

# Точные измерения емкости эталонных конденсаторов 10 – 1000 пФ и их частотных характеристик

Ю. П. Семенов<sup>1</sup>, Е. В. Кривицкая<sup>2</sup>,  
Г. А. Климов<sup>3</sup>, А. О. Фокина<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.Fokina@vniim.ru

**Аннотация.** Действительные значения электрической емкости двух конденсаторов 1000 пФ экспериментально устанавливаются в процессе измерений посредством квадратурного моста при частоте 1591,5... кГц. Значения этих конденсаторов представляют единицу электрической емкости, воспроизведенную при указанной частоте на основе значений физических констант и частоты. Рассмотрен метод определения частотных характеристик этих конденсаторов с использованием концепции «чёрного ящика», и измерения его  $S$  – параметров. Разработан метод аттестации трансформаторного моста, применяемого для передачи единицы групповому эталону 10 пФ, который осуществляет хранение единицы при частоте 1 кГц.

**Ключевые слова:** передача единицы, единица электрической емкости, трансформаторный мост,  $S$ -параметры

## I. ВВЕДЕНИЕ

Единица электрической емкости (Фарад) в результате переопределения системы SI выводится из значений фундаментальных констант (заряда электрона и постоянной Планка) и единицы частоты (Герц).

Воспроизведение единицы осуществляется в процессе экспериментального сравнения импеданса конденсатора и сопротивления резистора в цепи квадратурного моста при фиксированном значении частоты. Наиболее точное значение сопротивления резистора может быть получено экспериментальным сравнением с квантовым сопротивлением Холла (КСХ) на постоянном токе, значение которого установлено в связи со значениями упомянутых выше физических констант [1], [2], [3].

Физическая реализация перечисленных процессов является основным содержанием работ по совершенствованию Государственного первичного эталона единицы электрической емкости ГЭТ 25-79, осуществляемых в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Далее рассматриваются некоторые этапы этих работ, связанные с разработкой мер емкости и точным измерением их емкости. К их числу относятся:

1. создание и характеристика эталонов 1000 пФ квадратурного моста;
2. разработка методов и средств для определения частотной поправки эталонов 1000 пФ;
3. создание средств измерений для передачи единицы в пределах 1000 пФ – 10 пФ;
4. аттестация отношения трансформаторного моста.

Действительные значения электрической емкости двух конденсаторов 1000 пФ экспериментально устанавливаются в процессе измерений в цепи квадратурного моста при частоте 1591,5... кГц.

Эти значения представляют единицу электрической емкости, воспроизведенную на основе значений физических констант и частоты в текущий момент, но не могут обеспечить хранение единицы, поскольку долговременная стабильность эталонов 1000 пФ на один-два порядка ниже точности воспроизведения и хранения единицы (относительная неопределенность лучших результатов воспроизведения единицы емкости составляет  $(0,2-2) \cdot 10^{-8}$ ). Хранение воспроизведенной единицы осуществляется эталонами другого номинального значения – 10 пФ и при другой частоте – 1 кГц. Выбор номинального значения емкости 10 пФ обусловлен возможностью применения конденсаторов монолитной структуры на основе кварцевого стекла. Стабильность электрической емкости монолитной структуры зависит от:

1. стабильности формы и геометрических размеров системы электродов, нанесённых на поверхность кварцевого субстрата;
2. диэлектрических характеристик материала субстрата.

Ряд технических и технологических особенностей создания монолитных структур ограничивает диапазон практической реализации номинальными значениями емкости 10 и 100 пФ. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости устраняется точностью поддержания температуры монолитной структуры – порядка 0,001 К, что позволяет сохранить неизменным значение электрической емкости в пределах  $(1-2) \cdot 10^{-8}$ .

Никакая другая конструкция конденсаторов не может обеспечить столь высокую долговременную стабильность, в том числе и конденсаторы 1000 пФ квадратурного моста. Выбор частоты 1 кГц, при которой осуществляется хранение национальной единицы электрической емкости РФ, закреплён законодательно и объясняется лишь исторической традицией.

## II. КОНДЕНСАТОРЫ КВАДРАТУРНОГО МОСТА

Конденсаторы квадратурного моста должны удовлетворять ряду требований: стабильность емкости порядка  $(1-2) \cdot 10^{-8}$  за 10–15 дней, тангенс угла потерь не более  $20 \cdot 10^{-6}$ , относительное отклонение емкости от номинального значения при частотах 1–2 кГц не более  $20 \cdot 10^{-6}$ .

На начальном этапе работ были проведены исследования по созданию газонаполненных систем цилиндрических электродов из титановых сплавов, результаты которых показали невозможность уложиться в заданный временной интервал работ по совершенствованию ГЭТ 25. В ходе дальнейших работ разработаны макеты конденсаторов с керамическим и с газообразным диэлектриком. Герметизированные емкостные элементы керамических конденсаторов созданы на основе сборки из монолитных многослойных чип-конденсаторов температурной группы NPO (МПО) с применением схем компенсации их частотной и температурной зависимости.

Емкостные элементы газонаполненных конденсаторов получены отбором из ряда экземпляров мер емкости модели GR1404A (General Radio) [4]. Конденсаторы этой модели применяются во многих метрологических институтах мира, и некоторые экземпляры демонстрируют достаточную стабильность вследствие длительного процесса естественного старения.

Сопоставление характеристик макетов конденсаторов 1000 пФ с керамическим и воздушным диэлектриком приведено в таблице.

ТАБЛИЦА 1

Характеристика	Конденсатор с керамическим диэлектриком №2	Конденсатор с воздушным диэлектриком (азот), GR1404A, №3
Действительное значение емкости при частоте 1,6 кГц и температуре 20 °С, пФ	999,9992	999,973
Относительное изменение емкости при изменении частоты от 1 кГц до 1,6 кГц	$-5,5 \cdot 10^{-6}$	$\pm 1 \cdot 10^{-7}$
ТКЕ в диапазоне температуры (19 – 25) °С, К <sup>-1</sup>	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$
Тангенс угла потерь при частоте 1,6 кГц	$11 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$

Результаты исследования показывают, что для применения в качестве конденсаторов квадратурного моста преимуществами воздушных конденсаторов являются малая частотная зависимость (в 40 раз меньше, чем у керамических) и малый фазовый сдвига (в 30 раз меньше), а преимуществами керамических конденсаторов – меньшая зависимость от температур (вблизи 20 °С), а также малые размеры и масса (в 12–15 меньше воздушных), что позволяет упростить конструкцию блока конденсаторов квадратурного моста и снизить градиент температуры в его объеме. Следует также отметить зависимость емкости воздушных конденсаторов от пространственной ориентации, – при наклоне конденсатора от вертикали изменение емкости может достигать 10 ppm, но эти изменения являются обратимыми, то есть быстро уменьшаются при восстановлении положения. У керамических конденсаторов зависимость от пространственного положения не обнаружена. Керамические конденсаторы отличаются большей чувствительностью к колебаниям температуры, что является следствием их малой массы и теплоемкости, а также применением внутренней термокомпенсации. По своим характеристикам керамические конденсаторы ВНИИМ превосходят зарубежные аналоги, применяемые в некоторых НМИ.

Исследования обоих типов конденсаторов 1000 пФ будет продолжено, до выявления практических преимуществ того или иного типа по результатам работы в цепи квадратурного моста.

### III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ПОПРАВОК КОНДЕНСАТОРОВ 1000 пФ

Экспериментальное определение зависимости емкости конденсаторов 1000 пФ от частоты необходимо для введения поправки к значению ёмкости, измеренному в цепи квадратурного моста при частоте 1,592 кГц, для передачи единицы эталонам 10 и 100 пФ при частоте 1 кГц в соответствии с требованиями государственной поверочной схемы.

Измерения частотной зависимости осуществляется методом замещения опорным конденсатором с использованием ультрапрецизионного цифрового моста АН2700А «Option E» в качестве компаратора. Опорным является воздушный конденсатор Agilent 16384А, предназначенный для поверки СИ в диапазоне частот до 10 (20) МГц.

Согласно результатам исследований в зарубежных НМИ [5], [6] значение емкости конденсаторов этой модели при любой частоте может быть рассчитано на основании значения емкости, измеренного при частоте 1 кГц, и значений S-параметров, определенных с применением векторных анализаторов импеданса (VNA) в диапазоне частот до 500 МГц. Этот конденсатор с четырехпарным (4TP) включением можно рассматривать как «чёрный ящик», – многополюсник, характеристики которого в широком диапазоне частот описываются волновой матрицей рассеяния, – матрицей S – параметров. Измерения компонент  $s_{ij}$  этой матрицы осуществляется с большой чувствительностью. Конструкция конденсатора Agilent 16384А и примененные в ней материалы позволяют рассматривать его как линейный многополюсник, для расчёта импеданса которого достаточно измерение восьми компонент матрицы. Результаты измерений показывают, что упрощенная эквивалентная схема этого конденсатора может быть представлена как последовательное соединение индуктивности вводов (порядка 7 нГн) и емкости (1000 пФ с поправкой на «побочные» емкости, измеренные при 1 кГц), обуславливая последовательный резонанс в диапазоне частот (61–63) МГц. Результаты измерений ВНИИМ показали, что резонансная частота равна 61,6 МГц, а расчетное значение поправки при частоте 10 МГц составляет 2,68 %. Это означает, что при изменении частоты от 1 кГц до 1,6 кГц относительное изменение емкости составит  $1,6 \cdot 10^{-10}$ , т.е. ёмкость опорного конденсатора практически остаётся неизменной. Измерения емкости воздушного конденсатора методом замещения при частоте 1,6 кГц не выявило изменения емкости на фоне флуктуаций, примерно  $\pm (3-5) \cdot 10^{-8}$ . Основным источником неопределенности при выполнении измерений является нестабильность емкости опорного конденсатора (зависимость от температуры, влажности, вибрации измерительных кабелей).

В диапазоне частот от 1000 Гц до 2000 Гц относительное изменение емкости ёмкостного элемента GR 1404A s/n 387 не выходит за пределы  $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ , что удовлетворяет требованиям к конденсаторам квадратурного моста.

#### IV. ЁМКОСТНЫЕ МОСТЫ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ В ПРЕДЕЛАХ 1000 пФ – 10 пФ

Большинство измерений в процессе передачи единицы выполняются посредством цифрового ультрапрецизионного мост AN2700A «Option E» в качестве компаратора. Этот мост, базовая погрешность которого равна 3 ppm, предоставляет возможность определения и корректировки ряда составляющих неопределенности измерений и введения поправок.

Поправки при переходе диапазонов 10:1 достигают 1,5 ppm при частотах 1–1,6 кГц. Определение поправок осуществляется сравнением результатов с трансформаторным мостом, отношение 10:1 которого устанавливается с неопределенностью  $(1-2) \cdot 10^{-8}$  посредством его аттестации.

Наиболее универсальным и точным является трансформаторный мост, трансформатор отношения (ТО) которого отличается предельно малыми значениями продольных остаточных параметров вторичной обмотки, что достигается за счёт усложнения конструкции вторичной обмотки ТО.

ТО выполнен по схеме трехобмоточного трансформатора с первичной обмоткой возбуждения и вторичной секционированной делительной обмоткой. Вторичная обмотка содержит 20 секций с общей точкой в центре, так что при включении в схему ёмкостного моста могут быть образованы два плеча «-10» и «10» с отводами от секций «1», «2» и «4» в каждом плече. Такая схема позволяет измерять эталонные конденсаторы с равными номинальными значениями при различных уровнях напряжения – номинальном (100 В), 10 %, 20 % и 40 % от номинального без изменения рабочей точки на кривой намагничивания материала магнитопровода, а также осуществлять 4 варианта передачи единицы электрической емкости отношении 10:1 – в различных плечах 10: (-1); (-10):1 или в одном плече (1: 10) и (-1): (-10).

Первичная и вторичная обмотки разделены двумя изолированными друг от друга медными экранами, внутренний из которых соединён с первичной обмоткой, а вывод второго соединён с центральной точкой вторичной обмотки. Такое соединение экранов полностью изолирует измерительный контур вторичной обмотки от контура первичной обмотки, обеспечивая только электромагнитную связь между контурами посредством магнитного потока в магнитопроводе.

Магнитопровод тороидальной формы (площадь поперечного сечения составляет 6,84 см<sup>2</sup>) изготовлен из ленты толщиной 0,05 мм из сплава 79НМ (пермаллой), типичное значение магнитной проницаемости которого при частотах 1–2 кГц составляет 80000, а индукция технического насыщения – не менее 0,73 Тл.

Первичная обмотка выполнена изолированным медным проводом прямоугольного сечения 2,4×0,5 мм, нанесённым на магнитопровод таким образом, чтобы на внутренней поверхности магнитопровода соседние витки были уложены вплотную, что способствует повышению равномерности магнитного поля. Первичная обмотка из 81 витков содержит «обратный виток», что обеспечивает ее астатичность.

Минимальное значение остаточных параметров вторичной обмотки достигается посредством применения для создания ее витков из медных пластин

вместо проводов. Это техническое решение впервые было применено в NBS (ныне NIST) и подтвердило свою эффективность [7].

Каждый виток вторичной обмотки состоит из двух деталей, вырезанных из медного листа толщиной 0,4 мм, одна – плоская С-образной формы – образует три стороны витка, вторая – пространственно изогнутая S-образная – образует четвертую сторону, которая соединяется с С-образной деталью следующего витка как это показано на рис. 1.

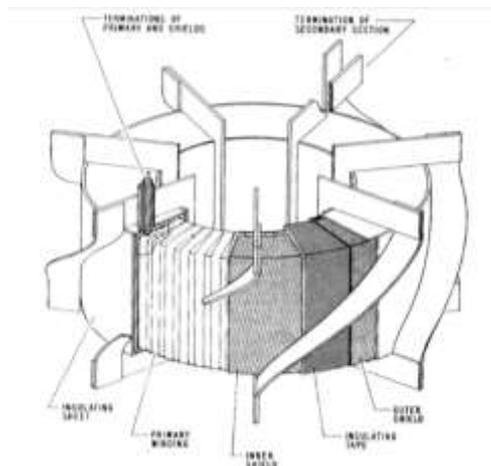


Рис. 1. Конструкция ТО (показано распределение по периметру витков одной секции из 7 витков)

Вторичная обмотка (рис. 2) состоит из 20 секций по 7 витков каждая, и витки каждой секции распределены равномерно по всей окружности магнитопровода, так что вторичная обмотка в целом совершает 20 обходов по периметру.

Результаты измерений остаточных параметров ТО при частоте 1 кГц (1,6 кГц) показывают, что индуктивность рассеяния ( $L_s$ ) и сопротивление ( $R_s$ ) вторичной обмотки (70 витков) равны соответственно 0,67 мкГн и 30,8 мОм, те же параметры одной секции вторичной обмотки (7 витков) равны соответственно 0,29 мкГн и 3,90 мОм. Эти значения в десятки раз меньше аналогичных параметров конвенциональных ТО, обмотки которых выполнены проводом.

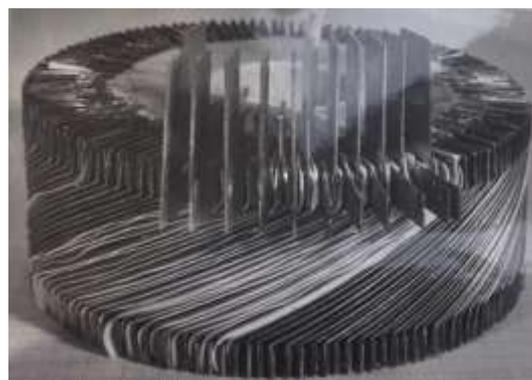


Рис. 2. Вторичная обмотка ТО

#### V. АТТЕСТАЦИЯ ОТНОШЕНИЯ 10:1 ТРАНСФОРМАТОРНОГО МОСТА

Известен метод аттестации отношения, основанный на перестановке однотипных конденсаторов в цепи ёмкостного моста, который включает в свой состав аттестуемый ТО в качестве плеч отношения [8], [9], – метод «циклической перестановки» (n+1) конденсаторов

при аттестации отношения  $n:1$ . Большим преимуществом этого метода является отсутствие необходимости знания действительных значений конденсатора, необходима лишь стабильность емкости в процессе перестановки. Применение этого метода для аттестации ТО 10:1 требует использования 11 стабильных однотипных конденсаторов, ёмкость каждого из которых остается неизменной при изменении напряжения на его выводах в 10 раз в процессе перестановки. Наилучшим выбором могли бы быть конденсаторы АН11А, но их стоимость ограничивает возможность их применения в таких количествах. Поэтому предложена модификация метода перестановки, основанная на разделении «цикла перестановки»  $(n+1)$  конденсаторов на несколько последовательных подциклов, в каждом из которых осуществляется циклическая перестановка меньшего количества конденсаторов, а затем их суперпозиция. Для реализации этого процесса необходима симметрия обмотки отношения относительно точки «нулевого потенциала», и возможность выделения соответствующих частей обмотки отношения с выводами для подключения конденсаторов. При аттестации отношения 10:1 самым экономичным является метод аттестации симметричной обмотки отношения из 20 секций, снабженной выводами 0;  $\pm 1$ ;  $\pm 2$ ;  $\pm 4$  и  $\pm 10$ . Для аттестации каждого из четырёх отношений  $|10:1|$  такого ТО необходимо только 4 конденсатора. Например, для аттестации отношения  $(-1):10$  необходимы 4 подцикла – (i)  $(-1):2$ ; (ii)  $2:(-2)$ ; (iii)  $2:(-4)$  и (iiii)  $[(-2):10] + [(-4):10]$ . В подциклах (i) и (iii) используются 3 конденсатора, а в подциклах (ii) и (iiii) – 2 и 4 соответственно. Пусть для уравнивания ёмкостного моста используется конденсатор переменной емкости в отводе  $(-10)$ , отсчеты которого обозначаются как  $a_{11}$ ,  $a_{12}$  и  $a_{13}$  в подцикле (i);  $a_{21}$  и  $a_{22}$  в подциклах (ii);  $a_{31}$ ,  $a_{32}$  и  $a_{33}$  в подцикле (iii);  $a_{41}$ ,  $a_{42}$ ,  $a_{43}$  и  $a_{44}$  в подцикле (iiii).

Тогда

$$U_{10} = 10U_{-1} + (U_{-10}/12C)\{20(a_{11} + a_{12} + a_{13}) - 8(a_{31} + a_{32} + a_{33}) - 6(a_{21} + a_{22}) + 3(a_{41} + a_{42} + a_{43} + a_{44})\},$$

где  $C$  – номинальное значение емкости переключаемых конденсаторов.

Измерения при частоте 1 кГц и  $U_{10} = 100$  В показали, что относительная неопределенность результатов на этапе (ii) не превышает  $2 \cdot 10^{-8}$ , а на этапах (i) и (iii) не превышает  $3 \cdot 10^{-8}$  (Измерения на этапе (iiii) не выполнены из-за отсутствия четвертого конденсатора).

Результат аттестации отношения

$$(U_{10}):10U_{-1} = 10 [1 + [1/(1,2)C] \times \{\dots\}]$$

Или

$$(U_{10}):10U_{-1} = 10 [1 + \alpha],$$

где  $\alpha = [1/(1,2)C] \times \{20(a_{11} + a_{12} + a_{13}) - 8(a_{31} + a_{32} + a_{33}) - 6(a_{21} + a_{22}) + 3(a_{41} + a_{42} + a_{43} + a_{44})\}$ .

Оцениваемая неопределенность измерения отношения 10:1 не превышает  $3 \cdot 10^{-8}$ .

При передаче единицы электрической емкости от конденсаторов квадратурного моста 1000 пФ конденсаторам группового эталона 10 пФ отношение 10:1 используется дважды, так что неопределенность передачи с учётом введения поправки на изменение нагрузки ТО можно оценить как  $5 \cdot 10^{-8}$ .

## VI. ВЫВОДЫ

Рассмотрены результаты работ, связанных с воспроизведением и передачей единицы электрической емкости конденсаторам группового эталона, в том числе, создание конденсаторов квадмоста и их характеристизация, метод введения частотных поправок конструкция трансформатора отношения и метод аттестации отношения. Оценка относительной неопределенности результатов передачи единицы конденсаторам 10 пФ не превышает  $5 \cdot 10^{-8}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Modular System for Calibration of Capacitance Standards Based on the Quantum Hall Effect. European Commission Program SMT4-CT98-2231. Documentation and Operating Manual. PTB, Braunschweig, 2001; 145 p. Metas
- [2] L. Callegaro, V. D'Elia, and B. Trinchera. Realization of the farad from the dc quantum Hall effect with digitally assisted impedance bridges. *Metrologia*, vol. 47, pp. 464–472, 2010
- [3] W.S. Kim, D. B. Kim, D. M. Kassim, L. Callegaro, V. D' Elia, B. Trencher, Jan Kucera, and R. Sedlacek. Traceability Chain at KRISS from DC QHR to Farad using Digitally Assisted Coaxial Bridges. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, No 6, pp. 1941–1947, 2019
- [4] A Highly Stable Reference Standard Capacitor, *The General Radio Experimenter*, vol. 37, No 8, August 1963, pp. 1–28
- [5] Callegaro L. The metrology of electrical impedance at high frequency: a review. *Meas. Sci. Technol.* 2009;201–14
- [6] L. Callegaro and F. Durbiano. Four-terminal-pair impedance and scattering parameters. *Mess. Sci. Technol.* 2000, vol. 14, pp. 523–9
- [7] M.C. McGregor, J.F. Hersh, R.D. Cutkosky, F.K. Harris, F.R. Kotter. New Apparatus at the National Bureau of Standards for Absolute Capacitance Measurement. *IRE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION*, 1958 г., pp. 253–261
- [8] Thompson A.M. 'Precise calibration of ratio transformers'. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1983;IM-32: 47–50
- [9] Cutkosky R.D., Shields J.Q. 'The precision measurement of transformer ratios'. *IRE Trans. Instrum.* 1960;I-9:243–50