

# Декадная калибровка эталонов электрической емкости

Ю. П. Семенов<sup>1</sup>, Е. В. Кривицкая<sup>2</sup>, Г. А. Климов<sup>3</sup>

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

<sup>1</sup>Y.P.Semenov@vniim.ru, <sup>2</sup>E.V.Krivitskaya@vniim.ru, <sup>3</sup>G.A.Klimov@vniim.ru

**Аннотация.** Method of decade calibration allows to transfer the capacitance unit from a single - value capacitance standard to another nominal values the same decade with the use of a comparator. Any digital RLC meter having sufficient sensitivity and resolution can be used as the comparator. During this process, corrections to the comparator readings are also calculated which can be applied when RLC meter is used in direct measurement mode.

**Ключевые слова:** standard; calibration; comparator; capacitance; RLC-meter; correction

## I. ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с определением, калибровка средств измерений (СИ) – это совокупность операций, которые служат для установления (при определенных условиях) соотношения между показаниями измерительных приборов или значениями величин, воспроизводимых материальной мерой, и соответствующими значениями величин, воспроизводимых эталоном [1]. Иными словами, – любое СИ должно каким-либо способом реализовать (осуществлять, материализовать) в себе размер единицы [2]. Каждое числовое значение величины является выражением отношения этого значения к единице измерения этой величины [1].

Калибровка многозначного СИ предполагает наличие такого количества калиброванных мер, которые воспроизводили бы все необходимые числовые значения величины в диапазоне измерений этого СИ.

Современные цифровые СИ, в том числе измерители электрической емкости, позволяют выполнять измерения крайне большого набора числовых значений измеряемой величины. Современные цифровые измерители электрической емкости можно рассматривать как многозначное СИ, для калибровки которого необходимо использовать такое количество эталонов, которое соответствует количеству числовых значений, реализуемых измерителем. Практически это невозможно осуществить, поскольку в большинстве случаев, доступным является только ограниченное число эталонов, как правило, с декадными номинальными значениями. Это означает, что в каждом диапазоне измерений только одна или две точки могут быть проверены, а для остальных числовых значений невозможно оценить не только погрешность измерений, но и линейность отсчетов измерителя – основную характеристику измерителя при его применении в качестве компаратора.

Этого недостатка лишен метод декадной калибровки (МДК) наборов эталонов (мер) электрической емкости, широко применявшийся в национальных метрологических институтах мира в период 1920–70 гг. [3–6].

Изначально известно действительное значение только одной меры с наименьшим номинальным значением. В процессе калибровки этим методом происходит ступенчатое возрастание номинального значения мер, действительное значение которых становится известным.

Метод основан на сравнении (компарировании) емкости равно-номинальных комбинаций параллельно включенных мер. Метод применим к наборам мер, сумма номинальных значений которых относится к номинальному значению наименьшей из них как 10:1, при этом различные комбинации параллельного соединения мер позволяют получить все значения десятичной декады от 1 до 10, а число мер в наборе является минимальным. Этим условиям удовлетворяют только два ряда номинальных значений: 1-2-3-4 и 1-2-2-5. Этим условиям удовлетворяет, например, набор мер емкости Р597, меры которого (от 1 пФ до 400 нФ) в каждой декаде соответствуют ряду 1-2-3-4.

Этот метод был незаменим до тех пор, пока сличения мер равного номинального значения оставался самым точным способом измерений физических величин. Значимость его применения снизилась после изобретения способов получения и точного измерения отношения одноименных электрических величин – тока и напряжения. Трансформаторные мосты и индуктивные делители (ИД) напряжения и тока, а затем цифровых измерителей импеданса используют возможность одновременно измерять отношения параметров измеряемого и эталонного объектов [7]. Этот принцип лежит в основе ультра-прецизионных цифровых мостов со встроенными ИД и эталонами емкости [8] и цифровых электронных синтезаторов [10, 11].

Наибольшее распространение в метрологической практике находят цифровые LRC-метры, которые позволяют производить измерения в широких диапазонах номинальных значений и частот и обладают высокой стабильностью показаний и разрешающей способностью (5–6 разрядов), но сравнительно невысокой точностью (погрешность 0,05 %) [12]. Такое соотношение между разрешающей способностью (0,0001 %) и погрешностью позволяет на новом технологическом уровне обратиться к

методу декадной калибровки [13–15] для решения двух задач – (1) повышения точности калибровки мер электрической емкости при ограниченном количестве исходных эталонов и (2) повышения точности цифровых LRC-метров посредством введения поправок к результатам их прямых измерений (отсчётов).

Применение МДК обеспечивает получение большого числа калибровочных значений при наличии единственного исходного эталона и при соблюдении ряда условий при осуществлении измерений.

## II. УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ДЕКАДНОЙ КАЛИБРОВКИ

Для успешного применения МДК необходимо соблюдение следующих условий при выполнении измерений:

1. Значение емкости каждого конденсатора должно оставаться неизменным (как минимум) на протяжении цикла измерений в пределах, определяемых требуемой точностью результата калибровки (стабильность мер, неизменность влияния соединительных цепей, неизменность определения мер различных декад);

2. Неопределенность суммирования значений емкости любого числа конденсаторов должна быть пренебрежимо мала по сравнению с требуемой точностью результата калибровки, в том числе необходимо исключить взаимное влияние измерительных цепей конденсаторов друг на друга (взаимные индуктивности), исключить начальную емкость и снизить утечки от каждого конденсатора к точке нулевого потенциала, а также проверить устойчивость отсчетов измерителя при изменении величины этой утечки при суммировании;

3. Неопределенность компарирования равнономинальных мер должна быть пренебрежимо мала по сравнению с требуемой точностью результата калибровки (стабильность отсчетов измерителя при измерении каждой из емкостей набора в течение времени выполнения всего цикла измерений; требования ограничения отклонения действительного значения мер или любой их комбинации от номинального значения, локальная линейность характеристики измерителя);

4. Предварительная настройка Short и Open измерителя должна осуществляться в той же эффективной плоскости, в которой расположены коммутирующие устройства калибруемых мер;

5. Выбор надлежащего режима работы измерителя без фиксации диапазона измерений, поскольку у всех RLC-метров программно предусмотрен выбор оптимального диапазона измерений в зависимости от значения измеряемого импеданса и частоты. Принудительное изменение алгоритма работы измерителя может дать ложное представление о погрешности измерителя.

## III. НОМИНАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ МЕР И АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЙ

Количество комбинаций включения конденсаторов (мер), которые необходимо измерить в процессе калибровки, зависит от числа мер и выбора соотношения

их номинальных значений. Далее рассматривается набор мер с отношением номинальных значений 1-2-3-4, применяемый совместно с эталоном, номинальное значение которого соответствует «1». Каждая комбинация конденсаторов поочередно измеряется калибруемым измерителем. Минимальное количество комбинаций, обеспечивающее однозначное вычисление действительных значений емкости мер, равно 8. Комбинации приведены в табл. 1, где «1» означает, что соответствующий конденсатор участвует в данной комбинации, а «0», что не участвует. Конденсаторы декады обозначены как C(1), C(2), C(3) и C(4), а C(1\*) обозначает эталонный конденсатор, который хранит единицу электрической емкости, которая должна быть передана декадным конденсаторам. Число в скобках указывает на «вес» конденсатора в декаде, т. е. номинальные значения конденсаторов C(1) и C(1\*) равны между собой и являются наименьшими в декаде.  $A_i$  обозначает отсчёт (показания) измерителя емкости при измерении комбинации №i.

Комбинации №№ (9–12), а также конденсаторы C(10) и C(20) относятся к следующей по старшинству декаде и указаны в таблице только для того, чтобы наглядно показать, что для старшей декады роль эталонного конденсатора выполняет сумма конденсаторов младшей декады.

ТАБЛИЦА I Минимально необходимое количество комбинаций конденсаторов одной декады, обеспечивающее однозначное решение соответствующей системы уравнений

№ п/п	C(1)	C(2)	C(3)	C(4)	C(1*)	C(10)	C(20)	$A_i$
1	0	0	0	0	1	-	-	$A_1$
2	1	0	0	0	0	-	-	$A_2$
3	1	0	0	0	1	-	-	$A_3$
4	0	1	0	0	0	-	-	$A_4$
5	1	1	0	0	0	-	-	$A_5$
6	0	0	1	0	0	-	-	$A_6$
7	1	0	1	0	0	-	-	$A_7$
8	0	0	0	1	0	-	-	$A_8$
9	1	1	1	1	0	0	0	$A_9$
10	0	0	0	0	0	1	0	$A_{10}$
11	1	1	1	1	0	1	0	$A_{11}$
12	0	0	0	0	0	0	1	$A_{12}$

<sup>a</sup> Примечание. Измерения Short и Open не включены в таблицу, поскольку относятся к процедуре предварительной подготовки измерителя, а не к калибровке конденсаторов декады.

Каждой строке в таблице соответствует соотношение между действительным значением емкости конденсаторов данной комбинации и показаниями измерителя. Так из строки № 1 следует, что действительному значению емкости эталонного конденсатора C(1\*) соответствует отсчет  $\Delta 1$ . Действительное значение эталонного конденсатора известно, поэтому разность  $[C(1*) - A_1]$  выражает поправку к отсчету измерителя. Измерение № 2 выполняется для конденсатора того же номинального значения, поэтому при соблюдении указанных выше условий поправка в этой точке остается неизменной и действительное значение C(1) определяется соотношением

$$C(1) = A_2 + [C(1*) - A_1] \text{ или } C(1) = C(1*) + (A_2 - A_1).$$

Аналогично определяются действительные значения остальных трёх конденсаторов декады:

$$C(2) = 2C(1^*) + (A_4 - A_3) + (A_2 - A_1);$$

$$C(3) = 3C(1^*) + (A_6 - A_5) + (A_4 - A_3) + 2(A_2 - A_1);$$

$$C(4) = 4C(1^*) + (A_8 - A_7) + (A_6 - A_5) + (A_4 - A_3) + 3(A_2 - A_1).$$

Остальные декадные значения емкости (5, 6...9) получают включением соответствующей комбинации четырех конденсаторов C(1), C(4), а их действительные значения – суммированием действительных значений этих конденсаторов.

Сумма значений первой декады C(10) используется в качестве эталона при калибровке конденсаторов второй декады (подобно C(1\*) при калибровке первой декады). Этот процесс может повторяться неоднократно в соответствии с числом декад, подлежащих калибровке. Расчетные соотношения для конденсаторов каждой декады остаются неизменными. В многодекадных устройствах не обязательно выполнять калибровку, начиная с младшей декады, – можно выполнять калибровку только некоторых декад, представляющих интерес в данный момент. Эта возможность может быть реализована при наличии эталонного конденсатора, номинальное значение которого равно единичному значению этой декады.

В общем случае декадная калибровка может быть выполнена при использовании в качестве эталона конденсатора с любым номинальным значением емкости, равным номинальному значению какого-либо из конденсаторов устройства. Как правило, номинальные значения эталонных конденсаторов кратны «10», поэтому калибровку можно выполнять «вверх», считая эталон единицей соответствующей декады, или «вниз», считая его единицей следующей декады (аналогично C(10)), т.е. равной сумме емкостей декады, подлежащей калибровке.

В случае калибровки «вниз» минимально необходимый набор комбинаций приведен в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2  
МИНИМАЛЬНО НЕОБХОДИМОЕ КОЛИЧЕСТВО  
КОМБИНАЦИЙ КОНДЕНСАТОРОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЕ ОДНОЗНАЧНОЕ  
РЕШЕНИЕ СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ПРИ КАЛИБРОВКЕ  
«ВНИЗ»

№ п/п	C(1)	C(2)	C(3)	C(4)	C(10)	ai
3*	1	0	0	1	-	a <sub>1</sub>
4*	0	1	1	0	-	a <sub>2</sub>
5*	1	1	0	0	-	a <sub>3</sub>
6*	0	0	1	0	-	a <sub>4</sub>
7*	1	0	1	0	-	a <sub>5</sub>
8*	0	0	0	1	-	a <sub>6</sub>
9*	1	1	1	1	0	a <sub>7</sub>
10*	0	0	0	0	1	a <sub>10</sub>

Расчетные соотношения при калибровке «вниз» в соответствии с табл. 2 имеют следующий вид:

$$C(1) = 0,1[C(10) + (a_9 - a_{10}) + 4(a_7 - a_8) + 2(a_5 - a_6) + 2(a_3 - a_4)].$$

Соотношения для остальных конденсаторов целесообразно выразить, используя вышеприведенную формулу для C(1):

$$C(2) = 2C(1) + (a_8 - a_7) + (a_4 - a_3);$$

$$C(3) = 3C(1) + (a_8 - a_7) + (a_6 - a_5) + (a_4 - a_3);$$

$$C(4) = 4C(1) + 2(a_8 - a_7) + (a_6 - a_5) + (a_4 - a_3).$$

После завершения декадной калибровки в каждой декаде известны действительные значения четырех конденсаторов, что позволяет вычислить:

- действительные значения всех остальных числовых значений (5...9);
- значение суммы четырех конденсаторов, которую можно использовать в качестве эталона C(10\*) для следующей декады;
- значение поправки к отсчетам измерителя в каждой точке декады как разность между действительным значением соответствующей комбинации конденсаторов и числовым отсчетом (показанием дисплея) измерителя.

Приведенный набор комбинаций не является единственно возможным, – так, например, ранее [10] было принято включать в цикл измерения конденсаторов одной декады в два раза больше измерений (уравновешиваний), чем это предусмотрено табл. 1 и 2. Это осуществлялось за счет введения дополнительных комбинаций, дублирующих рассмотренные выше, но с заменой конденсатора C(1) на C(1\*) при калибровке «вверх». При этом соответственно возрастает число уравнений связи между неизвестными действительными значениями конденсаторов, но число неизвестных остается неизменным. Решение системы уравнений становится неопределенным, поскольку число уравнений превышает число неизвестных.

Для решения этой задачи согласно принципу Лежандра–Гаусса в каждое из уравнений помимо известного отсчета вносят дополнительный неизвестный член – «остаточную неопределенность уравнения», – который отражает «влияние электромагнитных помех на измерение».

Следует отметить, что по своему физическому смыслу этот член отражает неопределенность значения отсчета измерителя, обусловленную совокупностью всех влияющих факторов, в первую очередь, – несовершенства аппаратуры и субъективного фактора оператора, а эти факторы не относятся к случайным, влияние которых может быть снижено статистической обработкой. Скорее их воздействие можно рассматривать как нарушение сформулированных выше условий применения метода.

Согласно принципу Лежандра–Гаусса введение дополнительных членов приводит к решению системы уравнений при наложении дополнительного условия – минимума суммы квадратов остаточных членов каждого из уравнений. В результате получают наиболее вероятные значения емкости конденсаторов декады.

Целесообразность использования метода наименьших квадратов при реализации МДК в современных условиях не является очевидной, поскольку применение этого метода в математической статистике предполагает, что результаты измерений содержат случайные погрешности с нулевым значением, имеющие нормальное распределение [15].

При использовании для компарирования емкостей цифровые измерители это условие не соблюдается, поскольку преобладающее влияние на результат их измерений оказывают факторы систематического характера, а влияние случайных составляющих устраняется выбором числа измерений или алгоритма обработки измерительной информации.

Тем не менее, метод декадной калибровки с использованием максимально возможного числа комбинаций и связанной с ними избыточной информации применяется и в настоящее время [12, 13].

#### IV. АППАРАТУРА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МДК

Экспериментальные исследования МДК выполнены с применением компьютерно-управляемой прецизионной меры емкости ПМЕ-1, принцип действия и конструкция которой в значительной степени соответствуют аналогичным характеристикам разработанной ранее меры емкости РД-1 [14]. Мера содержит 4 декады герметизированных конденсаторов, номинальные значения которых (от 100 пФ до 400 нФ) в пределах каждой декады находятся в соотношении 1-2-3-4. Ёмкостные элементы конденсаторов выполнены на основе многослойных керамических чип-компонентов. Коммутация каждого из 16 конденсаторов осуществляется посредством контактов реле квази-четырёхпарного коммутирующего устройства, обеспечивающего возможность параллельного включения любой комбинации конденсаторов, сохранение минимальных значений остаточной индуктивности (порядка единиц наногенри) и начальной емкости (не более 0,0004 пФ). Общий вид коммутирующего устройства и конденсаторов приведен на рис. 1.

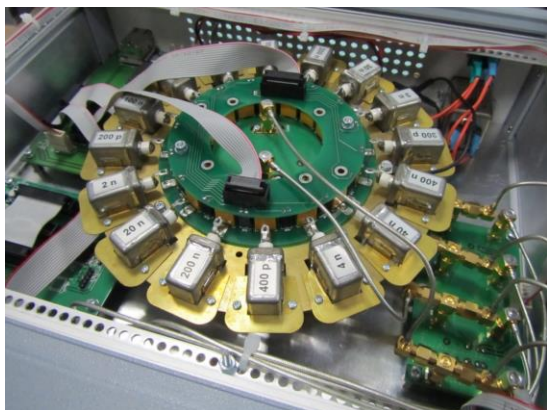


Рис. 1. Общий вид коммутирующего устройства и конденсаторов меры ПМЕ-1

Мера снабжена коаксиальными разъёмами для 4TP соединения с измерителем и включения эталонного конденсатора, кнопками и разъёмом ETHERNET для (соответственно) – ручного или посредством ПК управления коммутацией, а также дисплеем для отображения информации о числе и номинальных значениях включённых конденсаторов.

Помимо меры ПМЕ-1 при проведении экспериментальных исследований использованы цифровой RLC – метр Agilent E4980A, ультра-прецизионный мост для измерения электрической емкости АН2700А, внешние однозначные эталоны емкости 100 пФ, 1; 10 и 100 нФ, а также меры для выполнения настроек (Open) и (Short) из набора мер электрического сопротивления Н2–2. Действительные значения внешних эталонов при частоте 1 кГц прослеживаются к государственному первичному эталону ГЭТ 25.

Помимо меры ПМЕ-1 при проведении экспериментальных исследований использованы цифровой RLC-метр Agilent E4980A, ультра-прецизионный мост для измерения электрической емкости АН2700А, специальные однозначные эталоны емкости с номинальными значениями 100 пФ, 1; 10 и 100 нФ и меры нуля проводимости (Open) и нуля сопротивления (Short) из набора мер электрического сопротивления Н2–2. Действительные значения эталонов при частоте 1 кГц прослеживаются к государственному первичному эталону ГЭТ 25.

Цифровой RLC-метр Agilent E4980A использован в качестве компаратора, а затем в качестве калибруемого измерителя. Мост АН2700А применен только для сопоставления с результатами калибровки RLC-метра.

#### V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе исследований выполнен ряд измерений емкости конденсаторов меры ПМЕ-1 при частотах 1 кГц, 120 Гц, 10 кГц. Последовательность измерений конденсаторов каждой декады соответствует указанной в табл. 1. Продолжительность цикла калибровки каждой декады составляет (5–8) минут.

В табл. 3 приведены полученные результаты – абсолютные ( $\Delta C$ ) и относительные ( $\delta C$ ) значения разности результатов измерений емкости обоими методами при частоте 1 кГц. В последнем столбце для сопоставления указана погрешность моста АН2700А в соответствии с его спецификацией ( $\delta C_{АН}$ ).

ТАБЛИЦА III РАЗНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ЕМКОСТИ ПОСРЕДСТВОМ МДК И МОСТА АН2700А В СОПОСТАВЛЕНИИ С НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ ИЗМЕРЕНИЙ МОСТА

Номинальное значение, пФ	$\Delta C$ , пФ	$\delta C$ , ppm	$\delta C_{АН}$ , ppm
100 пФ	0,0017 пФ	17	5
200 пФ	0,0018 пФ	9	5
300 пФ	0,0055 пФ	18	5
400 пФ	0,0026 пФ	7	5
1 нФ	0,003	3	5
2 нФ	0,004	2	5
3 нФ	0,012	4	
4 нФ	0,032	8	
10 нФ	0,19	19	16
20 нФ	0,32	16	
30 нФ	0,41	14	
40 нФ	0,57	14	
100 нФ	0,4	4	36
200 нФ	4,4	22	
300 нФ	6,6	22	
400 нФ	5,6	14	
1 мкФ	16	16	70

Данные табл. 3 показывают, что точность МДК с использованием RLC – метра имеет тот же порядок

На рис. 2 представлены значения поправок (в пФ) к отсчетам RLC-метра, определенные в процессе калибровки меры ПМЕ-1 при частоте 1 кГц, а также относительная погрешность ( $\times 10^{-6}$ ) его измерений без поправок и с использованием после поправок. Очевидно, что введение поправок повышает точность RLC-метра в 20–100 раз в большей части диапазона измерений.

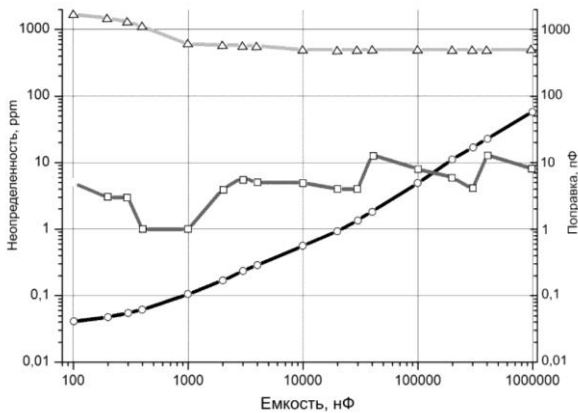


Рис. 2. Неопределенность измерения электрической емкости посредством RLC-метра Agilent E4980A в соответствии с его спецификацией (треугольники); то же, но после введения поправок к отсчетам RLC-метра (квадраты). Поправки, определенные по результатам калибровки меры ПМЕ-1 методом декадной калибровки при частоте 1 кГц (кружки)

Аналогичные результаты получены для измерений при частотах 120 Гц и 10 кГц. Действительные значения емкости 16 конденсаторов меры позволяют рассчитать более 11 тысяч значений емкости меры ПМЕ-1, которые могут быть использованы для калибровки любых измерителей емкости.

## VI. ВЫВОДЫ

Метод декадной калибровки может быть применён как для калибровки измерителей электрической емкости, так и для передачи единицы в широком диапазоне номинальных значений этой величины.

Для реализации метода достаточно наличие одного эталонного конденсатора, набора некалиброванных мер емкости и измерителя емкости (или RLC-метра), обладающего высокой стабильностью показаний и повторяемостью результатов.

Применение поправок к отсчетам измерителя, полученным при его использовании в качестве компаратора, повышает в десятки раз точность измерителя при его работе в режиме прямых измерений.

Метод прост в реализации и может найти применение в метрологической практике (например, в ЦСМ). Реализация МДК посредством мер емкости, встроенных в RLC-метр, превращает RLC-метр в самокалибруемый измеритель.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] GUM Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, document of JCGM 100: 2008, BIPM, 2008.
- [2] Балалаев В.А., Слаев В.А., Синяков А.И. Теория систем воспроизведения единиц и передачи их размеров. Изд. Профессионал, СПб., 2004 г., 159 с.
- [3] Ogawa K. Research of Electrotechnical Laboratories, Tokyo, 1930, №273.
- [4] Giebe und Zickner. Über die Kapazitätennormale der PTR. Zeitschrift für Instrumentenkunde, (53), Н. I – III, 1922, S. 49.
- [5] Zapf G. Engineering and Instrumentation, v.65, №3, 1961.
- [6] Кротков И.Н. Точные измерения электрических емкости и индуктивности, Издательство Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете министров СССР, Москва, 1966, 272 с.
- [7] GENRAD 1621 CAPACITANCE BRIDGE. Operation manual
- [8] AN2700A Ultra-precision Capacitance Bridge 50 Hz–20 kHz. Operation manual/
- [9] E4980A Precision LCR Meter, 20 Hz to 2 MHz. Operation manual
- [10] Кротков И.Н. И Гущина Т.М. Определение параметров рабочих эталонов емкости ВНИИМ методом декадных сличений. «Исследования в области электрических измерений. Труды ВНИИМ», в.п. 39/99, стр. 105–118, 1960.
- [11] Рабинович С.Г. Условия применения метода наименьших квадратов оценивание погрешностей при построении градуировочных характеристик в сб. «Методы обработки результатов наблюдений при измерениях», Труды метрологических институтов СССР, выпуск 242(302), Ленинград, 1978.
- [12] E. Pourdanesh, M. Ortolano, D’Elia and L. Callegaro. Determination of impedance meter nonlinearity with a capacitance build-up method, in Conference on Precision Electromagnetic Measurement’s (CPEM 2016), Ottawa, Ontario, Canada, 10 – 15 July 2016, p.1-2
- [13] N.T. M.Tran, V. D’Elia, L. Callegaro and M. Ortolano, “A Capacitance build-up method to determine LCR meter errors and capacitance transfer”, DOI 10.1109/TIM.2019.2960620
- [14] Heinz Eckardt, Günter Behnke, Werner Bemme, Yuri P. Semyonov, and Oleg A. She Dow. Preci soon Computer – Controlled Decade Capacitor. Transaction IEEE April 1998, pp. 360-364.