

Государственный первичный специальный эталон единицы силы электрического тока в диапазоне частот 20—1·10⁶ Гц ГЭТ 88—2014

Г. П. ТЕЛИТЧЕНКО, В. И. ШЕВЦОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: V.I.Shevtsov@vniim.ru

Рассмотрена структура и приведены основные метрологические характеристики Государственного первичного специального эталона единицы силы электрического тока в диапазоне частот 20—1·10⁶ Гц (ГЭТ 88—2014).

Ключевые слова: эталон, метрологические характеристики.

The structure of construction is examined and the basic metrological characteristics of the State primary special standard of electric current strength unit in the frequency range 20—1·10⁶ Hz (GET 88—2014) are presented.

Key words: standard, metrological characteristics.

Измерение силы переменного электрического тока особенно важно в электроэнергетике, электротехнике, металлургии, химии, приборостроении, оборонной промышленности, медицине при производстве изделий и ведении технологических процессов. В настоящее время широко применяют токи различного диапазона частот и уровней при термообработке и сварке (производство качественных, прочных, износостойких деталей), индукционной плавке металлов, сушке древесины, фруктов, индукционном прогреве бетона, обессоливании и обезвоживании нефти, стерилизации в консервной промышленности и медицине, в электротерапии.

Парк находящихся в обращении средств измерений (СИ) переменного электрического тока составляет десятки миллионов экземпляров. Номенклатура этих СИ достаточно обширна: щитовые приборы, высокоточные цифровые амперметры, калибраторы, мультиметры. За последние годы отечественной промышленностью разработаны и серийно выпускаются многофункциональные калибраторы Н4-6, Н4-7, Н4-12, Н4-16, Н4-17. Прошли испытания для целей утверждения типа и разрешены к применению в Российской Федерации зарубежные СИ: многофункциональные калибраторы 5520A, 5720A, 5730A фирмы Fluke, многофункциональные калибраторы серии 2000 и 3000 фирмы Transmille, шунты переменного тока А40, А40А, А40В фирмы Fluke и ряд других. Единство измерений в данной области обеспечивается государственным первичным, вторичными и разрядными эталонами в соответствии с действующей государственной поверочной схемой [1].

Предыстория создания эталона. В период 1800—1880 гг. в тесной связи с развитием прикладной электротехники и, в частности, с телеграфией, гальванопластикой и техникой электрического освещения развивалась теория цепей постоянного тока. Начало применению и изучению переменных токов в России положил в 1876 г. П. Н. Яблочков. Как оказалось, переменный ток обеспечил равномерность сгорания углей в свече Яблочкова и позволил осуществить пи-

тание многих ламп от одного источника электрической энергии. Переменный ток получил всеобщее признание и широчайшее применение в электроэнергетике благодаря изобретениям русского инженера и ученого М. О. Доливо-Добровольского. Им была разработана трехфазная система, получившая повсеместное распространение. В 1889 г. он построил первый трехфазный двигатель, разработал все остальные звенья трехфазной цепи и в 1891 г. осуществил передачу электрической энергии трехфазным током на расстояние 175 км.

Практически до середины XX в. энергетическое применение находили лишь токи промышленной (50—60 Гц) частоты. Переходу к токам более высоких частот препятствовало, в первую очередь, отсутствие экономичных методов генерирования и распределения токов повышенной частоты.

Точные измерения силы переменного тока с конца XIX в. и до 1940-х гг. основывались на применении электродинамических приборов непосредственной оценки. Во ВНИИМ под руководством профессора К. П. Широкова были проведены работы по исследованию погрешностей электродинамических приборов при переходе с постоянного тока, на котором их градуировали, к переменному. Погрешности таких приборов на частотах 40—60 Гц составляли 0,5—2 %. Дальнейшее развитие промышленности и появление таких областей, как радиоэлектроника, телевидение, приборостроение, освоение новых технологий в химии и металлургии, повышение частотного диапазона и точности измерений, привели к разработке метода сравнения силы переменного тока с силой постоянного тока с помощью компараторов. Наиболее перспективным по точности и широкому диапазону частот в качестве компаратора был признан термоэлектрический преобразователь (ТЭП). У истоков этих разработок стояли ученые ВНИИМ — К. П. Широков, Т. Б. Рождественская, А. Я. Безикович, Д. И. Зорин — и NBS (США) F. L. Hermach.

В результате исследований данного метода измерений в 1975 г. во ВНИИМ был создан первый Государственный специальный эталон единицы силы переменного тока в диапа-

зоне частот от 40 Гц до 100 кГц (ГЭТ 88—75), у которого диапазон силы тока составлял 10 мА — 10 А, неисключенная систематическая погрешность (НСП) — $3 \cdot 10^{-5}$ — $2 \cdot 10^{-4}$ отн. ед., оценка среднего квадратического отклонения (СКО) — $1 \cdot 10^{-5}$ — $1 \cdot 10^{-4}$ отн. ед.

Руководителем работ по созданию ГЭТ 88—75, а затем его ученым хранителем была О. П. Галахова. В связи с возрастающими требованиями промышленности по повышению точности и расширению частотного диапазона в 1988 г. был создан эталон второго поколения — Государственный специальный эталон единицы силы переменного тока в диапазоне частот 20 — $1 \cdot 10^6$ Гц (ГЭТ 88—88), диапазон силы тока составлял 1 мА — 20 А, НСП — $1 \cdot 10^{-5}$ — $3 \cdot 10^{-4}$ отн. ед., оценка СКО — $5 \cdot 10^{-6}$ — $1 \cdot 10^{-4}$ отн. ед. Руководителем работ по созданию эталона, а затем его ученым хранителем вновь была назначена О. П. Галахова.

Совершенствование ГЭТ 88—88 было осуществлено в период 2012—2014 гг. в соответствии с договором между ВНИИМ и Росстандартом в рамках темы «Совершенствование Государственного первичного специального эталона единицы силы электрического тока в диапазоне частот 20 — $1 \cdot 10^6$ Гц ГЭТ 88—88». По результатам проведенных научно-исследовательских работ был создан Государственный первичный специальный эталон единицы силы переменного тока в диапазоне частот 20 — $1 \cdot 10^6$ Гц ГЭТ 88—2014, который утвержден в установленном порядке [2]. Структурная схема эталона приведена на рис. 1.

На частотах свыше 100 кГц единицу воспроизводит Государственный первичный специальный эталон единицы силы тока высокой частоты ГЭТ 56—74 (организация-хранитель эталона — ВНИИФТРИ), а при силе тока свыше 100 А — Государственный первичный эталон единиц коэффициента и угла масштабного преобразования синусоидального

тока ГЭТ 152—2011 (организация-хранитель эталона — УНИИМ).

Структура построения и принцип действия. В основу работы эталона положен метод одновременного сравнения среднего квадратического значения (СКЗ) силы переменного тока со значением силы постоянного тока. В качестве средства сравнения применен термоэлектрический компаратор, работающий при силе тока до 20 А, и шунт переменного тока при силе тока до 100 А. При подаче на вход термоэлектрического компаратора постоянного тока $I_{\pm}$, термоЭДС $E_{\pm}$ на его выходе описывается выражением

$$E_{\pm} = k I_{\pm}^2,$$

где k — коэффициент, учитывающий характеристики нагревателя термодпары термоэлектрического компаратора.

При подаче на вход термоэлектрического компаратора переменного тока термоЭДС $E_{\sim}$ на его выходе пропорциональна СКЗ силы переменного тока $I_{\sim}$ [3]:

$$E_{\sim} = k \frac{1}{T_{\sim}} \int_0^{T_{\sim}} i^2 dt = k I_{\sim}^2,$$

где $T_{\sim}$ — период изменения переменного тока; i — мгновенное значение силы тока.

Если $E_{\sim} = E_{\pm}$, то СКЗ $I_{\sim}$ равно значению силы постоянного тока $I_{\pm}$. Таким образом происходит сравнение $I_{\sim}$ и $I_{\pm}$. Погрешность компарирования переменного тока $I_{\sim}$ с постоянным током $I_{\pm}$ описывается выражением

$$\gamma_K = (I_{\sim} - I_{\pm}) / I_{\pm}.$$

При этом $I_{\pm}$ с погрешностью $\gamma_{\pm}$ измеряют эталонными СИ, получающими единицу постоянного напряжения от ГЭТ 13—01 и единицу электрического сопротивления от ГЭТ 14—2014. Погрешность измерения СКЗ $I_{\sim}$ определяют как

$$\gamma_{\sim} = \gamma_K + \gamma_{\pm}.$$

При подаче на вход шунта постоянного тока напряжение на его выходе имеет значение $u_{\pm}$, в случае подачи переменного тока — $u_{\sim}$. Если $u_{\pm} = u_{\sim}$, то СКЗ $I_{\sim}$ равно $I_{\pm}$.

В состав термоэлектрического компаратора входят два набора эталонных ТЭП силы электрического тока с номинальными значениями: 1; 3; 5; 30; 50; 100 мА и 0,3; 0,5; 1; 2,5; 5; 10; 20 А. В каждый набор входит группа преобразователей с равнономинальными значениями. Групповая структура ТЭП обеспечивает повышение точности передачи единицы силы переменного тока от государственного первичного эталона соподчиненным СИ и позволяет путем взаимных сличений преобразователей внутри группы и со смежными значениями силы тока оценить погрешность эталона и контролировать их стабильность во времени.

Наборы ТЭП первой группы содержат по два термопреобразователя различной конструкции: вакуумные одноэлементные и воздушные многоэлементные на указанные значения силы тока. Наборы ТЭП второй группы — по три термопреобразователя различной конструкции: воздушные одноэлементные и многоэлементные. Причем ТЭП из послед-

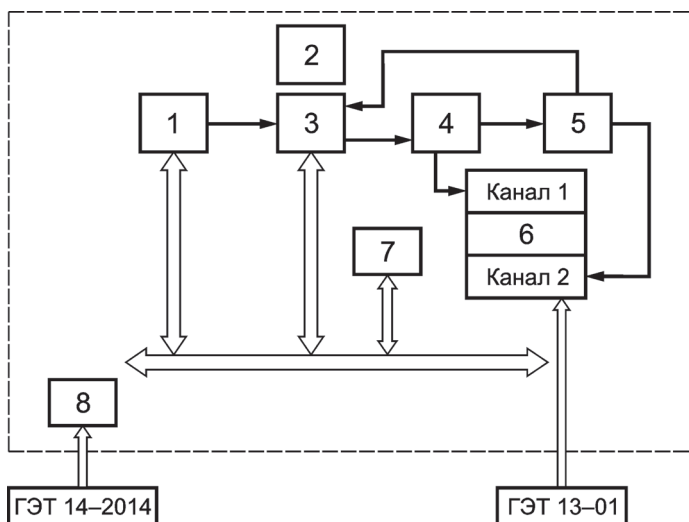


Рис. 1. Обобщенная структура ГЭТ 88—2014:

1 — программируемый высокостабильный источник постоянного и переменного напряжений в диапазоне частот 20 — $1 \cdot 10^6$ Гц; 2 — преобразователь «напряжение — ток» в диапазоне частот 1 кГц — 1 МГц; 3 — усилитель тока типа 8100 в диапазоне частот от постоянного тока до 100 кГц; 4, 5 — эталонное и поверяемое СИ, соответственно; 6 — двухканальный нановольтметр; 7 — персональный компьютер; 8 — меры электрического сопротивления

него набора уникальны по своей конструкции и технологии изготовления. Они были разработаны и изготовлены во ВНИИМ. Эти ТЭП имеют различную форму поперечного сечения нагревателя и являются преобразователями прямого включения, т. е. через нагреватель течет ток силой 0,3—20 А. Нагреватели ТЭП выполнены из специальных материалов (терминал, манганин, сплавы на основе нихрома), имеющих высокую временную стабильность электрического сопротивления, а также малый температурный коэффициент сопротивления.

Высокостабильный источник постоянного и переменного напряжений в диапазоне частот до 1 МГц является задающим генератором, выходное напряжение которого преобразуется соответствующим устройством в силу тока требуемой частоты и уровня. В качестве такого устройства при силе тока до 100 А и частотах до 100 кГц применяется усилитель типа 8100. В случае необходимости работы в диапазоне частот до 1 МГц и силе тока до 100 мА используется преобразователь «напряжение—ток» в диапазоне частот 1 кГц — 1 МГц. При передаче единицы от эталонного СИ поверяемым СИ, в качестве которых используют ТЭП, термоЭДС на их выходах измеряется непосредственно двухканальным нановольтметром. К измерительному каналу 1 нановольтметра подключают выход эталонного СИ, а к каналу 2 — выход поверяемого СИ. В случае использования шунтов переменного тока в качестве эталонного или поверяемого СИ к выходу шунта подключают вход преобразователя Fluke 792A, сигнал с выхода которого измеряется соответствующим каналом двухканального нановольтметра.

Персональный компьютер позволяет работать в диалоговом режиме, управляет выбором необходимых режимов работы источников (воспроизведение сил постоянного или переменного токов, напряжений требуемых частоты и уровня), переключением поддиапазонов измерений усилителя тока 8100, измерением значений термоЭДС на выходе ТЭП тока или падения напряжения на шунтах, обрабатывает полученные результаты.

Электропитание ГЭТ 88—2014 осуществляется от сети переменного тока с использованием источника бесперебойного питания. Помещение, в котором расположен эталон, оборудовано сплит-системой, позволяющей поддерживать необходимую температуру. Требуемая влажность в помещении обеспечивается специальными увлажнителями воздуха. Параметры окружающей среды контролируют прибором типа 50503.

Основные метрологические характеристики ГЭТ 88—2014 приведены в таблице.

Основные метрологические характеристики ГЭТ 88—2014

Составляющие погрешности (неопределенности)	Значения неопределенности, отн. ед., в диапазоне частот при силе тока и числе измерений $n = 21$	
	20–1·10 ⁶ Гц; 1·10 ⁻³ –0,1 А	40–1·10 ⁵ Гц; свыше 0,1 до 100 А
Оценка СКО	1·10 ⁻⁶ — 2·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵ — 5·10 ⁻⁵
Неисключенная систематическая погрешность (НСП)	3·10 ⁻⁶ — 5·10 ⁻⁵	5·10 ⁻⁵ — 1·10 ⁻⁴
Стандартная неопределенность, оцениваемая по типу A u_A по типу B u_B	1·10 ⁻⁶ — 2·10 ⁻⁵ 1,7·10 ⁻⁶ — 3·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵ — 5·10 ⁻⁵ 3·10 ⁻⁵ — 6·10 ⁻⁵

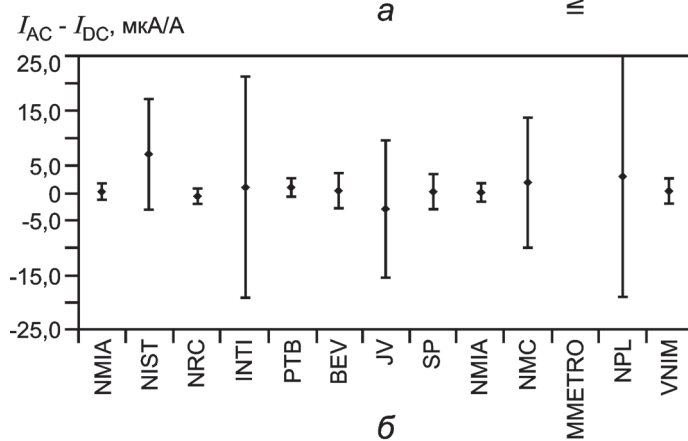
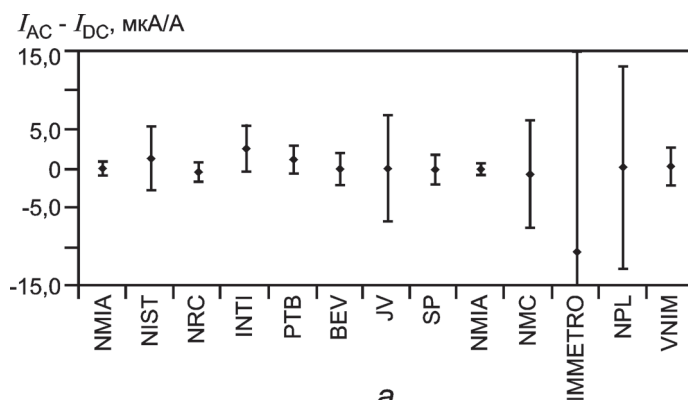


Рис. 2. Степень эквивалентности с расширенной неопределенностью относительно опорного значения при силе тока 10 мА и частотах 10 кГц (а) и 100 кГц (б)

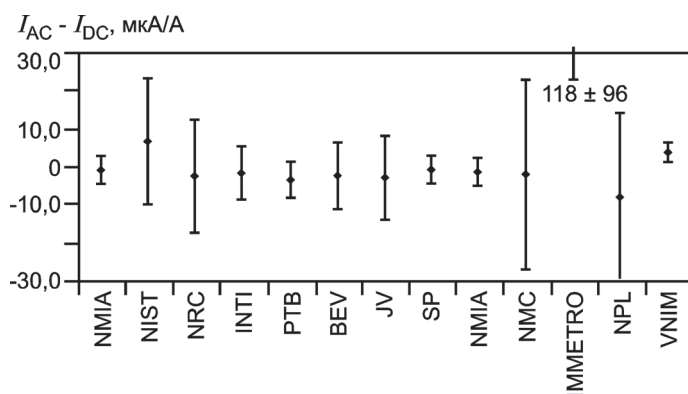


Рис. 3. Степень эквивалентности с расширенной неопределенностью относительно опорного значения при силе тока 5 А и частоте 10 кГц

Соподчиненность СИ, участвующих в передаче единицы, регламентирована действующей Государственной поверочной схемой для средств измерений силы переменного электрического тока от 1·10⁻⁸ до 100 А в диапазоне частот от 1·10⁻¹ до 1·10⁶ Гц [1].

Ключевые сличения. Достоверность заявленных у эталона метрологических характеристик подтверждена результатами международных ключевых сличений ССЕМ-K12, которые проводили при силе тока 10 мА и 5 А в диапазоне частот 10 Гц — 100 кГц. В сличениях принимали участие следующие организации: NMIA (Австралия), NIST (США), NRS (Канада), INTI (Аргентина), PTB

(Германия), BEV (Австрия), JV (Норвегия), SP (Швеция), NMC (Сингапур), INMETRO (Бразилия), NPL (Англия), VNIIM (Россия).

В качестве транспортируемого эталона лабораторией-пилотом были представлены одноэлементный ТЭП с номинальной силой тока 10 мА и шунт переменного тока с номинальной силой тока 5 А. Падение напряжения на шунте измеряли одноэлементным ТЭП напряжения с номинальным значением 1 В, также представленного лабораторией-пилотом. Отдельные результаты сличений приведены на рис. 2, 3. Результаты международных ключевых сличений подтверждают достоверность заявленных ВНИИМ метрологических характеристик, а также то, что ГЭТ 88—2014 не уступает уровню национальных эталонов промышленно развитых стран — Англии, Германии и США.

Литература

1. **Приказ** Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 мая 2015 г. № 575 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений силы переменного электрического тока от $1 \cdot 10^{-8}$ до 100 А в диапазоне частот от $1 \cdot 10^{-1}$ до $1 \cdot 10^6$ Гц».

2. **Приказ** Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 января 2015 г. № 121 «Об утверждении Государственного первичного специального эталона единицы силы электрического тока в диапазоне частот 20— $1 \cdot 10^6$ Гц».

3. **Рождественская Т. Б.** Электрические компараторы для точных измерений тока, напряжения и мощности. М.: Издательство стандартов, 1964.

Дата принятия 27.04.2015 г.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

53.081.1

Байесовские оценки систематических погрешностей средств измерений

Н. А. БУРМИСТРОВА, А. В. СТЕПАНОВ, А. Г. ЧУНОВКИНА

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: N.A.Burmistrova@vniim.ru

Рассмотрена задача вычисления расширенной неопределенности измерений при калибровке. Выделены два ее источника, обусловленные неопределенностью опорного значения, получаемого с помощью эталона, и разбросом показаний калибруемого средства измерений. Применен байесовский подход для получения зависимости коэффициента охвата от числа повторных измерений и соотношения названных неопределенностей.

Ключевые слова: систематическая погрешность, расширенная неопределенность, коэффициент охвата, байесовская оценка.

The problem of expanded uncertainty estimation at calibration of measuring instrument is considered. The two main sources of measurement uncertainty are revealed: the first one is associated with the reference value and the second one with the dispersion of measuring instrument indications. The dependence of coverage factor on a number of repeated indications and a ratio of the above two sources of uncertainties is obtained.

Key words: systematic error, expanded uncertainty, coverage factor, Bayesian estimate.

Концепция неопределенности измерений [1—4] используется в отечественной метрологии наряду с оценением погрешностей [5]. Вопрос о том, в каких метрологических задачах предпочтительнее использовать тот или иной подход, остается открытым. Однако в задачах калибровки средств измерений (СИ) вычисление неопределенности получило широкое распространение. При калибровке достаточно часто устанавливается систематическая погрешность СИ как

отклонение показаний от опорного значения измеряемой величины, воспроизводимого или получаемого с помощью соответствующего эталона.

При расчете неопределенности измерения учитывают: неопределенность калибровочных характеристик эталонных измерительных приборов или действительных значений эталонных мер, их нестабильность; нелинейность калибровочной характеристики эталонных измерительных приборов;