

Методы измерений при калибровке измерителей ЧР и калибраторов кажущегося заряда

М. Д. Клионский

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

m.d.klionsky@vniim.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности методов измерений, применяемых при калибровке измерителей ЧР и калибраторов кажущегося заряда. Установлены требования, которым должны удовлетворять цифровой осциллограф и генератор прямоугольных импульсов, для обеспечения минимальной неопределённости измерений. Приведены результаты исследований и расчёт неопределённости.

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

I. Постановка задачи

В начальные периоды развития электротехники о качестве изоляции аппаратов высокого напряжения судили по результатам измерений тангенса угла потерь и его зависимости от напряжения. Однако отдельные слабые места изоляции, такие, как газовые включения, трещины, при неблагоприятном соотношении ёмкостей объекта и дефектных участков изоляции остаются не выявленными с помощью измерения тангенса угла потерь изоляции. В настоящее время здесь используются другие средства измерений (СИ) – измерители частичных разрядов (далее – ИЧР, измерители ЧР) [1]. Ещё в 80-х годах прошлого века погрешность 30 % для ИЧР считалась допустимой (ГОСТ 20074-83), поэтому специальные методы и СИ для их поверки и калибровки не разрабатывались. Однако в настоящее время требования к точности измерений ЧР повысились (ГОСТ Р 55191-2012, ИЕС 60270-2000), появились ИЧР, точность которых существенно выше. Неопределённость измерений составляет от 3 % до 5 %. Для их контроля стали выпускать калибраторы кажущегося заряда (далее – калибраторы КАЗ) по точности в 2–3 раза выше [2]. Следует отметить, что несмотря на разное название, единица измерений ЧР и КАЗ одна и та же – Кулон (Кл), обычно используются дольные единицы – пКл и нКл. Первичный эталон в данной области измерений отсутствует, государственная поверочная схема не разрабатывалась. Во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева разработана локальная поверочная схема (ЛПС) для ИЧР и калибраторов КАЗ и утверждён государственный исходный эталон в данной области измерений (регистрационный № в ФИФ 3.1.ZZB.0446.2023). В статье рассматриваются методы измерений, включённые в ЛПС и применяемые при калибровке ИЧР и калибраторов КАЗ.

II. Методы измерений

Для измерения ЧР и КАЗ используются следующие методы измерений:

- метод прямых измерений;

- метод косвенных измерений;
- сличение с помощью компаратора.

Метод прямых измерений применяют для калибровки измерителей и измерительных систем (ИС) ЧР (рис. 1). В качестве средства калибровки применяют калибраторы КАЗ более высокой точности, часто входящие в состав этих СИ. Их аттестуют в качестве рабочих эталонов в соответствии с ЛПС (табл. 1).

Метод косвенных измерений применяют для калибровки калибраторов КАЗ. В качестве эталона применяют ИС, содержащую генератор сигналов произвольной формы и меры электрической ёмкости (далее – ёмкости). В генераторе используют функцию воспроизведения сигнала прямоугольной формы (меандра) с амплитудой импульса от 0,5 до 10 В. Используемые меры ёмкости имеют значения от 1 пФ до 10 нФ. В качестве прибора сравнения применяют цифровой осциллограф [3].

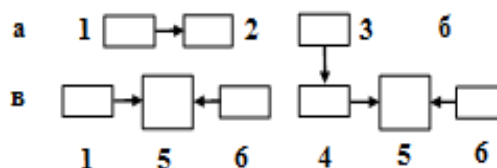


Рис. 1. Структурная схема соединений эталонов и калибруемых СИ

а – метод прямых измерений; б – метод косвенных измерений; в – сличение с помощью компаратора. 1 – эталонный калибратор; 2 – ИЧР; 3 – генератор прямоугольных импульсов; 4 – мера ёмкости; 5 – цифровой осциллограф; 6 – измеряемый калибратор.

Метод сличения с помощью компаратора применяют для калибровки калибраторов КАЗ при наличии эталонного калибратора. Например, в состав государственного исходного эталона входит эталонный калибратор с диапазоном воспроизведения КАЗ от 1 до 1000 пКл и неопределённостью 0,1 пКл + 0,005·q. В качестве компаратора в методе сличения применяют так же цифровой осциллограф.

Точность метода прямых измерений определяется метрологическими характеристиками (МХ) калибратора и ИЧР, участвующих в калибровке, неопределённость составляет 5 % и более. Точность двух других методов зависит от МХ цифрового осциллографа и генератора импульсов. Для цифрового осциллографа неопределённость при измерении напряжения обычно составляет 3 %. При работе в режиме сравнения двух одинаковых напряжений эту величину можно снизить до 0,1 %, при условии, что установки регулируемых элементов в обоих измерениях сохраняются

неизменными. В генераторе импульсов неопределённость воспроизведения обычно составляет 1 %. Её можно уменьшить, используя метод аттестации, описанный в [4]. Минимальная неопределённость измерений, полученная в исходном эталоне ВНИИМ, составляет $0,1 \text{ пКл} + 0,005 \cdot q$ (табл. 1).

III. ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЙ

Формирование кажущегося заряда в методе косвенных измерений производится путем пропускания импульсов напряжения от генератора импульсов через меру емкости, включенную последовательно с ним. В методах косвенных измерений и сличения с помощью компаратора важное значение имеет цифровой осциллограф, выполняющий функцию прибора сравнения или компаратора. Во ВНИИМ используют при калибровке калибраторов КАЗ метод, основанный на измерении и подстройке среднего напряжения, пропорционального среднему току в импульсе. Ток преобразуют в напряжение с помощью нагрузочного резистора (1 кОм), 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 напряжение сигнала (интеграл напряжения).

ТАБЛИЦА 1. Диапазон измерений и расширенная неопределённость эталонов и СИ

Наименование	Диапазон измерений	Расширенная неопределённость
Исходный эталон	От 1 пКл до 100 нКл	$0,1 \text{ пКл} + 0,005 \cdot q$
Рабочие эталоны	От 1 пКл до 10 нКл	$0,5 \text{ пКл} + (0,01 - 0,05) \cdot q$
Средства измерений: калибраторы КАЗ измерители ЧР; ИС	От 0,1 пКл до 10 нКл От 5 пКл до 50 нКл	$1 \text{ пКл} + (0,03 - 0,1) \cdot q$ 5 % - 30 %

По этой величине сравнивают кажущиеся заряды, воспроизводимые измеряемым калибратором и эталонным (или эталонной ИС). Осциллограф должен иметь высокий коэффициент отклонения по вертикали - от 10 до 12 bit, что соответствует разрешающей способности от 0,1 % до 0,05 % (например, используемый во ВНИИМ цифровой осциллограф RTB2002, ф. Rhode-Schwartz). Измерения на осциллографе проводят в режиме усреднения. Рекомендуемая частота следования импульсов 100 Гц или 1 кГц. Регулировкой ручек «Развертка по оси y» и «Горизонтальное смещение» добиваются, чтобы изображение занимало 80–90 % высоты экрана.

У некоторых проверяемых калибраторов при больших значениях КАЗ амплитуда импульса имеет значение до 200 В. Это превышает верхний предел напряжения импульсов, создаваемых генератором (обычно предел составляет 10 В). Оба сигнала не удаётся разместить на экране осциллографа при одной и той же установке регулировочных элементов, что приводит к возрастанию неопределённости измерений. Для совмещения импульсов КАЗ на экране осциллографа необходимо понизить амплитуду импульса, создаваемого проверяемым калибратором. Во ВНИИМ это делают с помощью устройства «Делитель кажущегося заряда», электрическая схема которого

показана на рис. 2. Устройство включают вместо нагрузочного резистора 1 кОм. Делитель содержит безиндуктивные (металлоплёночные) резисторы 10, 90 и 900 Ом, образующие при подключении калибруемого прибора отношения 1:10 и 1:100. При подключении к любому из этих выходов суммарное нагрузочное сопротивление по-прежнему составляет 1 кОм. Сопротивление каждого резистора должно соответствовать номинальному значению в пределах $\pm 0,1 \%$, тогда погрешность делителя можно не учитывать. Выход 1:1 используют при замене калибруемого прибора эталонной ИС.

В процессе измерений при любых изменениях в положении регулировочных элементов на передней панели осциллографа или при длительном временном интервале между первым и вторым измерениями (более 5 мин) необходимо проверять начальное смещение среднего напряжения при отсоединенном измерительном кабеле.

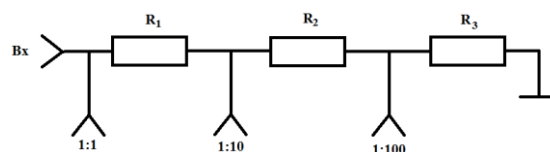


Рис. 2. Электрическая схема делителя кажущегося заряда
 $R_1 = 900 \text{ Ом}$, $R_2 = 90 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$

Для калибруемого и эталонного приборов начальные смещения в проверяемой точке не должны различаться более, чем на 0,5 % от значения среднего напряжения (U_x или $U_э$). В противном случае измерения следует повторить или учитывать начальное смещение, вычитая его из величин U_x и $U_э$. Измерения проводят для зарядов как положительной, так и отрицательной полярности.

Из всех рассмотренных методов наиболее универсальным является метод косвенных измерений. Он позволяет получать любые значения КАЗ, в то время как серийно выпускаемые калибраторы КАЗ имеют ограниченный диапазон, а внутри каждого десятичного поддиапазона воспроизводят неполную декаду (точки, кратные 1, 2, 5).

IV. УРАВНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Уравнение измерений имеет следующий вид:

прямые измерения

$$q_x = q_э + \Delta \quad (1)$$

косвенные измерения

$$q_x = C \cdot U + \Delta \quad (2)$$

сличение с помощью компаратора

$$q_x = q_э (1 + \alpha) \quad (3)$$

где q_x – кажущийся заряд, измеряемый или воспроизводимый калибруемым прибором; $q_э$ – кажущийся заряд, воспроизводимый эталонным калибратором (или ИС); C – емкость меры; U – амплитуда прямоугольного импульса; Δ – отклонение показаний измеряемого прибора от действительного значения кажущегося заряда; α – безразмерный коэффициент, характеризующий близость q_x к $q_э$; $\alpha = (U_{ср\ x} / U_{ср\ э}) - 1$; $U_{ср\ x}$ и $U_{ср\ э}$ – средние значения напряжения, вычисленные с помощью осциллографа и относящиеся соответственно к q_x и $q_э$.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

$$u_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_{xi} - \bar{q}_{xcp})^2}{n(n-1)}} \quad (5)$$

Рассмотрим результаты калибровки калибратора CAL 542B по государственному исходному эталону (ВНИИМ). Диапазон измерений калибратора CAL 542B от 1 до 100 пКл, допускаемое отклонение показаний: 1 пКл в поддиапазоне 1 – 10 пКл; 5 % в поддиапазоне 11 – 100 пКл. Используется метод сличения с помощью компаратора. Измерения проводят с помощью эталонного калибратора и цифрового осциллографа из состава исходного эталона.

Уравнение для расчета суммарной стандартной неопределенности $u_c(q)$ имеет вид:

$$u_c(q) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}, \quad (4)$$

где u_1 – стандартная неопределенность, обусловленная разбросом показаний осциллографа; u_1 определяется по формуле:

u_2 – стандартная неопределенность, обусловленная неопределённостью показаний эталонного калибратора (из паспорта); u_3 – стандартная неопределенность, обусловленная влиянием температуры на калибруемый калибратор.

Составляют бюджет неопределенности в виде табл. 2, куда заносят стандартные неопределенности всех входящих величин.

Расширенную неопределенность рассчитывают по формуле

$$U(q) = k \cdot u_c(q), \quad (6)$$

где k – коэффициент охвата; принимают $k=2$ ($p=0,95$).

ТАБЛИЦА II. БЮДЖЕТ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ПРИ КАЛИБРОВКЕ КАЛИБРАТОРА КАЖУЩЕГОСЯ ЗАРЯДА CAL 542B (АВСТРИЯ) МЕТОДОМ СЛИЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ КОМПАРАТОРА

Входная величина и единица измерений	Оценка	Стандартная неопределённость, u_i	Тип оценивания	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в суммарную стандартную неопределённость $c_i u_i$
Кажущийся заряд q_x или q_y , пКл	1 – 10 пКл	Разброс показаний осциллографа 0,06 пКл	A	2	0,12 пКл
	11 – 100 пКл	0,17 %	A	2	0,34 %
Кажущийся заряд q_y , пКл	1 – 10 пКл	Неопределённость действительного значения заряда эталонного калибратора 0,06 пКл	B	1	0,06 пКл
	11 – 100 пКл	0,29 %	B	1	0,29 %
Кажущийся заряд q_x , пКл	1 – 10 пКл	Влияние температуры на измеряемый калибратор 0,0006 пКл	B	1	0,0006 пКл
	11 – 100 пКл	0,006 %	B	1	0,006 %
Выходная величина: кажущийся заряд		Суммарная стандартная неопределённость, u_c		Расширенная неопределённость ($k=2$)	
1 – 10 пКл		0,134 пКл		0,27 пКл	
11 – 100 пКл		0,45 %		0,9 %	

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При калибровке ИЧР и калибраторов кажущегося заряда применяют следующие методы: прямых измерений, косвенных измерений, сличение с помощью компаратора. Наибольшую точность обеспечивают последние два метода. Неопределённость результатов измерений зависит от разрешающей способности применённого цифрового осциллографа, используемого в виде компаратора или прибора сравнения, и от точности генератора прямоугольных импульсов. Предлагается для сравнения кажущихся зарядов, воспроизводимых калибруемым и эталонным калибраторами (или эталонной ИС) использовать свойство цифровых осциллографов, выводить на экран среднее напряжение входного сигнала (интеграл напряжения). Минимальная неопределённость, достигнутая в государственном исходном эталоне ВНИИМ, составляет 0,1 пКл + 0,005· q . Метод косвенных измерений позволяет получать любые значения кажущегося заряда, что делает его универсальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Ленинград: Энергия. Ленингр. отделение, 1979. 224 с.
- [2] 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.
- [3] Клионский М.Д. Метрологическое обеспечение для калибраторов кажущегося заряда и измерителей частичных разрядов // 78-я науч.-техн. конф. СПб НТО РЭС им. А.С. Попова, посвящённая Дню радио: сб. докладов, 2023, СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». с. 418-421. Доступно на: <https://conf-ntores.etu.ru/2023/ru/sbornik-dokladov/sekcija-11-izmereniya-v-radioelektronike-i-svyazi>
- [4] Клионский М.Д. Эталон единицы кажущегося заряда повышенной точности. 79-я науч.-техн. конф. СПб НТО РЭС им. А.С. Попова, посвящённая Дню радио: сб. докладов, 2024, СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», с. 416-418. Доступно на: <https://conf-ntores.etu.ru/2024/ru/sbornik-dokladov/sekcija-11-izmereniya-v-radioelektronike-i-svyazi>