

Эталон единицы кажущегося заряда повышенной точности

М. Д. Клионский

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им Д. И. Менделеева

m.d.klionsky@vniim.ru

Аннотация. Во ВНИИМ разработан эталон единицы кажущегося заряда (q) повышенной точности, возглавляющий локальную поверочную схему для калибраторов кажущегося заряда и измерителей частичных разрядов. Эталон содержит калибратор кажущегося заряда и эталонную измерительную систему. В качестве компаратора используют цифровой осциллограф с высокой разрешающей способностью по вертикальной оси. Диапазон воспроизводимых значений эталона от 1 пКл до 100 нКл, погрешность $\pm(0,1 \text{ пКл} + 0,005 \cdot q)$.

Ключевые слова: поверка; калибровка; калибратор кажущегося заряда; измеритель частичных разрядов; методы поверки; поверочная схема

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Высоковольтные устройства, такие как конденсаторы, трансформаторы тока, электромашин, проходные изоляторы, кабели, должны проходить испытательные тесты на наличие в изоляции частичных разрядов (ЧР) [1]. Их регистрируют с помощью измерителей частичных разрядов (ИЧР). Для градуировки, контроля, поверки и калибровки ИЧР используют калибраторы кажущегося заряда, которые выпускают в виде самостоятельных приборов и часто включают в состав всей измерительной системы для измерения ЧР (табл. 1). Иногда эти калибраторы называют калибраторами ЧР, или генераторами градуировочных импульсов.

Государственная поверочная схема для калибраторов кажущегося заряда и ИЧР не разрабатывалась. Чтобы восполнить этот пробел, во ВНИИМ разработана локальная поверочная схема (ЛПС, 2022 г.) для рассматриваемых средств измерений [2], а в 2023 г. разработан и утверждён возглавляющий ЛПС эталон повышенной точности (государственный исходный эталон, регистрационный № в ФИФ 3.1.ZZV.0446.2023).

ТАБЛИЦА I. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЛИБРАТОРОВ КАЖУЩЕГОСЯ ЗАРЯДА

Наименование	Обозначение, рег. номер	Диапазон	Пределы допускаемой погрешности
Генератор ЧР (из состава ИЧР 201)	ГГЧР 201	1-10 пКл; 20 пКл – 2 нКл	$\pm 0,5$ пКл $\pm 5 \%$
Калибратор ЧР	KAL 9510 Рег. № 63939-16	1 – 20 пКл; 50 – 100 пКл	± 1 пКл $\pm 5 \%$
Калибратор ЧР	KAL 9520 Рег. № 63939-16	1-20 пКл; 50 пКл – 50 нКл	± 1 пКл $\pm 5 \%$

Калибратор кажущегося заряда (из состава ИЧР MPD 800)	CAL 542 A, B, C, D Рег. № 84158-21	1 – 10 пКл; 20 – 100 пКл; 0,2 – 10 нКл	± 1 пКл $\pm 5 \%$ $\pm 10 \%$
Калибратор кажущегося заряда (из состава ИЧР PD-TaD)	CAL 1B; CAL 1E Рег. № 63377-16 76048-19	0,1 – 10 нКл; 0,5 – 50 нКл	$\pm 3 \%$ $\pm 3 \%$
Калибратор кажущегося заряда (из состава ИЧР DDX-8003)	DDX-8003 Рег. № 57783-14	1- 1000 нКл	$\pm 3 \%$
Калибратор кажущегося заряда (из состава ИЧР TOPAZ B4)	TOPAZ B4	10 пКл- 10 нКл	$\pm 10 \%$

II. ОСНОВНЫЕ РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

В разработанном эталоне реализуется свойство прямоугольного импульса тока, создаваемого генератором прямоугольных импульсов, создавать заряд при прохождении через конденсатор, пКл

$$q = C \cdot U, \quad (1)$$

где C – значение емкости конденсатора, пФ; U – напряжение на выходе генератора, В.

С другой стороны, в электрической цепи заряд импульса тока определяется по формуле

$$q = \int i(t) \cdot dt = \frac{1}{R} \cdot \int u(t) \cdot dt, \quad (2)$$

где R – сопротивление нагрузки генератора.

В качестве индикатора заряда используют цифровые осциллографы, обладающие, как правило, встроенным алгоритмом расчета среднего значения напряжения U_{cp}

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \cdot \int u(t) \cdot dt \quad (3)$$

где T – время интегрирования (произведение коэффициента развертки K_r на количество делений развертки по экрану осциллографа N).

Из (2) и (3) получаем

$$q = U_{cp} \cdot K_r \cdot N / R \quad (4)$$

Выражение (4) можно использовать для расчета действительного значения заряда при поверке

калибраторов невысокой точности (погрешность от 5 % до 30 %). Для получения более точных результатов применяют метод сличения, подключая к осциллографу более точный эталонный калибратор или эталонную измерительную систему (ИС). Получить точно такое же значение, регулируя выходной параметр эталонного калибратора или напряжение на ИС, удастся не всегда (не хватает разрешающей способности). Тогда для оценки фактической погрешности можно воспользоваться выражением, вытекающим из (4):

$$q_x = q_\varepsilon \cdot U_{cp\ x} / U_{cp\ \varepsilon} = q_\varepsilon (1 + \alpha) \quad (5)$$

где q_x и q_ε – кажущиеся заряды, воспроизводимые соответственно поверяемым и эталонным калибратором (или ИС); $U_{cp\ x}$ и $U_{cp\ \varepsilon}$ – средние значения напряжения, вычисленные с помощью осциллографа и относящиеся соответственно к q_x и q_ε ; α – безразмерный коэффициент, характеризующий близость $U_{cp\ x}$ к $U_{cp\ \varepsilon}$.

Значение α не должно превосходить 1/3 погрешности (ПГ) поверяемого калибратора. По значению α можно определить, надо ли продолжать дальнейшую подстройку величины q_ε .

III. СОСТАВ ЭТАЛОНА И ЕГО МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В состав эталона входят специально изготовленный калибратор кажущегося заряда ЭГКЗ-1 (фирма ТЕСТСЕТ, СПб) и измерительная система (ИС). ИС содержит генератор сигналов произвольной формы Rigol DG5071, меры ёмкости значением 1, 2, 10, 20, 100, 200 пФ, 1, 10 нФ, мультиметр 34410А, цифровой осциллограф Rohde – Schwarz RTB 2002.

Мультиметр 34410А предназначен для определения ПГ амплитуды прямоугольного импульса (ПГ измерений напряжения у мультиметра более, чем в десять раз, меньше нормируемой ПГ генератора: 0,09 % относительно 1 %).

Метрологические характеристики (МХ) эталона представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭТАЛОНА

Наименование характеристики	Значение
Диапазон воспроизведения кажущегося заряда: калибратор	от 1 пКл до 1 нКл
измерительная система	от 1 до 100 нКл
Пределы допускаемой абсолютной погрешности	$\pm(0,1 \text{ пКл} + 0,005 \cdot q)$
Расширенная неопределённость измерений при $k=2$	$0,1 \text{ пКл} + 0,005 \cdot q$

Как видно из табл. 1 и 2, эталон охватывает весь диапазон значений существующих калибраторов, а по точности превосходит их в 6 – 10 раз.

Эталон имеет прослеживаемость к государственному первичному эталону единицы электрической емкости ГЭТ 25-79 и государственному первичному специальному эталону единицы электрического напряжения (вольта) в диапазоне частот 10 – $3 \cdot 10^7$ Гц ГЭТ 89-2008.

IV. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЭТАЛОНЕ

А. Методы измерений, применяемые при поверке

Поверку (или калибровку) ИЧР по эталонному калибратору проводят методом прямых измерений, поверку калибраторов проводят сличением с помощью компаратора.

Если в качестве эталона применяют ИС, то используют метод косвенных измерений в соответствии с (1).

В обоих случаях в качестве компаратора применяют цифровой осциллограф с разрешением по вертикальной оси 10 – 12 бит, что соответствует чувствительности по напряжению 0,1 % и выше (рис. 1).

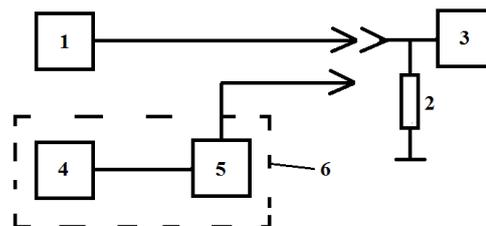


Рис. 1. Схема соединений при поверке

1 – поверяемый калибратор; 2 – нагрузочный резистор; 3 – цифровой осциллограф; 4 – генератор прямоугольных импульсов; 5 – мера емкости; 6 – измерительная система.

Обычно в методиках поверки калибраторов используется метод косвенных измерений: измеряют амплитуду прямоугольного импульса с помощью самого осциллографа, подставляют его значение в формулу (1), получают действительное значение заряда и рассчитывают ПГ калибратора. Недостаток этого метода состоит в том, что ПГ осциллографа по напряжению составляет от 2 % до 3 %, что ограничивает точность измерений кажущегося заряда. Известен также метод измерения амплитуды импульса с помощью цифрового вольтметра [3]. Однако, как указывает сам автор, погрешности, связанные с входным импедансом вольтметра, нелинейностью и недостаточным разрешением его АЦП, а также выбросами напряжения составляют не менее 2 %.

Во ВНИИМ используют при поверке калибраторов метод, основанный на измерении и подстройке среднего значения напряжения, пропорционального среднему току в импульсе. Ток преобразуют в напряжение с помощью нагрузочного резистора, включенного на входе осциллографа и размещенного на конце измерительного кабеля между внутренней жилой и оплеткой. Цифровые осциллографы обладают встроенной функцией цифрового интегрирования сигнала, поэтому на экран выводится рассчитанное среднее значение напряжения сигнала. По этой величине сравнивают кажущиеся заряды, воспроизводимые поверяемым калибратором и эталонным средством измерений (СИ). В этом случае осциллограф используется как нуль-индикатор, и указанная выше ПГ осциллографа по напряжению существенно снижается.

В. Метод сличения

При сличении применяют нулевой метод. Поверяемый прибор присоединяют к осциллографу, на нем устанавливают заданное значение кажущегося заряда. Изменяя режимы работы осциллографа (запуск, усреднение), развертку по оси Y, сдвиг нулевой линии по оси X, добиваются, чтобы изображение занимало не менее 80 % высоты экрана.

К осциллографу вместо калибруемого прибора подключают ИС или эталонный калибратор ЭГКЗ-1. Регулировкой напряжения ИС устанавливают среднее значение напряжения равным этому параметру сигнала поверяемого прибора. Допускается подгонку равенства выполнять с помощью переменного конденсатора, установленного параллельно мере емкости. Если вместо ИС используется эталонный калибратор ЭГКЗ-1, то подгонку равенства средних значений напряжения производят с помощью подстроечного устройства самого эталонного калибратора. При этом также упрощается расчёт ПГ, т.к. подстроечное устройство отградуировано непосредственно в виде процентного отклонения от установленного значения q .

С. Метод аттестации генератора прямоугольных импульсов

Нормированная ПГ генератора по амплитуде напряжения составляет 1 %. Очевидно, что ПГ для конкретного образца в требуемых точках может быть меньше. Существующие калибраторы кажущегося заряда обычно воспроизводят значения q кратные 1, 2, 5. Можно определить фактическую ПГ генератора в этих точках с помощью импульсных вольтметров, однако ПГ последних составляет не менее 0,5 % (по модулю), что сопоставимо с ПГ самого разработанного эталона. Разработан метод аттестации генератора, основанный на известном положении о том, что прямоугольный импульс создаётся в генераторе путём цифровой обработки синусоидального сигнала. В этом случае ПГ генератора по амплитуде прямоугольного импульса в основном будет определяться ПГ воспроизведения синусоиды, составляющей для среднеквадратического значения 0,5 %, а фактическая ПГ может быть ещё меньше этого значения.

На генераторе устанавливают синусоидальную форму сигнала, выставляют амплитуду 1 В (pic-to-pic) и измеряют среднеквадратическое значение U_1 . Это значение пересчитывают в амплитудное значение U_a по формуле

$$U_a = 2 \cdot 1,4142 \cdot U_1 \quad (6)$$

ТАБЛИЦА III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПО АМПЛИТУДЕ ПРИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ИМПУЛЬСА

Напряжение на генераторе, В	Синусоидальное напряжение			Прямоугольный импульс			
	Измеренное значение, В	Амплитуда, В	Погрешность, %	Измеренное значение, В	Амплитуда, В	Погрешность, %	
						фактическая	допускаемая
0,5	0,17698	0,50057	-0,12	0,25042	0,50084	-0,16	±0,4
1	0,35380	1,0007	-0,07	0,50014	1,0003	-0,03	
5	1,7679	5,0040	-0,08	2,5029	5,0058	-0,12	
10	3,5407	10,015	-0,15	5,0059	10,012	-0,12	

Результаты измерений заносят в табл. 3 и определяют погрешность генератора при синусоидальном напряжении. В табл. 3 приведены для примера результаты измерений, полученные для генератора из состава эталона.

Далее при том же напряжении на генераторе переключают форму сигнала на прямоугольную (меандр) и измеряют амплитуду сигнала с помощью мультиметра. Результаты измерений также заносят в табл. 3 и определяют погрешность генератора при прямоугольном напряжении. Полученное значение погрешности по модулю не должно быть более 0,4 % (чтобы не превысить погрешность эталона, равную 0,5 %, см. табл. 2). Это значение не должно также превосходить более, чем на погрешность мультиметра (0,09 %), погрешность генератора по амплитуде при воспроизведении синусоидального сигнала. В противном случае измерения следует повторить. Так же проводят измерения для других используемых значений напряжения.

Д. Выбор мер емкости и нагрузочного резистора

Меры ёмкости из состава эталона полностью экранированы и выполнены по трехполосной схеме включения. Большая часть мер изготовлена на основе керамических конденсаторов, имеющих нулевую группу ТКЕ.

Значения ёмкости мер определены с ПГ $\pm 0,005$ %.

Количество мер емкости и их номинальные значения, умноженные на амплитуду импульса генератора, должны соответствовать диапазону воспроизведения кажущегося заряда поверяемого прибора. При выборе этих параметров следует отдать предпочтение такому сочетанию С и U, при котором С имеет минимальное значение. Меры ёмкости 2, 20, 200 пФ предназначены для аттестации калибратора ЭГКЗ-1, имеющего встроенные конденсаторы того же номинального значения. Это позволяет сравнивать сигналы от калибратора и ИС на экране осциллографа без дополнительных подстроек.

ТАБЛИЦА IV.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОВЕРКИ КАЛИБРАТОРА КАЖУЩЕГОСЯ ЗАРЯДА CAL 542 A

Установленное значение q на калибруемом приборе, пКл	Действительное значение q , пКл	Отклонение показаний калибруемого прибора	
		абсолютное Δ , пКл,	относительное δ , %
Положительный заряд			
1,00	1,05	-0,05	Не нормируется
2,00	2,00	0,00	То же
5,00	5,08	-0,08	-
10,0	10,3	-0,3	-
20,0	20,5	-0,5	-2,5
50,0	50,8	-0,8	-1,6
100,0	100,1	-0,1	-0,1
Отрицательный заряд			
-1,00	-1,03	0,03	Не нормируется
-2,00	-2,00	0,00	То же
-5,00	-5,05	0,05	-
-10,0	-10,0	0,00	-
-20,0	-20,5	0,5	2,5
-50,0	-50,9	0,9	1,8
-100,0	-100,1	0,1	0,1

Остальные меры емкости применяют в составе ИС для поверки других калибраторов.

Нагрузочный резистор имеет сопротивление 1 кОм с допуском $\pm 0,1\%$ и должен быть безреактивным (напр., металлопленочные резисторы С2-29).

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве примера приведём результаты поверки калибратора CAL 542 A (МХ представлены в табл. 1). Поверка проводилась методом сличения с использованием эталонного калибратора ЭГКЗ-1. В качестве компаратора использован цифровой осциллограф. Измерения показали, что абсолютные отклонения воспроизводимых значений поверяемого СИ от действительного значения составляют от минус 0,05 до 0,9 пКл. Указанные погрешности ниже допускаемой ПГ, составляющей ± 1 пКл для поверяемого СИ.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во ВНИИМ разработан эталон повышенной точности для поверки и калибровки калибраторов кажущегося заряда и ИЧР. Эталон утверждён в качестве исходного

эталона в структуре локальной поверочной схемы ВНИИМ для указанных СИ. Диапазон воспроизведения кажущегося заряда составляет от 1 пКл до 100 нКл, пределы допускаемой абсолютной погрешности составляют $\pm(0,1 \text{ пКл} + 0,005 \cdot q)$. Эталон охватывает весь диапазон значений существующих калибраторов, а по точности превосходит их в 6–10 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Ленинград: Энергия. Ленингр. отделение, 1979. 224 с.
- [2] Клионский М.Д. Метрологическое обеспечение для калибраторов кажущегося заряда и измерителей частичных разрядов // 78-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург. 2023. С. 416-418. Электронное издание. Доступно на: <https://confntores.etu.ru/2023/ru/sbornik-dokladov/sekcija-11-izmereniya-v-radioelektronike-i-svyazi>.
- [3] Ove Gunnarsson. Anders Bergman and Karl-Erik Rydler. A Method for Calibration of Partial Discharge Calibrators // Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 48, No 2. April, 1999, p. 453-456.