

Государственная поверочная схема для средств измерений электрического сопротивления постоянного и переменного токов

Марк Данилович Клионский¹✉, Игорь Александрович Самодуров²

^{1, 2} Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия

¹m.d.klionsky@vniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9629-9091>

²i.a.samodurov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8174-556X>

Аннотация. Рассмотрены вопросы разработки государственной поверочной схемы для средств измерений электрического сопротивления постоянного и переменного токов в связи с появлением высокоточных мостов, внедрением в метрологическую практику мер и магазинов сопротивления, обладающих весьма малым температурным коэффициентом $(0,02-0,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, высокостабильных переходных мер, электронных калибраторов сопротивления, мер сопротивления переменного тока, используемых как на постоянном, так и на переменном токе. Даны рекомендации по присвоению статуса эталона измерительным шунтам, мерам и измерителям сопротивления с погрешностью 0,005–0,5 %, достаточной для проведения поверки средств измерений. Разработана, утверждена и описана государственная поверочная схема для средств измерений электрического сопротивления постоянного и переменного токов, которая состоит из двух частей: первая часть распространяется на меры, магазины и измерители электрического сопротивления, вторая часть – на измерительные шунты и измерители сопротивления шунтов. Вторая часть введена в государственную поверочную схему впервые. Уточнены показатели точности для эталонов всех уровней, приведены условия исследования средств измерений для присвоения статуса эталона, критерии оценки метрологических характеристик.

Ключевые слова: электрическое сопротивление, поверочная схема, эталон, измерительный шунт

Для цитирования: Клионский М. Д., Самодуров И. А. Государственная поверочная схема для средств измерений электрического сопротивления постоянного и переменного токов // Измерительная техника. 2021. № 5. С. 26–30. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-5-26-30>

State verification scheme for means of measuring DC and AC electrical resistance

Mark D. Klionsky¹✉, Igor A. Samodurov²

^{1, 2} D. I. Mendeleev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

¹m.d.klionsky@vniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9629-9091>

²i.a.samodurov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8174-556X>

Abstract. The need to develop a new state verification scheme (SVS) is caused by the emergence of high-precision bridges, resistance measures and boxes with a low temperature coefficient $(0,02-0,5) \text{ ppm/K}$, highly stable transient measures, electronic resistance calibrators, and high frequency resistance measures. Recommendations how to assign the status of a working standard to measures, R-meters and measuring shunts with accuracy from 0,005 % to 0,500 %, sufficient for verification of measuring instruments, are given. SVS consists of two parts: part 1 covers electrical resistance measures, boxes and R-meters, part 2 – to measuring shunts and shunt resistance meters. Part 2 was introduced to the SVS for the first time. The revised indicators of accuracy for working standards of all levels are considered, conditions for the investigation of measuring instruments for assigning the status of a working standard, criteria for assessing metrological characteristics are given.

Keywords: electrical resistance, verification scheme, working standard, measuring shunt

Введение. В связи с появлением высокоточных мостов, внедрением в метрологическую практику мер и магазинов сопротивления с низким температурным коэффициентом $(0,02-0,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, высокостабильных переходных мер, электронных калибраторов сопротивления, мер сопротивления переменного тока, используемых как на постоянном, так и на переменном токе, возникла необходимость узаконить их применение

в качестве эталонов. Кроме того, в Международной системе единиц принято новое определение единицы сопротивления, что должно быть отражено в нормативных документах, действующих в данной области измерений. Для решения этих задач во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева разработана Государственная поверочная схема (ГПС) для средств измерений (СИ) электрического сопротивления постоянного

и переменного токов. ГПС утверждена приказом Росстандарта от 30.12.2019 г. № 3456 и действует с 1 апреля 2020 г.

При разработке ГПС учтены следующие изменения, произошедшие в области измерений электрического сопротивления в период 2016–2020 гг.:

введены новые определения основных единиц Международной системы единиц, базирующихся на значениях фундаментальных физических констант, что узаконило воспроизведение единицы электрического сопротивления (ом) посредством реализации квантового эффекта Холла и установило определение ома на основе значений заряда электрона и постоянной Планка. Базовые значения сопротивления: 100 Ом; 1 и 10 кОм;

появление в метрологической практике автоматизированных высокоточных мостов с отношением плеч 0,1; 1; 10; 100, позволяющих упростить процедуру передачи единицы для эталонов высшей точности;

оснащение многих метрологических центров СИ на уровне точности вторичного и разрядных рабочих эталонов, что требует уточнения критериев присвоения статуса эталона;

внедрение в метрологическую практику высокостабильных многозначных мер (магазинов сопротивления, переходных мер) и электронных калибраторов сопротивления [1–5], не уступающих однозначным мерам по метрологическим характеристикам (МХ). Это позволяет установить единые показатели точности при присвоении разряда;

появление мер сопротивления переменного тока с верхней границей частоты 10 МГц, что требует расширения в ГПС диапазона частот эталонных мер до указанной частоты;

необходимость приведения требований к нестабильности мер некоторых номинальных значений в соответствие с реальными характеристиками существующих СИ, полученными путём обобщения результатов многолетних исследований высокоточных СИ сопротивления постоянного и переменного токов, проводимых во ВНИИМ при присвоении разряда или статуса вторичного эталона;

присвоение статуса эталона однозначным мерам, магазинам и измерителям сопротивления постоянного тока с пониженной точностью (погрешность 0,005–0,5 %), но достаточной по запасу точности для поверки СИ;

необходимость включения в ГПС измерительных шунтов, так как последние, по существу, являются мерами сопротивления, работающими при больших токах. Кроме того, исходными эталонами при их поверке являются эталонные меры электрического сопротивления;

присвоение статуса эталона измерительным шунтам, используемым при поверке в центрах стандартизации, метрологии и испытаний и на предприятиях-изготовителях.

Состав ГПС. Разработанная ГПС состоит из двух частей: первая часть распространяется на меры, магазины и измерители электрического сопротивления, вторая часть – на измерительные шунты и измерители сопротивления шунтов. Также разработанная ГПС полностью покрывает МХ шунтов, включённых в ГПС для СИ коэффициентов преобразования тока (утверждена в 2018 г.).

Основные положения ГПС в части мер, магазинов и измерителей сопротивления. В ГПС отражены следующие положения.

Узаконено применение в качестве эталонов, наряду с мерами и магазинами сопротивления, измерителями и мостами постоянного и переменного токов, таких СИ, как калибраторы сопротивления, прецизионные резисторы, шунты, составные меры на основе Т-цепей. Допускается применять в качестве эталонов отдельные меры из наборов мер, магазины сопротивления с неполным набором декад и измерители сопротивления в неполном диапазоне (не на всех поддиапазонах).

Приведены показатели точности (доверительная граница погрешности $\delta_{\text{отн}}$ ($P=0,95$) или предел допускаемой

Таблица 1

Показатели точности эталонных мер и измерителей сопротивления постоянного тока

Разряд	$R_{\text{ном}}, \text{Ом}$	$\delta_{\text{отн}}, \Delta_{\text{отн}}, \%$	$v_{\text{отн}}, \%$, не более
1	$1 \cdot 10^{-4}$	0,0004	0,001
	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^5$	0,0002	0,0006
	$1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^8$	0,0004	0,001
	$1 \cdot 10^9$	0,0005	0,001
	$1 \cdot 10^{10}$	0,002	0,005
	$1 \cdot 10^{11}$	0,01	0,03
	$1 \cdot 10^{12}$	0,05	0,1
2	$1 \cdot 10^{-4}$	0,001	0,002
	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^5$	0,0004	0,0008
	$1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^8$	0,001	0,002
	$1 \cdot 10^9$	0,001	0,002
	$1 \cdot 10^{10}$	0,005	0,01
	$1 \cdot 10^{11}$	0,02	0,05
	$1 \cdot 10^{12}$	0,1	0,2
3	$1 \cdot 10^{-4}$	0,002	0,005
	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^5$	0,001	0,002
	$1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^8$	0,002	0,005
	$1 \cdot 10^9$	0,002	0,005
	$1 \cdot 10^{10}$	0,01	0,05
	$1 \cdot 10^{11}$	0,05	0,15
	$1 \cdot 10^{12}$	0,5	1
4	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^8$	0,5	0,6
	$1 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{10}$	1,5	2,5
	$1 \cdot 10^{11}$	2	4
	$1 \cdot 10^{12}$	4	6
	$1 \cdot 10^{13}$	6	8
	$1 \cdot 10^{14}$	8	15
	$1 \cdot 10^{15}$	12	18
	$1 \cdot 10^{16}$	30	–

Примечание. *Исправлена опечатка, допущенная в тексте ГПС.

относительной погрешности определения действительного значения $\Delta_{\text{отн}}$), а также относительная нестабильность за год $v_{\text{отн}}$ для каждого номинального значения сопротивления разрядных рабочих эталонов $R_{\text{ном}}$ (табл. 1, 2).

Присвоение разряда стало возможным для СИ с любыми нестандартными значениями сопротивления. При этом для мер с номинальными значениями сопротивления $(2 \dots 9) \cdot 10^n$ указанные погрешности и нестабильность не должны превышать значений, приведённых в табл. 1, 2 для мер с номинальными значениями сопротивления $1 \cdot 10^n$.

В ГПС, утверждённой в 2016 г., в таблицах показатели точности для каждого номинального значения сопротивления были даны только для эталонов-копий, эталонов сравнения и вторичных эталонов. Для разрядных эталонов были приведены только верхняя и нижняя границы диапазонов погрешности и нестабильности, что приводило к неоднозначной трактовке показателей при присвоении разряда.

Выработаны единые требования к МХ при присвоении разряда однозначным мерам, многозначным мерам (магазинам сопротивления) и измерителям сопротивления. Раньше для присвоения разряда использовали различные документы (для однозначных мер – ГОСТ 8.237-2003 «ГСИ. Меры электрического сопротивления однозначные. Методика поверки»; для магазинов сопротивления – МИ 1695-87, для мостов переменного тока – ГОСТ Р 8.686-2009 «ГСИ. Мосты переменного тока уравновешенные. Методика поверки»; для измерителей сопротивления – ГПС 2016 г., хотя в ней были указаны лишь диапазоны погрешности и допускаемой

нестабильности). При этом требования к МХ СИ различного вида, но одного и того же разряда иногда не совпадали.

Введён дополнительный 4 разряд для мер, магазинов и измерителей сопротивления постоянного тока с пониженной точностью (погрешность 0,005–0,500 %), не удовлетворяющих требованиям к эталонам 3 разряда. В ГПС 2016 г. не предусмотрена возможность присвоения разряда таким СИ, даже если они обеспечивали необходимый запас по точности по отношению к поверяемому (рабочему) СИ. В настоящее время в стране действует положение о том, что все СИ, применяемые для поверки, должны иметь статус эталона, поэтому введение 4 разряда позволит использовать упомянутые СИ сопротивления в поверочных целях. Вместе с тем возможна ситуация, когда магазину сопротивления (или другому СИ) ранее был присвоен статус эталона 3 разряда, по ГПС теперь он попадает в 4 разряд и формально не будет соответствовать требованию методики поверки, если там указан в качестве средства поверки эталон 3 разряда. В этом случае эталон можно, по-прежнему, применять для поверки, если он обеспечивает необходимый запас по точности (обычно отношение погрешностей эталона и СИ должно быть не более 1:3 (см. ГОСТ 22261-94 «Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия»).

Разработаны и включены в ГПС условия присвоения статуса вторичного или разрядного рабочего эталона. Указано, что для вторичных и разрядных эталонов необходимо проводить исследование в течение не менее двух лет с интервалом один год, в течение которых должно быть проведено не менее трёх поверок. Полученные МХ должны соответствовать показателям точности, указанным в табл. 1, 2. Введено положение о том, что измерителям сопротивления статус вторичного или разрядного рабочего эталона может быть присвоен непосредственно по результатам первичной или периодической поверки.

Предусмотрена возможность проведения поверки эталонных мер и магазинов сопротивления 3, 4 разрядов методом косвенных измерений (метод «амперметра-вольтметра») с помощью калибратора тока и вольтметра.

В эталон сравнения включены меры большого сопротивления до 1 ГОм. Это связано с тем, что в последние годы международные сличения эталонов сопротивления проводят в области больших значений сопротивления [6].

Расширены верхняя и нижняя границы диапазона частот для ряда эталонов сопротивления переменного тока в связи с появлением мер сопротивления, применяемых при частотах до 10 МГц, и измерителей импеданса, захватывающих область низких частот. Теперь диапазон частот эталонов составляет 20–10⁷ Гц. Определение действительного значения сопротивления мер на переменном токе соответствующей частоты проводят на уровне вторичных эталонов введением поправок с помощью мер сопротивления с расчётной частотной характеристикой [7, 8]. Допускаемые погрешности измерений эталонов нормируют при частотах: в диапазоне 20–100 Гц; 1, 10, 100 кГц; 1 и 10 МГц. Учитывая частотный диапазон некоторых измерителей импеданса, иногда

Таблица 2

Показатели точности эталонных мер и измерителей сопротивления переменного тока

Разряд	$R_{\text{ном}}, \text{Ом}$	$\delta_{\text{отн}}, \Delta_{\text{отн}}, \%$, при частоте, Гц						$v_{\text{отн}}^{**}, \%$ не более
		20–100	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	
1	$1 \cdot 10^{-1}$	0,02	0,01	0,02	0,08	–	–	0,03
	1–10	0,03	0,01	0,01	0,05	0,3	–	0,03
	$1 \cdot 10^2$ – $1 \cdot 10^4$	0,01	0,008	0,01	0,02	0,03	0,3	0,02
	$1 \cdot 10^5$	0,01	0,01	0,02	0,02	0,2	–	0,03
	$1 \cdot 10^6$	0,01	0,01	0,03	0,03	0,2*	–	0,03
	$1 \cdot 10^7$ – $1 \cdot 10^8$	0,03	0,03	0,1	1	–	–	0,10
2	$1 \cdot 10^{-2}$	0,05	0,03	0,1	–	–	–	0,10
	$1 \cdot 10^{-1}$	0,05	0,02	0,05	0,1	–	–	0,05
	1–10	0,05	0,02	0,05	0,1	0,5	–	0,05
	$1 \cdot 10^2$ – $1 \cdot 10^4$	0,03	0,02	0,02	0,03	0,05	0,5	0,05
	$1 \cdot 10^5$ – $1 \cdot 10^6$	0,02	0,02	0,05	0,05	0,3*	–	0,05
	$1 \cdot 10^7$ – $1 \cdot 10^8$	0,05	0,05	0,2	2	–	–	0,10
3	$1 \cdot 10^{-3}$	0,1	0,2	–	–	–	–	0,10
	$1 \cdot 10^{-2}$	0,1	0,1	0,2	–	–	–	0,20
	$1 \cdot 10^{-1}$	0,1	0,05	0,1	0,2	–	–	0,10
	1–10	0,1	0,05	0,1	0,2	0,3	1	0,10
	$1 \cdot 10^2$ – $1 \cdot 10^4$	0,04	0,03	0,03	0,05	0,1	1	0,10
	$1 \cdot 10^5$ – $1 \cdot 10^6$	0,05	0,05	0,1	0,3	0,5	–	0,10
	$1 \cdot 10^7$ – $1 \cdot 10^8$	0,1	0,1	0,5	3	–	–	0,20

Примечание. *Исправлена опечатка, допущенная в тексте ГПС.

**Значение $v_{\text{отн}}$ определено на частоте 1 кГц или при постоянном токе.

Таблица 3

Показатели точности и основные технические характеристики эталонных шунтов

Ток	Статус эталона	R , Ом	$\Delta_{\text{отн}}$, %	$I_{\text{ном}}$, А	Класс точности
Постоянный	Вторичный	10^{-4} –10	0,001–0,01	10^{-4} –300	–
	1 разряд	10^{-4} –10	0,005–0,05	10^{-3} –300	–
	2 разряд	$5 \cdot 10^{-6}$ –10	0,07–0,2	10^{-3} – $4 \cdot 10^3$	0,1; 0,2
	2 разряд	$5 \cdot 10^{-6}$ –10	0,07–0,2	$500; (5-15) \cdot 10^3$	0,5
Переменный	Вторичный	10^{-4} –1000	0,01–0,05	10^{-2} –300	–
	1 разряд	10^{-2} –1000	0,02–0,1	10^{-3} –300	–
	2 разряд	10^{-3} –1000	0,1–0,2	10^{-3} –300	0,1; 0,2

появляется потребность проводить поверку также при частоте 120 или 400 Гц. Тогда допускаемые погрешности эталонов можно принять равными погрешностям, указанным для частот 100 Гц и 1 кГц соответственно.

Основные положения ГПС в части измерительных шунтов. Вторая часть ГПС устанавливает требования к МХ измерительных шунтов постоянного и переменного токов и является новым разделом для рассматриваемой ГПС (табл. 3, где R – сопротивление, $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток).

В качестве исходного эталона используются низкоомные меры электрического сопротивления 1, 2, 3, 4 разрядов из первой части рассматриваемой ГПС. Диапазон сопротивления этих мер составляет 10^{-4} –10 Ом на постоянном токе, 10^{-3} – 10^3 Ом [9] на переменном токе в широком диапазоне частот (до 100 кГц в зависимости от $R_{\text{ном}}$). Предел допускаемой погрешности соответственно 0,0002–0,05 и 0,008–0,2 %.

Во второй части ГПС предусмотрены вторичные эталоны и рабочие эталоны 1 и 2 разрядов. В качестве вторичных и разрядных рабочих эталонов используют измерительные и электронные шунты постоянного и переменного тока и измерители сопротивления шунтов [9, 10]. В последние годы появились электронные шунты, диапазон сопротивления которых составляет 10^{-3} –10 Ом при силе тока от 20 мА до 200–300 А. Погрешности электронных шунтов 0,01–0,02 %. В качестве измерителей сопротивления шунтов используют измерители малого сопротивления (микроомметры) с дополнительным разрядом, получаемым с помощью специальных программ, с разрешающей способностью 1–10 нОм. Наиболее распространённым шунтам класса точности 0,5 статус эталона можно присвоить только в диапазоне больших значений тока ($I_{\text{ном}}=5$ кА и более). При $I_{\text{ном}}=4$ кА и менее эталонами могут быть только шунты класса точности 0,2 и лучше. Исключение составляют эталонные шунты с $I_{\text{ном}}=500$ А, так как шунты, рассчитанные на эту силу тока, выпускаются только класса точности 0,5.

Так же, как для мер сопротивления, предусмотрена возможность поверки эталонных и измерительных шунтов методом «амперметра-вольтметра» с помощью калибратора тока и вольтметра. Включено также положение о возможности применения эталонных шунтов для поверки микроомметров в диапазоне измерений 5–100 мкОм (соответствует шунтам для силы тока 750– $15 \cdot 10^3$ А), т. е. там, где отсутствуют эталонные меры сопротивления. В этом случае сопротивление шунтов следует измерять при силе тока, близкой к рабочему току микроомметра (обычно от одного до нескольких десятков ампер, но не при рабочих токах шунтов). Рассматриваемые шунты имеют несколько токовых зажимов с каждой стороны, и часто возможность подключения всех токовых зажимов отсутствует. Проведённые во ВНИИМ исследования шунтов с $I_{\text{ном}}=6$ кА (по четыре токовых зажима) и $I_{\text{ном}}=15$ кА (по восемь токовых зажимов) с применением специальных токовых перемычек показывают, что погрешности в зависимости

от способа включения шунта могут составить: 0,1–0,3 % для шунта 6 кА, 0,8–1,6 % для шунта 15 кА. Учитывая, что класс точности шунтов 0,5, и соответственно предел допускаемой погрешности $\Delta_{\text{отн}}=0,5$ %, погрешности от способа включения шунта могут составить значительную часть значения $\Delta_{\text{отн}}$ и даже превысить его.

Для присвоения шунтам и измерителям сопротивления шунтов статуса вторичного эталона исследование должно проводиться не менее двух лет с интервалом один год, в течение которых должно быть проведено не менее трёх поверок. Статус рабочего эталона 1 или 2 разряда может быть присвоен непосредственно по результатам первичной или периодической поверки. Измерения проводят при трёх значениях испытательного тока, составляющих 20 % $I_{\text{ном}}$, одно значение из диапазона 50–60 % $I_{\text{ном}}$; 100 % $I_{\text{ном}}$. Допускается для эталонных шунтов 2 разряда с номинальным током 5–15 кА измерения проводить только при токе, равном 20 % $I_{\text{ном}}$. Шунтам 1 и 2 разрядов требования к оценке долговременной нестабильности сопротивления не предъявляются из-за относительно высокой погрешности эталонных шунтов (на 2–3 порядка больше, чем для эталонов единицы сопротивления). Причина в том, что шунты изготавливают из высокостабильного сплава (обычно из манганина), поэтому нестабильность, как правило, оказывается существенно меньше погрешности измерений.

Заключение. Разработанная ГПС содержит ряд впервые введённых положений, устанавливающих чёткий порядок при присвоении СИ статуса эталона различных разрядов и содержащих единые критерии оценки показателей точности для эталонов различных видов (однозначных мер, магазинов и измерителей сопротивления), но одного и того же разряда. Введён дополнительный 4 разряд, что позволит использовать имеющиеся СИ сопротивления невысокой точности в поверочных целях. Допускается возможность поверки эталонных мер сопротивления методом косвенных измерений. Важным дополнением к ГПС является вторая часть, охватывающая область измерений шунтов постоянного и переменного токов. Установлены требования к показателям точности и значениям испытательного тока при присвоении шунтам статуса эталона. Введено положение о возможности использования шунтов для поверки микроомметров.

Внедрение ГПС позволит расширить диапазон значений сопротивления и повысить точность измерений на низших звеньях поверочной схемы, проводить более эффективно поверочные работы, охватить метрологическим контролем расширенную номенклатуру СИ сопротивления.

Список литературы

1. Самодуров И. А. Передача единицы электрического сопротивления в область тераом в соответствии с ГПС электрического сопротивления // Сборник докладов 75-й науч.-техн. конф. СПб НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященной Дню радио, 2020, СПб. С. 264–265. URL: <https://confntores.etu.ru/assets/files/2020/cp/pages/s11.html> (дата обращения: 24.04.2020).
2. Semenov Y., Samodurov I., *CPEM 2010*, Daejeon, Korea (South), 2010, pp. 643–644. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2010.5544296>
3. Lisowski M., Krawczyk K., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, June 2013, vol. 62, no. 6, pp. 1749–1754. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2250132>
4. Jarrett D. G., Dupree A. J., *CPEM 2010*, Daejeon, Korea (South), 2010, pp. 571–572. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2010.5544805>
5. Jarret D. G., Kraft M.E., 10 TΩ and 100 TΩ resistance measurements at NIST, *X-Semetro Congress, Digest*, Buenos Aires, Argentina, Sept. 25–27, 2013.
6. Jeckelmann B., Zeier M., *Metrologia*, 2010, vol. 47, 01006. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/47/1A/01006>
7. Bohacek J., Wood B. M., *Metrologia*, 2001, vol. 38, no. 3, pp. 241–248. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2000.850932>
8. Awan S. A., Kibble B. P., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, April 2005, vol. 54, no. 2, pp. 516–520. <https://doi.org/10.1109/TIM.2005.843582>
9. Filipski P. S., Boecker M., Garcocz M., *2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007*, Warsaw, Poland, 2007, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2007.379124>
10. Клионский М. Д., Шипелев К. И. Метод сличения шунтов с мерой сопротивления // Сборник докладов 75-й

науч.-техн. конф. СПб НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященной Дню радио, 2020, СПб. С. 262–263. URL: <https://confntores.etu.ru/assets/files/2020/cp/pages/s11.html> (дата обращения: 24.04.2020).

References

1. Samodurov I. A., *Collection of reports of the 75th International Scientific and Technical Conference*, 2020, St. Petersburg, pp. 264–265, available at: <https://confntores.etu.ru/assets/files/2020/cp/pages/s11.html> (accessed: 24.04.2020). (In Russ.)
2. Semenov Y., Samodurov I., *CPEM 2010*, Daejeon, Korea (South), 2010, pp. 643–644. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2010.5544296>
3. Lisowski M., Krawczyk K., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, June 2013, vol. 62, no. 6, pp. 1749–1754. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2250132>
4. Jarrett D. G., Dupree A. J., *CPEM 2010*, Daejeon, Korea (South), 2010, pp. 571–572. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2010.5544805>
5. Jarret D. G., Kraft M.E., 10 TΩ and 100 TΩ resistance measurements at NIST, *X-Semetro Congress, Digest*, Buenos Aires, Argentina, Sept. 25–27, 2013.
6. Jeckelmann B., Zeier M., *Metrologia*, 2010, vol. 47, 01006. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/47/1A/01006>
7. Bohacek J., Wood B. M., *Metrologia*, 2001, vol. 38, no. 3, pp. 241–248. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2000.850932>
8. Awan S. A., Kibble B. P., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, April 2005, vol. 54, no. 2, pp. 516–520. <https://doi.org/10.1109/TIM.2005.843582>
9. Filipski P. S., Boecker M., Garcocz M., *2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007*, Warsaw, Poland, 2007, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2007.379124>
10. Klionsky M. D., Shipelev K. I., *Collection of reports of the 75th International Scientific and Technical Conference 2020*, St. Petersburg, pp. 262–263, available at: <https://confntores.etu.ru/assets/files/2020/cp/pages/s11.html> (accessed: 24.04.2020). (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 25.02.2021; принята к публикации 16.03.2021.