

Метрологическое обеспечение для калибраторов кажущегося заряда и измерителей частичных разрядов

М. Д. Клионский

Всероссийский НИИ метрологии им. Д.И. Менделеева
m.d.klionsky@vniim.ru

Аннотация. Для поверки (калибровки) калибраторов кажущегося заряда используют метод косвенных измерений, основанный на подаче на калибратор заряда, создаваемого прямоугольным импульсом тока при прохождении через конденсатор малой ёмкости. Используемая для этого измерительная система содержит генератор сигналов произвольной формы и меры малой ёмкости. В качестве компаратора используют цифровой осциллограф с высокой разрешающей способностью по вертикальной оси. Другой метод поверки заключается в сличении с калибратором повышенной точности. Калибраторы затем используют для поверки и градуировки измерителей частичных разрядов. Во ВНИИМ разработана локальная поверочная схема (ЛПС) для данной области измерений. ЛПС содержит исходный эталон единицы электрического заряда в виде калибратора повышенной точности, заимствованные эталоны, рабочие эталоны, и средства измерений.

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

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Высоковольтные устройства, такие как трансформаторы, вводы, кабели, должны проходить испытательные тесты на наличие в изоляции частичных разрядов (ЧР). В соответствии с ГОСТ 20074-83 и ГОСТ Р 55191-12 частичный разряд – это электрический разряд, который шунтирует лишь часть изоляции между электродами, находящимися под разными потенциалами. Если значение ЧР превышает норму, то устройство подлежит ремонту или замене. Происходящие в изоляции или на её поверхности ЧР проявляются в виде малых импульсов тока или напряжения. Их регистрируют с помощью приборов, называемых измерителями частичных разрядов (ИЧР). Для градуировки и контроля ИЧР используют калибраторы кажущегося заряда (далее – калибраторы), которые выпускают в виде самостоятельных приборов и часто включают в состав всей измерительной системы для измерения ЧР. Иногда эти калибраторы называют калибраторами ЧР, или генераторами кажущегося заряда. Кажущийся заряд q имитирует заряд, при введении которого между электродами испытуемого объекта напряжение изменится (уменьшится) на такое же значение, как при частичном разряде в нём. Однако требования к метрологическим характеристикам ИЧР и

калибраторам не стандартизованы, государственная поверочная схема (ГПС) для этих СИ не разрабатывалась. В настоящее время в стране действует положение о том, что все СИ, применяемые для поверки, должны иметь статус эталона, но это нельзя выполнить для калибраторов и измерителей ЧР из-за отсутствия ГПС. Чтобы восполнить этот пробел, во ВНИИМ разработана локальная поверочная схема (ЛПС, утверждена в декабре 2022 г.) для рассматриваемых средств измерений (СИ) и исследованы методы измерений и СИ, которые обладают необходимой точностью для включения в ЛПС.

II. ТРЕБОВАНИЯ К ЭТАЛОНАМ И СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЙ

Исходным эталоном ЛПС является специально изготовленный калибратор кажущегося заряда ЭГКЗ-1 (фирма ТЕСТСЕТ, СПб). Диапазон воспроизводимых значений исходного эталона составляет от 1 пКл до 1,1 нКл. Пределы допускаемой абсолютной погрешности воспроизведения значений кажущегося заряда составляют $\pm(0,1 \text{ пКл} + 0,005 q)$. Исходный 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.

В исходном эталоне реализуется свойство прямоугольного импульса тока 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.

Метрологические характеристики (МХ) некоторых существующих калибраторов, которые могут быть аттестованы в качестве рабочих эталонов, представлены в таблице.

ТАБЛИЦА I. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЛИБРАТОРОВ КАЖУЩЕГОСЯ ЗАРЯДА

Наименование	Обозначение, регистрационный номер	Диапазон	Пределы допускаемой погрешности
Генератор ЧР (из состава ИЧР 201)	ГГЧР 201	1-10 пКл 11 пКл – 2 нКл	$\pm 0,5$ пКл $\pm 5\%$
Калибратор ЧР	KAL 9510 Рег. № 63939-16	1-20 пКл 20-100 пКл	± 1 пКл $\pm 5\%$
Калибратор ЧР	KAL 9520 Рег. № 63939-16	1-20 пКл 20 пКл – 50 нКл	± 1 пКл $\pm 5\%$
Калибратор кажущегося заряда (из состава МРД 600)	CAL 542 Рег. № 40797-09	1-100 пКл 100 пКл – 10 нКл	± 1 пКл $\pm 5\%$
Калибратор кажущегося заряда (из состава РД-ТaD)	1В; 1Е Рег. № 63377-16	1-100 пКл 1-50 нКл	$\pm 3\%$ $\pm 3\%$

Как видно из таблицы, исходный эталон охватывает не весь диапазон измерений эталонных калибраторов (не охвачены q свыше 1 нКл до 50 нКл), поэтому в ЛПС введены заимствованные эталоны из других ГПС, обеспечивающие получение заряда в соответствии с (1).

В качестве заимствованных эталонов используют:

- меры электрической ёмкости в диапазоне от 0,1 пФ до 10 нФ с пределами допускаемой относительной погрешности $\pm(0,02 - 0,05)\%$;
- генератор сигналов произвольной формы (генератор прямоугольных импульсов) с амплитудой прямоугольного импульса от 0,1 до 10 В, длительностью импульса (Т) от 0,1 до 2 мс, частотой следования импульсов 0,1 или 1 кГц; эталонный вольтметр переменного напряжения в диапазоне от 0,1 до 10 В с пределами допускаемой относительной погрешности $\pm(0,1 - 0,2)\%$ – для измерения выходного напряжения генератора.

Диапазон воспроизводимых значений кажущегося заряда с помощью заимствованных эталонов составляет от 1 пКл до 100 нКл; пределы допускаемой абсолютной погрешности составляют $\pm(0,1 \text{ пКл} + 0,01 q)$. Совокупность мер ёмкости и генератора сигналов, включая соединительные элементы, будем называть измерительной системой (ИС).

Соотношение пределов допускаемой погрешности воспроизведения значений кажущегося заряда, полученных с помощью исходного и заимствованных эталонов, и поверяемых по ним рабочих эталонов и высокоточных СИ должно быть не более 1:2. Это же соотношение при поверке СИ по рабочим эталонам должно быть не более: для малых значений q в диапазоне от 1 до 10 пКл – 1:2; при значениях q свыше 10 пКл – 1:3.

III. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Поверку ИЧР по калибратору проводят методом прямых измерений. Поверку калибраторов по эталону 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 оси y 10 бит и выше (что соответствует чувствительности по напряжению 0,1 % и выше).

Обычно в методиках поверки калибраторов предлагается метод косвенных измерений, в котором амплитуду прямоугольного импульса измеряют с помощью самого осциллографа, подставляют его значение в формулу (1) и получают действительное значение заряда. Погрешность (ПГ) осциллографа по напряжению составляет от 2 % до 3 %, что ограничивает точность измерений. Известен также метод измерения амплитуды импульса с помощью цифрового вольтметра [1]. Однако 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 конце измерительного кабеля между внутренней жилой и оплеткой (на входе осциллографа). Осциллограф должен обладать встроенной функцией цифрового интегрирования сигнала (режим *mean* в меню *Meas/Voltage*). В этом случае осциллограф используется как нуль-индикатор и указанная ПГ существенно уменьшается.

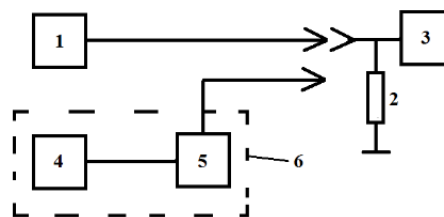


Рис. 1. Схема соединений при поверке. 1 – поверяемый калибратор; 2 – нагрузочный резистор; 3 – осциллограф; 4 – генератор прямоугольных импульсов; 5 – мера емкости; 6 – измерительная система

ИС содержит генератор сигналов произвольной формы или генератор стандартных сигналов с амплитудой прямоугольного импульса до 10 В и меры емкости из диапазона 0,1 пФ – 10 нФ (значения ёмкости рекомендуется принять кратными или дольными десяти, а именно: 0,1; 1, 10, 100 пФ, 1 и 10 нФ). Погрешность генератора по амплитуде напряжения составляет 1 %. Класс точности мер выбирается в зависимости от точности поверяемого прибора (рисунок 1).

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 C и U , при котором C имеет минимальное значение. Нагрузочный резистор имеет сопротивление 1 кОм с допуском $\pm 0,1\%$ и должен быть безреактивным (например, металлопленочные резисторы С2-29).

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 Y , добиваются, чтобы изображение занимало не менее 80 % высоты экрана.

К осциллографу вместо калибруемого прибора подключают ИС (или эталонный калибратор). Регулировкой напряжения ИС устанавливают среднее значение напряжения равным этому параметру сигнала поверяемого прибора. Допускается подгонку равенства выполнять с помощью поверяемого прибора.

IV. РАСЧЕТНЫЕ ВЫРАЖЕНИЯ

Заряд прямоугольного 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.

Для определения фактического заряда импульса используется встроенный алгоритм расчета среднего значения напряжения цифрового осциллографа

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

где T – время интегрирования (произведение коэффициента развёртки K_r и количества делений развёртки по экрану осциллографа N).

Из (2) и (3) получают

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

Выражение (4) можно использовать для расчета действительного значения заряда при поверке калибраторов невысокой точности (ПГ 5 % – 10 %). Для получения более точных результатов применяют метод сличения, подключая к осциллографу ИС или более точный эталонный калибратор. Получить точно такое же значение U_{cp} , регулируя напряжение на ИС или выходной параметр эталонного калибратора, удаётся не всегда (не хватает разрешающей способности). Тогда для оценки допустимой 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 $U_{cp x}$ – величины, относящиеся к поверяемому калибратору; q_{ε} и $U_{cp \varepsilon}$ – величины, относящиеся к эталонному СИ.

По значению α можно определить, надо ли продолжать дальнейшую подстройку величины q_{ε} .

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве примера приведём результаты поверки калибраторов CAL 542 и KAL 9520 (МХ представлены в таблице). Поверка проводилась методом сличения с использованием следующих эталонов: в диапазоне от 1 пКл до 1 нКл – исходный эталон ЭГКЗ-1; в диапазоне от 2 до 50 нКл – измерительная система, содержащая меры емкости P597 значением 1 и 10 нФ и генератор сигналов произвольной формы Rigor DG5071. В качестве компаратора использован цифровой осциллограф DSO5012A (разрешение по вертикали 12 bit). В калибраторе KAL 9520 при больших значениях заряда выходное напряжение составляет 20 и 200 В, в то время как в использованном генераторе максимальное значение амплитуды импульса равно 10 В (этот предел по напряжению установлен и в генераторах сигналов других типов). Чтобы разместить изображения импульсов разной амплитуды на одном и том же экране осциллографа, не изменяя его настройки, использованы при подключении поверяемого калибратора делители 1:10 и 1:100, составленные из резисторов с подгонкой 0,1 %. Далее эти коэффициенты учитывались при расчете заряда.

Измерения показали, что погрешности поверяемых СИ не превышают: для CAL 542 в диапазоне 1–10 пКл ПГ 0,3 пКл, в диапазоне 20–100 пКл ПГ 2 %; для CAL 9520 в диапазоне 1–10 пКл ПГ 0,3 пКл, в диапазоне 20 пКл – 50 нКл ПГ 1,7 %. Указанные погрешности существенно ниже допустимой ПГ, составляющей соответственно 1 пКл и 5 % для обоих поверяемых СИ.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во ВНИИМ разработана локальная поверочная схема для калибраторов кажущегося заряда и ИЧР. Исследования показали, что методы измерений и СИ, включённые в ЛПС, обеспечивают необходимый запас по точности при поверке. В настоящее время в стране действует положение о том, что все СИ, применяемые для поверки, должны иметь статус эталона, поэтому внедрение новой ЛПС и связанных с ней рабочих эталонов позволит узаконить использование калибраторов кажущегося заряда в поверочных целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] 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.