

УДК 621.317.33

Э.В. Семенов, О.Ю. Малаховский

## Измерение больших значений добротности емкостных объектов прямым методом с использованием специальной калибровки измерителя импеданса

Рассмотрена проблема измерения добротности величиной более 1000. Указаны максимальные значения добротности емкостных объектов, при которых современные измерители импеданса дают удовлетворительную погрешность измерения добротности. Показано, что с применением предлагаемого подхода к калибровке измерителей импеданса верхняя граница диапазона измерения добротности увеличивается на два порядка при сохранении приемлемой погрешности измерения.

**Ключевые слова:** добротность, измерение, варикапы, конденсаторы, малые потери.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-4-11-16

Добротность (потери) является ключевым параметром ряда электрорадиоэлементов, таких, например, как варикапы и конденсаторы.

Существует большое количество различных методов измерения добротности и тангенса угла потерь [1]. Наилучшие результаты дают методы, при которых внутри исследуемого диэлектрика возбуждается резонанс того или иного типа [2–3]. Однако такие методы непригодны, если нужно измерить потери не материала, а прибора (варикапа, конденсатора), причем на относительно низких частотах.

При измерении добротности приборов емкостной объект включается в контур с индуктивным характером импеданса. Это может быть катушка индуктивности [4] либо линия передачи [5]. При этом потери в индуктивной части контура являются значимыми. Для их снижения в [6] предлагается охлаждение индуктивности до температуры жидкого азота.

Все резонансные методы неудобны тем, что при необходимости измерения добротности на фиксированной частоте для объекта с новым значением емкости требуется разрабатывать новую резонансную систему. Поэтому практически удобным является прямой метод измерения добротности – на измерителе импеданса определяют комплексное сопротивление объекта измерения, из которого и находят добротность. Однако установки, на которых данным методом можно измерять добротность порядка 1000 или более, уникальны [7]. На серийных измерителях импеданса измерять такую добротность нельзя.

Существует и ряд нетрадиционных методов измерения добротности. К ним, например, относится вычисление добротности диэлектрического материала по результатам измерения ослабления, вносимого линией передачи с этим материалом [8]. Уменьшения погрешности измерения можно также достигать за счет преобразования результатов измерения из частотной области во временную с последующей обработкой [9]. Потенциально хорошие результаты обещает также короткоимпульсный метод характеристики емкостных объектов [10–12]. Однако перечисленные подходы находятся только в стадии становления.

Таким образом, актуальным является уменьшение погрешности измерения добротности прямым методом.

Цель настоящей статьи – рассмотреть метод дополнительной калибровки измерителя импеданса, при котором удается существенно уменьшить погрешность измерения больших значений добротности емкостных объектов.

### Метрологические свойства современных измерителей импеданса

Практически важной для характеристики емкостных объектов (в частности, варикапов) является частота 50 МГц. Для данной частоты измерители импеданса выполняются либо по четырехпроводной схеме (например, Wayne Kerr 6500B), либо как рефлектометры (Agilent E4991A). Последний гораздо удобней в эксплуатации, так как имеет ряд высококачественных присоединительных устройств, однако погрешность измерения добротности получается неудовлетворительной.

Штатно в измерителе импеданса Agilent E4991A предусмотрено два режима калибровки: short / open / load (далее – SOL) и short / open / load / low loss capacitor (далее – SOLC). Следует, однако, учитывать, что четыре калибровочных меры применить одновременно невозможно, так как при калибровке определяются параметры взаимного четырехполюсника погрешностей, в матрице которого всего три независимых элемента [13].

Из руководства к прибору Agilent E4991A [14] следует, что калибровка SOLC дает меньшую погрешность измерения добротности. Исследования, однако, показывают, что производитель не указал важное условие: данное преимущество реализуется только на частотах выше 400 МГц. На рис. 1 приведены измерения частотной зависимости тангенса угла потерь  $D = 1/Q$  калибровочного конденсатора с малыми потерями (из набора калибровочных мер Agilent E4991A) для калибровки SOL и SOLC. Действительное значение  $D$  калибровочного конденсатора принимается равным нулю (конденсатор с воздушным диэлектриком). Из рис. 1 видно, что преимущество от применения калибровки SOLC начи-

нается только от 400 МГц. Таким образом, применение калибровки SOLC на интересующей нас частоте 50 МГц бессмысленно.

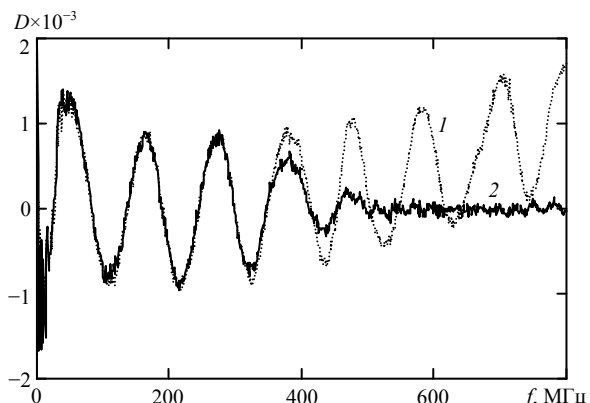


Рис. 1. Измеренная на приборе Agilent E4991A частотная зависимость тангенса угла потерь калибровочного конденсатора с малыми потерями при калибровках SOL (кривая 1) и SOLC (кривая 2)

Относительная погрешность измерения добротности при выполнении калибровки SOL равна [14]:

$$\delta Q = \pm(E_a + E_b)Q_x, \quad (1)$$

где  $Q_x$  – измеренное значение добротности;  $E_a$  – основная относительная погрешность измерения (0,65% в диапазоне частот до 100 МГц);  $E_b$  – относительная погрешность, возникающая из-за остаточной (после калибровки) погрешности измерения импеданса короткого замыкания и холостого хода.  $E_b$  находится как сумма относительных погрешностей измерения импеданса короткого замыкания и холостого хода:

$$E_b = \pm(Z_s/|Z_x| + Y_o/|Z_x|),$$

где  $Z_x$  – импеданс объекта измерения;  $Z_s$  – абсолютная погрешность измерения импеданса короткого замыкания;  $Y_o$  – абсолютная погрешность измерения адмиттанса холостого хода. Для Agilent E4991A на частоте 50 МГц  $Z_s = 38$  мОм,  $Y_o = 10$  мкСм. Для практически важного диапазона емкостей 2,5–5 пФ получается  $E_b = 1,3$ –0,64%.

Будем считать допустимой относительную погрешность измерения, равную 30%. Подставив это значение в (1) и учитывая приведенные значения  $E_{a,b}$ , получим для емкостей 2,5–5 пФ на частоте 50 МГц верхнюю границу диапазона измерения добротности 15–23, что не удовлетворяет большинству задач по измерению добротности.

**Источники остаточной погрешности измерения добротности в измерителях импеданса**  
Проанализируем, что является источником большой остаточной (после калибровки) погрешности измерения.

Прибором Agilent E4991A напрямую измеряется коэффициент отражения, прочие параметры вычисляются из него. Поэтому рассмотрим зависимость погрешности измерения коэффициента отражения от значения коэффициента отражения (табл.).

#### Зависимость погрешности измерения коэффициента отражения от значения коэффициента отражения $\Gamma$

Мера	Действительное значение $\Gamma$		Модуль абсолютной погрешности измерения $\Gamma$
	Модуль	Фаза	
Load	0	–	$4 \times 10^{-7}$
Short	1	$180^\circ$	$8 \times 10^{-8}$
Open	1	$-0,148^\circ$	$3 \times 10^{-7}$
Low loss cap.	1	$-3,44^\circ$	$3 \times 10^{-5}$

Результаты в таблице приведены для частоты 50 МГц. Результат измерения получен при усреднении 99900 наблюдений, поэтому составляющую погрешности, связанную с тепловыми шумами измерительных усилителей Agilent E4991A, можно не учитывать. Измерения проводятся в отношении мер из комплекта прибора, поэтому действительное значение их коэффициента отражения известно. Первые три меры (short, open, load) используются при калибровке прибора. Четвертая (low loss capacitor) в калибровке не участвовала.

Из таблицы видно, что для мер, участвовавших в калибровке, погрешность измерения коэффициента отражения составляет порядка  $10^{-7}$ , а для меры, не участвовавшей в калибровке, – порядка  $10^{-5}$ . Другими словами, остаточная (после калибровки) погрешность измерения связана, в основном, с отличием импеданса объекта измерения от импеданса калибровочных мер.

#### Предлагаемый метод калибровки для прецизионного измерения добротности прямым методом

Для того чтобы уменьшить остающуюся после калибровки погрешность измерения, предлагается использовать калибровочную меру, импеданс которой максимально близок к импедансу объекта измерения. Для емкостных объектов измерения роль такой калибровочной меры будут выполнять конденсаторы, емкость которых  $C$  близка к емкости объекта измерения.

Вычисляемую с использованием калибровочного конденсатора поправку удобнее всего определять в отношении последовательного сопротивления потерь, а не добротности, так как в этом случае она получается аддитивной. Поправка также будет аддитивной и в отношении тангенса угла потерь, однако последовательное сопротивление потерь удобнее и по другой причине. Добротность конденсаторов с малыми потерями определяется, в основном, электропроводностью их обкладок, которую удобнее характеризовать также последовательным сопротивлением потерь.

Таким образом, мы определяем поправку  $DR$ , вычисляемую как разность между измеренным значением последовательного сопротивления потерь калибровочного конденсатора  $R_{ик}$  и его действительным последовательным сопротивлением потерь  $R_k$ :

$$DR = R_{ик} - R_k. \quad (1)$$

Последовательное сопротивление потерь объекта измерения  $R$  определяют по формуле

$$R = R_{и} - DR, \quad (2)$$

где  $R_n$  – неисправленное последовательное сопротивление потерь объекта измерения. Далее рассчитывается добротность объекта измерения  $Q$  по формуле

$$Q = 1/(2\pi fCR).$$

#### Методика измерения последовательного сопротивления потерь калибровочных конденсаторов

Предлагаемый метод калибровки подразумевает, что последовательное сопротивление потерь калибровочного конденсатора известно. С другой стороны, разнообразие объектов измерения потребует и широкой номенклатуры калибровочных конденсаторов. Практический выход из данной ситуации состоит в том, чтобы в качестве калибровочных конденсаторов использовать конденсаторы общего применения, определив каким-либо образом их последовательное сопротивление потерь.

Предлагается следующая методика измерения последовательного сопротивления потерь калибровочных конденсаторов.

Во-первых, исходя из описания производителя, отбирают конденсаторы, последовательное сопротивление потерь которых частотно-независимо примерно на декаду вверх от частоты измерения добротности (в нашем случае 50 МГц). Например, для конденсатора Murata GJM1555C1H5R0WB01 номинальной емкостью 5,1 пФ производитель указывает [15], что номинальное последовательное сопротивление потерь конденсатора равно 0,10 Ом в диапазоне частот до 980 МГц. С физической точки зрения это означает, что основным фактором потерь в данном диапазоне частот является электропроводность обкладок  $R_k$ .

Дополнительно выполнение данного условия можно подтвердить, наблюдая неравномерность частотной зависимости последовательного сопротивления потерь по результатам ее наблюдения на измерителе импеданса.

Во-вторых, выбирают частоту, на которой будет оцениваться электропроводность обкладок калибровочного конденсатора. Она может быть любой в пределах равномерного участка сопротивления потерь конденсатора.

Однако для того чтобы иметь малую погрешность измерения, обусловленную калибровкой SOLC, выберем частоту измерения, равную 550 МГц.

Как следует из [14], при использовании калибровки SOLC и для больших значений добротности абсолютная погрешность измерения последовательного сопротивления потерь на приборе Agilent E4991A выражается формулой

$$\Delta R = E_c / (2\pi fC),$$

где  $E_c$  – относительная погрешность измерения угла потерь:  $E_c = \pm(6 \times 10^{-4} + 8 \times 10^{-11}f)$ . Для частоты 550 МГц получается  $E_c = 1,0 \times 10^{-3}$ .

Для измеряемых емкостей 5 пФ получаем  $\Delta R_k = \pm 0,06$  Ом.

#### Оценивание остаточной погрешности измерения при использовании предлагаемой калибровки

Остаточная погрешность измерения с применением предлагаемой калибровки будет зависеть от трех факторов.

Первый фактор – шумы измерительного тракта измерителя импеданса. Влияние этого фактора можно нивелировать за счет усреднения, однако должно быть определено минимальное количество усредняемых наблюдений, при котором будет обеспечена заданная погрешность.

Второй фактор – долговременная (десять минут – часы) нестабильность коэффициентов усиления и смещений в измерительном тракте измерителя импеданса, вызванная изменением параметров окружающей среды и питания. Эту нестабильность необходимо оценить.

Третий фактор – отличие импедансов объекта измерения и калибровочного конденсатора. В общем случае значимость этого фактора необходимо оценивать. Мы, однако, рассмотрим случай, когда несоответствие импеданса объекта и меры можно сделать весьма малым. Это задача измерения добротности варикапов с малыми потерями. В первом приближении соответствие импедансов обеспечивается выбором емкости калибровочного конденсатора равной номинальной емкости варикапа. Далее перед измерением добротности емкость варикапа регулировкой напряжения на нем устанавливается равной емкости калибровочного конденсатора. Поэтому в настоящей работе данным фактором погрешности мы пренебрегаем.

Чтобы оценить необходимое количество усредняемых наблюдений, необходимо выполнить многократные наблюдения последовательного сопротивления потерь на приборе Agilent E4991A при требуемой частоте измерения (50 МГц) в отношении объекта с нужной емкостью.

Для примера выполним указанные наблюдения в отношении конденсатора Murata GRM1885C1H5R1C. Действительное значение емкости конденсатора составляет 5,0 пФ. На рис. 2 приведено 800 однократных наблюдений сопротивления потерь данного конденсатора на частоте 50 МГц. Среднеквадратическое отклонение данных наблюдений составляет 0,20 Ом. Коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 95% составляет 1,96. Таким образом, предельное значение абсолютной случайной погрешности  $R_{сл}$  для одиночного измерения составит  $\pm 0,39$  Ом. Если мы будем усреднять 800 измерений, то случайная погрешность результата измерения  $R_{сл}$  будет равна  $\pm 0,014$  Ом.

В соответствии с (1)–(2) сопротивление потерь объекта измерения вычисляется по формуле

$$R = R_n - R_{нк} + R_k.$$

Погрешность измерения  $\Delta R$  следует искать в виде

$$\Delta R = \pm(\sqrt{2}R_{сл} + \Delta R_n + \Delta R_k), \quad (3)$$

где  $\Delta R_{сл}$  – случайная погрешность измерения последовательного сопротивления потерь калибровочного

конденсатора или объекта измерения,  $\Delta R_n$  – погрешность измерения разности  $R_n - R_{нк}$ , возникающая за счет медленного дрейфа параметров окружающей среды и питания прибора,  $\Delta R_k$  – погрешность действительного значения последовательного сопротивления потерь калибровочного конденсатора (в нашем примере  $\pm 0,06$  Ом). Случайные погрешности измерения сопротивления потерь калибровочного конденсатора и объекта измерения статистически независимы и хорошо укладываются в нормальный закон (рис. 2), поэтому в (3) указано их среднеквадратическое значение. Закон распределения  $\Delta R_n$  и  $\Delta R_k$  неизвестен, поэтому в (3) они входят аддитивно.

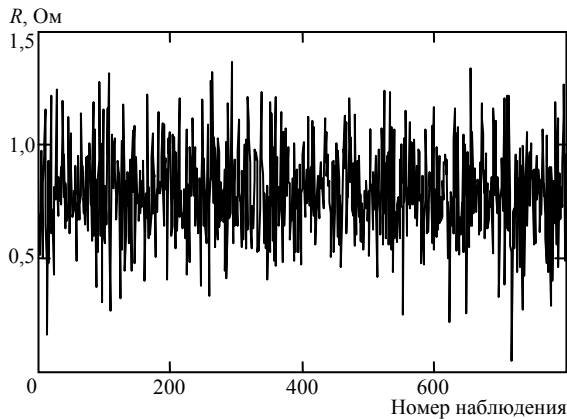


Рис. 2. 800 однократных наблюдений последовательного сопротивления потерь конденсатора Murata GRM1885C1H5R1C (частота измерения 50 МГц)

При усреднении 800 наблюдений слагаемое  $\sqrt{2}R_{сл}$  в (3) получается равным  $\pm 0,02$  Ом.

Для определения  $\Delta R_n$  нужно выполнить долговременные наблюдения последовательного сопротивления потерь объекта с нужной емкостью. На рис. 3 приведена зависимость результата измерения последовательного сопротивления потерь Murata GRM1885C1H5R1C (5,0 пФ) от времени. Измерения выполнены на частоте 50 МГц. При этом каждый результат измерения получен усреднением 800 наблюдений. Измерения выполнялись в одной из обычных лабораторий АО «НИИПП» без кондиционирования воздуха, экранирования и стабилизации сетевого напряжения. Штриховыми линиями приведены границы погрешности измерений для  $\Delta R_n = \pm 0,03$  Ом. Видно, что результаты измерения укладываются в эти границы на интервале времени 16 мин. Таким образом, мы можем принять  $\Delta R_n = \pm 0,03$  Ом, если установим, что калибровка прибора посредством калибровочного конденсатора будет выполняться каждые 15 мин. Лучшие результаты могут быть получены в специальных помещениях со стабилизированными параметрами окружающей среды и питания прибора.

Теперь получаем, что общая погрешность измерения последовательного сопротивления потерь на приборе Agilent E4991A с применением предлагаемой калибровки составит 0,11 Ом. Для емкости объекта измерения 5 пФ и добротности 1800 это дает

относительную погрешность измерения добротности  $\pm 30\%$ .

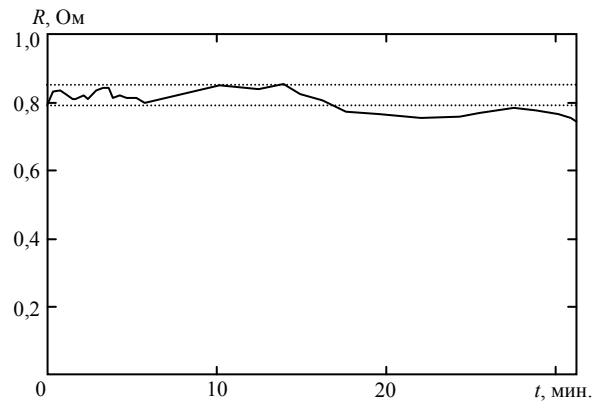


Рис. 3. Долговременный дрейф результата измерения последовательного сопротивления потерь конденсатора Murata GRM1885C1H5R1C на измерителе импеданса Agilent E4991A (частота измерения 50 МГц). Пунктирные линии – доверительный интервал для погрешности измерения  $\pm 0,03$  Ом

### Заключение

Основным источником остаточной погрешности (после калибровки) в измерителях импеданса является отличие импеданса объекта измерения от импеданса калибровочных мер.

Чем бы ни было вызвано такое отличие, очевидным подходом к уменьшению остаточной погрешности является использование калибровочных мер, импеданс которых максимально близок к импедансу объекта.

Универсальным решением в этом смысле при измерении добротности емкостных объектов является применение в составе калибровочных мер конденсатора с малыми потерями. Такое решение применяется в современных измерителях импеданса, например, Agilent E4991A: к мерам короткого замыкания, холостого хода и согласованной нагрузки добавляется конденсатор с малыми потерями.

Однако все четыре меры не могут быть использованы одновременно, так как система калибровочных уравнений становится переопределенной. Для каждой частоты используется только три меры.

Производитель прибора Agilent E4991A определил, что конденсатор с малыми потерями включается в состав калибровочных мер только начиная с частоты 400 МГц. В практически важном диапазоне до 400 МГц преимуществ от такой калибровки получить невозможно. В итоге на частоте 50 МГц для емкости порядка нескольких пикофарад максимальная измеряемая добротность составляет всего около 20 (при относительной погрешности измерения  $\pm 30\%$ ).

Более эффективным, хотя и менее универсальным, решением является применение калибровочной меры, емкость которой максимально близка к емкости объекта измерения. Диапазон емкостей таких мер, конечно, должен быть широким, поэтому практически реальным представляется использование конденсаторов общего применения, добротность которых будет определена заранее.

Для определения добротности калибровочного конденсатора предлагается выбирать, исходя из описания производителя, конденсаторы с равномерным последовательным сопротивлением потерь в области частот примерно на декаду выше частоты измерения добротности объекта измерения. Такие конденсаторы имеются на рынке в достаточном количестве. Далее, их действительное значение сопротивления потерь измеряется прибором Agilent E4991A на частоте не менее 550 МГц, где погрешность измерения получается приемлемой.

Собственно добротность объекта измерения определяется на частоте 50 МГц с использованием поправки, которая находится как разность измеренного на частоте 50 МГц последовательного сопротивления потерь калибровочного конденсатора и его действительного сопротивления потерь.

Если повторять описанную калибровку в условиях обычной лаборатории не реже каждых 15 мин, то для объекта измерения емкостью 5 пФ на частоте 50 МГц будет реализован диапазон измерения добротности до 1800 при погрешности измерения не более  $\pm 30\%$ . Таким образом, верхняя граница измерения добротности прибора Agilent E4991A увеличивается на два порядка.

#### Литература

1. Гусев Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопии: учеб. пособие. – Казань, 2008. – 112 с.
2. Krupka J. Measurements of the Complex Permittivity of Low Loss Polymers at Frequency Range From 5 GHz to 50 GHz // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2016. – Vol. 26, No. 6. – P. 464–466.
3. Cavity Resonator for Dielectric Measurements of High- $\epsilon$ , Low Loss Materials, Demonstrated with Barium Strontium Titanate Ceramics / Q.R. Marksteiner, M.B. Treiman, C.-F. Chen et al. // Review of Scientific Instruments. – 2017. – Vol. 88, No. 6. – 064704. – 6 p.
4. ГОСТ 18986.19–73. Варикапы. Метод измерения добротности. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 19 с.
5. Ingalls M. Measurement of the Characteristics of High-Q Ceramic Capacitors / M. Ingalls, K. Gordon // IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. – 1987. – Vol. CHMT-12, No. 4. – P. 487–495.
6. New Complex Permittivity Measurement Method at Low Frequency for Measuring Low-Loss Materials Using High Q-value LC Resonator Immersed in Liquid Nitrogen / H. Suzuki, T. Kobayashi, H. Takino, T. Nojima // IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Binjiang, China, 10–12 May 2011. – Binjiang, China, 2011. – 4 p.
7. Абросимов Э.А. Измерение параметров электрических цепей с сосредоточенными постоянными / Э.А. Абросимов, А.А. Мамонов // Измерительная техника. – 1974. – № 8. – С. 30–32.
8. Arz U. Loss Tangent Extraction Based on Equivalent Conductivity Derived from CPW Measurements // 18<sup>th</sup> IEEE Workshop on Signal and Power Integrity. Ghent, Belgium, 11–14 May 2014. – Ghent, Belgium, 2014. – 4 p.
9. Savin A.A. Additional Error Correction for Two-Port Vector Network Analyzers / A.A. Savin, V.G. Guba // Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo '2014) : Proc. of 24<sup>th</sup> Int. conf. Sevastopol, Russia, 7–13 September 2014. – Sevastopol : Veber, 2014. – Vol. 2. – P. 900–901.

10. Назаров М.А. Сопоставление квазистатической и неквазистатической видеоимпульсной модели конденсатора при различном уровне тестовых воздействий / М.А. Назаров, Э.В. Семенов // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 50–52.

11. Semyonov E.V. Ultra-Short Pulse Characterization of Dielectrics with Simultaneous Evaluation of Conduction, Relaxation Losses and Dielectric Nonlinearity // Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo '2014): Proc. of 24<sup>th</sup> Int. conf. Sevastopol, Russia, 7–13 September 2014. – Sevastopol : Veber, 2014. – Vol. 2. – P. 912–913.

12. Nazarov M.A. Specificity of Inaccuracy of Indirect Measurements of Capacitance-Voltage Characteristics by Means of Ultra-Short Pulse Method / M.A. Nazarov, E.V. Semyonov // Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo '2014) : Proc. of 24<sup>th</sup> Int. conf. Sevastopol, Russia, 7–13 September 2014. – Sevastopol: Veber, 2014. – Vol. 2. – P. 948–949.

13. Ferrero A. Multiport Vector Network Analyzer Calibration: A General Formulation / A. Ferrero, F. Sanpietro, U. Pisani // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1994. – Vol. 42, No. 12. – P. 2455–2461.

14. Agilent E4991A RF Impedance/Material Analyzer. Operation Manual. – 9<sup>th</sup> ed. / Agilent Technologies. – 2012. – 488 p. – URL: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/E4991-90090.pdf> (дата обращения: 02.12.2018).

15. SimSurfing (WEB). Multilayer Ceramic Capacitors / Murata Manufacturing Corporation. – URL: <http://ds.murata.co.jp/simsurfing/mlcc.html?lcid=en-us> (дата обращения: 02.12.2018).

#### Семенов Эдуард Валерьевич

Д-р техн. наук, доцент, ст. науч. сотр. отд. полупроводниковых приборов АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (АО «НИИПП»), профессор каф. радиоэлектроники и систем связи (РСС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Красноармейская ул., д. 99 а, г. Томск, Россия, 634034 Тел.: +7 (382-2) 41-33-65 Эл. почта: edwardsemyonov@narod.ru

#### Малаховский Олег Юрьевич

Канд. физ.-мат. наук, нач. лаб. 42 отд. полупроводниковых приборов АО «НИИПП» Красноармейская ул., д. 99 а, г. Томск, Россия, 634034 Тел.: +7 (382-2) 28-84-92 Эл. почта: malakhovskiy\_oy@niipp.ru

Semyonov E.V., Malakhovskij O.Yu.

#### Measurement of High-Values Quality Factor of Capacitive Objects by the Direct Method Using a Special Calibration of Impedance Meter

The problem of the quality factor measurement of more than 1000 is considered. The maximum values of the capacitive objects Q-factor are indicated, at which modern impedance meters give a satisfactory error. It is shown that the proposed approach to the calibration of impedance meters increases the upper limit of the Q-factor measurement range by two orders of magnitude while maintaining an acceptable measurement error.

**Keywords:** Q-factor, measurement, variable capacitance diodes, capacitors, small losses.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-4-11-16

## References

1. Gusev Ju.A. *Osnovy dijelektricheskoy spektroskopii : uchebnoe posobie* [Fundamentals of dielectric spectroscopy: a tutorial]. Kazan', 2008. 112 p. (in Russ.).
2. Krupka J. Measurements of the Complex Permittivity of Low Loss Polymers at Frequency Range From 5 GHz to 50 GHz. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, vol. 26, no. 6, pp. 464–466.
3. Marksteiner Q.R., Treiman M.B., Chen C.-F., Haynes W.B., Reiten M.T., Dalmas D., Pulliam E. Cavity Resonator for Dielectric Measurements of High- $\epsilon$ , Low Loss Materials, Demonstrated with Barium Strontium Zirconium Titanate Ceramics. *Review of Scientific Instruments*, 2017, vol. 88, no. 6, 064704, 6 p.
4. GOST 18986.19-73. *Varikapy. Metod izmerenija dobrotnosti*. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov, 2004. 19 p.
5. Ingalls M., Gordon K. Measurement of the Characteristics of High-Q Ceramic Capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1987, vol. CHMT-12, no. 4, pp. 487–495.
6. Suzuki H., Kobayashi T., Takino H., Nojima T. New Complex Permittivity Measurement Method at Low Frequency for Measuring Low-Loss Materials Using High Q-value LC Resonator Immersed in Liquid Nitrogen. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Binjiang, China, 2011. 4 p.
7. Abrosimov E.A., Mamonov A.A. Measurement of Parameters of Electrical Circuits with Lumped Constants. *Izmeritel'naya Tekhnika*, 1974, no. 8, pp. 30–32.
8. Arz U. Loss Tangent Extraction Based on Equivalent Conductivity Derived from CPW Measurements. *18<sup>th</sup> IEEE Workshop on Signal and Power Integrity*. Ghent, Belgium, 2014. 4 p.
9. Savin A.A., Guba V.G. Additional Error Correction for Two-Port Vector Network Analyzers. *Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo '2014)*. Proc. of 24<sup>th</sup> Int. conf. Sevastopol, Russia, Veber, 2014, vol. 2, pp. 900–901.
10. Nazarov M.A., Semyonov E.V. Investigation of Ultra-Short Pulsed Capacitor Model. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 50–52 (in Russ.).
11. Semyonov E.V. Ultra-Short Pulse Characterization of Dielectrics with Simultaneous Evaluation of Conduction, Relaxation Losses and Dielectric Nonlinearity. *Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo '2014)*. Proc. of 24<sup>th</sup> Int. conf. Sevastopol, Russia, Veber, 2014, vol. 2, pp. 912–913.
12. Nazarov M.A., Semyonov E.V. Specificity of Inaccuracy of Indirect Measurements of Capacitance-Voltage Characteristics by Means of Ultra-Short Pulse Method. *Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo '2014)*. Proc. of 24<sup>th</sup> Int. conf. Sevastopol, Russia, Veber, 2014, vol. 2, pp. 948–949.
13. Ferrero A., Sanpietro F., Pisani U. Multiport Vector Network Analyzer Calibration: A General Formulation. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1994, vol. 42, no. 12, pp. 2455–2461.
14. *Agilent E4991A RF Impedance/Material Analyzer. Operation Manual. – 9-th ed.* Agilent Technologies, 2012. 488 p. Available at: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/E4991-90090.pdf> (accessed: December 02, 2018).
15. *SimSurfing (WEB). Multilayer Ceramic Capacitors*. Murata Manufacturing Corporation. Available at: <http://ds.murata.co.jp/simsurfing/mlcc.html?lclid=en-us> (accessed: December 02, 2018).

**Edward V. Semyonov**

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,  
Senior Researcher of Semiconductor Devices Department,  
Research Institute of Semiconductor Devices,  
Professor of Department of Radiocommunication Systems,  
Tomsk State University of Control Systems  
and Radioelectronics  
99 a, Krasnoarmejskaja st., Tomsk, Russia, 634034  
Phone: +7 (382-2) 41-33-65  
Email: edwardsemyonov@narod.ru

**Oleg Yu. Malakhovskij**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Head of Laboratory of Semiconductor Devices Department,  
Research Institute of Semiconductor Devices  
99 a, Krasnoarmejskaja st., Tomsk, Russia, 634034  
Phone: +7 (382-2) 28-84-92  
Email: malakhovskiy\_oy@niipp.ru