

Государственный первичный эталон единиц коэффициента и угла масштабного преобразования синусоидального тока ГЭТ 152—2011

Ю. И. СЫЧЕВ, Б. В. ЗАХАРОВ, Ю. И. ДИДИК, Е. В. ВОРОНСКАЯ

Уральский научно-исследовательский институт метрологии, Екатеринбург,
Россия, e-mail: tme@uniim.ru

Представлены результаты модернизации Государственного первичного эталона единиц коэффициента и угла масштабного преобразования синусоидального тока ГЭТ 152—2011. Приведены его устройство и метрологические характеристики.

Ключевые слова: эталон, масштабное преобразование электрического тока, трансформаторы тока.

The results of improvement of the State primary standard GET 152—2011 of the coefficient and angle of sinusoidal current scale transformation are presented. Its structure and metrological characteristics are described.

Key words: standard, scale transformation of electric current, current transformer.

Измерение силы электрического тока является актуальной задачей с момента возникновения производства, передачи и потребления электрической энергии. По данным Росстата объем производства электрической энергии в России составляет порядка 10^{12} кВт·ч/год, доля промышленного потребления — около 60 %, потери в сетях — приблизительно 12 %. Технически электрическая энергия производится и передается, за небольшим исключением, на переменном токе.

Единица электрического тока (ампер) — одна из основных единиц величин. Метрологическое обеспечение измерений силы переменного тока в России осуществляется на основе государственного специального эталона, созданного во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева [1].

В электроэнергетике необходимо измерять ток в диапазоне 1—30000 А и более, в промышленности — до нескольких сотен килоампер. Для этого применяют измерительные трансформаторы тока (ИТТ), обеспечивающие масштабное преобразование большого¹ первичного тока в ток с меньшей силой в пределах диапазона со стандартными номинальными значениями 5 А или 1 А, а также сохранение фазового угла преобразуемого тока, что важно для измерений электрической мощности и энергии [2, 3]. Мировой опыт в этой области измерений показывает, что технически целесообразнее решать задачу метрологического обеспечения ИТТ, чем создавать эталон ампера на 30000 А. В настоящее время парк рабочих средств измерений практически полностью состоит из ИТТ.

В 1960—1980 гг. в Свердловском филиале ВНИИМ им. Д. И. Менделеева (ныне УНИИМ) с целью поверки ИТТ были созданы исходные образцовые средства измерений и установка высшей точности УВТ 11-81, которые перекрыли достаточно широкий диапазон токов и частот. В 1983—1986 гг.

разработан и исследован Государственный первичный специальный эталон единицы коэффициента и угла масштабного преобразования синусоидального тока ГЭТ 152—86 с целью централизованного воспроизведения и передачи единиц коэффициента и угла масштабного преобразования синусоидального тока (МПСТ) рабочим средствам измерений — трансформаторам тока. В 1988 г. введен в действие стандарт [4] на указанный эталон и государственную поверочную схему. С момента создания поверочной схемы измерительные возможности УНИИМ включены в базу данных Международного бюро мер и весов [5].

Эффективность централизованного воспроизведения и передачи единиц величин, характеризующих масштабное преобразование электрического тока, полностью подтверждена на практике. Электротехнические предприятия, производящие ИТТ, а также потребители их продукции — энергетические объекты, получили возможность надлежащим образом организовывать метрологическое обеспечение выпускаемых ИТТ.

Передача единиц коэффициента и угла МПСТ осуществляется в соответствии с [4]. Методы и средства поверки ИТТ при выпуске и эксплуатации регламентированы стандартом [6].

Состояние и перспективы развития средств измерений коэффициента и угла МПСТ в России. Необходимость совершенствования государственного эталона. В настоящее время в эксплуатации находятся около 100 млн. единиц трансформаторного оборудования. Из них на долю ИТТ приходится не менее 10 млн. единиц. В частности, ИТТ применяют в различных автоматизированных системах, обеспечивающих учет количества электрической энергии, контроль показателей ее качества, а также выполняющих функции управления энергообъектами и защиты от аварийных ситуаций.

На сегодняшний день в России насчитывается более 800 энергоблоков общей мощностью 220 ГВт. В течение бли-

¹ По классификации МБМВ большим считают электрический ток силой более 100 А.

жайших 10 лет планируется создание и ввод в эксплуатацию примерно такого же количества новых мощностей, что повлечет значительное увеличение числа трансформаторного оборудования.

За прошедшие десятилетия с момента ввода ГЭТ 152—86 произошли значительные изменения в этой области. С одной стороны, возник рынок электрической энергии, резко обостривший проблему поверки ИТТ на местах эксплуатации. С другой стороны, прогресс в области технологий привел к появлению новых магнитных материалов с улучшенными потребительскими свойствами. Применяв магнитные материалы на основе аморфных и нанокристаллических сплавов для изготовления магнитопроводов трансформаторов, были разработаны ИТТ классов точности 0,2S и 0,5S. Нормирование метрологических характеристик (МХ) таких ИТТ осуществляется в диапазоне 1—120 % номинального значения первичного тока, так же как и для счетчиков электрической энергии соответствующих классов точности. Начиная с 2000 г. в эксплуатацию поступают указанные трансформаторы тока российского и зарубежного производства.

Парк ИТТ в России состоит, в основном, из трансформаторов тока классов точности 0,5 и 1,0. Нормирование МХ (токовая и угловая погрешности) этих трансформаторов осуществляется в диапазоне изменения первичного тока 5—120 % его номинального значения, что не отвечает современным требованиям, предъявляемым к точности учета электрической энергии. Измерение электроэнергии с использованием трансформаторов данного класса точности приводит к значительному количеству неучтенной электроэнергии. Например, при объеме производимой в России электроэнергии примерно 1000 млрд. кВт·ч/год, останутся неучтенными или будут недополучены с потребителей порядка 400 млрд. руб. В связи с изложенным выше возникает задача по проведению модернизации и замене изношенного оборудования, в том числе и трансформаторов тока, на новое с более высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

В последние десять лет произошел качественный скачок в вопросе метрологического обеспечения данного вида измерений. Появление материалов с высокой магнитной

проницаемостью и уменьшенными магнитными потерями позволило существенно повысить метрологические характеристики выпускаемых ИТТ. В стране освоен выпуск новых ИТТ с повышенной точностью и первичным током до 36 кА класса точности 0,01. Разработаны и производятся трансформаторы тока измерительные лабораторные ТТЭ-3000.5 (токовая погрешность 0,003—0,006 %, угловая погрешность 0,2—0,4'), позволяющие применять их в качестве вторичных эталонов с целью передачи единиц коэффициента и угла масштабного преобразования переменного тока от государственного эталона рабочим эталонам первого разряда. Применение двухступенчатых трансформаторов тока (ДТТ) совместно с приборами сравнения токов, обеспечивающими необходимые параметры нагрузки для ДТТ, позволило не только существенно улучшить МХ этих трансформаторов, но и значительно снизить их вес и габаритные размеры. В результате появилась возможность проведения поверки ИТТ на месте эксплуатации без демонтажа и транспортирования в распоряжение метрологических служб.

Чем выше возможности государственного эталона, тем сильнее стимул для производителей и потребителей применять рабочие средства измерений с более высокой точностью. Сегодня технические возможности современных счетчиков электроэнергии в автоматизированных информационно-измерительных системах коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) не реализуются в полной мере именно из-за низкого класса точности измерительных трансформаторов.

Очевидно, что назрела необходимость модернизации ГЭТ 152—86. Основные причины проведения работ по модернизации: отставание эталона по своим калибровочным возможностям от эталонов ведущих стран мира; устаревшее оборудование; потребность в расширении рабочего диапазона первичного тока; появление новых рабочих средств измерений повышенной точности; невысокая производительность работ при передаче единиц; отсутствие эталона сравнения, позволяющего проводить сличения в широком диапазоне первичных токов, обладающего высокими МХ, малыми габаритными размерами и весом.

С 2009 по 2011 гг. в УНИИМ в рамках программы по развитию эталонной базы России были выполнены работы по совершенствованию ГЭТ 152—86. Модернизированному первичному эталону коэффициента и угла МПСТ присвоен номер ГЭТ 152—2011 [7].

Состав и описание ГЭТ 152—2011. В результате проведенных работ было заменено оборудование, входящее в состав эталона. Структурная схема ГЭТ 152—2011 приведена на рис. 1. Первичный эталон представляет комплекс следующих технических средств: компараторов тока, измерительной установки и эталона сравнения.

В состав набора компараторов тока входят: компаратор тока эталонный каскадный ТТЭК-30К/5; компаратор тока КЭ-10М. Измерительная установка состоит из: приборов сравнения КНТ-05А и КНТ-05АМ; источников регулируемого тока ИТР-15К и ИТР-30К; персонального компьютера; принтера. Эталон сравнения содержит трансформаторы тока измерительные лабораторные ТТЭ-3000.5, ТТЭ-100, ТТЭ-200.

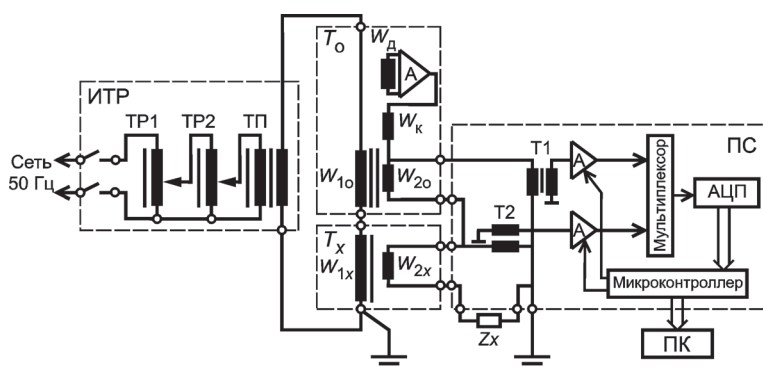


Рис. 1. Схема государственного первичного эталона:

ИТР — регулируемый источник тока (ИТР-15К или ИТР-30К); ТР1, ТР2 — регулировочные трансформаторы; ТП — трансформатор питания; Т0 — эталонный трансформатор тока (ТТЭК-30К/5 или КЭ-10М); Тх — поверяемый трансформатор тока; W10, W1x — первичные обмотки; W20, W2x — вторичные обмотки; Wк — компенсационная обмотка; Wд — детекторная обмотка; ПС — прибор сравнения (КНТ-05А или КНТ-05АМ); Т1, Т2 — измерительный и дифференциальный трансформаторы; А — электронный усилитель; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; Zx — вторичная нагрузка Тх; ПК — персональный компьютер

Питание измерительной установки осуществляется от трехфазной сети 380 В. Мощность, потребляемая установкой при максимальном первичном токе 36 кА, не превышает 80 кВ·А. Регулируемый источник тока ИТР (см. рис. 1) управляет током с помощью автотрансформаторов ТР1 и ТР2, имеющих две схемы включения (последовательное соединение автотрансформаторов с питанием от одной или подключение к двум фазам сети) в зависимости от силы первичного тока. На рис. 1 приведена первая схема подключения, которая обеспечивает плавную регулировку тока в нижнем диапазоне и используется при первичных токах до 10 кА. Первичные обмотки W_{10} эталонного и W_{1x} поверяемого трансформаторов тока соединены последовательно и подключены к выходной обмотке трансформатора питания ТП регулируемого источника тока ИТР. Вторичные обмотки W_{20} и W_{2x} подключены к прибору сравнения ПС. В основу работы прибора положен дифференциальный метод, основанный на сравнении вторичных токов поверяемого и эталонного трансформаторов. Сигнал с вторичной обмотки трансформатора Т1, пропорциональный вторичному току эталонного трансформатора, а также сигнал с вторичной обмотки дифференциального трансформатора Т2, пропорциональный разности вторичных токов эталонного и поверяемого трансформаторов, усиливаются и преобразуются с применением аналого-цифрового преобразователя в дискретные последовательности. Микроконтроллер, анализируя полученные цифровые данные, выбирает по каждому измерительному каналу оптимальный коэффициент усиления, а затем с помощью дискретного преобразования Фурье вычисляет амплитудную и угловую погрешности поверяемого трансформатора. Персональный компьютер ПК, подключенный к прибору сравнения, с программным обеспечением «КНТ-Эталон» собирает и обрабатывает данные. Результаты измерений заносятся в протокол поверки установленного типа, распечатываются на принтере и сохраняются в электронном виде на жестком диске компьютера.

Набор компараторов тока служит для воспроизведения и хранения единиц коэффициента и угла МПСТ на частоте 50 Гц в диапазоне номинальных значений первичного тока от 0,5 А до 50 кА.

Компаратор ТТЭК-30К/5 состоит из двух каскадов — В, А. Каскад В используется при первичных номинальных токах 0,5—3000 А и вторичном номинальном токе 5 А и 0,5—600 А и 1 А. При токах свыше 3000 А и 600 А применяется каскадная схема включения. Суммарный коэффициент трансформации при каскадном включении трансформаторов равен произведению их коэффициентов.

Пульт оператора состоит из регулируемых источников напряжения, силовых коммутаторов, измерительного блока, прибора сравнения, компьютера и принтера. Соединение эталонного и калибруемого трансформаторов с прибором сравнения КНТ-05АМ осуществляется посредством попарно свитых проводников с нормируемыми значениями сопротивления.

Входящие в состав эталона трансформаторы тока ТТЭ-3000.5, ТТЭ-100 и ТТЭ-200 используются в качестве эталонов сравнения при проведении международных сличений. Трансформатор ТТЭ-3000.5 применяется в диапазоне первичных номинальных токов 0,5—3000 А и вторичных номинальных токах 1 А и 5 А. При токах свыше 400 А в качестве первичной обмотки используется съемный шинопровод. Его конструкция позволяет с высокой точностью и стабильно-

стью обеспечивать воспроизведение коэффициента и угла МПСТ. Трансформаторы ТТЭ-100 и ТТЭ-200 служат для расширения диапазона первичного тока и работают совместно с ТТЭ-3000.5 в каскадной схеме включения. Максимальный ток ТТЭ-100 составляет 18 кА, ТТЭ-200 — 60 кА. Все трансформаторы изготовлены по схеме двухступенчатых четырехобмоточных компараторов с электронной компенсацией.

Анализ метрологических характеристик ГЭТ 152—2011.

В соответствии с программой и методикой аттестации эталона были проведены исследования погрешности (неопределенности) воспроизведения единиц коэффициента и угла МПСТ.

В основу работы ГЭТ 152—2011 положен принцип равенства магнитодвижущих сил, возникающих при протекании тока по виткам первичной и вторичной обмоток компаратора тока:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2, \quad (1)$$

где N_1 , N_2 — число витков первичной и вторичной обмоток; I_1 , I_2 — первичный и вторичный токи.

Коэффициент масштабного преобразования K_i определяется в соответствии с формулой, полученной из (1):

$$K_i = I_1/I_2 = N_2/N_1. \quad (2)$$

Номинальный коэффициент $K_{i \text{ ном}}$ — отношение номинальных первичного $I_{1 \text{ ном}}$ и вторичного $I_{2 \text{ ном}}$ токов, которое может быть представлено в виде определенного числа или диапазона номинальных значений первичного и вторичного токов.

Погрешность компаратора тока выражена формулой:

$$\varepsilon = \varepsilon_p + j\varepsilon_q = N_s I_s / (N_p I_p) - 1, \quad (3)$$

где ε_p , ε_q — синфазная и квадратурная (сдвиг по фазе на 90°) составляющие комплексной погрешности ε , соответственно; N_p , N_s — число первичных и вторичных витков; I_p , I_s — первичные и вторичные комплексные токи.

В табл. 1 приведены МХ ГЭТ 152—2011, а в табл. 2 — показатели точности при воспроизведении единицы коэффициента и угла МПСТ.

Таблица 1
Метрологические характеристики ГЭТ 152—2011

Наименование МХ	Значение
Номинальные значения коэффициента МПСТ	от 0,5/1 до $5 \cdot 10^4/1$ от 0,5/5 до $5 \cdot 10^4/5$
Номинальное значение угла МПСТ	0
Номинальные значения первичного тока, А	$0,5—5 \cdot 10^4$
Диапазон измерения первичного тока, в % от номинального	1—120
Номинальные значения вторичного тока, А	1; 5
Номинальное значение частоты переменного тока, Гц	50

Таблица 2

Показатели точности при воспроизведении единиц коэффициента, млн^{-1} , и угла, мкрад, МПСТ

Наименование МХ	Значение
Среднее квадратическое отклонение результата измерений при 10 независимых наблюдениях, S	0,5—1,0
Неисключенная систематическая погрешность, Θ	5,0—15
Стандартная неопределенность по типу А при 10 независимых наблюдениях, u_A	0,5—1,0
Стандартная неопределенность по типу В, u_B	1,8—6,9
Расширенная неопределенность, U ($k = 2$)	4,0—14
Нестабильность эталона за год, ν	1,0—2,0

Результаты международных сличений. С целью определения степени эквивалентности национальных эталонных измерительных систем коэффициента преобразования переменного тока между УНИИМ (Россия) и РТВ (Германия) в 2010—2011 гг. были проведены дополнительные двухсторонние сличения ИТТ с номинальными коэффициентами преобразования тока (5 А ... 50 кА/5 А; 1 А ... 50 кА/1 А) при частоте 50 Гц.

Сличения проходили в рамках проекта COOMET.EM-S11 и темы KOOMET 513/DE-a/10. В качестве института-пилота выступил РТВ. Результаты сличений доложены на конференции CPEM в 2012 г. [8].

Транспортируемые эталоны сравнения подготовил УНИИМ. В их качестве были использованы трансформаторы тока из состава эталона сравнения ТТЭ-3000.5 в диапазоне первичных номинальных токов 1—3000 А и трансформатор тока ТТЭ-200 совместно с ТТЭ-3000.5 в каскадном включении в диапазоне токов 5—50 кА на частоте 50 Гц.

Результаты международных сличений (рис. 2) соответствуют границам суммарных стандартных неопределенностей. УНИИМ были заявлены значения расширенной неопределенности в соответствии с МХ усовершенствованного эталона. На основании полученных результатов составлены и приведены в табл. 3 новые данные об измерительных возможностях эталона.

Сопоставление ГЭТ 152—2011 с зарубежными аналогами. На основании предварительных данных о результатах сличений можно сделать вывод, что калибровочные возможности ГЭТ 152—2011 соответствуют мировому уровню. В табл. 4 даны сравнительные характеристики измерительных возможностей.

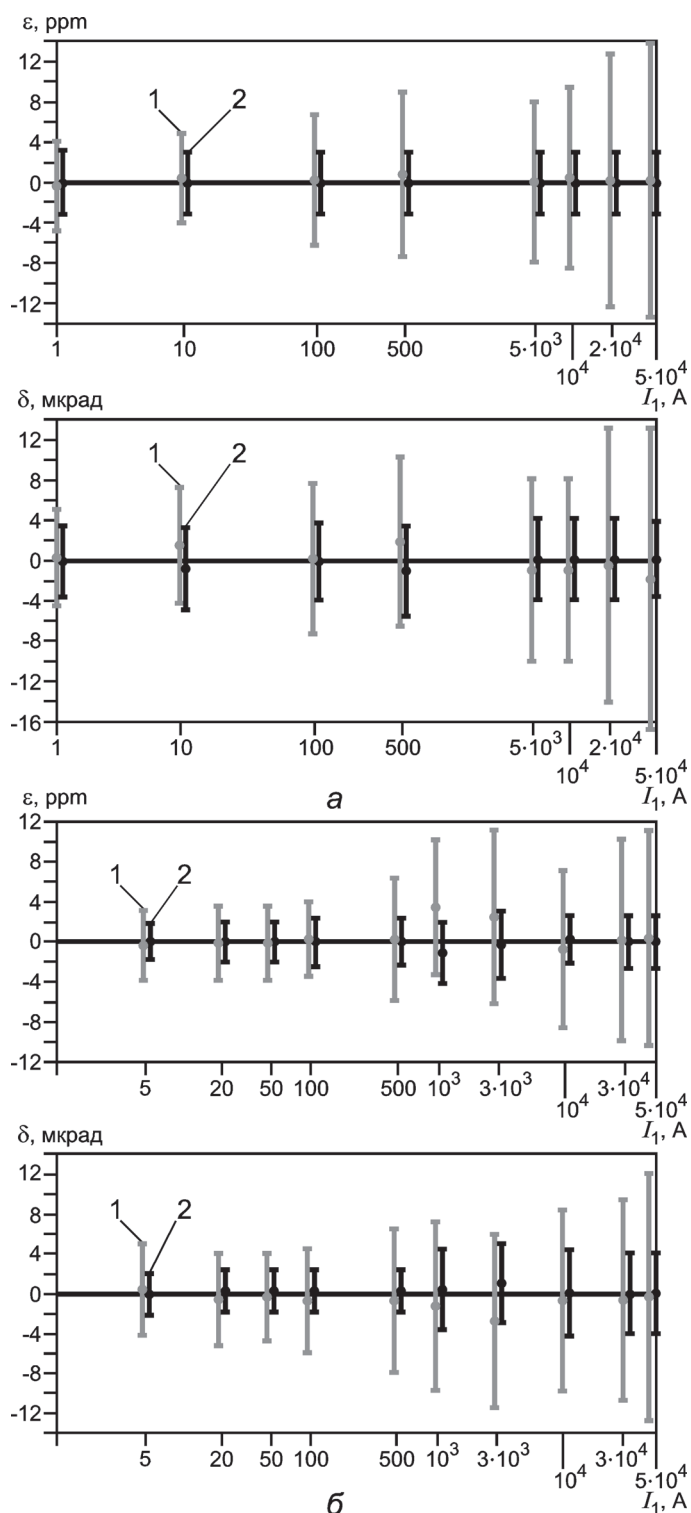


Рис. 2. Результаты международных сличений эталонов УНИИМ (1) и РТВ (2):

а, б — вторичный номинальный ток 1; 5 А, соответственно

Таблица 3

Калибровочные и измерительные возможности эталона

Калибровочная или измерительная услуга			Уровень или диапазон		Параметры проведения измерений		Расширенная неопределенность				
Область применения	Средство измерений	Метод	Значение	Единица измерения			Значение	Единица измерения	k	P	Отн. ед.
Измерение большого переменного тока: погрешность коэффициента трансформации	Трансформатор тока	Сличение с эталоном	0—1·10 ⁻²	A/A	Диапазон первичного тока, А Вторичный ток, А Частота, Гц	0,5—50·10 ³ 1—5 50	5—15	мкА/А	2	0,95	Да
Измерение большого переменного тока: угол фазового сдвига	Трансформатор тока	Сличение с эталоном	0—1·10 ⁻²	рад	Диапазон первичного тока, А Вторичный ток, А Частота, Гц	0,5—50·10 ³ 1—5 50	5—15	мкрад	2	0,95	Нет

Таблица 4

Литература

Сравнительные характеристики измерительных возможностей

Страна	Частота, Гц	Диапазон первичного тока, А	Расширенная неопределенность по	
			току, млн ⁻¹	углу, мкрад
Германия, PTB	50; 60	0,05—10 ⁵	2—10	2—15
Англия, NPL	50; 60	100—10 ³ *	10	10
	50	10 ³ —10 ⁴ *	10	10
США, NIST	50; 60	≤18 · 10 ³	10	10
Канада, NRC	50; 60	≤60 · 10 ³	10	10
Россия, УНИИМ ГЭТ 152—86	50	0,5—10 ⁴ *	100	150
Россия, УНИИМ ГЭТ 152—2011	50	0,5—5 · 10 ⁴ *	5—15	5—15

Примечание — * номинальные значения.

Выводы. В результате ГЭТ 152—2011 обеспечивает воспроизведение и передачу единиц коэффициента и угла МПСТ в расширенном диапазоне и отвечает современным требованиям к точности воспроизведения. Реализованы все функции, связанные с поддержанием единства измерений в данном виде измерений. Погрешность воспроизведения единиц уменьшена в 1,5—5 раз в диапазоне первичных токов 0,5—10000 А и в 4—12 раз в диапазоне 10—50 кА. Разработан и подготовлен к утверждению новый стандарт поверочной схемы [8].

1. **МИ 1940—88.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений силы переменного электрического тока от 1·10⁻⁸ до 25 А в диапазоне частот от 20 до 1·10⁶ Гц.

2. **ГОСТ 7746—2001.** Трансформаторы тока. Общие технические условия.

3. **ГОСТ 23624—2001.** Трансформаторы тока измерительные лабораторные. Общие технические условия.

4. **ГОСТ 8.550—86.** ГСИ. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента и угла масштабного преобразования синусоидального тока.

5. **Захаров Б. В. и др.** О работах УНИИМ в области метрологического обеспечения измерений большого переменного тока // Метрология — измерения — учет и оценка качества электрической энергии: Материалы 1-й науч.-техн. конф. СПб, 2008. С. 53—57.

6. **ГОСТ 8.217—2003.** ГСИ. Трансформаторы тока. Методика поверки.

7. **Приказ** Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 3 мая 2012 г. № 291 «Об утверждении Государственного первичного эталона единиц коэффициента и угла масштабного преобразования синусоидального тока».

8. **Mohns E., Sychev Y., Roeissle G.** PTB-UNIIM Bilateral Comparison on Current Transformer Measurement Systems at Currents up to 60000 A // CPEM 2012 conf. Digest, 2012. P. 18—19.

9. **ГОСТ Р 8.859—2013.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента и угла масштабного преобразования синусоидального тока.

Дата принятия 19.05.2014 г.