

Исследование передачи единицы электрической емкости на частоте 300 МГц от ГПСЭ ГЭТ 107-2019

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

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

² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: otdel_3@sniim.ru

Аннотация. Выполнено исследование передачи единицы электрической емкости на частоте 300 МГц, реализованной на эталонной установке, входящей в состав государственного первичного специального эталона единицы электрической емкости ГЭТ 107-2019. В результате исследования установлено, что характеристики эталонной установки на частоте 300 МГц позволяют передавать единицу электрической емкости с относительной расширенной неопределенностью результата измерений не более $2 \cdot 10^{-4}$, что превосходит возможности национальных эталонов других стран.

Ключевые слова: электрическая емкость, компаратор, эталон, мера емкости

Investigation of the transfer of a unit of electrical capacity at the frequency of 300 MHz from GPSE GET 107-2019

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

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

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: otdel_3@sniim.ru

Abstract. A study of the transfer of a unit of electrical capacity at frequency of 300 MHz, implemented on a reference setup, which is part of the state primary special standard of the unit of electrical capacity GET 107-2019, was carried out. As a result of the study, it was found that the characteristics of the reference installation at a frequency of 300 MHz allow the transfer a unit of electrical capacity with a relative extended uncertainty of the measurement result of no more than $2 \cdot 10^{-4}$, which exceeds the capabilities of national standards of other countries.

Keywords: electric capacity, comparator, standard, measure of capacity

Введение

Единица электрической емкости на высоких частотах широко востребована в следующих областях технической деятельности:

– оборонный комплекс: при производстве элементной базы электронных систем и комплексов;

– атомная промышленность: для контроля производственных процессов при обогащении ядерного топлива;

– наука и технологии: разработка новых ВЧ-компонентов и систем, а также изделий на их основе;

– метрология и приборостроение: при создании эталонов и средств измерений электрических величин на высоких частотах;

– системы связи и телекоммуникации: обеспечение качества и надежности телекоммуникационной аппаратуры.

Единица электрической емкости на высоких частотах хранится и воспроизводится с наивысшей в Российской Федерации точностью Государственным первичным специальным эталоном единицы электрической емкости в диапазоне частот от 1 до 300 МГц ГЭТ 107-2019, утвержденным приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27.12.2019 № 3388 [1]. Передача единицы рабочим эталонам и средствам измерений осуществляется согласно государственной поверочной схеме для средств измерений электрической емкости в диапазоне частот от 1 до 300 МГц, утвержденной приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 02.06.2021 № 926 [2].

До недавнего времени единство измерений электрической емкости было обеспечено на частотах до 100 МГц по ГОСТ 8.564-98. Но растущие потребности науки и промышленности, появление новых типов средств измерений, в том числе работы [3–7], потребовали расширения частотного диапазона государственного первичного специального эталона до 300 МГц. В основу работ по расширению были положены разработки [8–15].

Следует отметить, что среди национальных эталонов единицы электрической емкости на высоких частотах аналоги ГЭТ 107-2019 по рабочему диапазону частот в настоящее время отсутствуют.

Целью настоящей работы является исследование передачи единицы электрической емкости на частоте 300 МГц от ГПСЭ ГЭТ 107-2019 с целью подтверждения паспортных значений эталона.

Методы измерений

Эталонная установка Э-300 предназначена для передачи единицы электрической емкости эталонного расчетного конденсатора на частоте 300 МГц вторичным эталонным конденсаторам и рабочим эталонам электрической емкости. Эталонная установка Э-300 состоит из комплекса аппаратуры, работающего под управлением ПК.

Основным блоком эталонной установки является компаратор К-300 с резонансным измерительным контуром (ИК). Блок-схема компаратора приведена на рис. 1.

Компаратор состоит из следующих основных блоков:

А1 – резонансный измерительный контур (ИК), образуемый индуктивным элементом L и емкостью C_3 подключаемого эталонного конденсатора;

А2 – усилитель преобразователь, состоящий из входного высокоомного согласующего усилителя, подключенного к резонансному контуру, и детекторного преобразователя переменного напряжения в постоянное.

Резонансная частота резонансного измерительного контура А1 задается выражением:

$$f_3^2 = \frac{1}{(2\pi)^2 \cdot L \cdot (C_3 + C_{ИК} + C_3)}, \quad (1)$$

где L – индуктивность ИК; C_3 – емкость эталонного конденсатора, $C_{ИК}$ – паразитная емкость ИК, C_3 – емкость цилиндрической заглушки, устанавливаемой на эталонный конденсатор для уменьшения краевых эффектов.

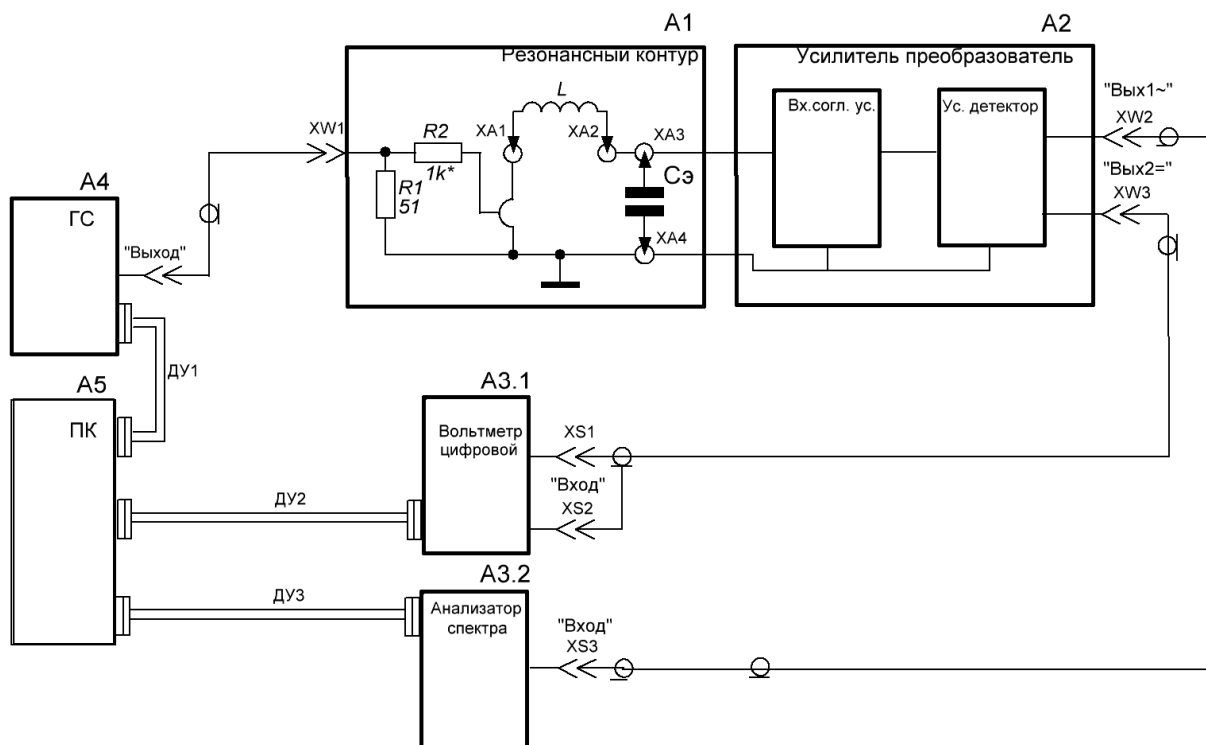


Рис. 1. Блок-схема компаратора К-300 с резонансным измерительным контуром:

А3.1 – цифровой вольтметр (ЦВ) для измерения постоянного напряжения с выхода усилителя «Вых2=» преобразователя А2; А3.2 – анализатор спектра (АС) с подключением входа к выходу «Вых1~» усилителя А2 сигнала переменного напряжения; А4 – генератор синусоидального сигнала (ГС) для возбуждения резонансного контура А1; А5 – персональный компьютер (ПК) для управления ГС и осуществления вычислений по заложенным программам в автоматическом режиме измерения

Для определения емкости $C_{ИК}$ к измерительному контуру поочередно подключаются конденсаторы с емкостями $C_{к1}$ и $C_{к2}$, определенными заранее на частоте 1 кГц, и измеряются резонансные частоты $f_{к1}$ и $f_{к2}$. Исходя из (1), получаем соотношение:

$$\frac{f_{к1}^2}{f_{к2}^2} = \frac{C_{ИК} + C_{к2}}{C_{ИК} + C_{к1}},$$

и тогда емкость $C_{ИК}$ рассчитывается по следующей формуле

$$C_{ИК} = \left(\frac{C_{к1} \cdot f_{к1}^2 - C_{к2} \cdot f_{к2}^2}{f_{к2}^2 - f_{к1}^2} \right). \quad (2)$$

Емкость цилиндрической заглушки C_3 также определяется заранее на частоте 1 кГц.

Принцип действия компаратора заключается в сравнении частот экстремума резонансного измерительного контура при последовательном подключении исходного (первичного) эталона емкости, значение которого получено расчетным путем, и поверяемых эталонов (эталона-копии и рабочего эталона). Различие частот показывает отличие емкости поверяемых эталонов от емкости исходного эталона и позволяет рассчитать емкости поверяемых эталонов.

Алгоритм поиска частот экстремума осуществляется компьютерной программой автоматического управления частотой генератора сигнала. Сканирование частоты генератора сигнала вокруг экстремального значения напряжения на резонансном контуре дает массив значений частот, который позволяет с помощью математической обработки, вычислить частоту экстремума.

После окончания измерений в 10 циклах, выполняется автоматическая процедура исключения промахов из ряда полученных значений частот экстремума f_i по признаку выполнения условия отсутствия промахов:

$$\frac{f_{\max} - f_{\text{ср}}}{S_f} < 2\sqrt{N},$$

$$\frac{f_{\text{ср}} - f_{\min}}{S_f} < 2\sqrt{N},$$

где f_{\max} , f_{\min} – максимальное и минимальное значения частот экстремума; $f_{\text{ср}}$ – среднее значение частоты и S_f – среднее квадратическое отклонение (СКО) частоты по 10 измерениям.

После исключения промахов для оставшихся N измерений ряда f_{i3} определяют среднее значение частоты резонансного контура $f_{\text{ср}}$.

Расчет емкости поверяемых эталонов (эталона-копии, рабочего эталона или других эталонов), проводится по формуле (на примере расчета емкости эталона-копии C_k по частоте f_k), с учетом значения $C_{\text{ИК}}$, полученного по формуле (2), и значения C_3 , измеренного на частоте 1 кГц:

$$C_k = \left(C_{\text{П}} \frac{f_{\text{П}}^2}{f_k^2} + C_{\text{ИК}} + C_3 \right) \cdot \left(\frac{f_{\text{П}}^2}{f_k^2} - 1 \right). \quad (3)$$

Далее определяется СКО емкости в относительной форме:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (C_i - C_{\text{ср}})^2} \cdot \frac{100\%}{C_{\text{ср}}}, \quad (4)$$

и случайная погрешность:

$$\delta_{\text{сл}} = t(n) \cdot S, \quad (5)$$

где $t(n)$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от числа измерений и доверительной вероятности. Для первичного эталона принимаются значения $t(n)$ для доверительной вероятности 0,99, для вторичных эталонов – для 0,95.

Неисключенная систематическая погрешность (НСП) эффективной емкости эталонных конденсаторов складывается из следующих основных частных составляющих:

- погрешностей от неопределенности линейных размеров электродов эталона и от несовершенства обработки их поверхностей;
- погрешностей от таких искажений формы электродов эталона, как их эллиптичность, конусность, выпуклость или вогнутость их поверхностей;
- погрешностей от таких неправильностей взаимного расположения электродов эталона, как их несоосности при параллельных осях и непараллельность осей электродов;
- погрешностей от неопределенности величины относительной диэлектрической проницаемости воздуха;
- погрешности от влияния окисной пленки на поверхностях электродов;
- погрешности от влияния емкости неоднородности в плоскости подключения электродов к клемме.

Значения неопределенности по типу B_{iB} и сумма частных НСП θ_{Σ} на частоте 300 МГц определены в [16] и имеют предельные значения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Частные стандартные неопределенности u_{B0i} (частные НСП θ_{0i})

| Влияющий фактор | | Частная стандартная неопределенность $u_{B0i} \cdot 10^6$ (частная НСП $\cdot 10^6$) |
|---|----------------------|---|
| Наименование | значения | |
| 1. Погрешности значений линейных размеров эталонных конденсаторов: | | |
| – длины электродов | 0,3 мкм | 4 (7) |
| – диаметра внутреннего электрода | 0,15 мкм | 20 (36) |
| – диаметра наружного электрода | 0,2 мкм | 18 (31) |
| 2. Отклонения формы и взаимного расположения электродов: | | |
| – непараллельность открытых торцов | 0,2 мкм | 1,1 (1,9) |
| – несоосность | 4 мкм | 0,5 (0,9) |
| 3. Зазор в плоскости подключения электродов | 0,1 мкм | 1,1 (1,9) |
| 4. Емкости неоднородности в плоскости подключения электродов к клемме за счет различия диаметров: | | |
| – внутренних электродов конденсатора и клеммы | 2 мкм | 0,6 (1) |
| – наружных электродов конденсатора и клеммы | 2 мкм | 0,9 (1,5) |
| 5. Погрешность значения краевой емкости | $2 \cdot 10^{-4}$ пФ | 0,1 (0,2) |
| 6. Погрешности значений электромагнитных характеристик материала электродов | 30% | 35 (60) |
| 7. Нестабильность температуры | 0,2 °C | 1,6 (2,8) |
| Сумма $u_{B0} \cdot 10^6$ ($\theta_0 \cdot 10^6$) | | 44 (86) |

Результаты

Результаты воспроизведения и передачи единицы электрической емкости на частоте 300 МГц представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты воспроизведения и передачи единицы электрической емкости на частоте 300 МГц

| | | | | | ПЭК300 | ВЭК300/к | ВЭК300/р |
|--|-----------------|------|--------|-------------------|---------|----------|----------|
| Первичный | $t(n)_{0,99/6}$ | 4,03 | НСП, % | СКО, % | 0,00008 | 0,00017 | 0,00028 |
| $\delta_{сл} = t(n) \cdot \text{СКО}$ | $t(n)_{0,95/6}$ | 2,57 | 0,0044 | $\delta_{сл}$, % | 0,0003 | 0,0005 | 0,0008 |
| Границы НСП ($k(0,99) = 1,4$; $k(0,95) = 1,1$) | | | | Θ , % | 0,01 | 0,008 | 0,008 |
| Сумма НСП и случайной погрешности | | | | S_{Σ} , % | 0,004 | 0,004 | 0,004 |
| Стандартная неопределенность типа A | | | | u_A , % | 0,00008 | 0,00017 | 0,00028 |
| Стандартная неопределенность типа B | | | | u_B , % | 0,006 | 0,004 | 0,004 |
| Суммарная неопределенность типа C | | | | u_C , % | 0,006 | 0,004 | 0,004 |
| Расширенная неопределенность ($K(0,99)=3$; $K(0,95)=2$) | | | | U_p , % | 0,02 | 0,009 | 0,009 |

Обсуждение

По результатам исследований передачи единицы от первичного эталона к эталону-копии и рабочему эталону было установлено, что при 6 независимых измерениях:

- относительная стандартная неопределенность типа A составляет $3 \cdot 10^{-6}$;
- относительная стандартная неопределенность типа B составляет $4 \cdot 10^{-5}$;
- относительная расширенная неопределенность составляет $9 \cdot 10^{-5}$.

Заключение

В ходе исследования, были определены метрологические характеристики эталонной установки Э-300 из состава ГЭТ 107-2019. Паспортные значения ГЭТ 107-2019 на рабочей частоте 300 МГц подтверждены. В дальнейшем планируется изучить долговременную стабильность эталонных конденсаторов, а также провести подготовительные мероприятия для обеспечения передачи единицы величины в рамках международных сличений ГЭТ 107-2019.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) в рамках Соглашения от 08.04.2020 № 172-11-2020-016.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27.12.2019 № 3388.
2. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 02.06.2021 № 926.
3. Кларк Э.Р., Эберхардт К.Н. Микроскопические методы исследования материалов // Техносфера. – М., 2007.
4. Гаврилов А.Б. Состояние и перспективы развития эталонной базы радиотехнических измерений ФГУП «СНИИМ». В сборнике: Метрология в радиоэлектронике. Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции. В 2-х томах. Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»). – 2018. – С. 32–40.
5. Коломиец Т.А., Казакова Е.А., Сосновская Т.Г. Создание и исследование национального эталона единицы электрической емкости. Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1 (4). – С. 69–74.
6. Velychko O., Shevkun S., Gordiyenko T., Dobrolyubova M. Metrological traceability of impedance parameter measurements in Ukraine. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Т. 4. – № 9 (94). – С. 43–49.
7. Лухверчик И.Н., Сосновская Т.Г. Сравнение импедансов разнородных величин при передаче размера единицы электрической емкости от единицы электрического сопротивления (активного). Метрология и приборостроение. – 2020. – № 2 (89). – С. 20–23.
8. Грохольский А.Л. Образцовый конденсатор для частот 200–300 МГц // Измерительная техника. – 1960. – № 6.
9. Циклаури Г.Н. Эффективные параметры коаксиальных конденсаторов в широком диапазоне частот. Доклады 2-й республиканской научно-технической конференции по метрологии. Тбилиси, 1972.
10. Циклаури Г.Н. Погрешность расчетных формул для определения параметров конденсаторов на высоких частотах. Доклады Всесоюзного симпозиума «Современные методы и аппаратура для измерения параметров радиотехнических линий», Новосибирск, 1973.
11. Бэйншелл Б.О. Воздушная коаксиальная линия как эталон абсолютного импеданса. Экспресс-информация. Контрольно-измерительная техника, № 34, 1964.
12. Абросимов Э.А., Малошенко О.Я., Лазарева Н.А., Шмидт В.И. Высокочастотный расчетный конденсатор постоянной емкости. Доклады Всесоюзной научно-технической конференции по радиотехническим измерениям, т.1, Новосибирск, 1970.
13. Рабинович Б.Е. Методика суммирования частных погрешностей в области радиотехнических измерений. Вопросы радиоэлектроники, серия Радиоизмерительная техника, выпуск 4, 1961.
14. Черепин Н.В. Вакуумные свойства материалов для электронных приборов, «Советское радио», 1966.
15. Вольперт А.Р. Влияние диэлектрической проницаемости воздуха на устойчивость частоты колебательных контуров. «Электросвязь», 1941.
16. Результаты исследований государственного первичного специального эталона единицы электрической емкости в диапазоне частот от 1 до 300 МГц, выпущен ФГУП «СНИИМ», Новосибирск, 2019 г.

© С. Д. Загайнов, А. Е. Мандруева, Е. Ю. Ульянов,
Д. В. Рябчинский, А. М. Шилов, 2022