

С. Д. Загайнов^{1}, А. Е. Мандруева¹, М. М. Попов¹, Е. Ю. Ульянов¹, Д. В. Рябчинский¹,
А. М. Шилов^{1, 2}, А. С. Толстиков^{1, 3}*

Анализ возможности расширения функций ГПЭ ГЭТ 139-2013 за счет обеспечения воспроизведения единицы электрической добротности в диапазоне номинальных значений от 5 до 1500 и диапазоне частот от 0,05 до 500 МГц

¹ Западно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», г. Новосибирск,
Российская Федерация

² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,
Российская Федерация

³ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: otдел_3@sniim.ru

Аннотация. В настоящей работе выполнен анализ возможности расширения диапазона номинальных значений и диапазона рабочих частот Государственного первичного эталона (ГПЭ) единицы электрической добротности ГЭТ 139-2013. Детально описан существующий метод воспроизведения единицы электрической добротности в диапазоне номинальных значений от 5 до 1200 и в диапазоне частот от 0,05 до 300 МГц. Рассмотрены актуальные способы расширения диапазона номинальных значений ГЭТ 139-2013 до 1500 и возможности расширения диапазона рабочих частот до 500 МГц. Данная работа позволяет реализовать работы по совершенствованию ГЭТ 139-2013 и создать задел для дальнейшего расширения функциональных возможностей эталона для обеспечения единства измерений в области измерения электрической добротности до 5000 и выше на частотах свыше 500 МГц.

Ключевые слова: электрическая добротность, государственный первичный эталон, векторный анализатор цепей, диэлектрический резонатор

S. D. Zagainov^{1}, A. E. Mandrueva¹, M. M. Popov¹, E. Yu. Ulyanov¹, D. V. Ryabchinsky¹,
A. M. Shilov^{1, 2}, A. S. Tolstikov^{1, 3}*

Analysis of the possibility of expanding the functionality of GPE GET 139-2013 by providing reproduction of the unit of electrical quality in the range of nominal values from 5 to 1500 and the frequency range from 0.05 to 500 MHz

¹ West-Siberian Branch of FSUE "VNIIFTRI", Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

³ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

*e-mail: otдел_3@sniim.ru

Abstract. In this paper, the analysis of the possibility of expanding the range of nominal values and the range of operating frequencies of the State Primary Standard of the unit of electrical quality of GET 139-2013 is carried out. The existing method of reproducing the unit of electrical quality in the range of nominal values from 5 to 1200 and in the frequency range from 0.05 to 300 MHz is described in detail. The current ways of expanding the range of nominal values of GET 139-2013 to 1500 and

the possibility of expanding the range of operating frequencies to 500 MHz are considered. This work makes it possible to implement work on improving GET 139-2013 and create a foundation for further expansion of the functionality of the standard to ensure the uniformity of measurements in the field of measuring electrical Q-factor up to 5000 and higher at frequencies over 500 MHz.

Keywords: electrical quality factor, state primary standard, vector circuit analyzer, dielectric resonator

Введение

Электрическая добротность является физической величиной, характеризующей потери электромагнитной энергии в колебательных системах.

Колебательные системы широко применяются в различных электротехнических и радиотехнических устройствах – в приемо-передающей, радиолокационной, телевизионной аппаратуре, системах наземной и спутниковой связи, в различной радиоизмерительной аппаратуре, в системах управления и обработки информации, в различной бытовой радиоаппаратуре и др.

В настоящее время единица электрической добротности активно применяется для контроля качества продукции изделий электронной компонентной базы [1, 2], а также для исследований полупроводниковых [3] и диэлектрических [4] материалов.

На территории РФ единство измерений в области измерения электрической добротности обеспечивает Государственный первичный эталон единицы электрической добротности ГЭТ 139-2013, который возглавляет государственную поверочную схему ГОСТ Р 8.868-2014. В метрологической цепочке, возглавляемой ГЭТ 139-2013, содержится 76 типов средств измерений (СИ), входящих в Госреестр СИ, из них 15 типов внесены за последние 5 лет. Регулярно проходят поверку 2217 СИ.

ГЭТ 139-2013 обеспечивает хранение, воспроизведение и передачу единицы электрической добротности в диапазоне номинальных значений от 5 до 1200 в диапазоне частот от 0,05 до 300 МГц. В связи с развитием радиоэлектронной промышленности актуальна задача по совершенствованию метрологического обеспечения в части расширения диапазона номинальных значений и диапазона рабочих частот.

С 2023 года в ФГУП «ВНИИФТРИ» выполняются работы по совершенствованию ГЭТ 139-2013 в целях расширения функциональных возможностей за счет обеспечения воспроизведения единицы электрической добротности в диапазоне номинальных значений от 5 до 1500 и диапазоне частот от 0,05 до 500 МГц. Согласно техническому заданию на совершенствование ГЭТ 139-2013, относительное среднеквадратическое отклонение не должно превышать 0,6 %, относительная неисключенная систематическая погрешность не должна превышать 5 %.

В настоящей работе рассматриваются способы расширения диапазона номинальных значений и диапазона рабочих частот, позволяющие реализовать работы по совершенствованию ГЭТ 139-2013.

Принцип работы ГЭТ 139-2013

Известные способы измерения электрической добротности подразделяются на мостовые методы и резонансные методы.

Опыт работ Западно-Сибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ» (ранее – ФГУП «СНИИМ») в области точных измерений электрической добротности показал, что мостовые цепи имеют преимущества с точки зрения достижения наименьших погрешностей перед резонансными цепями при измерении малых и средних значений добротностей при сравнительно невысоких частотах (до единиц мегагерц или несколько больших). Однако применение мостовых цепей для точных измерений добротностей на высоких частотах свыше 100 МГц является проблематичным.

В свою очередь резонансные методы можно разделить на три типа: метод измерения амплитуды при частоте экстремума амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) (применяется в куметрах), метод расстройки по емкости, метод расстройки по частоте.

Основным недостатком резонансных методов является то, что они требуют применения высокоточных и высокочувствительных вольтметров переменного тока.

Используемый в работе ГЭТ 139-2013 метод измерения добротности [5] основан на расстройке колебательного контура по частоте до двух произвольных уровней.

Сущность метода воспроизведения единицы добротности иллюстрируется на рис. 1.

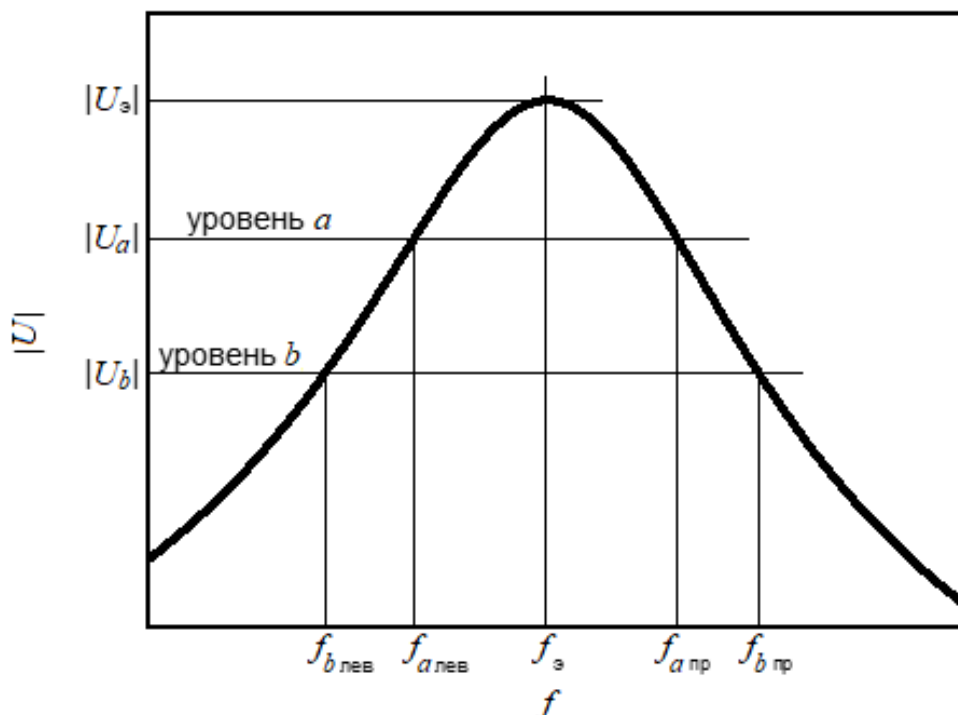


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика контура и метод расстройки частоты до двух произвольных уровней

Выбираются уровни напряжения U_a и U_b , отношение которых $A_{ab} = \frac{|U_a|}{|U_b|}$

должно быть известно с требуемой точностью. Далее находится частота $f_{a \text{ лев}}$ на левом склоне АЧХ контура, соответствующая напряжению U_a . Затем находится частота $f_{a \text{ пр}}$ на правом склоне АЧХ, соответствующая тому же уровню напряжения U_a . Далее устанавливается частота $f_{b \text{ лев}}$, соответствующая уровню напряжения U_b , и аналогично, как для уровня «а», находится частота $f_{b \text{ пр}}$, соответствующая тому же уровню напряжения U_b .

Частота экстремума f_3 может быть рассчитана по формуле:

$$f_3 = \sqrt{\frac{f_{a \text{ лев}}^2 + f_{a \text{ пр}}^2}{2}}$$

через частоты расстройки $f_{a \text{ лев}}$ и $f_{a \text{ пр}}$.

Соотношения, однозначно связывающие добротность контура с измеренными частотами расстройки $f_{a \text{ лев}}$, $f_{a \text{ пр}}$, $f_{b \text{ лев}}$, $f_{b \text{ пр}}$, напряжениями U_a , U_b и с частотой f_3 , учитывающие компенсацию частотного хода параметров контура, имеют вид:

$$Q_{3 \text{ лев}} = \sqrt{\frac{A_{ab}^2 - 1}{\left(1 - \frac{f_{b \text{ лев}}^2}{f_3^2}\right)^2 - A_{ab}^2 \left(1 - \frac{f_{a \text{ лев}}^2}{f_3^2}\right)^2} \times \frac{1}{2}} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{\left(1 - \frac{f_{b \text{ лев}}^2}{f_3^2}\right)^2 - A_{ab}^2 \left(1 - \frac{f_{a \text{ лев}}^2}{f_3^2}\right)^2}{A_{ab}^2 - 1}} \right\} \quad (1)$$

для левого склона резонансной кривой (рис. 1) и

$$Q_{3 \text{ пр}} = \sqrt{\frac{A_{ab}^2 - 1}{\left(1 - \frac{f_{b \text{ пр}}^2}{f_3^2}\right)^2 - A_{ab}^2 \left(1 - \frac{f_{a \text{ пр}}^2}{f_3^2}\right)^2} \times \frac{1}{2}} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{\left(1 - \frac{f_{b \text{ пр}}^2}{f_3^2}\right)^2 - A_{ab}^2 \left(1 - \frac{f_{a \text{ пр}}^2}{f_3^2}\right)^2}{A_{ab}^2 - 1}} \right\} \quad (2)$$

для правого склона резонансной кривой.

Результирующая величина Q_3 определяется как среднее значение добротностей, определенных по формулам (1) и (2):

$$Q_3 = \frac{Q_{3 \text{ лев}} + Q_{3 \text{ пр}}}{2}.$$

Используемый метод измерения добротности контура имеет следующие основные преимущества:

- все регулировки в измерительной цепи производятся только изменением частоты, что наиболее благоприятно с точки зрения автоматизации измерительного процесса;
- выбор отношения уровней напряжения в контуре не является критичным; выбор этого отношения диктуется возможностью его точного определения и получения оптимальной чувствительности схемы;
- не требуется высокоточных абсолютных измерений напряжений в широком диапазоне частот, т. к. в расчетные формулы входят только отношения двух напряжений.

Для повышения точности измерений на частотах свыше 100 МГц применяется коррекция значений добротности на собственную емкость эталонных катушек индуктивности [2]. Кроме того, собственную емкость можно определить с помощью анализатора импеданса (например, WK65120P или E4991B).

Таким образом, для измерений добротности на частоте 500 МГц должен быть опробован существующий метод измерения добротности с использованием коррекции на собственную емкость катушек индуктивности.

Способы расширения диапазона номинальных значений

Опыт предыдущих разработок и эксплуатации ГЭТ 139-2013 показал, что для существующей конструкции резонансного контура эталона значения электрической добротности до 1500 являются достижимыми не во всем диапазоне частот в силу использования мер электрической добротности индуктивного типа. Также с ростом частоты уменьшается максимально допустимые значения электрической добротности мер. При этом существующая конструкция эталона позволяет достичь заданных для совершенствования эталона показателей, не ухудшая значительно точностные характеристики. Для этого требуется разработка новой меры на 1500 единиц, а также резонансного контура и мер (меры), работающих на частотах от 300 до 500 МГц.

В то же время у промышленности есть запрос на измерение электрической добротности до 5000 с потенциалом увеличения.

Альтернативным способом достижения значений добротности более 1000 является определение параметров объемных резонаторов (коаксиальные, диэлектрические [7], гибридные [8]) с помощью векторных анализаторов цепей [9]. Иллюстрация применения векторного анализатора цепей для определения добротности в объемных резонаторах приведена на рис. 2. Резонансная частота и ширина, полученные по уровню -3 дБ, отмечены звездочками на графике амплитуды. Они показывают, что метод измерения добротности по уровню -3 дБ не является точным при наличии значительной утечки.

Собственная добротность объемных резонаторов зависит от их конструктивных особенностей. У диэлектрических резонаторов (ДР) добротность достигает 25 000 на частотах порядка 1 ГГц, что намного превышает показатели коаксиальных резонаторов, которые позволяют воспроизвести добротность не более

1 000. Особенностью ДР, позволяющей получить столь высокие значения добротности, является реализация эффекта полного внутреннего отражения на границе раздела диэлектрик/воздух при высоком значении относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_r \geq 10$. В связи с этим электромагнитные волны в ДР распространяются с малыми потерями, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta < 10^{-3}$, что эквивалентно высокой собственной добротности $Q \approx 1/\text{tg } \delta$.

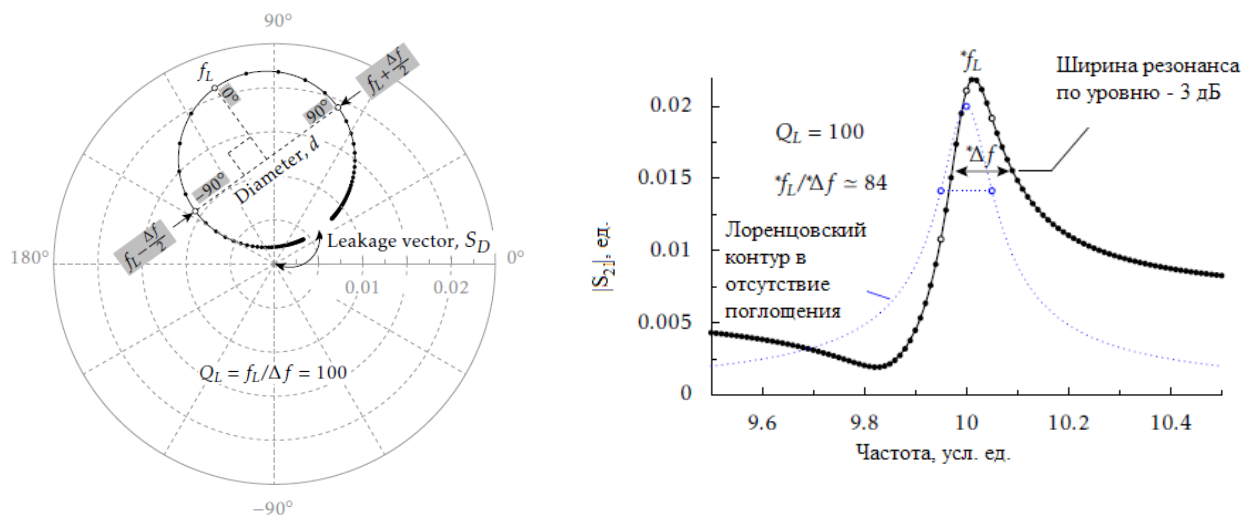


Рис. 2. Полярный (слева) и амплитудно-частотный (справа) графики передачи $|S_{21}|$ при резонансе [9]

С использованием алгоритмов аппроксимации данных достигнута неопределенность при измерении добротности менее 1 % [9].

Для реализации данного подхода потребуется освоить работу с диэлектрическими резонаторами на основе керамики с низкими диэлектрическими потерями [10]. Такие типы керамики выпускаются на территории РФ (например, АО «НЭВЗ-КЕРАМИКС»).

Следует отметить, что данный подход применим для достижения величины добротности до 5000 и выше на частотах свыше 300 МГц. Изыскания в данном направлении должны определить возможность для дальнейшего совершенствования ГЭТ 139-2013. Поэтому данный метод является наиболее перспективным с точки зрения формирования задела для обеспечения единства измерений в области измерения электрической добротности.

Заключение

В работе было установлено, что наиболее перспективным способом расширения диапазона номинальных значений и диапазона рабочих частот ГЭТ 139-2013 является создание и исследование диэлектрических резонаторов. Данный способ позволит достичь расширения диапазона номинальных значений единицы электрической добротности до 1500 и расширить диапазон рабочих частот до 500 МГц с обеспечением требуемых метрологических характеристик, а также

сформировать задел для обеспечения единства измерений в диапазоне до 5000 и выше на частотах свыше 500 МГц.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) в рамках Соглашения от 31.01.2023 № 172-11-2023-001.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В. Н. Литвиненко, И. П. Игнатенко, Н. А. Самойлов. Экспериментальное исследование зависимости добротности варикапа от его физических и электрических параметров // Биомедицинская инженерия и электроника. – 2014. – № 2(6). – С. 104–111.
2. Семенов, Э. В. Измерение больших значений добротности емкостных объектов прямым методом с использованием специальной калибровки измерителя импеданса / Э. В. Семенов, О. Ю. Малаховский // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 11–16. – DOI 10.21293/1818-0442-2018-21-4-11-16. – EDN YYSUOD.
3. Jong-Wan, Kim & Takao, Hidekuni & Sawada, Kazuaki & Makoto, Ishida. (2007). Integrated inductors for RF transmitters in CMOS/MEMS smart microsensor systems. *Sensors*. 7. 10.3390/s7081387.
4. Krupka, Jerzy & Tobar, Michael & Hartnett, John & Cros, Dominique & Le Floch, Jean-Michel. (2005). Extremely high-Q factor dielectric resonators for millimeter-wave applications. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*. 53. 702–712.
5. Абросимов Э.А., Малошенко О.Я., Шмидт В.И. Развитие методов измерения электрической добротности в колебательных контурах. Исследования в области измерений параметров электрических цепей с сосредоточенными постоянными на высоких частотах. Сборник научных трудов НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», Ленинград, 1982.
6. E. A. Abrosimov, I. V. Burehin, S. V. Eremtsova et al. Precise measurement of the objects self-capacitance of inductive nature // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering APEIE 2014: Proceedings, Novosibirsk, 02–04 октября 2014 года. – Novosibirsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014. – P. 217–219.
7. Геворкян, В. Объемные диэлектрические резонаторы – основные типы, характеристики, производители. Часть 1 / В. Геворкян, В. Кочемасов // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. – 2016. – № 4(154). – С. 62–77.
8. R. N. Clarke (Ed.) Guide to the characterisation of dielectric materials at RF and microwave frequencies. Tech. rep. The Institute of Measurement, Control, and The National Physical Laboratory, London, 2003.
9. Gregory, Andrew. (2021). Q-factor Measurement by using a Vector Network Analyser. 10.47120/npl.MAT58.
10. А.С. Толкачева, И.А. Павлова Технология керамики для материалов электронной промышленности: учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1 / Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 124 с.

© С. Д. Загайнов, А. Е. Мандруева, М. М. Попов, Е. Ю. Ульянов, Д. В. Рябчинский,
А. М. Шилов, А. С. Толстиков, 2023