

Трансформаторный мост-компаратор

Ю. П. Семенов¹, А. В. Рычков²

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

¹Y.P.Semenov@vniim.ru, ²alrych@mail.ru

Аннотация. Разработан трансформаторный мост-компаратор, предназначенный для измерений с наивысшей точностью эталонов электрической емкости с номинальными значениями (10 – 1000) пФ в диапазоне частот (1000 – 1600) Гц.

Плечи отношения моста составляет трансформатор отношения с предельно малым выходным импедансом.

Исследования показали, что мост обеспечивает измерение отношения значений емкости эталонов с относительной неопределенностью не более 3×10^{-8} , а чувствительность достигает $(3 - 5) \times 10^{-9}$.

Мост-компаратор является составной частью комплекса аппаратуры для воспроизведения единицы электрической емкости на основе квантового сопротивления Холла.

Ключевые слова: трансформатор отношения, воспроизведение единицы, точность, эталоны емкости

I. ВВЕДЕНИЕ

Передача единицы электрической емкости в диапазоне номинальных значений от 1000 пФ до 10 пФ с наивысшей точностью (неопределенность результата порядка 2×10^{-8}) является необходимым этапом комплекса работ по воспроизведению единицы электрической емкости (фарада) на основе реализации квантового сопротивления Холла (КСХ). Существует ряд возможных вариантов выполнения работ по воспроизведению фарада, отличающихся номинальными значениями эталонов электрической емкости и сопротивлений, и способами их включения в измерительные цепи, частотой сравнения импедансов эталонов, методами определения зависимостей характеристик всех компонентов создаваемого комплекса от частоты и напряжения и др.

Вне зависимости от указанных различий общими для всех вариантов являются:

- исходная и конечная величины – значение КСХ 12,90640373...кОм при измерении сопротивления на втором плече ($I=2$) (в соответствии с решением Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) от 16 ноября 2018 г.) и действительное значение емкости эталона 10 пФ при частоте 1000 Гц;
- основные этапы работы: воспроизведение КСХ, передача единицы сопротивления эталонам квадратурного моста, сличение импеданса резисторов и конденсаторов в цепи квадратурного моста, передача единицы электрической емкости от эталонов квадратурного моста мерам в составе группового эталона Государственного первичного эталона ГЭТ 25, который осуществляет хранение национального размера единицы.

В ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» создается комплекс аппаратуры, который на основе КСХ, реализуемого на постоянном токе с экспериментальной

относительной неопределенностью 5×10^{-9} должен обеспечивать воспроизведение и хранение фарада с неопределенностью не более, чем $(5-8) \times 10^{-8}$. Для достижения этого результата необходимо, чтобы на этапе передачи единицы электрической емкости оценка бюджета относительной неопределенности не превышала 3×10^{-8} . В цепи квадратурного моста эталоны 1000 пФ измеряют при напряжении 1 В и частоте из диапазона (1543–1592) Гц. Для того, чтобы исключить необходимость экспериментального определения зависимости емкости эталона 1000 пФ от напряжения, это же напряжение 1 В поддерживается на этапе декадной передачи единицы, при этом на конденсаторах 100 и 10 пФ поддерживается напряжение 10 и 100 В соответственно. Зависимости емкости от частоты всех участвующих в передаче эталонов должны быть установлены в процессе передачи единицы. Для передачи единицы электрической емкости разработан рассматриваемый далее трансформаторный мост-компаратор (ТМК).

II. СХЕМА И СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ МОСТА-КОМПАРАТОРА

A. Общая концепция

В схемах современных трансформаторных мостов для измерения импеданса с высокой точностью применяются многочисленные цепи для обеспечения ряда условий (4ТР включение эталонов, режим холостого хода трансформаторов отношения (ТО), компенсация влияния соединительных проводников и др.), а также цепи, которые осуществляют контроль выполнения этих условий (инжекторные трансформаторы, дополнительные нуль-индикаторы) [1]. Такие мосты позволяют проводить измерения с высокой точностью (до 10⁹), но процесс измерения включает многочисленные итерационно повторяющиеся операции для регулирования и контроля состояния цепей, обеспечивающих выполнение условий.

В процессе исследований по созданию ТМК для передачи единицы электрической емкости установлено, что:

1. Необходимая точность измерения (10⁸) может быть достигнута посредством очень простого моста-компаратора при выполнении нескольких условий: предельно низкий выходной импеданс ТО, использование 2ТР включения эталонов и уравнивание посредством конденсаторов и резисторов переменного значения;

2. Отсутствуют эталоны, которые обладают стабильностью 10⁹.

Стабильность 10⁹ и выше достижима только у эталонов на основе квантовых явлений. Неопределенность результатов измерений эталонов – артефактов ограничивается их кратковременной нестабильностью на уровне порядка 5×10^{-9} при большом числе измерений [2].

Эти условия практически выполнимы, поскольку на предыдущих этапах работы уже были созданы макеты ТО с низким выходным импедансом и конденсаторы переменной емкости с ценой деления 10^{-7} пФ, а результаты измерения эталонов емкости в цепи квадратного моста могут быть определены на разьемах их коаксиальных кабелей (то есть измерительные кабели рассматриваются как неотъемлемая часть эталона). Реализация указанной концепции привела к созданию очень простого ТМК, электрическая схема которого представлена на рис. 1.

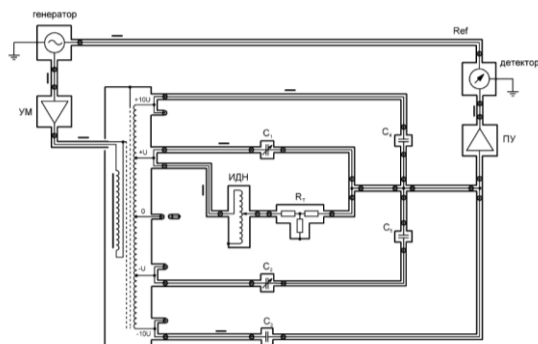


Рис. 1. Электрическая схема трансформаторного моста-компаратора

В. Электрическая схема

Два плеча канонического 4-хплечего моста образуют секции вторичной обмотки ТО, два других плеча – измеряемые конденсаторы, подключенные к выводам секций. Номинальные значения емкости конденсаторов могут быть или равными (отношение 1:1) или отличаться в 10 раз (отношение 10:1). Измерительный сигнал, формируемый генератором и усилителем мощности, поступает на первичную обмотку ТО. Индикация выходного сигнала осуществляется синхронным детектором, на входе которого установлен предусилитель ПУ.

Уравновешивание моста достигается введением двух малых и регулируемых по величине токов – синфазного и квадратурного, вводимых в вершину моста, к которой подключен нуль-индикатор. Синфазный ток образуется суммой токов двух идентичных конденсаторов малой переменной емкости, квадратурный ток создается резистивной цепью R_T и индуктивного делителя напряжения (ИДН).

Исключение взаимного влияния компонентов схемы и соединяющих их коаксиальных кабелей достигается применением коаксиальных дросселей, которые обеспечивают равенство величины и противоположность направлений токов в центральном проводнике каждого кабеля и его экране. Расположение коаксиальных дросселей в схеме моста обозначено отрезками толстых линий параллельно кабелю.

С. Трансформатор отношения

Трансформатор отношения напряжения выполнен по схеме одноступенчатого трехобмоточного трансформатора с двумя экранами между первичной и вторичной обмотками. Обмотки размещены на тороидальном магнитопроводе (Пермаллой 79НМУ 0,05 мм с размерами $114 \times 77 \times 37$ мм). Обмотка 1 содержит 81 виток. Обмотка 2 содержит 20 последовательно соединенных секций по 7 витков,

каждая из которых равномерно распределена вдоль окружности магнитопровода.

Особенностью конструкции трансформатора является выполнение его вторичной обмотки в виде медной сварной шины толщиной 1 мм и шириной от 7 до 13 мм. Впервые такая конструкция обмотки была использована в NIST для снижения выходного импеданса ТО и оказалась эффективной [3], [4], но впоследствии практически больше не применялась из-за сложности изготовления. Внешний вид вторичной обмотки представлен на рис. 2. Обмотки разделены двумя медными экранами, потенциалы которых близки к «нулю», хотя экраны не соединены между собой. Измеренные при частоте 1,6 кГц электрические параметры для вторичной обмотки 70 витков составляют 0,00032 мГн и 15,4 мОм.

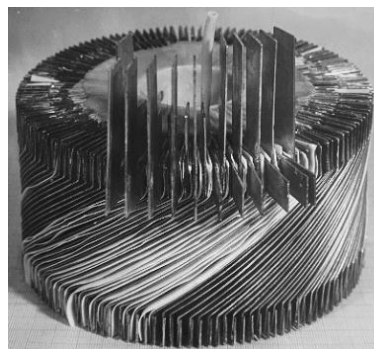


Рис. 2. Внешний вид вторичной обмотки трансформатора отношения

Значения индуктивности и сопротивления вторичных обмоток, измеренные в режиме их короткого замыкания (l_s и r_s), характеризуют импеданс рассеяния, значения которого не зависят от частот и потока в магнитопроводе, но являются основной причиной отличия действительного значения отношения напряжения на выводах обмоток (U_1/U_2) от номинального значения, определяемого отношением числа витков этих обмоток (N_{12}):

$$U_1/U_2 = N_{12} \cdot (1 + \alpha + j \cdot \beta), \quad (1)$$

где α и β – синфазная и квадратурная погрешности ТО.

Емкость между I и II обмотками (C_{12}) является одной из причин появления интермодуляционных помех ТМК. В идеальном ТО значения l_s , r_s и C_{12} равны нулю.

Д. Конденсаторы, образующие плечи моста-компаратора

Конденсаторы, образующие плечи моста-компаратора – это измеряемые эталоны электрической емкости (10–1000) пФ – герметизированные, с воздушным или кварцевым диэлектриком, которые характеризуются высокой кратковременной стабильностью (10^8), малыми углами потерь (менее 6×10^{-6}), малыми отклонениями емкости от номинального значения (менее 6×10^{-6}).

Е. Конденсаторы переменной емкости и резистивная T- схема R_T и ИДН

Цепи регулирования синфазной и квадратурной составляющих сигнала разбаланса моста должны обеспечивать дискретность и линейность

уравновешивания не хуже 1×10^{-8} (например, 1×10^{-7} пФ при измерении емкости 10 пФ). В схеме ТМК используются две пары конденсаторов переменной емкости – КПЕ-1 или КПС-1-0,01, принцип действия которых основан на линейном перемещении экрана в «охранной щели» между электродами. Конструктивной особенностью конденсаторов КПС-1-0,001 является возможность регулирования цены деления и максимальной емкости посредством смещения одной из стенок «щели». Требования к стабильности и линейности не являются строгими, если существует возможность измерения действительного значения установившейся емкости цифровым мостом АН2700А. Преимуществами такого способа регулирования синфазной составляющей является минимальное шунтирование обмоток ТО.

Уравновешивание квадратурной составляющей разбаланса моста может осуществляться регулировкой активной проводимости в пределах $\pm(10^{-14} - 10^{-8})$ См. Основным требованием к этой проводимости является отсутствие фазового сдвига, который приведет к появлению погрешности измерения емкости (так называемая « α в β »). Разработано регулирующее устройство в составе 6-декадного ИДН и резистивной Т-образной цепи R_T , составленной из двух мер сопротивления типа Н2-2 с номинальными значениями 10 и 100 кОм и резистора 1 Ом. Пропускная проводимость цепи R_T равна 10^{-8} См, компенсация фазового сдвига может быть выполнена шунтированием резистора 1 Ом подстроечным конденсатором. Практически выполнять шунтирование не потребовалось, поскольку значения постоянной времени мер Н2-2 достаточно малы ($\tau < 10^{-8}$), так что измеренное при частоте 1,6 кГц значение пропускной емкости цепи R_T составило 0,00011 пФ. В наихудшем случае, при измерении эталона 10 пФ, погрешность « α в β » не превысит 1×10^{-9} .

Преимуществом предложенного способа уравновешивания квадратурной составляющей сигнала разбаланса является независимость от измерительной частоты.

F. Генератор и усилитель мощности

В качестве источника измерительного напряжения ТМК применен цифровой генератор DS360 «Stanford Research Systems» для создания предельно чистых (коэффициент нелинейных искажений менее -109 дБ) синусоидальных сигналов. Напряжение на несимметричном выходе может быть установлено в пределах до 20 В при частотах до 200 кГц.

DS360 использует прямой цифровой синтез (DSS) для генерации основной формы сигнала. 24-битный цифровой сигнальный процессор (DSP) Motorola DSP56002 действует как фазовый аккумулятор и содержит внутреннюю оперативную память о форме волны.

Все регулировки выполняются с передней панели, в том числе посредством многофункционального поворотного устройства («spin knob»), которое позволяет быстро и плавно установить значение в любом разряде выбранной величины. Эта функция особенно полезна при включении, регулировании и отключении входного напряжения ТМК, поскольку исключает возможность мгновенного изменения напряжения, которое может привести к изменению магнитного состояния магнитопровода.

Широкополосный усилитель мощности Krohn-Hite Model 7600 используется при измерении конденсаторов 10 и 100 пФ, когда выходное напряжение DS360 оказывается недостаточным для обеспечения требуемой чувствительности.

G. Синхронный детектор и предусилитель

Сигнал разбаланса с выхода ТМК поступает на вход предусилителя (ПУ) модели SR550, который работает совместно с синхронным цифровым услителем SR830 (Stanford Research Systems). SR550 со входом на полевых транзисторах имеет входной импеданс $100 \text{ МОм} + 25 \text{ пФ}$ и усиление в пределах от 1 до 10, автоматически устанавливаемое обратной связью с SR830. Собственный шум на входе ПУ составляет $3,6 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$ при частоте 1 кГц и выше, а чувствительность на полную шкалу доходит до 10 нВ. ПУ снижает шум и наводки в соединительном кабеле с ТО и подавляет интермодуляционные (синфазные составляющие гармоник полезного сигнала) помехи – коэффициент их подавления составляет минус 90 дБ.

В SR830 все операции с сигналом выполняются в цифровом виде с использованием собственного опорного сигнала, который генерируется методом прямого цифрового синтеза (DSS) под управлением TTL сигнала, поступающего от генератора DS360. Результатом взаимодействия указанных приборов являются отсутствие помех и возможность мгновенной перестройки частоты.

Следует отметить, что кабель, соединяющий ПУ с ТО, в наибольшей степени подвержен действию помех, поэтому желательно использовать возможно более короткий кабель, а также избегать механических воздействий и вибрации.

H. Коаксиальные разъемы и кабели

Компоненты моста соединены коаксиальными кабелями с изоляцией из фторопласта Ф-4 и проводниками посеребренной медной проволоки. Коэффициент экранирования экранов составляет 99 %.

Коаксиальные дроссели изготовлены намоткой 14 витков кабеля на тороидальные магнитопроводы из аморфного сплава ГМ 401 ($\mu_r > 80000$) с размерами $50 \times 25 \times 15$ мм. Кабели снабжены коаксиальными разъемами (конструкция ВНИИМ), обеспечивающими контактное сопротивление центрального проводника не более 2 Ом.

III. ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

Целью исследований является оценка составляющих бюджета неопределенности результата передачи единицы электрической емкости от конденсаторов квадратурного моста 1000 пФ эталона емкости 10 пФ. Результатом измерений в квадратурном мосте является экспериментально установленное значение произведения действительных значений емкости двух номинально равных конденсаторов C_1 и C_2 , то есть $\{C_1 \times C_2\}$.

Если разность $|\Delta c| = C_2 - C_1$ достаточно мала ($|\Delta c| \ll C_1$), то значение C_1 определяется соотношением

$$C_1 = [\{C_1 \times C_2\} / (1 + \Delta c / C_0)]^{1/2}, \quad (2)$$

где C_0 – номинальное значение конденсаторов C_1 и C_2 .

Член $1/(1 + \Delta c|C_0|)^{1/2}$ можно представить степенным рядом вида

$$(1 + \alpha)^{-1/2} = 1 - (\alpha/2) + (3\alpha^2/8) - \dots \quad (3)$$

Поскольку относительное отклонение действительных значений каждого из конденсаторов от номинального значения не превышает 5×10^{-6} , то можно ограничиться только двумя первыми членами ряда без внесения погрешности, превышающей 10^{-11} .

Тогда

$$C_1 = \{C_1 \times C_2\}^{1/2} [1 - \Delta c/2C_0], \quad (4)$$

что позволяет преобразовать величину $\{C_1 \times C_2\}$ в значение емкости одного из конденсаторов, которое может быть использовано в процессе передачи единицы электрической емкости эталону 10 пФ. Этот процесс состоит из нескольких этапов, выполняемых в цепи трансформаторного моста-компаратора.

Основными источниками неопределенности результата процесса передачи являются:

- отклонения действительных значений отношений напряжений 10:1 и 1:1 на разъемах ТО от их номинальных значений в режиме нагрузки измеряемыми конденсаторами 1000, 100 и 10 пФ;
- зависимость указанных выше отношений при изменении частоты в пределах (800–1592) Гц;
- зависимость отношений при изменении измерительного напряжения;
- недостаточная чувствительность нуль-индикатора моста-компаратора;
- влияние температуры на результаты измерений;
- влияние остаточных параметров цепи регулирования квадратурного сигнала;
- влияние недостаточной эффективности коаксиальных дросселей и их расположения;
- повторяемость результатов в условиях изменения положения измерительных кабелей при коммутации конденсаторов.

Исследования проведены с использованием двух эталонных конденсаторов 10 и 100 пФ, отношение действительных значений которых предварительно установлены с относительной неопределенностью $0,02 \times 10^{-6}$ при частоте 1,6 кГц.

Все использованные в процессе исследований эталонные конденсаторы располагались в условиях, обеспечивающих неизменность их емкости в пределах $(0,02 \pm 0,02) \times 10^{-6}$. Для создания этих условий использованы воздушный термостат ТК190US Kambiс и жидкостный термостат MEATEST M301.

А. Чувствительность

В результате, достигнута относительная статистическая неопределенность $(2 - 10) \times 10^{-9}$ для каждого номинального значения емкости при указанных выше фиксированных условиях и установках органов управления синхронного детектора SR830 и использовании времени усреднения показаний порядка 150 с ($\tau = 30$ с) и 30 с ($\tau = 10$ с), при измерении

конденсаторов 1000 пФ (или отношения 1000 пФ/100 пФ) и конденсаторов 100 и 10 пФ (или отношения 100 пФ/10 пФ) соответственно.

В. Влияние остаточных параметров цепи регулирования квадратурного сигнала

В процессе исследования опробован режим измерений, при котором квадратурный сигнал вообще никак не уравнивался, а исключался только вследствие применения фазочувствительного детектора (PSD) в схеме SR830. Оказалось, что в этом режиме измерений не наблюдается (в пределах указанной выше чувствительности) смещение показаний синфазной составляющей. Происходит только увеличение показаний сигнала в квадратурном канале (канал «Y»), которое может привести к перегрузке («overload») и потребует увеличения показателя чувствительности. Величина этого сигнала зависит от разности значений угла потерь ($\text{tg } \delta$) компарируемых конденсаторов и увеличивается пропорционально частоте. При измерении конденсаторов от 10 до 1000 пФ, значения $\text{tg } \delta$ которых не превышает 3×10^{-6} , показания канала Y не превышали 100 мкВ. Чувствительность по каналу X (без учета разбаланса квадратурной составляющей) всегда устанавливалась в пределах от 100 до 2 мкВ, поэтому вынужденное увеличение показателя чувствительности не выходит за эти пределы и может быть компенсировано увеличением постоянной времени. Динамический резерв при этом остается в пределах от 40 до 94 дБ, то есть измерение сигнала разбаланса моста может происходить без искажений при воздействии шумового сигнала, превосходящего его в 100–80000 раз.

Все дальнейшие исследования выполнены без уравнивания квадратурного сигнала.

С. Влияние нагрузки

Отношение напряжений на разъемах ТО зависит от значения токов, протекающих через разъемы и обусловленных как импедансом измеряемых конденсаторов, так и проводимостью между центральным проводником каждого из разъемов и его экраном, включая проводимость присоединенного к нему коаксиального кабеля и измеряемого конденсатора. Ранее уже указывалось, что в данной работе кабели измеряемых конденсаторов рассматриваются как их неотъемлемая часть, а их параметры учитываются автоматически в результатах измерения емкости. Поэтому можно считать, что влияние на результат измерения оказывает только суммарная нагрузка на выводах ТО, обусловленная импедансом рассеяния, относящимся к каждому используемому при данном измерении разьему.

Проведены исследования для определения изменения отношения напряжений 10:1 и 1:1, вызванные изменением номинальных значений измеряемых конденсаторов. Наблюдались изменения равновесия моста при включении имитаторов дополнительной нагрузки, которые показали, что симметричная нагрузка, пропорциональная измеряемым емкостям, вызывает систематическое смещение равновесия в пределах до 15×10^{-9} , значение которого может быть использовано как поправка. Нагрузка только одного из плеч вызывает смещение до 35×10^{-9} , но этот режим не может возникнуть при компарировании конденсаторов. Повторяемость эффекта нагрузки 5×10^{-9} учтена в бюджете неопределенности.

D. Влияние недостаточной эффективности коаксиальных дросселей

Электрическая схема моста (рис. 1) настолько проста, что для выбора наилучшего расположения коаксиальных дросселей достаточно руководствоваться простым правилом – в цепи должен быть только один кабель, соединяющий все узлы моста. Особое внимание следует уделить коаксиальным дросселям в цепях, соединяющих генератор и синхродетектор между собой и с ТО. Эффективность каждого коаксиального дросселя была проверена с использованием схемы, показанной на рис. 3. Источник создает переменный ток порядка 1 мА через центральный проводник коаксиального кабеля, который может возвращаться к источнику двумя проводниками с одинаковыми сопротивлениями 10 Ом в каждом.

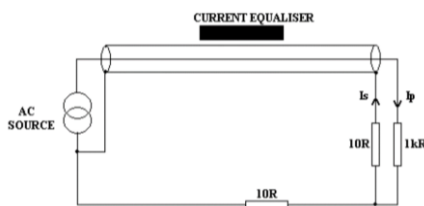


Рис. 3. Способ проверки коаксиального дросселя

При отсутствии дросселя (или при его коротком замыкании) ток будет делиться поровну, так что половина тока будет возвращаться через экран коаксиального кабеля. Тесная магнитная связь, обусловленная дросселем, вынуждает большую часть тока возвращаться через экран коаксиального кабеля. Мерой эффективности дросселя является отношение тока, текущего через экран, к току, текущему через центральный проводник коаксиального кабеля (I_s/I_p). Измеренные при частоте 1,6 кГц значения отношения для всех шести дросселей в цепи моста находятся в пределах от 0,941 до 0,954 (стандартная неопределенность измеренного отношения тока не превышает 0,004), то есть неуравновешенный ток составляет не более 5–6%, причем эффективность повышается при понижении частоты.

E. Определение коэффициентов отношения напряжений ТО и их зависимостей

Отношения напряжений представлены в виде

$$U_1/U_2 = N(1 + \alpha + j\beta), \quad (5)$$

где N – номинальное значение отношения (1 или 10), α и β – синфазная и квадратурная поправки соответственно.

Значения « α » определены посредством измерения опорных конденсаторов 10 и 100 пФ, действительные значения емкости которых, также как и зависимость от частоты и приложенного напряжения (в пределах до 200 В) были установлены предварительно. Значение « β » оказалось незначительно малым и фазовый угол не измерялся, а автоматически компенсировался. Расширение диапазона измеряемой емкости до 1000 пФ осуществлено посредством применения соответствующих дополнительных нагрузок при измерении опорных конденсаторов.

Результаты измерений коэффициента « α » для трех значений N представлены в табл. 1. Измерения

выполнены в расширенном диапазоне частот для обеспечения возможности экспериментального выявления неучтенных ранее систематических погрешностей.

ТАБЛИЦА I. ЗАВИСИМОСТЬ ОТНОШЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ТО ОТ ЧАСТОТЫ

Частота, Гц	Коэффициент « α », 10 ⁻⁸ , для отношений N		
	1:1	10:10	10:1*
1592	0,8	0,5	35
1400	0,8	0,5	26
1200	0,8	0,5	16
1000	0,8	0,5	12
2000	1,2	1,0	50

Примечание. * - в таблице указано среднее значение результатов измерений четырех различных отношений 10:1, реализуемых в ТО

Приведенные результаты показывают, что зависимость « α » от частоты близка к квадратичной.

Источники составляющих неопределенности и оценка их влияния на результат передачи единицы электрической емкости в пределах (10–1000) пФ приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА II. БЮДЖЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ПРИ ЧАСТОТЕ 1592 Гц

Источник	Тип	Оценка u_r , пФ/Ф
Аттестация отношения ТО	B	14
Зависимость отношения от напряжения	B	8
Зависимость отношения от частоты	B	5
Зависимость отношения от нагрузки	B	5
Компенсация нагрузки	-	-
Разрешающая способность	B	5
Чувствительность нуль-индикатора	B	4
Синфазная составляющая реглировки фазы	B	0
Шумы	A	8
Эффективность коаксиальных дросселей	B	10
Кратковременная стабильность	B	8
Повторяемость	A	12
Суммарная стандартная неопределенность		27

IV. Выводы

Полученные результаты исследований показывают: метрологические характеристики конденсаторов № 1 и № 2 удовлетворяют требованиям их применения в составе квадратурного моста, для воспроизведения единицы электрической ёмкости на основе значений квантовых констант с относительной неопределенностью (5–8)·10⁻⁸.

Экспериментальные исследования позволили установить все основные источники неопределенности, их влияние на результат передачи единицы и составить бюджет неопределенности, оценка которого составляет 27×10^{-9} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Shakil Avan, Bryan Kibble and Juergen Schurr, Coaxial electrical circuits for interference-free measurements, Publ. by the Institution of Engineering and Technology, London, UK.2011.
- [2] P Gournay and all. Comparison CCEM-K4.2017 of 10 pF and 100 pF capacitance standards // Metrologia, vol. 56 № 1A, 01001, 2019, 36 p.
- [3] M.C. McGregor and all. New Apparatus at the NBS for Absolute Capacitance Measurement. // IRE Transactions on Instrumentation, 1958, p. 253-261.
- [4] Cutkosky R.D., Shields J.Q. The precision measurement of transformer ratios // IRE Trans. Instrum. 1960, I-9, 243–250. DOI: 10.1109/IRE-I.1960.5006925