cdot 10^{-7}$
Мера № 2	$9,999925114 \pm 4,16 \cdot 10^{-7}$	$9,999924887 \pm 5,17 \cdot 10^{-7}$	$9,999925121 \pm 1,31 \cdot 10^{-7}$
Мера № 3	$9,999928298 \pm 4,16 \cdot 10^{-7}$	$9,999928206 \pm 5,19 \cdot 10^{-7}$	$9,999928326 \pm 1,24 \cdot 10^{-7}$
Мера № 4	$9,999928409 \pm 4,16 \cdot 10^{-7}$	$9,999928315 \pm 5,17 \cdot 10^{-7}$	$9,999928414 \pm 1,24 \cdot 10^{-7}$

и рабочих эталонов напряжения – СИ заказчиков. Проверка функциональности автоматической системы продемонстрировала, что автоматическая калибровка происходит быстрее, чем в ручном режиме, и не требует присутствия оператора. Верификация автоматической системы проведена при калибровке набора мер напряжения 10 В в идентичных условиях калибровки при десятикратных наблюдениях в течение десяти дней. Полученные результаты измерений и соответствующая оценка расширенной неопределённости сопоставлены с результатами ручной калибровки и калибровки с использованием системы supraVOLTcontrol, реализующей эффект Джозефсона. Проанализированы серии из 20 измерений, за оценку результата наблюдений (приписанное действительное значение меры напряжения) принято среднее арифметическое результатов измерений. При этом как при ручной, так и при автоматической калибровке использованы одни и те же сканер, цифровой мультиметр, соединительные кабели. В табл. 1 представлен расчёт бюджета неопределённости результатов калибровки в ручном и автоматическом режимах одной меры напряжения 10 В, где u_c – стандартная неопределённость; P – доверительная вероятность; k – коэффициент охвата. В табл. 2 приведены полученные различными способами результаты (приписанные действительные значения с расширенной неопределённостью) калибровки набора мер напряжения 10 В (Fluke 732B), входящих в состав НЭ.

Из табл. 2 следует, что сопоставимы результаты калибровки, полученные в автоматическом и ручном режимах, а оценка расширенной неопределённости в автоматическом режиме меньше соответствующих оценок в ручном режиме. В результате достигнута совместимость и улучшена повторяемость результатов измерений в автоматическом режиме. В процессе верификации разработанной и внедрённой автоматизированной системы подтверждены её функциональные возможности и совместимость результатов измерений в автоматическом и ручном режимах, а также с использованием системы supraVOLTcontrol, реализующей эффект Джозефсона.

Заключение. Разработанный по итогам исследований проблемы автоматизации измерений программно-аппаратный комплекс позволяет проводить измерения на Национальном эталоне единицы напряжения – вольты в автоматическом режиме. Полученный массив результатов измерений подвергается дальнейшей обработке, отображается в графическом виде, хранится и передаётся пользователям, тем самым оптимизируются процессы воспроизведения и передачи единицы напряжения постоянного тока рабочим эталонам и СИ.

Список литературы

1. Катков А. С., Черняев П. А. Сличение национальных эталонов вольты Российской Федерации и Республики Беларусь // Измерительная техника. 2013. № 5. С. 69–71.
2. Столлинс В. Компьютерные системы передачи данных. М.: Вильямс, 2002, 928 с.

3. Катков А. С., Ловцус В. Э., Быков А. И., Шевцов В. И., Новодережкин Г. В. Воспроизведение вольты на основе переходов Джозефсона СИС- и СНС-типа // Измерительная техника. 2017. № 6. С. 45–48. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2017-6-45-48>
4. Катков А. С., Солее С. Ключевые сличения эталонов вольты ВНИИМ и МБМВ // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 70–73.
5. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М.: Наука, 1969. 512 с.
6. Миронов Э. Г., Бессонов Н. П. Метрология и технические измерения. М.: КНОРУС, 2015. 422 с.
7. Муха Ю. Л., Королева И. Ю. Информационно-измерительные системы. Волгоград: Волгоградский ГТУ, 2015.
8. Behr R., Katkov A. S., *Metrologia*, 2005, vol. 42, Technical Supplement, p. 01005. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/42/1A/01005>
9. Behr R., Schulze H., Müller F., Kohlmann J., Niemeyer J., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1999, vol. 48, no. 2, pp. 270–273. <https://doi.org/10.5772/17031>
10. Павлов Ал. А., Павлов А. А., Павлов П. А., Царьков А. Н., Хоруженко О. В. Метод контроля ошибок в устройствах хранения и передачи информации автоматизированных систем измерительной техники // Измерительная техника. 2011. № 11. С. 21–25.

References

1. Katkov A. S., Chernjaev P. A., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 5, pp. 570–575. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0246-6>
2. William Stallings, *Data & Computer Communications*, Upper Saddle River, New Jersey, 2001, 928 p.
3. Katkov A. S., Lovcjs V. Je., Bykov A. I., Shevcov V. I., Novoderezhkin G. V., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 589–593. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1240-1>
4. Katkov A. S., Solve S., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 54, no. 11, pp. 1313–1318. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-9873-6>
5. Smirnov N. V., Dunin-Barkovskij I. V., *Kurs teorii verojatnostej i matematicheskoj statistiki dlja tehnicheskikh prilozhenij*, Moscow, Nauka Publ, 1969, 512 p. (In Russ.)
6. Mironov E. G., Bessonov N. P., *Metrologija i tehnicheckie izmerenija*, Moscow, KNORUS Publ, 2015, 422 p. (In Russ.)
7. Muha Yu. L., Koroleva I. Yu., *Informacionno-izmeritel'nye sistemy*, Volgograd, Volgogradskij GTU Publ., 2015. (In Russ.)
8. Behr R., Katkov A. S., *Metrologia*, 2005, vol. 42, Technical Supplement, p. 01005. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/42/1A/01005>
9. Behr R., Schulze H., Müller F., Kohlmann J., Niemeyer J., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1999, vol. 48, no. 2, pp. 270–273. <https://doi.org/10.5772/17031>
10. Pavlov Al. A., Pavlov A. A., Pavlov P. A., Car'kov A. N., Horuzhenko O. V., *Measurement Techniques*, 2011, vol. 53, no. 11, pp. 1233–1235. <https://doi.org/10.1007/s11018-011-9647-6>

Статья поступила в редакцию 30.03.2021; принята к публикации 01.06.2021.