

Определение частотных характеристик резисторов квадратурного моста

Ю. П. Семенов¹, Е. В. Кривицкая²
 ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»
¹Y.P.Semenov@vniim.ru, ²E.V.Krivitskaya@vniim.ru

Аннотация. Значения сопротивления резисторов квадратурного моста должны быть определены с относительной неопределенностью не превышающей $2 \cdot 10^{-8}$. Основной составляющей является неопределенность значения частотной характеристики в диапазоне частот от 0 до 2 кГц. Традиционным методом определения указанной характеристики является экспериментальное сличение резисторов с мерами сопротивления, частотные характеристики которых определяются расчетным путем. Предлагается новый метод измерения частотной зависимости, основанный на измерении импеданса на высоких частотах и последующей экстраполяции на частоту 1,6 кГц.

Ключевые слова: резистор, квадратурный мост, квантовое сопротивление Холла, эталон электрического сопротивления

1. ВВЕДЕНИЕ

Квадратурными мостами в измерительной технике называются мостовые измерительные цепи, которые позволяют экспериментально сравнить значения импеданса элементов электрических цепей, фазовые углы которых находятся в квадратуре (отличаются на $\pi/4$). Квадратурные мосты (далее – КМ) имеют очень узкое, но чрезвычайно важное применение в метрологии, являясь одним из основных устройств в цепи измерений, связывающих первичные эталоны единицы электрического сопротивления и электрической емкости [1]. В современной международной системе единиц СИ единица электрического сопротивления Ом непосредственно определяется значениями двух фундаментальных физических констант – постоянной Планка h и заряда электрона e посредством квантового эффекта Холла. Квантовое сопротивление Холла (КСХ).

$$R_H = h / (i \cdot e^2),$$

где i – номер плато КСХ (целое число 1, 2, ...)

Экспериментально реализуется в двумерном электронном газе в условиях криогенной температуры ($T < 1$ К) и сильного магнитного поля (индукция $B > 4$ Т). Значение R_H при фиксированном номере плато (обычно $i=2$) принципиально не зависит от способа формирования двумерного электронного газа, времени и места, колебаний температуры, тока и других параметров среды, которые ограничивают точность измерения обычных (неквантовых) эталонов сопротивления. Теоретически точность значения R_H определяется только точностью значений констант h и

e , практически точность воспроизведения единицы при $R_H(2) = 12,90640372... \text{ кОм}$ зависит от технологических характеристик оборудования и характеризуется неопределенностью результата измерений в пределах от $1 \cdot 10^{-9}$ - $2 \cdot 10^{-8}$ ($k = 2$). Эта точность относится к числу наиболее высоких в области электромагнитных единиц, поэтому одной из важнейших задач метрологии является ее распространение на воспроизведение других единиц электрических величин, в первую очередь, электрической емкости.

В цепи измерений, связывающих первичные эталоны единицы электрического сопротивления и электрической емкости, используются несколько измерительных мостов постоянного и переменного тока, но среди них квадратурный мост отличается тем, что предназначен для сравнения импеданса разнородных величин (сопротивления и емкости) и условие его равновесия является частотно-зависимым. Принципиальная схема КМ приведена на рис. 1, а условие его равновесия имеет вид:

$$\omega^2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot C_2 \cdot C_4 = 1,$$

где $\omega = 2\pi f$, f – измерительная частота.

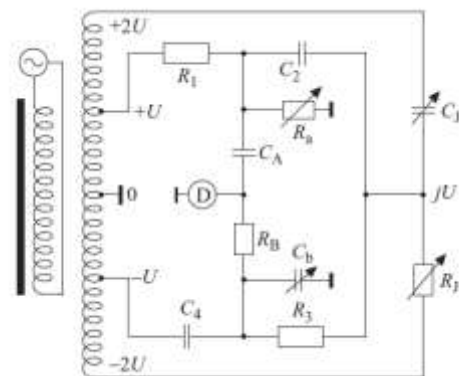


Рис. 1. Принципиальная схема квадратурного моста

На рис. 1 R_1 , R_3 , C_2 и C_4 – сличаемые эталоны; C_A , R_A , R_B и C_B – цепь, объединяющая точки с нулевым потенциалом при равновесии моста, что позволяет использовать один нуль-детектор (D) вместо двух; C_1 и R_1 – цепь квадратурного сдвига напряжения (jU).

Приведенная схема КМ предполагает, что при значениях импеданса равно-номинальных эталонов сопротивления R_1 , R_3 , и эталонов емкости C_2 , C_4 равны при

измерительной частоте f , а остаточные параметры эталонов (постоянная времени резисторов τ , тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторов) – малы. Наиболее распространённым является использование частоты $(5000/\pi)$ рад/с ($\sim 1591,6$ Гц), что позволяет применять эталоны электрического сопротивления и емкости с десятично-кратными номинальными значениями 100 кОм и 1000 пФ [2, 3, 4, 5].

Относительная неопределенность лучших результатов измерений емкости эталонов 1000 пФ в цепи квадратного моста составляет $(0,2-2) \cdot 10^{-8}$. Значительная по величине составляющая этой неопределенности связана с определением значения сопротивления эталонов 100 кОм при частоте 1591,6 Гц. Передача единицы электрического сопротивления от КСХ, $R_H(2)$, к эталонам 100 кОм на постоянном токе может сопровождаться минимальными потерями точности, при частоте f значение сопротивления (R_f) отличается от значения (R_0), измеренного на постоянном токе:

$$R_f = R_0 [1 + \delta(f)],$$

где $\delta(f)$ – частотная поправка резистора при частоте f .

В зависимости от номинального значения, конструкции, материала резистивного элемента и его электрической схемы значение поправки $\delta(f)$ может в сотни раз превышать погрешность передачи единицы от КСХ.

II. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗИСТОРОВ

Экспериментальное определение частотных поправок эталонов сопротивления КМ основано на применении резисторов с расчетными частотными характеристиками (РРЧХ), то есть таких резисторов, значения сопротивления которых при любой частоте могут быть рассчитаны исходя из их конструкции, геометрических размеров резистивного элемента, электрических характеристик применённых материалов и значения сопротивления на постоянном токе (R_0).

Номинальные значения сопротивления РРЧХ лежат в пределах от 100 Ом до 12,9 кОм и ограничены их конструктивными особенностями. Резистивные элементы РРЧХ имеют простейшую форму тонкого прямолинейного проводника или системы из нескольких таких проводников, расположенных параллельно внутри соосного цилиндрического экрана.

Повышение номинального значения свыше 10 кОм ограничено необходимостью применения очень длинного (иногда более трёх – четырёх метров) очень тонкого (10–20 мкм) провода из резистивного сплава с высоким удельным сопротивлением (ρ). Работа с таким проводом (создание необходимой геометрической конфигурации, поддержание ее неизменности во времени и, в том числе, измерение ее геометрических параметров) является своего рода видом искусства, особенно, если учесть тензочувствительность (зависимость ρ резистивного сплава от малейшего механического напряжения). Для снижения механического напряжения в проводе

применяется термообработка при температуре до 350 °С, но при этом изменяется геометрическая конфигурация резистивного элемента вследствие необратимого изменения длины провода.

Создание РРЧХ с номинальными значениями менее 100 Ом ограничено необходимостью применения резистивных проводников настолько большого диаметра, что снижается точность расчёта сопротивления и индуктивности вследствие возрастания роли эффектов, связанных с действием вихревых токов (поверхностный эффект, эффект близости, в том числе и в материале экрана, и т. д.).

Применение РРЧХ с номинальными значениями 6,45...кОм ($R_H(4)$) и 12,9... кОм ($R_H(2)$) позволило ранее исследовать с достаточной точностью характеристики КСХ на переменном токе при частотах до 5 кГц посредством сличения равнономинальных значений сопротивления.

Применение аналогичного способа измерений для установления частотных поправок резисторов КМ невозможно из-за отсутствия возможности физической реализации РРЧХ с номинальным значением 100 кОм. Поэтому в зарубежных национальных метрологических институтах применяются различные варианты измерений на основе нескольких РРЧХ и мостов отношения постоянного и переменного тока, при этом РРЧХ используются также и для аттестации частотных поправок отношений плеч трансформаторных мостов [6, 7]. Такая схема исследований требует разработки, построения и аттестации нескольких устройств (мостов и РРЧХ), весьма трудоёмкая, а полученные результаты представляются не очень надёжными вследствие большого числа влияющих факторов и близости уровней точности каждого из устройств и искомого результата, т. е. частотной поправки эталона сопротивления КМ. Следует также отметить, что неопределенность результата включает составляющие, обусловленные расчетом поправок РРЧХ (соответствие фактической и расчетной моделей и точность измерения геометрических размеров) и сличениями мер сопротивления с различными номинальными значениями (неопределенность аттестации отношений, поправки на различие энергетических режимов, вибрация проводов РРЧХ, низкочастотные шумы), проверить которые экспериментально посредством межлабораторных сличений невозможно вследствие того, что РРЧХ практически нетранспортабельны. Обзор доступной информации [2, 6, 8] обнаруживает большой разброс даже при оценке частотных поправок РРЧХ 12,906 кОм – от $+5,5 \cdot 10^{-8}$ до $+20 \cdot 10^{-8}$ при частоте 5 кГц (расширенная неопределенность составляет $6 \cdot 10^{-8}$), результаты при частоте 1,6 кГц не сообщаются.

III. МЕТОД ЧАСТОТНОЙ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ

На основании опыта создания и исследования метрологических характеристик особого типа РРЧХ – бифилярная на кварцевом основании [9, 10] – авторами предложен иной метод определения частотных поправок. Суть метода заключается в сличении (компарировании) сопротивления резисторов квадратного моста и РРЧХ

при высокой частоте (ВЧ) с применением предварительно исследованных серийных измерителей импеданса – цифровых RLC-метров и анализаторов цепей с последующей экстраполяцией результатов к рабочей частоте 1,6 кГц и номинальному значению 100 кОм.

Высокой в данном контексте можно считать частоту, при которой абсолютное значение изменения сопротивления возрастает настолько, что существенно превышает погрешность (неопределенность) предварительно аттестованного измерителя импеданса. В зависимости от номинального значения сопротивления и частоты эта погрешность находится в пределах от 0,003 % до 0,3 % в диапазоне частот 0,1–5 МГц.

Этот метод может быть применен в тех случаях, когда частотная зависимость каждого из сличаемых резисторов является гладкой функцией в заданном диапазоне частот (напомним, что гладкой на отрезке $[a, b]$ называется функция $f(x)$, которая имеет непрерывную производную на этом отрезке).

Проведенные ранее исследования [1, 3, 10] экспериментально подтвердили, что частотные поправки РРЧХ с номинальными значениями от 100 Ом до 12,9 кОм зависят от квадрата частоты, что соответствует расчетам и физической природе РРЧХ. Результаты подтвердили возможность применения расчетной модели бифилярных РРЧХ (при надлежащем выборе конструкции и материалов) в широком диапазоне частот до 30 МГц, хотя ранее считалось, что влияние различных эффектов вихревых токов делает эту модель непригодной уже при частотах порядка сотни килогерц. Одновременно была подтверждена действенность метода частотной экстраполяции, но это подтверждение было ограничено случаем квадратичной зависимости, являющейся гладкой функцией. Применимость этого метода в случае резисторов КМ зависит от характеристик применяемых резистивных элементов.

Из информационных источников известно, что преимущественное применение в последние десятилетия нашли металлофольговые резистивные элементы Vishay. Эти резисторы отличаются малыми геометрическими размерами, стабильностью сопротивления (менее 0,001 %/год), малой зависимостью от температуры ($\text{TKC} < 0,6 (0,2) \cdot 10^{-6} / \text{K}$) и приложенного напряжения ($< (0,1) \cdot 10^{-6} / \text{В}$), низким уровнем шума ($< 0,01 \text{ мкВ/В}$), безреактивностью (остаточная индуктивность менее 0,08 мкГн). Конструктивно резисторы могут быть выполнены в виде SMD компонентов или в герметизированных корпусах. Резистивный элемент образован монолитным соединением фольги из резистивного сплава (Z Foil) и подложки из алюминоксида (Al_2O_3) высшей очистки (99,5 %). Является ли функция зависимости сопротивления от частоты гладкой, то есть пригодной для применения метода экстраполяции, до проведения исследований было неизвестно.

Конфигурация резистивного элемента неизвестна, но принцип ее формирования для достижения минимальной реактивности и возможности подгонки сопротивления к номинальному значению ($\pm 0,01 \%$) показан на рис. 2.

Подгонка осуществляется путем перерезания перемычек между секциями резистора, что приводит к увеличению сопротивления. Пунктиром показан путь тока до подгонки (верхняя часть рисунка) и после подгонки (нижняя часть).

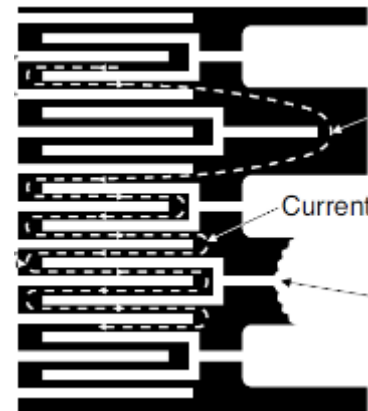


Рис. 2. Резистивный элемент металлофольгового резистора

Функция, описывающая частотную характеристику резисторов КМ, неизвестна, также недоступна информация, которая могла бы быть использована для расчетной оценки поправки (форма и размеры резистивного элемента и других компонент, характеристики материалов). Результаты оценки частотных поправок $\delta(f)$ для эталонов сопротивления КМ, в том числе, на основе металлофольговых резисторов обычно приводятся только в качественной форме («незначительны», «пренебрежимо малы», «учтены в бюджете неопределенности»), хотя в [6] сообщается, что $\delta(f) = -11 \cdot 10^{-8}$ на один килогерц.

В рамках проекта по созданию квадратурного с целью реализации воспроизведения Фарада на основе квантового сопротивления Холла проводится разработка резисторов КМ, в том числе выполнены экспериментальные исследования частотной зависимости сопротивления некоторых типов резисторов Vishay. Целью исследований является установление возможности применения метода экстраполяции результатов измерений при высокой частоте в диапазон низких частот. Метод может быть использован в дальнейших работах указанного проекта, если значение частотной поправки $\delta(f)$ при частоте 1592 Гц не превысит $5 \cdot 10^{-8}$, при этом оценка расширенной неопределенности должна быть не более $(5-8) \cdot 10^{-9}$.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Далее рассматриваются результаты исследования резисторов с номинальными значениями 100 (103,2) кОм двух исполнений – герметизированные в металлическом корпусе, заполненном маслом, серии VNA 516 и макет на основе чип резисторов 1206 серии VSMP (4 последовательно соединённых чип резисторов 20 и 30 кОм на подложке из фольгированного фторопласта-4). Все резисторы размещены в металлических корпусах, снабженных четырьмя коаксиальными разъёмами BNC, что обеспечивает их измерение в соответствии с 4TP определением импеданса и присоединение к измерителям без соединительных кабелей.

Измерения выполнены посредством приборов Agilent E4980A (Precision LCR Meter) и Agilent 4294A (Precision Impedance Analyzer), предварительная аттестация которых выполнена при частотах до 2 МГц и 5 МГц (соответственно) с применением бифилярных ПРЧХ ВНИИМ 1 кОм – 12,9 кОм и конденсаторов Agilent 16383A (100 пФ) и 16384A (1 нФ). Измерения выполнены в соответствии с параллельной схемой замещения измеряемого объекта ($R_p - C_p$).

Результаты измерений, представленные в соответствии с параллельной схемой замещения ($R_p - C_p$), приведены в таблице 1 и на рис. 3 и 4.

ТАБЛИЦА 1 РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ РЕЗИСТОРОВ

Частота, МГц	Серия VNA 516-4, №1		Серия VNA 516-4, №2		Серия VSMP (сборка)	
	R_p , кОм	C_p , пФ	R_p , кОм	C_p , пФ	R_p , кОм	C_p , пФ
0,001	103,2458		103,2444		99,9933	
0,01	103,2463		103,2447		99,9938	
0,1	103,2785	-0,15	103,2787	-0,16	99,9914	-0,03
0,2	103,4036		103,4085		100,0102	
0,4	103,8675		103,8965		100,0527	
0,6	104,6373		104,7025		100,1257	
0,8	105,6966		105,8114		100,2263	
1,0	107,0308	-0,14	107,2084	-0,15	100,3630	-0,03
1,2	108,6133		108,8639		100,5241	
1,5	111,3886		111,7658		100,8205	
2,0	116,8611		117,4902		101,4436	

Результаты измерений сопротивления резисторов № 1 VNA серии 516-4 и VSMP (сборка) (столбцы 2 и 6 в таблице в более широком диапазоне частот до 5 МГц представлены на рис. 3 и 4 (нижняя кривая на каждом изображении).

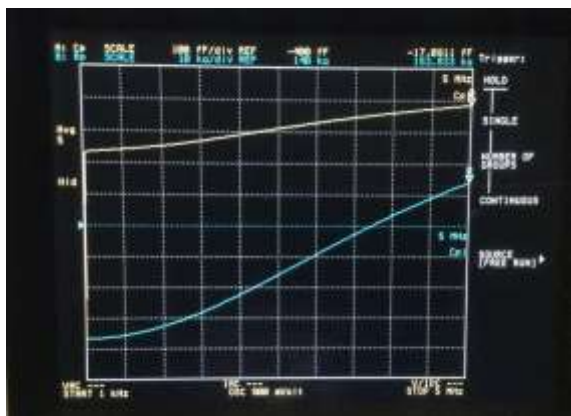


Рис. 3. Результаты измерений сопротивления резисторов VNA

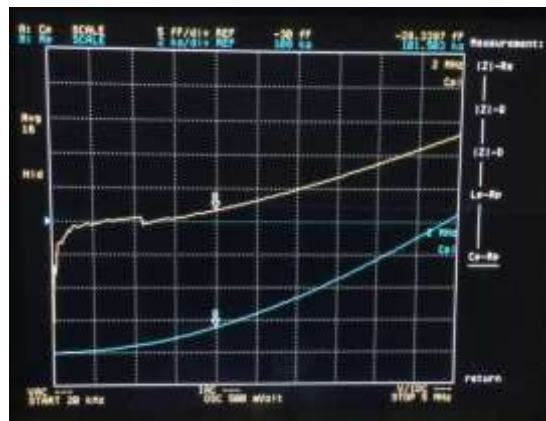


Рис. 4. Результаты измерений сопротивления резисторов VSMP

Приведенные результаты показали, что характеристики всех исследованных резисторов оказались не только гладкими функциями до частоты 5 МГц, но при частотах до 2 МГц могут быть представлены квадратичными функциями. Этот результат является неожиданным, но весьма полезным, поскольку даёт возможность очень простой оценки частотной поправки резисторов при частоте 1592 Гц.

Относительное значение частотной поправки при частотах f_1 и f_2 связаны соотношением

$$(\delta_2) = (\delta_1) \cdot (f_2 / f_1)^2,$$

где $\delta_2 = (R_2 - R_0)/R_0$, R_0 – сопротивление при частоте 0 (постоянный ток), R_2 – сопротивление при частоте f_2 .

Повторяемость многократных измерений каждого из резисторов при фиксированной частоте находится в пределах оценки неопределенности измерителя импеданса с учетом выполненной предварительно аттестацией.

Частотная поправка сопротивление сборки из чип-резисторов значительно (приблизительно в 10 раз) меньше поправки герметизированного резистора в корпусе, заполненном маслом.

Относительная частотная поправка для сборки чип-резисторов VSMP при частоте 1592 Гц составляет $9,4 \cdot 10^{-9}$, поправка для резистора VHS 516-4 № 1 при той же частоте составляет $92 \cdot 10^{-9}$.

Относительная неопределенность полученных результатов оценивается приблизительно как (8–10) % измеренного значения, но эта оценка является весьма консервативной и требует проведения более тщательного анализа составляющих бюджета неопределенности, связанных с определением функциональной зависимости частотной поправки от частоты.

V. ВЫВОДЫ

Рассмотрена и экспериментально исследована возможность применения метода частотной экстраполяции для определения весьма малых частотных поправок резисторов квадратурного моста. Ранее метод использовался только в тех случаях, когда функция зависимости поправки от частоты была установлена предварительно на основе расчёта остаточных параметров. Полученные результаты позволят существенно сократить объем работ по созданию аппаратуры для воспроизведения единицы электрической емкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kibble B.P., Rayner G.H. Coaxial AC Bridges. Bristol: Adam Hilger Ltd.; 1984. (Presently available from NPL, Teddington, TW11 0LW, U.K. www.npl.co.uk)
- [2] G.W. Small, J.R. Fiander and P.C. Coogan. A bridge for the comparison of resistance with capacitance at frequencies from 200 Hz to 2 kHz. Metrologia 38(4):363 · March 2003
- [3] S.A. Awan, R.G. Jones and B.P. Kibble, 2003 “Evaluation of coaxial bridges systems for accurate determination of the Farad from the DC quantum Hall effect” Metrologia vol. 40, pp. 264–270.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] F. Delahaye and R. Goebel. Evaluation of the frequency dependence of the resistance and capacitance standards in the BIPM quadrature bridge. // IEEE Trans. Instrum. Meas. April 2005. vol. 54, no. 2,
- [7] P.C. Coogan, J.M. Darlow, J.R. Fiander and G. W. Small, “200 kΩ AC resistance transfer standard,” Metrologia 38 503-507, 2001.
- [8] S,hakil Avan, Bryan Kibble and Juergen Schurr, “Coaxial electrical circuits for interference-free measurements”, Publ. by the Institution of Engineering and Technology, London, UK
- [9] Han Jun Kim, Rae Duk Lee, and Yu. P. Semenov, “Resistors With Calculable Frequency Dependencies Up to 1 MHz,” IEEE Trans. Instrum. Meas. vol. 56, no. 2, pp. 453-457, 2007.
- [10] Yu.P. Semenov, O.A. Shvedov, “Multifilar Resistors from DC up to 30 MH”, CPEM2018 Digest Paris France July 8 -13, pp.750-751