

# РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ЭТАЛОН МАСШТАБНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*Юрий Сычев<sup>1)</sup>, Екатерина Воронская<sup>2)</sup>*

*1) УНИИМ, 620000, Россия, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, д. 4,  
emails: <sup>1)</sup>sichev@uniim.ru, <sup>2)</sup>ekaterina@uniim.ru*

*Резюме:* Представлен Российский государственный первичный эталон масштабного преобразования переменного тока, его состав и принцип работы. Приведены метрологические характеристики и показатели точности при воспроизведении единиц коэффициента и угла масштабного преобразования. Представлены результаты международных сличений и новые данные об измерительных возможностях эталона. Даны сравнительные характеристики измерительных возможностей.

*Ключевые слова:* эталон, измерительные трансформаторы тока, масштабное преобразование синусоидального тока.

## Введение

Как и в других странах мира, в России изменение силы электрического тока всегда является актуальной задачей. В электроэнергетике величина тока достигает 30000 А и более, в промышленности используют токи до нескольких сотен килоампер. Определение тока столь значительной величины прямыми измерениями невозможно, для этого применяют различные преобразователи, сигнал на выходе которых пропорционален измеряемому току и удобен по размеру для подачи на вход измерительного прибора. На переменном токе промышленной частоты в качестве таких преобразователей используют измерительные трансформаторы тока (ИТТ), обеспечивающие масштабное преобразование большого<sup>1</sup> первичного тока в ток с меньшей силой в пределах диапазона со стандартными номинальными значениями 5 А и 1 А, а также сохранение фазового угла преобразуемого тока, что существенно важно для измерений электрической мощности и энергии [1, 2]. В настоящее время парк рабочих средств измерений практически полностью состоит из ИТТ, мировой опыт в этой области измерений показывает, что технически целесообразнее решать задачу метрологического обеспечения измерительных трансформаторов, чем создавать эталон ампера на 30000 А.

Уральский научноисследовательский институт метрологии (УНИИМ) практически с момента основания в 1942 году занимается вопросами промышленной энергетики. В 1986 г. был создан государственный эталон, являющийся

результатом многолетнего исследования, с целью централизованного воспроизведения и передачи единиц коэффициента и угла масштабного преобразования синусоидального тока (далее МПСТ) рабочим средствам измерений – измерительным трансформаторам тока, с целью обеспечения единства измерений в стране.

В 1988 г. введен в действие ГОСТ 8.55086 на указанный эталон и государственную поверочную схему для трансформаторов тока [3]. С момента создания базы данных Международного бюро мер и весов были включены измерительные возможности УНИИМ [4].

За прошедшие десятилетия с момента ввода специального эталона ГЭТ 15286 произошли значительные изменения в этой области. Прогресс в области технологий привел к появлению новых магнитных материалов, используемых при изготовлении магнитопроводов, с улучшенными свойствами, что позволило существенно повысить метрологические характеристики выпускаемых ИТТ. В результате произошел качественный скачок в вопросе метрологического обеспечения данного вида измерений.

С 2009 по 2011 годы были проведены работы по совершенствованию эталона с целью повышения его метрологических и технических характеристик. В 2011 году утвержден модернизированный Государственный первичный эталон единиц коэффициента и угла масштабного преобразования синусоидального тока ГЭТ 1522011.

В результате проведенного усовершенствования

---

<sup>1</sup> По классификации МБМВ большим считают электрический ток силой более 100 А

вания эталон ГЭТ 1522011 обеспечивает воспроизведение, хранение и передачу единиц коэффициента и угла МПСТ промышленной частоты 50 Гц в диапазоне изменения первичного тока от 0,5 до  $5 \cdot 10^4$  А, и отвечает современным требованиям к точности воспроизведения. Реализуются все функции, связанные с поддержанием единства измерений в данном виде измерений.

### 1. Состав и описание эталона

Общий вид государственного первичного эталона ГЭТ 1522011 приведен на рис. 1.



Рис. 1. Фотография общего вида ГЭТ 1522011

Структурная схема ГЭТ 152–2011 приведена на рис. 2.

Первичный эталон представляет собой комплекс следующих технических средств:

- 1 Набор компараторов тока в составе: компаратор тока эталонный каскадный

ТТЭК30К/5;

компаратор тока КЭ10М.

2 Измерительная установка в составе:

приборы сравнения КНТ05А;

источники регулируемого тока ИТР15К

и ИТР30К;

персональный компьютер с периферийными устройствами.

3 Эталон сравнения:

трансформатор тока измерительный лабораторный ТТЭ3000.5;

трансформатор тока измерительный лабораторный ТТЭ100;

трансформатор тока измерительный лабораторный ТТЭ200.

Питание измерительной установки осуществляется от трехфазной сети 380 В. Мощность, потребляемая установкой при максимальном первичном токе 36 кА, не превышает 80 кВ·А. Источник тока ИТР осуществляет регулировку тока 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 величины первичного тока. На рис. 2 приведена первая схема подключения, которая обеспечивает плавную регулировку тока в нижнем диапазоне и используется при первичных токах до 10 кА. Первичные обмотки  $W_{1o}$  эталонного и  $W_{1x}$  поверяемого трансформаторов тока соединены последовательно и подключены

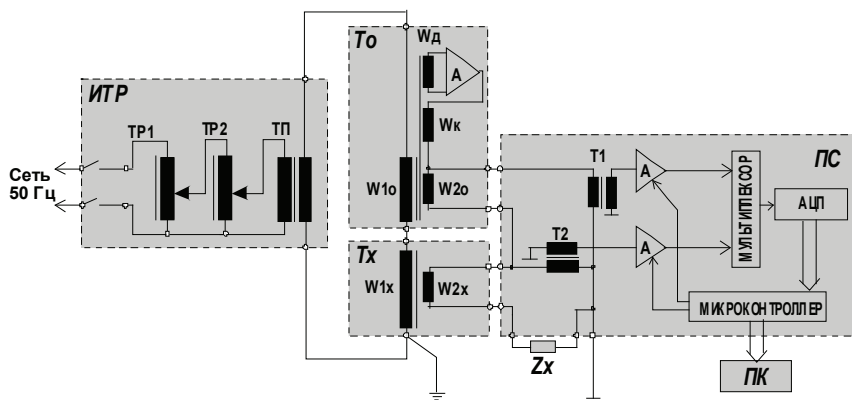


Рис. 2. Схема государственного первичного эталона ГЭТ 1522011

ИТР – регулируемый источник тока (ИТР–15К или ИТР–30К); ТР1, ТР2 – регулировочные трансформаторы; ТП – трансформатор питания; Т<sub>о</sub> – эталонный трансформатор тока (ТТЭК–30К/5 или КЭ–10М); Т<sub>х</sub> – поверяемый трансформатор тока;  $W_{1o}$ ,  $W_{1x}$  – первичные обмотки;  $W_{2o}$ ,  $W_{2x}$  – вторичные обмотки;  $W_k$  – компенсационная обмотка;  $W_o$  – детекторная обмотка; ПС – прибор сравнения (КНТ–05А); Т1, Т2 – измерительный и дифференциальный трансформаторы; А – электронный усилитель; АЦП – аналого–цифровой преобразователь;  $Z_x$  – вторичная нагрузка Т<sub>х</sub>; ПК – персональный компьютер

к выходной обмотке трансформатора питания ТП регулируемого источника тока ИТР. Вторичные обмотки W2o и W2x подключены к прибору сравнения ПС. В основу работы прибора сравнения 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 с помощью аналогоцифрового преобразователя преобразуются 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 помощью программного обеспечения «КНТЭталон», осуществляет сбор и обработку данных. Результаты измерений заносятся в протокол 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 ТТЭК30К/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 КНТ05АМ осуществляется с помощью попарно свитых проводников с нормируемыми значениями сопротивления.

Входящие в состав эталона трансформаторы тока ТТЭ3000.5, ТТЭ100 и ТТЭ200 используются в качестве эталонов сравнения при проведении

международных сличений. Трансформатор ТТЭ3000.5 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 стабильностью обеспечивать воспроизведение коэффициента и угла МПСТ. Трансформаторы ТТЭ100 и ТТЭ200 служат для расширения диапазона первичного тока и работают совместно с ТТЭ3000.5 в каскадной схеме включения. Максимальный ток ТТЭ100 составляет 18 кА, ТТЭ200 – 60 кА. Все трансформаторы изготовлены по схеме двухступенчатых четырехобмоточных компараторов с электронной компенсацией.

## 2. Анализ метрологических характеристик эталона

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  $K_{ном}$  – отношение номинальных первичного  $I_{ном}$  и вторичного  $I_{2ном}$  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  $\varepsilon_p, \varepsilon_q$  – синфазная и квадратурная (сдвиг по фазе на 90°) составляющие комплексной погрешности  $\varepsilon$ , соответственно;  $N_p, N_s$  – число первичных и вторичных витков;  $I_p, I_s$  – первичные и вторичные комплексные токи.

В таблице 1 приведены МХ эталона, а в таблице 2 – показатели точности при воспроизведении единицы коэффициента и угла МПСТ.

Таблица 1.  
Метрологические характеристики эталона

Наименование МХ	Значение
Номинальные значения коэффициента МПСТ, А/А	от 0,5/1 до 5•10 <sup>4</sup> /1 от 0,5/5 до 5•10 <sup>4</sup> /5
Номинальное значение угла МПСТ, рад.	0
Номинальные значения первичного тока, А	0,5 – 5•10 <sup>4</sup>
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 МПСТ, в млн<sup>1</sup>, и угла МПСТ, в мкрад

Наименование МХ	Значение
Среднее квадратическое отклонение результата измерений при 10 независимых наблюдениях, <i>S</i>	0,5–1,0
Неисключенная систематическая погрешность, $\Theta$	5,0–15
Стандартная неопределенность по типу А при 10 независимых наблюдениях, <i>u<sub>A</sub></i>	0,5–1,0
Стандартная неопределенность по типу В, <i>u<sub>B</sub></i>	1,8–6,9
Расширенная неопределенность, <i>U</i> ( <i>k</i> = 2)	4,0–14
Нестабильность эталона за год, <i>v</i>	1,0–2,0

### 3. 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.EMS11 и темы KOOMET 513/DEa/10 [5]. В качестве института-пилота выступил РТВ. Результаты международных сличений (рис. 3) соответствуют границам суммарных стандартных неопределенностей.

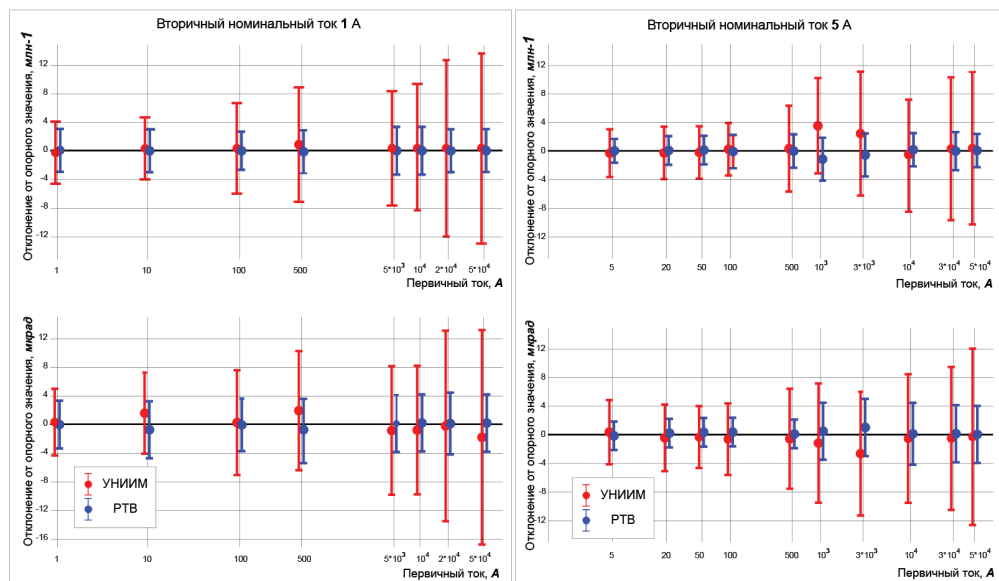


Рис. 3. Результаты международных сличений эталонов УНИИМ и РТВ

Таблица 3. Калибровочные и измерительные возможности эталона

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

На основании результатов сличений составлен отчет [6]. В 2015 году внесены изменения в базу данных Международного бюро мер и весов о новых измерительных возможностях эталона (таблица 3). В таблице 4 приведены характеристики измерительных возможностей стран, лидирующих в этой области измерений.

Таблица 4. Сравнительные характеристики измерительных возможностей

Страна	Частота, Гц	Диапазон первичного тока, А	Расширенная неопределенность по	
			току, мдн <sup>-1</sup>	углу, мкрад
Германия, PTB	50; 60	0,05–10 <sup>5</sup>	2–10	2–15
Англия, NPL	50; 60	100–10 <sup>3</sup> *	10	10
	50	10 <sup>3</sup> –10 <sup>4</sup> *	10	10
США, NIST	50; 60	≤ 18·10 <sup>3</sup>	10	10
Канада, NRC	50; 60	≤ 60·10 <sup>3</sup>	10	10
Россия, УНИИМ	50	0,5–5·10 <sup>4</sup> *	5–15	5–15

Примечание –\*номинальные значения

С 01.01.2015 г. введен в действие стандарт на поверочную схему ГОСТ 8.8592013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента и угла масштабного преобразования синусоидального тока» [7].

### Литература

- [1] ГОСТ 7746–2001. Трансформаторы тока. Общие технические условия.
- [2] ГОСТ 23624–2001. Трансформаторы тока измерительные лабораторные. Общие технические условия.
- [3] ГОСТ 8.550–86. ГСИ. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента и угла масштабного преобразования синусоидального тока.
- [4] Б.В. Захаров, Ю.И. Сычев, Ю.И. Дидик, Е.Л. Башко О работах УНИИМ в области метрологического обеспечения измерений большого переменного тока // Метрология – измерения – учет и оценка качества электрической энергии: Материалы 1й науч. техн. конф. СПб, 2008. С. 53–57.
- [5] Mohs E., Sychev Y., Rocissle G. PTBUNIIM Bilateral Comparison on Current Transformer Measurement Systems at Currents up 60000 A // CPEM 2012 conf. Digest. 2012. P. 18–19.

[6] **Enrico Mohns, Y Sychev and G Roessle** «Final report on COOMET.EMS11: Supplementary bilateral comparison of the measurement of current transformers between UNIIM and PTB», Metrologia 51, 2014

[7] ГОСТ Р 8.859–2013. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента и угла масштабного преобразования синусоидального тока.

### Сведения об авторах

**Сычев Юрий Ильич.** Уральский политехнический институт – технология редких и рассеянных элементов (1977). Ведущий инженер (1992),

ученый хранитель эталона (2011); Уральский научноисследовательский институт метрологии, лаборатория метрологии электромагнетизма. Научные интересы: метрологическое обеспечение электроэнергетики, измерение электрических и магнитных величин.

**Воронская Екатерина Владимировна.** Уральский государственный университет им. А.М. Горького – физическая метрология (2006). Ведущий инженер (2015), помощник ученого хранителя эталона (2013); Уральский научноисследовательский институт метрологии, лаборатория метрологии электромагнетизма. Научные интересы: метрологическое обеспечение электроэнергетики, измерение электрических величин.

## THE RUSSIAN STATE PRIMARY STANDARD SCALE TRANSFORMATIONS AC

*Yuriy Sichev<sup>1)</sup>, Ekaterina Voronskaya<sup>2)</sup>*

<sup>1)2)</sup> USRIM, ROSSTANDART, Ekaterinburg (UNIIM), 620000, Ekaterinburg, GSP824, 4 Krasnoarmeiskaia St, emails: <sup>1)</sup>sichev@uniim.ru, <sup>2)</sup>ekaterina@uniim.ru

*Abstract:* The Russian State primary standard scale transformations AC, its structure and operation are presented. Metrological characteristics and indicators of the accuracy of the playback unit ratio and angle scaling conversion are described. The results of international comparisons and new data on the measurement capabilities of the standard are presented. Given the comparative characteristics of measurement capabilities.

*Key words:* standard, current transformers, scale conversion of sinusoidal current.

### References

[1] GOST 7746–2001. Transformatory toka. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya.

[2] GOST 23624–2001. Transformatory toka izmeritel'nyye laboratornyye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya.

[3] GOST 8.550–86. GSI. Gosudarstvennyy spetsial'nyy etalon i gosudarstvennaya poverochnaya skhema dlya sredstv izmereniy koeffitsiyenta i ugla masshtabnogo preobrazovaniya sinusoidal'nogo toka.

[4] **B.V. Zakharov, Yu.I. Sychev, Yu.I. Didik, YE.L. Bashko.** O rabotakh UNIIM v oblasti metrologicheskogo obespecheniya izmereniy bol'shogo peremennogo toka // Metrologiya – izmereniya – uchet i otsenka kachestva elektricheskoy energii:

Materialy 1y nauch.tekhn. konf. SPb, 2008. S. 53–57.

[5] **Mohns E., Sychev Y., Roessle G.** PTBUNIIM Bilateral Comparison on Current Transformer Measurement Systems at Currents up 60000 A // CPEM 2012 conf. Digest. 2012. P. 18–19.

[6] **Enrico Mohns, Y Sychev and G Roessle.** «Final report on COOMET.EMS11: Supplementary bilateral comparison of the measurement of current transformers between UNIIM and PTB», Metrologia 51, 2014.

[7] GOST R 8.859–2013. GSI. Gosudarstvennaya poverochnaya skhema dlya sredstv izmereniy koeffitsiyenta i ugla masshtabnogo preobrazovaniya sinusoidal'nogo toka.

# РУСКИ ДЪРЖАВЕН ПЪРВИЧЕН ЕТАЛОН ЗА МАЩАБНО ПРЕОБРАЗУВАНЕ НА ПРОМЕНЛИВ ТОК

*Юрий Сычев<sup>1)</sup>, Екатерина Воронская<sup>2)</sup>*

*<sup>1)</sup> УНИИМ, 620000, Русия, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, д. 4  
<sup>2)</sup> emails: <sup>1)</sup>sichev@uniim.ru, <sup>2)</sup>ekaterina@uniim.ru*

*Резюме:* Представени са Руски държавен първичен еталон за мащабно преобразуване на променлив ток, неговият състав и принципът на работа. Приведени са метрологичните характеристики и показателите на точността при възпроизвеждане на единиците на коефициента и ъгъла на мащабното преобразуване. Представени са резултатите от международни сравнения и нови данни за възможностите на измерване на еталона. Дадени са сравнителните характеристики на възможностите за измерване.

*Ключови думи:* еталон, измервателни токови трансформатори, мащабно преобразуване на синусоидален ток.