

# Переходные меры электрической емкости

Ю. П. Семенов<sup>1</sup>, Е. В. Кривицкая<sup>2</sup>, Г. А. Климов<sup>3</sup>, А. О. Обухова<sup>4</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, <sup>4</sup>A.O.Obukhova@vniim.ru

**Аннотация.** Современные цифровые средства измерения (СИ) импеданса позволяют проводить измерения в широком диапазоне номинальных значений электрической емкости и частоты. Обладая большой разрешающей способностью и стабильностью показаний, представления информации и ее вывода в различной форме, эти приборы незаменимы в метрологической практике в качестве компараторов.

Проверка (калибровка) этих приборов в диапазоне номинальных значений более 10 нФ может быть осуществлена только с использованием рабочих эталонов на основе СИ, изготовленных более 35 лет назад.

Разработаны макеты мер электрической емкости на основе применения принципа последовательно – параллельного соединения конденсаторов с номинальными значениями от 10 нФ до 1 мФ, которые могут применяться для проверки цифровых измерителей импеданса, но также позволяют осуществлять ступенчатую передачу единицы в области больших номинальных значений с применением тех же измерителей в качестве компараторов. Экспериментальные исследования макетов при частотах от 50 Гц до 20 кГц позволили установить их метрологические характеристики, а также показали возможность их применения для повышения в несколько раз точности цифровых измерителей.

**Ключевые слова:** электрическая емкость, импеданс, проверка, калибровка

## I. ВВЕДЕНИЕ

Измерения электрической емкости востребованы в широком диапазоне номинальных значений (от 10<sup>-15</sup> до 1 Ф) и частот (от 0 до 100 МГц). В эксплуатации в РФ находится десятки тысяч современных цифровых измерителей RLC, анализаторов и калибраторов параметров цепей (Keysight (Agilent) Technologies, Wayne Kerr, Hioki, Fluke, Zürich, АК ИП, Гириконд и др.), которые пришли на смену ранее применявшимся средствам измерений, производство которых прекращено (мосты и меры «Точэлектронприбор», «Позитрон»).

Некоторые из этих устройств применяются в метрологической практике в качестве компараторов вследствие большой разрешающей способности, стабильности и широкому диапазону номинальных значений.

В диапазоне номинальных значений 1 мФ и более для проверки и калибровки современных измерителей могут быть применены средства измерений (СИ) электрической емкости из весьма ограниченного перечня, причем эти СИ разработаны и выпускались (часть из них – малыми партиями) в период до конца

90-х годов прошлого века, а их применение ограничено их малочисленностью.

В настоящее время наивысшая точность передачи единицы электрической емкости (относительная погрешность 0,0005 % – 0,001 %) достигается в диапазоне от 1 пФ до 1000 пФ применением ультрапрецизионного моста АН2700А (Andeen Hagerling, США), верхний предел измерения которого составляет 1,6 мФ. Метрологические характеристики моста АН2700А при измерении емкости 10 нФ и более приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА I.

Емкость	Относительная погрешность моста АН2700А при измерении электрической емкости в диапазоне 10 нФ – 1 мФ при частотах, %				
	50 Гц	200 Гц	1 кГц	5 кГц	10 кГц
10 нФ	0,011	0,0030	0,015	0,0035	0,006
100 нФ	0,031	0,0090	0,0035	0,0110	0,02
1 мФ	0,06	0,016	0,007	0,03	0,14

Для передачи единицы при номинальных значениях более 10 нФ может быть применен цифровой LRC-метр E4980A (Keysight Technologies, Малайзия), базовая погрешность которого составляет 0,05 %. Относительная погрешность LRC-метра E4980A при измерении емкости в диапазоне 10 нФ – 100 мФ приведена в табл. 2 для тех же значений частоты, которые приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА II.

Емкость	Относительная погрешность LRC-метра E4980A при измерении электрической емкости в диапазоне 10 нФ – 100 мФ при частотах, %				
	50 Гц	200 Гц	1 кГц	5 кГц	10 кГц
10 нФ	0,14	0,06	0,05	0,05	0,05
100 нФ	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05
1 мкФ	0,10	0,05	0,05	0,05	0,06
10 мкФ	0,10	0,05	0,06	0,09	0,12
100 мкФ	0,11	0,08	0,16	0,23	0,48
1 мФ	0,24	0,21	0,65	1,87	3,46
10 мФ	0,89	1,68	5,18	18,2	33,2
100 мФ	7,1	16,3	50,4	182	331

*Примечание.* Значения погрешности указаны в соответствии с расчетом по формулам, приведенным в спецификации прибора для случая непосредственного включения измеряемого объекта к входным разъемам прибора

На практике в большинстве случаев измеряемый объект присоединяется не непосредственно к входным разъемам прибора, а посредством соединительных кабелей длиной 1 м (иногда 2 м или 4 м). Влияние кабелей на результат измерения снижается предварительной калибровкой SOL (короткое замыкание – открытый

вход – нагрузка), но расчетное значение погрешности, тем не менее, возрастает по сравнению с приведенными в табл. 2. Следует отметить, что большая разрешающая способность (6 знаков) и стабильность показаний позволяют применять LRC-метр E4980A в качестве компаратора.

Данные табл. 1 и 2 показывают, что в диапазоне (1–10) мкФ и выше точность прямых измерений недостаточна для передачи единицы в диапазоны свыше 10 мкФ без потери точности, а также для поверки и калибровки ряда мер (например, M1000, M10000 и GR1417).

В какой-то мере этот пробел мог бы быть частично закрыт применением мер типа ПМЕ-1, которые обеспечивают автоматическое суммирование емкости в пределах 100 пФ – 1,111 мкФ с погрешностью (0,001–0,05) % (в зависимости от номинального значения) [1], но они изготовлены лишь в нескольких экземплярах.

Ниже рассматриваются результаты выполненных в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» исследований по разработке СИ для передачи единицы электрической емкости и поверки (калибровки) современных измерителей импеданса в диапазоне номинальных значений 10 нФ – 100 мФ.

## II. ПЕРЕХОДНЫЕ МЕРЫ ЕМКОСТИ

Для передачи единицы электрического сопротивления на постоянном токе с высокой точностью применяются переходные меры сопротивления, принцип действия которых основан на сопоставлении значений сопротивления «m» резисторов равного номинального значения при двух схемах их соединения – последовательном  $R_S$  и параллельном  $R_P$  [2], [3]. При соблюдении условий для исключения влияния ряда источников погрешности (от самонагрева измерительным током, от контактных сопротивлений, от перетекания тока в потенциальную цепь и т. п.) отношение  $R_S/R_P = m^2 \cdot (1 + \delta^2)$ , где  $\delta$  – среднее относительное отклонение действительного значения сопротивления резисторов от номинального значения. Например, при применении резисторов, сопротивление которых измерено с погрешностью 0,1 % (или значение сопротивления отклоняется от номинального на 0,1 %) отношение  $R_S/R_P$  будет известно с относительной погрешностью 0,0001 %.

Известно, что этот же принцип последовательно-параллельного соединения (ППС) может быть применен для передачи единицы электрической емкости (впервые эта идея была высказана к.т.н. А.М. Теплинским в 70-х годах прошлого века, но так и не была реализована) [4].

Применение этого принципа для построения переходных мер электрической емкости (назовем их так по аналогии с переходными мерами электрического сопротивления) требует уточнения требований как к отдельным конденсаторам, так и к способу их коммутации и к конструкции меры, поскольку, в отличие от измерения сопротивления на постоянном токе:

1. конденсатор на переменном токе характеризуется двумя основными параметрами – емкостью и углом потерь;

2. существуют ёмкостные связи между конденсаторами;
3. неизбежна магнитная связь между токами в различных проводниках меры;
4. необходимо учитывать емкость разомкнутых контактов при последовательном соединении.

Влияние каждого из этих факторов на коэффициент передачи меры (отношение CP/CS) различно в зависимости от номинального значения конденсаторов и частоты. Например, влияние емкостных связей повышается по мере снижения емкости конденсаторов переходной меры.

Далее приведены результаты исследования точности переходных мер емкости, которые включают:

1. оценку погрешности, обусловленной большим значением угла потерь конденсаторов;
2. разработку макетов переходных мер и выбор схемы коммутации конденсаторов;
3. экспериментальное исследование макетов мер в диапазоне номинальных значений от 10 нФ до 10 мФ;
4. разработку алгоритма передачи единицы посредством переходных мер и цифровых компараторов.

## III. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗ-ЗА ВЛИЯНИЯ УГЛА ПОТЕРЬ КОНДЕНСАТОРОВ

В диапазоне 0,1 мФ – 10 мФ для построения мер применяются конденсаторы с большим значением угла потерь ( $\text{tg } \delta = 0,05$  при частоте 100 Гц), поэтому проведена оценка влияния значения  $\text{tg } \delta$  конденсаторов на поправочный член при использовании принципа ППС.

Показано, что емкости цепей из «m» конденсаторов, соединенных параллельно (CP) и последовательно (CS), равны соответственно:

$$C_P = m \cdot C_0;$$

$$C_S = (C_0/m) \cdot (1 + \beta),$$

где  $C_0 = \sum C_i/m$  – среднее значение емкости конденсаторов меры;  $\text{tg } \delta_0 = (\sum \text{tg } \delta_i)/m$  – среднее значение тангенса угла потерь ( $\text{tg } \delta_i$ ) конденсаторов меры,

$$C_P = \frac{C}{m} \cdot (1 + \beta)$$

$$\text{tg } \delta_P = \text{tg } \delta \cdot (1 + \gamma)$$

где

$$\beta = \left( -\frac{\sum_{i=1}^m \Delta_i^2}{m} \right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sum \Delta_i^2}{m}} + \frac{\sum \Delta_i^3}{m} \cdot \left( 1 - \frac{\sum \Delta_i^3}{m} \right) - \frac{2}{m^2} \cdot (\sum \Delta_i^2) \cdot (\sum \Delta_i^3) + \frac{\text{tg } \delta}{m} \times$$

$$\times \left[ \sum \alpha_i^2 - 6 \sum \Delta_i^2 - \frac{2}{m} \cdot (\sum \Delta_i^2) \cdot (\sum \alpha_i^2) - 2 \text{tg } \delta \sum (\Delta_i \alpha_i) \right]$$

$$\gamma = \frac{\sum \Delta_i^2}{m} + \frac{2}{m} \sum \Delta_i^3 - \frac{6}{m^2} (\sum \Delta_i^2)^2 -$$

$$- \frac{2}{m} \sum (\Delta_i \alpha_i) + \frac{3}{m} \sum (\Delta_i^2 \alpha_i) - \frac{4}{m^2} (\sum \Delta_i^2) \sum (\Delta_i \alpha_i) - \frac{2}{m} \text{tg} \delta \sum \alpha_i^2$$

тогда  $C_p/C_s = m^2/(1 + \beta)$ .

#### IV. СХЕМА КОММУТАЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ И КОНСТРУКЦИЯ МАКЕТОВ

Схема коммутации должна обеспечивать минимальное влияние контактных сопротивлений, ёмкостных и индуктивных связей на точность переходных мер при измерении параллельного и последовательного соединения конденсаторов, а также возможность измерения каждого из конденсаторов меры.

Особенностями разработанной схемы коммутации, представленной на рис. 2, являются:

- параллельное соединение посредством контактных соединений между каждым узлом последовательной цепи и одной из шин;
- конструкция шин (диск или пластина) обеспечивает минимальное значение собственной индуктивности и сопротивления;
- каждый конденсатор может быть соединен с шинами индивидуально, что позволяет измерить начальную емкость;
- коммутация осуществляется контактными парами радиотехнических разъемов;
- включение меры в измерительную цепь осуществляется по четырехпарной (4ТР) схеме и не изменяется при коммутации конденсаторов.

В макетах применены два типа контактных пар – «гнездо – вилка» из разъемов типа ШР и высокочастотные разъемы BNC «f» совместно с короткозамкнутыми разъемами BNC «m». Контактное сопротивление таких пар находится в пределах (3–8) мОм, что в худшем случае может увеличить измеренные значение  $\text{tg} \delta$  конденсатора 1 мФ на 0,003 или 0,006 при частотах 50 или 100 Гц соответственно. Упрощенная схема параллельного включения конденсаторов представлена на рис. 1.

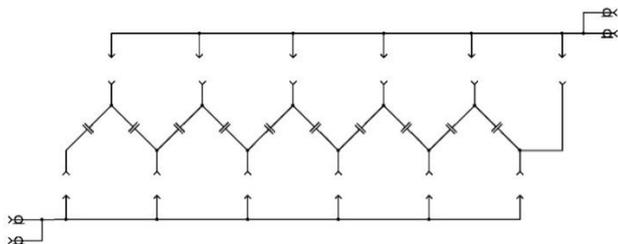


Рис. 1. Схема параллельного включения конденсаторов

Эта схема отличается от первоначального варианта, который не обеспечивал возможность включения в измерительную цепь отдельных конденсаторов, а также

изменял напряжение на конденсаторах за счет падения напряжения на последовательно соединенных контактных сопротивлениях при параллельной схеме включения меры.

Для исследования возможности применения принципа ППС на различных этапах передачи единицы электрической емкости и оценки практически достижимой точности разработаны 4 макета мер с десятью конденсаторами каждая с номинальными значениями 0,1 мкФ, 1 мкФ, 10 мкФ и 1 мФ.

Конденсаторы 1 мФ – электролитические (танталовые), остальные – сборки из керамических чип-компонентов с температурными характеристиками NPO.

На рис. 2 представлен общий вид трех макетов (макет меры 10×0,1 мкФ не представлен, поскольку его вид полностью аналогичен изображенному на фото макету 10×1 мкФ). На рисунке 3 меры 10×1 мкФ и 10×10 мкФ представлены в сопоставлении с магазином емкости P5025, старшие декады которого они заменяют.

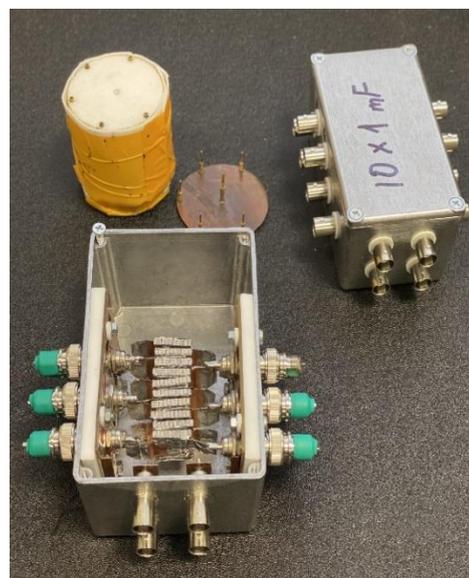


Рис. 2. Общий вид макетов переходных мер 10×1 мкФ, 10×10 мкФ, 10×1 мФ



Рис. 3. Общий вид макетов переходных мер 10×1 мкФ, 10×10 мкФ на фоне магазина емкости P5025

## V. ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТОВ МЕР

Экспериментальные исследования макетов мер выполнены с применением моста АН2700А (Andeen Hagerling), LRC-метров Е4980А (Keysight) и 3533-01 (Hioki).

Результаты исследований показали, что емкость  $C_p$  каждой меры при частоте «f» может быть рассчитана как  $C_p = m^2 \cdot C_s \cdot (1 + \gamma) / (1 + \beta)$ , где  $\gamma = (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot L_p$  – частотная поправка, вызванная индуктивностью  $L_p$  токоведущих путей меры. Эффективные значения  $L_p$  приведены в табл. 3 наряду с расчетными значениями поправок « $\beta$ » и другими характеристиками мер.

ТАБЛИЦА III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МАКЕТОВ МЕР

Характеристика	Макет 10×0,1 мкФ	Макет 10×1 мкФ	Макет 10×10 мкФ	Макет 10×1 мФ
Номинальная емкость конденсаторов	0,1 мкФ	1 мкФ	10 мкФ	1 мФ
Среднее значение емкости $C_0$	100,428 нФ	0,999685 мкФ	10,0055 мкФ	1,0527 мФ (51 Гц)
Отклонение емкости от среднего значения $C_0$ , %	< 0,5	0,04	0,3	2,5
Расчетная поправка $\beta$	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0011
Частотная поправка $\gamma$	< 0,001	< 0,001	< 0,002 (50 Гц)	*
Индуктивность $L_p$ , мкГн	-	0,134	0,038	*
Тангенс угла потерь при последовательном соединении	0,00009	0,0008	0,00010 (50 Гц) 0,00019	0,049
Тангенс угла потерь при параллельном соединении	0,00006	0,0007	0,00017 (50 Гц) 0,00142	0,049 (50 Гц)
Емкость $C_s$	10,0428 нФ	99,972 нФ	1,00049 мкФ	104,73 мкФ
Диапазон частот, кГц	0,05 - 20	0,05 - 15	0,05 - 10	0,02 – 0,12
Размеры, мм	60×60×80	60×60×80	130×135×55	130×135×55

### Примечания.

- 1) Характеристики указаны при частоте 1 кГц, если в скобках не указано иное значение частоты;
- 2) Характеристика не установлена, поскольку частотные характеристики меры определяются свойствами конденсатора.

В мере 10×1 мкФ применены танталовые электролитические конденсаторы с номинальным значением 330 мкФ, соединенные параллельно по три для получения номинального значения 1 мФ.

Электролитические конденсаторы предназначены для работы в цепях постоянного напряжения с такой составляющей переменного напряжения, амплитуда которой не превышает постоянную составляющую, так что приложенное напряжение не должно изменять полярность. В данном применении это правило вынужденно нарушается, но измерительное напряжение ограничивается значением 10 мВ (среднеквадратическое значение).

Емкость и угол потерь танталовых конденсаторов зависят от частоты. Например, при частотах 20 Гц, 50 Гц и 100 Гц измеренные значения конденсатора характеризуются значениями емкости 1,0657 мФ, 1,0473 мФ и 1,0346 мФ соответственно, т.е. при изменении частоты на 50 Гц (от 50 Гц до 100 Гц) емкость изменяется на 1,3 % или более. Значения тангенса угла потерь возрастают с частотой, составляя для приведенного выше примера значения 0,032; 0,034 и 0,040 соответственно. Это означает, что применение переходных мер на основе электролитических конденсаторов требует контроля режима работы – напряжения, частоты, температуры. Даже при соблюдении всех условий, нестабильность емкости может достигать значений (0,4–0,5) %, что затрудняет их

использование при точных измерениях. Применение принципа ППС снижает погрешность, обусловленную нестабильностью конденсаторов, поскольку единица электрической емкости сохраняется группой из десяти конденсаторов, а не индивидуальным значением одного из них.

Результаты исследований подтвердили возможность применения переходных мер для повышения точности измерений электрической емкости в диапазоне 0,01 мкФ – 10 мФ.

«Алгоритм» передачи единицы «вверх» по диапазону номинальных значений сводится к выполнению следующих действий с использованием приведенных выше формул:

1. измерить емкость ПМ при последовательной схеме включения  $C_s$ ;
2. измерить разность значений емкости  $\Delta C_i$  между каждым из конденсаторов и конденсатором «1»;
3. рассчитать значение средней емкости конденсатора  $C_0$ ;
4. рассчитать значение емкости ПМ при параллельном включении  $C_p$ ;
5. рассчитать значение емкости каждого конденсатора  $C_i$ .

## VI. Выводы

Применение переходных мер электрической емкости обеспечивает следующие преимущества:

1. От единственного исходного эталона можно расширить диапазон измерений (осуществлять передачу единицы) электрической емкости на две декады (в 100 раз), при этом в ближайшей к эталону декаде будут определены значения во всех ее десяти точках.
2. Для реализации процедуры передачи необходимо применение одного прибора, выполняющего функцию компаратора, требованиями к которому являются только линейность, повторяемость и разрешающая способность (но не точность), например, – цифровой RLC-метр.
3. Применяемый прибор (цифровой RLC – метр) в процессе передачи единицы оказывается аттестованным при указанных выше значениях и в дальнейшем может применяться для измерений методом прямых отсчетов для измерения емкости (при условии достаточной долговременной стабильности показаний).
4. Переходная мера хранит единицу в двух точках шкалы («1» и «100») посредством групповых эталонов, включающих в себя 10 равнономинальных мер, что обеспечивает соответствующее повышение точности и надежности результата (по сравнению с однозначными мерами).
5. В диапазоне 10 нФ – 100 мкФ переходные меры могут обеспечивать повышение в 3–5 раз точности приборов, применяемых в качестве компараторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Семенов Ю.П., Кривицкая Е.В. и Климов Г.А. Декадная калибровка эталонов электрической емкости // СПБНТОРЭС: ТРУДЫ ежегодной НТК, № 1 (75), 2020, с. 253-257.
- [2] BV Hamon, A 1:100 build-up resistor for calibration of standard resistors // J. Instrum., vol. 31, pp. 450–453.
- [3] JC Riley, The accuracy of series and parallel connections of four terminal resistors // IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-16 no. 3, pp. 258–268, 1967.
- [4] A Guide to measuring resistance and impedance below 1 MHz, NPL, The Institute of Measurement and Control, 87 Gower Street, London. WC1E 6AA Published 1997