

Научная статья

УДК 621.317.73

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-9-16>

Государственный первичный специальный эталон единицы электрической ёмкости в диапазоне частот от 1 до 300 МГц ГЭТ 107-2019

Александр Михайлович Шилов¹, Сергей Дмитриевич Загайнов^{2✉}, Анастасия Евгеньевна Мандруева³, Дмитрий Владимирович Рябчинский⁴, Евгений Юрьевич Ульянов⁵

1, 2, 3, 4, 5 Западно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», Новосибирск, Россия

¹ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

¹amshilov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9274-3642>

²zagainov@sniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4360-6152>

³otdel_3@sniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5017-6835>

⁴otdel_3@sniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0916-8443>

⁵ulyanov@sniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3245-638X>

Аннотация. Описаны состав и характеристики Государственного первичного специального эталона единицы электрической ёмкости в диапазоне частот от 1 до 300 МГц ГЭТ 107-2019. Верхняя граница частотного диапазона воспроизведения электрической ёмкости ГЭТ 107-2019 составляет 300 МГц. Это достигнуто в результате разработки эталонной установки с рабочей частотой 300 МГц. Рассмотрены принцип действия установки и алгоритмы обработки измерений. Неисключённая относительная систематическая погрешность ГЭТ 107-2019 составляет $5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$ (в зависимости от рабочей частоты), относительное среднеквадратическое отклонение результата измерений при воспроизведении единицы – $3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-4}$, что превосходит возможности национальных эталонов других стран. Разработана и утверждена Государственная поверочная схема для средств измерений электрической ёмкости в диапазоне частот 1–300 МГц. ГЭТ 107-2019, а также подчинённые эталоны и средства измерений широко используются в микро- и нанoeлектронике, биомедицине, радиоэлектронной промышленности, приборостроении, при разработке и производстве современных материалов и оборудования.

Ключевые слова: первичный эталон, электрическая ёмкость, эталонный конденсатор, поверочная схема

Благодарности: авторы выражают благодарность В. Н. Колесову за неоценимый вклад в работы по совершенствованию государственного первичного специального эталона, а также Попову М. М. за техническое содействие в реализации проекта.

Финансирование: работа выполнена при поддержке Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, соглашение от 07.06.2017 № 172-11-006.

Для цитирования: Шилов А. М., Загайнов С. Д., Мандруева А. Е., Рябчинский Д. В., Ульянов Е. Ю. Государственный первичный специальный эталон единицы электрической ёмкости в диапазоне частот от 1 до 300 МГц ГЭТ 107-2019 // Измерительная техника. 2022. № 8. С. 9–16.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-9-16>

The State primary special standard for the unit of electrical capacitance at the frequency range from 1 to 300 MHz GET 107-2019

Alexander M. Shilov¹, Sergey D. Zagaynov^{2✉}, Anastasiya Ev. Mandrueva³, Dmitriy V. Ryabchinskiy⁴, Eugeny Yu. Uliyanov⁵

1, 2, 3, 4, 5 The West-Siberian Branch of FSUE "VNIIFTRI", Novosibirsk, Russia

¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

¹amshilov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9274-3642>

²zagainov@sniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4360-6152>

³otdel_3@sniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5017-6835>

⁴otdel_3@sniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0916-8443>

⁵ulyanov@sniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3245-638X>

Abstract. The composition and characteristics of the State primary special standard of electrical capacity units in the frequency range from 1 to 300 MHz GET 107-2019 are described. The upper limit of the frequency range of electrical capacitance reproduction has been expanded to 300 MHz due to the development of a new reference installation with an operating frequency of 300 MHz. The principle of operation of the installation and algorithms for processing measurements are considered. The non-excluded relative systematic error

of GET 107-2019 is from $5 \cdot 10^{-5}$ to $1 \cdot 10^{-3}$ (depending on the operating frequency), the relative standard deviation of the measurement result when reproducing the unit is from $3 \cdot 10^{-6}$ to $3 \cdot 10^{-4}$, which exceeds the capabilities of national standards of other countries. An updated State Verification Scheme for measuring electrical capacitance in the frequency range from 1 to 300 MHz has been developed and approved. GET 107-2019 and its subordinate standards and measuring instruments are widely used in micro- and nanoelectronics, radioelectronic industry, instrument engineering, in the development and production of modern materials and devices, in biomedicine.

Keywords: primary reference, electrical capacitance, reference capacitor, calibration circuit

Acknowledgments: the authors are grateful to V. N. Kolesov for an invaluable contribution to the work on improving the State Primary Special Standard, as well as Popov M. M. for technical assistance in the implementation of the project.

Financial Support: the work was supported by the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology, agreement dated July 6, 2017 no. 172-11-006.

Введение. Для хранения, воспроизведения и передачи единицы электрической ёмкости в Российской Федерации применяется Государственный первичный специальный эталон единицы электрической ёмкости в диапазоне частот от 1 до 300 МГц ГЭТ 107-2019¹, который воспроизводит единицу электрической ёмкости с номинальным значением 10 пФ в диапазоне частот 1–300 МГц. Передача единицы электрической ёмкости в указанном диапазоне частот от ГЭТ 107-2019 рабочим эталонам 1-го разряда происходит в соответствии с Государственной поверочной схемой для средств измерений электрической ёмкости в диапазоне частот от 1 до 300 МГц².

В настоящее время в Российской Федерации единицу электрической ёмкости от ГЭТ 107-2019 получают несколько десятков эталонов 1-го разряда, находящихся в эксплуатации в региональных метрологических центрах, метрологических службах промышленных предприятий и научно-исследовательских институтов Министерства промышленности и торговли, Министерства атомной промышленности, Федерального космического агентства. Для передачи единицы электрической ёмкости от ГЭТ 107-2019 рабочим эталонам-мерам электрической ёмкости применяется автоматизированный компаратор [1].

Единица электрической ёмкости на высоких частотах применяется в следующих областях технической деятельности: микро- и нанoeлектронике [2–5], отечественной радиоэлектронной промышленности [6, 7], биомедицине [8–10], при метрологическом обеспечении передовых научных исследований и приборостроения [11–13], при разработке новых способов измерений физических величин [14–16] и производстве современных материалов и оборудования [17–20].

В 2007–2011 гг. ГЭТ 107-77 принимал участие в международных дополнительных сличениях эталонов индуктивности на рабочих частотах до 10 МГц, код сличения COOMET.EM-S8 (469/RU-a/09) [21]. В сличении участвовали национальные метрологические институты (НМИ) пяти стран – России (НМИ-пилот), Белорусии, Чехии, Казахстана, Украины. На данный момент в СМС-таблицах ММББ³ у Российской

Федерации в области высоких частот представлено девять СМС-строк по электрической ёмкости (Lumped Impedance: Admittance: Capacitance) и четыре СМС-строки по индуктивности (Lumped Impedance: Admittance: Inductance).

Также следует отметить, что активно ведутся работы по созданию эталонов в области единиц электрических величин, основанные на квантовых эффектах и фундаментальных константах в соответствии с новыми определениями Международной системы единиц. Квантовые эталоны единицы электрической ёмкости в области низких частот прорабатываются уже более 20 лет [22–24], а недавние успехи в реализации высокочастотных одноэлектронных насосов [25, 26] открывают путь к созданию квантовых эталонов ёмкости и на высоких частотах.

Цель настоящей статьи – описание функциональных возможностей Государственного первичного специального эталона единицы электрической ёмкости в диапазоне частот от 1 до 300 МГц ГЭТ 107-2019.

Цели и задачи совершенствования ГЭТ 107-77. С момента создания Государственного первичного специального эталона единицы электрической ёмкости в диапазоне частот 1–100 МГц ГЭТ 107-77 Россия (тогда – СССР) заняла лидирующие позиции по диапазону частот, в котором обеспечивается хранение и воспроизведение единицы электрической ёмкости. Данный рекорд не побит до сих пор, хотя работы в направлении расширения диапазона частот ведутся во многих НМИ мира [27–30]. В Азиатско-тихоокеанском регионе с 2017 г. проводятся ключевые сличения между Китаем (НМИ-пилот), Таиландом и Индией⁴.

Принцип работы ГЭТ 107-77 был основан на определении единицы электрической ёмкости с помощью двойного T-образного моста [31], прецизионная схема настройки которого и послужила залогом прорыва в метрологии электрических параметров цепей на высоких частотах на долгие десятилетия вперед.

Необходимость совершенствования ГЭТ 107-77 в 2017–2019 гг. обусловлена тем, что эталон функционировал более 40 лет и за это время неоднократно выработал технический

¹ Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27.12.2019 № 3388 «Об утверждении Государственного первичного специального эталона единицы электрической ёмкости в диапазоне частот от 1 до 300 МГц».

² Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 02.06.2021 № 926 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений электрической ёмкости в диапазоне частот от 1 до 300 МГц».

³ KCDB. URL: <https://www.bipm.org/kcdb/> (дата обращения: 02.07.2022).

⁴ APMP.EM-S15. URL: <https://www.bipm.org/kcdb/comparison?id=579> (дата обращения: 02.07.2022).

ресурс. Вспомогательные устройства эталона морально устарели и требовали замены. Кроме того, в Российской Федерации полностью отсутствовало метрологическое обеспечение средств измерений единицы электрической ёмкости на частотах выше 100 МГц, несмотря на то, что измерения электрической ёмкости на указанных частотах в стране широко востребованы. К 2017 г. в Государственный реестр СИ внесено более 40 типов измерителей параметров LCR, их парк составляет десятки тысяч единиц. В связи с отсутствием метрологического обеспечения достоверность измерений указанных приборов не могла быть подтверждена на частотах выше 100 МГц, что приводило к нарушению единства измерений.

Поэтому задача совершенствования ГЭТ 107-77 – восстановление технического ресурса эталонной установки в рабочем диапазоне частот 1–100 МГц (эталонная установка Э-100) при сохранении принципов работы на основе Т-образного моста, а также расширение частотного диапазона эталона до 300 МГц с помощью разработки автоматизированной эталонной установки на рабочей частоте 300 МГц (эталонная установка Э-300).

Эталонная установка Э-300. В основу работ по расширению диапазона частот были положены разработки [32–35]. Т-образный мост изначально не был предназначен для работы на частоте 300 МГц, поэтому для расширения диапазона частот до 300 МГц создана новая эталонная установка Э-300, принцип работы которой основан на определении импеданса по профилю резонансной кривой колебательного контура.

Основным блоком Э-300 служит компаратор с резонансным измерительным контуром (ИК). Электрическая схема компаратора приведена на рис. 1. ИК А1 образован индуктивным элементом L и ёмкостью эталонного конденсатора C_0 , подключённого к компаратору через прецизионный коаксиальный униполярный разъём. В качестве эталонного конденсатора C_0 к компаратору можно подключить или первичный эталонный конденсатор (ПЭК300), или эталон-копию (ВЭК300/к), или рабочий эталонный конденсатор (ВЭК300/р) из состава Э-300.

При подаче сигнала с генератора синусоидального сигнала А4 на частоте 300 МГц в ИК А1 устанавливаются колебания. Сигнал из ИК поступает на вход выпрямляющего усилителя-преобразователя А2, состоящего из подключённого к ИК входного согласующего усилителя А2.1 с высоким входным активным сопротивлением и малой входной ёмкостью и детекторного преобразователя А2.2 переменного напряжения в постоянное. Принципиальная схема усилителя-преобразователя приведена на рис. 2.

Напряжение сигнала поступает через вход ХТ1 на истоковый повторитель

на полевом транзисторе VT1 с динамической нагрузкой на полевом транзисторе VT2. Активное входное сопротивление такого каскада определяется в основном резисторами $R1$, $R2$ и составляет порядка 100 МОм. Динамическая нагрузка на транзисторе VT2 позволяет получить близкий к единице коэффициент передачи каскада. Усиление сигнала по напряжению происходит двумя каскадами DA1.1, DA1.2 на высокочастотном сдвоенном операционном усилителе. Коэффициент усиления каждого каскада определяется делителем на резисторах $R6$ – $R5$, $R8$ – $R9$ и для получения максимально широкой полосы рабочих частот подобран близким к единице.

Преобразование переменного напряжения в постоянное осуществляется с выхода усилителя DA1.2 кремниевым высокочастотным диодом Шоттки VD1 и фильтром $R12$ – $C7$. Диод Шоттки по сравнению с обычным диодом имеет меньшее барьерное напряжение открывания, что повышает линейность преобразования. Выпрямленный сигнал поступает на выход ХТ3 (Вых2=), усиленный сигнал переменного напряжения через согласующий резистор $R11$ поступает на выход ХТ2 (Вых1~).

Схема питается от двухполюсного источника («плюс» ИП1 и «минус» ИП2) с номинальным напряжением ± 9 В через стабилизаторы DA2 и DA3.

После усилителя-преобразователя (см. рис. 1) выпрямленный сигнал Вых2= поступает на вольтметр А3.1 и далее в цифровом коде передаётся на персональный компьютер А5 в управляющее программное обеспечение. Контрольный сигнал Вых1~ поступает на анализатор спектра А3.2. Связь между персональным компьютером и эталонным оборудованием

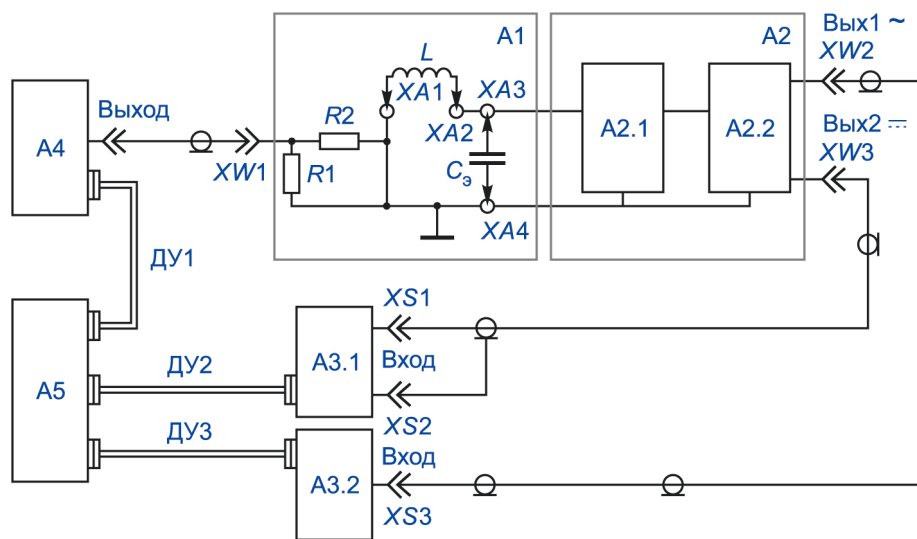


Рис. 1. Блок-схема компаратора с резонансным измерительным контуром: А1 – резонансный измерительный контур; А2 – усилитель-преобразователь; А2.1 – входной согласующий усилитель; А2.2 – детекторный преобразователь; А3.1 – цифровой вольтметр; А3.2 – анализатор спектра; А4 – генератор синусоидального сигнала; А5 – персональный компьютер; ДУ1, ДУ2, ДУ3 – каналы дистанционного управления

Fig. 1. Block diagram of a comparator with a resonant measuring circuit: А1 – a resonant measuring circuit; А2 – an amplifier-converter; А2.1 – input matching amplifier; А2.2 – AC/DC converter; А3.1 – digital voltmeter; А3.2 – spectrum analyzer; А4 – generator of a sinusoidal signal; А5 – a personal computer (PC); ДУ1, ДУ2, ДУ3 – remote control channels

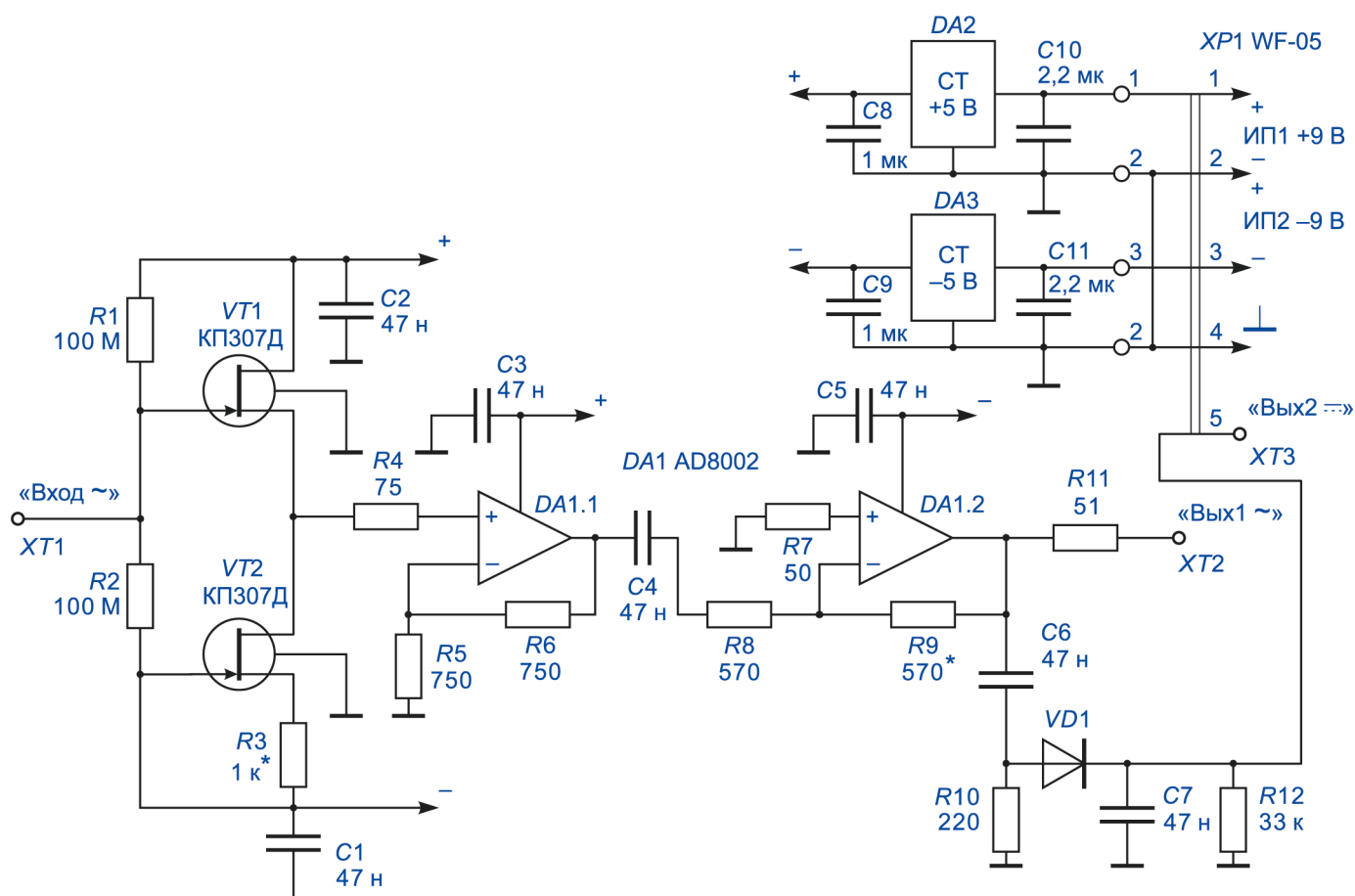


Рис. 2. Принципиальная схема усилителя-преобразователя

Fig. 2. Schematic diagram of the amplifier-converter

Таблица 1

Коэффициент Стьюдента t в зависимости от числа измерений n и доверительной вероятности

P	n								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,95	12,7	4,3	3,18	2,78	2,57	2,45	2,36	2,33	2,26
0,99	63,7	9,92	5,84	4,60	4,03	3,71	3,50	3,36	3,25

осуществляется посредством интерфейса GPIB по каналам ДУ1, ДУ2, ДУ3.

Принцип действия компаратора заключается в сравнении частот экстремума контура при последовательном подключении первичного расчётного эталона ёмкости и поверяемых эталонов (эталона-копии и рабочего эталона). Разница частот показывает отличие ёмкости поверяемых эталонов (ВЭК300/к или ВЭК300/р) от ёмкости ПЭК300 и позволяет рассчитать ёмкости поверяемых эталонов.

Алгоритм поиска частот экстремума реализуется с помощью функции автоматического управления частотой генератора сигнала. При сканировании частоты генератора сигнала вокруг экстремального значения напряжения на резонансном контуре

получаем массив частот, который позволяет с помощью математической обработки вычислить частоту экстремума.

Эффективная ёмкость эталонного конденсатора на частоте 300 МГц рассчитана в соответствии с теорией электрических цепей с распределёнными параметрами (однородных длинных линий) [32, 33].

В качестве основного материала для изготовления электродов эталонных конденсаторов выбрана бронза марки Брб2 [13]. На электроды нанесено покрытие – золото 999 пробы толщиной 5 мкм.

Согласно выполненным расчётам при длине электродов эталонного коаксиального конденсатора 69,52288 мм, внутреннем диаметре внешнего электрода 20,0 мм и внешнем диаметре внутреннего электрода 13,1796 мм ёмкость эталонного конденсатора составит 9,9999998 пФ. Поскольку ёмкость эталонных конденсаторов является частотно зависимой, то при передаче единицы с помощью компаратора необходимо корректировать ёмкость для заданной рабочей частоты передачи:

$$C_K = C_э(f_n/f_k)^2 + (C_э + C_{ИК})[(f_n/f_k)^2 - 1],$$

где $C_э$ – ёмкость первичного (расчётного) эталонного конденсатора, полученная по фактическим значениям геометрических размеров электродов; f_n , f_k – резонансные частоты контура

при подключённых первичном и вторичном эталонных конденсаторах, соответственно; $C_3=0,371$ пФ – ёмкость заглушки, устанавливаемой на внешний электрод эталонного конденсатора для экранирования на частоте 1 кГц; $C_{ИК}$ – ёмкость ИК, вычисленная предварительно по частотам экстремума компаратора f_{k1} , f_{k2} при подключении калибровочных конденсаторов C_{k1} , C_{k2} .

Ёмкость ИК вычислим по формуле

$$C_{ИК} = (C_{k1}f_{k1}^2 - C_{k2}f_{k2}^2) / (f_{k2}^2 - f_{k1}^2).$$

Число выполняемых измерений для одной передачи $n=6$. Автоматически рассчитываются: среднее значение ёмкости поверяемых эталонов C_{cp} , среднеквадратическое отклонение (СКО) S результатов измерений и случайная погрешность δ по формулам:

$$C_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{ki};$$

$$S = \sqrt{[n(n-1)]^{-1} \sum_{i=1}^n ((C_{ki} - C_{cp}) / C_{cp})^2};$$

$$\delta = t(n)S, \quad (1)$$

где $t(n)$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от числа измерений n и доверительной вероятности (см. табл. 1). Для ГЭТ 107-2019 используется значение $t(n)$ при доверительной вероятности $P=0,99$, для вторичных эталонов – при $P=0,95$.

Суммарная стандартная неопределённость по типу В u_B и суммарная неисключённая систематическая погрешность (НСП) θ_Σ расчётной ёмкости эталонных конденсаторов на частоте 300 МГц рассчитаны с использованием формул в работах [36, 37] и складываются из основных частных составляющих, приведённых в табл. 2, где u_{Bi} – частная стандартная неопределённость, θ_i – частная НСП.

Результаты. Результаты воспроизведения и передачи единицы электрической ёмкости представлены в табл. 3, где δ рассчитана по формуле (1), S_Σ – сумма НСП и случайной погрешности δ , u_A , u_B – стандартные неопределённости соответственно по типу А, В, u_c – суммарная стандартная неопределённость, U_p – расширенная неопределённость, k – коэффициент охвата.

По результатам воспроизведения единицы электрической ёмкости, выполненного при поддержании температуры в диапазоне $(20,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$, установлено, что при шести независимых измерениях ГЭТ 107-2019 обеспечивает воспроизведение единицы с СКО $S=8 \cdot 10^{-7}$, НСП $\theta < 1 \cdot 10^{-4}$.

Относительная стандартная неопределённость по типу А составляет $8 \cdot 10^{-7}$, по типу В – $6 \cdot 10^{-5}$, относительная расширенная неопределённость – $2 \cdot 10^{-4}$.

Сравнительные характеристики ГЭТ 107-77 и ГЭТ 107-2019 приведены в табл. 4.

Характеристики международных эталонов ёмкости с верхней границей диапазона частоты более 1 МГц приведены в табл. 5, из которой следует, что характеристики ГЭТ 107-2019 превосходят возможности эталонов других стран в части границ частотного диапазона.

Таблица 2

Частные стандартные неопределённости u_{Bi} и НСП θ_i

Наименование влияющего фактора	Значение влияющего фактора	$u_{Bi} \cdot 10^6$	$\theta_i \cdot 10^6$
Погрешность измерения линейных размеров эталонных конденсаторов, мкм:			
длина электродов	0,3	4	7
диаметра внутреннего электрода	0,15	20	36
диаметра наружного электрода	0,2	18	31
Отклонения формы и взаимного расположения электродов, мкм:			
непараллельность открытых торцов	0,2	1,1	1,9
несоосность	4	0,5	0,9
Зазор в плоскости подключения электродов, мкм	0,1	1,1	1,9
Неоднородности в плоскости подключения электродов к клемме за счёт различия диаметров, мкм:			
внутренних электродов конденсатора и клеммы	2	0,6	1
наружных электродов конденсатора и клеммы	2	0,9	1,5
Погрешность измерения краевой ёмкости, пФ	$2 \cdot 10^{-4}$	0,1	0,2
Погрешность электромагнитных характеристик материала электродов, %	30	35	60
Нестабильность температуры, $^\circ\text{C}$	0,2	1,6	2,8
Суммарная стандартная неопределённость и суммарная НСП		44	86

Таблица 3

Результаты воспроизведения и передачи единицы электрической ёмкости на частоте 300 МГц

Характеристика	ПЭК300	ВЭК300/к	ВЭК300/р
СКО ($n=6$)	0,00008	0,00017	0,00028
δ , %	0,0003	0,0005	0,0008
θ^* , %	0,01	0,008	0,008
S_Σ , %	0,004	0,004	0,004
u_A , %	0,00008	0,00017	0,00028
u_B , %	0,006	0,004	0,004
u_c , %	0,006	0,004	0,004
U_p^{**} , %	0,02	0,009	0,009

Примечание. $*k(0,99)=1,4$; $k(0,95)=1,1$; $**k(0,99)=3$; $k(0,95)=2$

Таблица 4

Характеристики ГЭТ 107-77 и ГЭТ 107-2019

Характеристика	ГЭТ 107-77	ГЭТ 107-2019
Частота, МГц	1–100	1–100 300
НСП при $P=0,99$	$5 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-4}$
СКО	$3 \cdot 10^{-6}$ – $3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$ – $3 \cdot 10^{-5}$ $8 \cdot 10^{-7}$

Таблица 5

Характеристики международных эталонов ёмкости

Основные характеристики	ГЭТ 107-2019	США, NIST (2007)	Турция, UME (2015)	Словения, MIRS (2013)	Китай, NIM (2014)
Диапазон частот, МГц	1–300	1–10	1–30	$1 \cdot 10^{-4}$ –10	$1 \cdot 10^{-2}$ –10
Номинальное значение (диапазон значений) ёмкости, пФ	10	1–1000	1–1000	1–1000	1–1000
Расширенная неопределённость воспроизведения ёмкости, мкФ/Ф	400–2000	25–14000	50–62000	15–5100	30–6000

Закключение. ГЭТ 107-2019 обеспечивает поверку всего парка образцовых средств измерений ёмкости, находящихся в эксплуатации в Российской Федерации. Параметры воспроизведения и передачи единицы электрической ёмкости ГЭТ 107-2019 превосходят возможности эталонов других стран. ГЭТ 107-2019 позволяет решать актуальные проблемы метрологического обеспечения в диапазоне частот 1–300 МГц.

Список источников

1. Шилов А. М., Ульянов Е. Ю., Мандруева А. Е., Загайнов С. Д. Разработка и исследование универсального автоматизированного компаратора для передачи единицы электрической ёмкости от ГПСЭ единицы электрической ёмкости (ГЭТ 107-2019) в диапазоне частот от 1 до 300 МГц рабочим эталонам – мерам электрической ёмкости // Метрология в радиоэлектронике: Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции, Менделеево, 21–23 сентября 2021. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2021. С. 266–270.
2. Ковчавцев А. П. Структуры металл–диэлектрик–полупроводник на основе арсенида индия: дисс. докт. физ.-мат. наук (ИФП СО РАН, Новосибирск, 2003).
3. Talanov V. V., Schwartz A. R., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, vol. 57, no. 5, pp. 1224–1229. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2009.2017352>
4. Guenther K.-M., Witte H., Krost A., Kontermann S., Schade W., *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 100, no. 4, 042101. <https://doi.org/10.1063/1.3679380>
5. Гольдман Е. И., Левашова А. И., Левашов С. А., Нарышкина В. Г., Чучуева Г. В. Измерения высокочастотного импеданса структур «металл – диэлектрик – полупроводник» со сверхтонким оксидом // Современные информационные и электронные технологии. 2014. Т. 2. № 15. С. 130–131.
6. Черепин Н. В. Вакуумные свойства материалов для электронных приборов. М.: Советское радио, 1966. 350 с.
7. Демин С., Южалкин А., Пашков С. и др. Исследование высокочастотных кварцевых резонаторов среза SC // Компоненты и технологии. 2021. № 2(235). С. 44–47.
8. Reinecke N., Mewes D., *Measurement Science and Technology*, 1996, vol. 7, no. 3, pp. 233–246. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/7/3/004>
9. Kaatz U., *Measurement Science and Technology*, 2013, no. 24(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/1/012005>
10. Wajman R., Fiderek P., Fidos H., Jaworski T., Nowakowski J., Sankowski D., Banasiak R., *Measurement Science and Technology*, 2013, no. 24(6), 065302. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/6/065302>
11. Сурду М. Н., Ламеко А. Л., Сурду Д. М., Курсин С. Н. Автоматическая прецизионная система для метрологического обеспечения измерений параметров импеданса. Ч. I. Принципы действия // Измерительная техника. 2012. № 7. С. 51–57.
12. Лухверчик И. Н., Сосновская Т. Г. Сравнение импедансов разнородных величин при передаче размера единицы электрической ёмкости от единицы электрического сопротивления (активного) // Метрология и приборостроение. 2020. № 2(89). С. 20–23.
13. Вихарева Н. А. Метрологическое обеспечение средств измерений добротности и индуктивности // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25. № 4. С. 221–228. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-4-221-228>
14. Морозов Н. Н., Мазаник А. И., Акимбаев Е. Ж. Экспресс-метод измерения дозы за импульс излучения высокой интенсивности // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2021. № 2(49). С. 55–60.
15. Малогабаритный высокочувствительный датчик ускорений. Пат. RU 71773 U1 / Л. М. Игнатов, А. С. Кусков // Изобретения. Полезные модели. 2008. № 8.
16. Kyaw P. A., Stein A. L. F., Sullivan C. R., *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2017, pp. 2519–2526, <https://doi.org/10.1109/APEC.2017.7931052>
17. Кларк Э. Р., Эберхард К. Н. Микроскопические методы исследования материалов: Пер. с англ. М.: РИЦ «Техносфера», 2007. 376 с.
18. Wong Jee Keen Raymond, Chandan Kumar Chakrabarty, Goh Chin Hock, Ahmad Basri Ghani, *Measurement*, 2013, vol. 46, no. 10, pp. 3796–3801. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.06.039>
19. Heath J., Zabierowski P., Capacitance Spectroscopy of Thin-Film Solar Cells, In *Advanced Characterization Techniques for Thin Film Solar Cells* (eds D. Abou-Ras, T. Kirchartz and U. Rau), 2011, pp. 81–105. <https://doi.org/10.1002/9783527636280.ch4>
20. Ушаков П. А., Бабошкин Г. Д., Стойчев С. В., Гравшин В. Г. Двухполюсные элементы с фрактальным импедансом и их применение в радиотехнике и связи // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 1. С. 75–105.
21. Заключительный отчёт по теме COOMET.EM-S8 (469/RU-a/09). URL: <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/>

final_reports/EM/S8/COOMET.EM-S8.pdf (дата обращения: 02.07.2022).

22. Keller M. W., Eichenberger A. L., Martinis J. M., Zimmerman N. M., *Science*, 1999, no. 285(5434), pp. 1706–1709. <https://doi.org/10.1126/science.285.5434.1706>

23. Keller M. W., Zimmerman N. M., Eichenberger A. L., *Metrologia*, 2007, vol. 44(6), pp. 505–512. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/44/6/010>

24. Scherer H., Schurr J., Ahlers F. J., *Metrologia*, 2017, vol. 54(3), pp. 322–338. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/AA65F9>

25. Yamahata G., Giblin S. P., Kataoka M., Karasawa T., Fujiwara A., *Applied Physics Letters*, 2016, vol. 109(1), 013101. <https://doi.org/10.1063/1.4953872>

26. Шерстобитов С. В., Карпова М. В., Тертычная М. А. Квантовые эффекты и фундаментальные константы в основе эталонов единиц электрических величин // Измерительная техника. 2020. № 2. С. 65–70. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-2-65-70>

27. Kibble B. P., *Metrologia*, 1998, vol. 35(1), 17. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/35/1/3>

28. Callegaro L., *Measurement Science and Technology*, 2009, no. 20(2), 022002. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/2/022002>

29. Awan S. A., Kibble B. P., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, April 2005, vol. 54, no. 2, pp. 516–520. <https://doi.org/10.1109/TIM.2005.843582>

30. Özkan T., Gulmez G., Turhan E., Gulmez Ya., *Measurement Science and Technology*, 2007, no. 18(11), pp. 3496–3500. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/11/033>

31. Вудс Д. Двойной Т-образный мост для точного измерения проводимости на частотах 3–300 МГц // Точные электрические измерения: Сборник докладов конференции: Пер. с англ. М.: ИИЛ, 1959. С. 55.

32. Грохольский А. Л. Образцовый конденсатор для частот 200–300 МГц // Измерительная техника. 1960. № 6. С. 43–47.

33. Циклаури Г. Н. Эффективные параметры коаксиальных конденсаторов в широком диапазоне частот // Доклады второй Республиканской научно-технической конференции по метрологии. 27–29 ноября 1972 г. Тбил. филиал Всесоюз. науч.-исслед. ин-та метрологии им. Д. И. Менделеева. Тбилиси, 1972.

34. Weinschel B. O., Air-filled coaxial lines as absolute impedance standards, *Microwave Journal*, 1964, vol. 7, no. 4, pp. 47–50.

35. Абросимов Э. А. и др. Высокочастотный расчетный конденсатор постоянной емкости // Доклады Всесоюзной научно-технической конференции по радиотехническим измерениям. Новосибирск: Сиб. науч.-исслед. ин-т метрологии., 1970. Т. 1. С. 11.

36. Циклаури Г. Н. Погрешность расчетных формул для определения параметров конденсаторов на высоких частотах // Современные методы и аппаратура для измерения параметров радиоцепей: Сборник докладов Всесоюзного симпозиума, Новосибирск, 18–22 сентября 1973 г. Сиб. науч.-исслед. ин-т метрологии. Новосибирск, 1974.

37. Рабинович Б. Е. Методика суммирования частных погрешностей в области радиотехнических измерений // Вопросы

радиоэлектроники. Сер. Радиоизмерительная техника. 1961. Вып. 4. С. 3–22.

References

1. Shilov A. M., Ul'janov E. Ju., Mandrueva A. E., Zagajnov S. D., Razrabotka i issledovanie universal'nogo avtomatizirovannogo komparatora dlja peredachi edinicy jelektricheskoy emkosti ot GPSE edinicy jelektricheskoy emkosti (GET 107-2019) v diapazone chastot ot 1 do 300 MGc rabochim jetalonam – meram jelektricheskoy emkosti, *Proc. the XII All-Russian Scientific and Technical Conference "Metrology in Radioelectronics"*, Mendeleev, September 21–23, 2021, Mendeleev, FSUE "VNIIFTRI" Publ., 2021, pp. 266–270. (In Russ.)

2. Kovchaycev A. P., *Struktury metall–dielektrik–poluprovodnik na osnove arsenida indija: Doctoral dissertation in Mathematics and Physics Sciences (IFP SO RAN, Novosibirsk, 2003)*. (In Russ.)

3. Talanov V. V., Schwartz A. R., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, vol. 57, no. 5, pp. 1224–1229. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2009.2017352>

4. Guenther K.-M., Witte H., Krost A., Kontermann S., Schade W., *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 100, no. 4, 042101. <https://doi.org/10.1063/1.3679380>

5. Goldman E. I., Levashova A. I., Levashov S. A., Naryshkina V. G., Chucheva G. V., *Sovremennye informatsionnye i elektronnye tekhnologii*, 2014, vol. 2, no. 15, pp. 130–131. (In Russ.)

6. Cherepin N. V., *Vakuumnye svoystva materialov dlja elektronnykh priborov [Vacuum properties of materials for electronic devices]*, Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1966, 350 p. (In Russ.)

7. Demin S., Juzhalkin A., Pashkov S. et. al, *Issledovanie vysokochastotnykh kvarcevykh rezonatorov sreza SC, Komponenty and Tehnologies*, 2021, no. 2(235), pp. 44–47. (In Russ.)

8. Reinecke N., Mewes D., *Measurement Science and Technology*, 1996, vol. 7, no. 3, pp. 233–246. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/7/3/004>

9. Kaatz U., *Measurement Science and Technology*, 2013, no. 24(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/1/012005>

10. Wajman R., Fiderek P., Fidos H., Jaworski T., Nowakowski J., Sankowski D., Banasiak R., *Measurement Science and Technology*, 2013, no. 24(6), 065302. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/6/065302>

11. Surdu M. N., Lameko A. L., Surdu, D. M., Kursin S. N., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 55, pp. 816–825. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-0045-5>

12. Lukhverchik I. N., Sosnovskaya T. G., Comparison of impedances of heterogeneous quantities when disseminating electric capacitance unit from the (active) electric resistance unit, *Metrologija i priborostroenie*, 2020, no. 2(89), pp. 20–23. (In Russ.)

13. Vihareva N. A., *Vestnik SSUGT*, 2020, vol. 25, no 4, pp. 221–228. (In Russ.) <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-4-221-228>

14. Morozov N. N., Mazanik A. I., Akimbaev E. Zh., *The composition of the editorial board*, 2021, no. 2(49). pp. 55–60. (In Russ.)

15. Ignatov L. M., Kuskov A. S., Patent RU 71773 U1, *Byull. Izobret.*, no. 8 (2008).
16. Kyaw P. A., Stein A. L. F., Sullivan C. R., *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2017, pp. 2519–2526, <https://doi.org/10.1109/APEC.2017.7931052>
17. Clarke A., Eberhardt C., *Microscopy Techniques for Materials Science*, Woodhead Publishing, 2002.
18. Wong Jee Keen Raymond, Chandan Kumar Chakrabarty, Goh Chin Hock, Ahmad Basri Ghani, *Measurement*, 2013, vol. 46, no. 10, pp. 3796–3801. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.06.039>
19. Heath J., Zabierowski P., Capacitance Spectroscopy of Thin-Film Solar Cells, In *Advanced Characterization Techniques for Thin Film Solar Cells* (eds D. Abou-Ras, T. Kirchartz and U. Rau), 2011, pp. 81–105. <https://doi.org/10.1002/9783527636280.ch4>
20. Ushakov P. A., Baboshkin G. D., Stojchev S. V., Gravshin V. G., Dvukhpolyusnye ehlementy s fraktal'nyim impedansom i ikh primeneniye v radiotekhnike i svyazi, *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 75–105 (In Russ.)
21. Final Report COOMET.EM-S8 (469/RU-a/09), available at: https://www.bipm.org/utis/common/pdf/final_reports/EM/S8/COOMET.EM-S8.pdf (accessed: 21.07.2022).
22. Keller M. W., Eichenberger A. L., Martinis J. M., Zimmerman N. M., *Science*, 1999, no. 285(5434), pp. 1706–1709. <https://doi.org/10.1126/science.285.5434.1706>
23. Keller M. W., Zimmerman N. M., Eichenberger A. L., *Metrologia*, 2007, vol. 44(6), pp. 505–512. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/44/6/010>
24. Scherer H., Schurr J., Ahlers F. J., *Metrologia*, 2017, vol. 54(3), pp. 322–338. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/AA65F9>
25. Yamahata G., Giblin S. P., Kataoka M., Karasawa T., Fujiwara A., *Applied Physics Letters*, 2016, vol. 109(1), 013101. <https://doi.org/10.1063/1.4953872>
26. Sherstobitov S. V., Karpova M. V., Tertychnaya M. A., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 145–150. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01764-6>
27. Kibble B. P., *Metrologia*, 1998, vol. 35(1), 17. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/35/1/3>
28. Callegaro L., *Measurement Science and Technology*, 2009, no. 20(2), 022002. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/2/022002>
29. Awan S. A., Kibble B. P., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, April 2005, vol. 54, no. 2, pp. 516–520. <https://doi.org/10.1109/TIM.2005.843582>
30. Özkan T., Gulmez G., Turhan E., Gulmez Ya., *Measurement Science and Technology*, 2007, no. 18(11), pp. 3496–3500. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/11/033>
31. Woods D., *Proc. IEE – Part C: Monographs*, September 1957, vol. 104, iss. 6, pp. 538–541. <https://doi.org/10.1049/pi-c.1957.0062>
32. Grokhol'skii A. L., *Measurement Techniques*, 1960, vol. 3, no. 6, pp. 518–523. <https://doi.org/10.1007/BF00976494>
33. Ciklauri G. N., Ehffektivnye parametry koaksial'nykh kondensatorov v shirokom diapazone chastot, *Proceedings of the Second Republic Scientific-Technical Conference on Metrology*, Tbilisi, November 27–29, 1972, Tbil. filial VNIIM im. D. I. Mendeleeva, 1972. (In Russ.)
34. Weinschel B. O., Air-filled coaxial lines as absolute impedance standards, *Microwave Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 47–50, 1964.
35. Abrosimov Je. A., etc., Vysokochastotnyj raschetnyj kondensator postoyannoj emkosti, *Proc. All-Union Scientific-Technical Conference on Radiotechnical Measurements*, Novosibirsk, Siberian Scientific Research Institute of Metrology, 1970, vol. 1, p. 11. (In Russ.)
36. Ciklauri G. N., Sovremennye metody i apparatura dlja izmereniya parametrov radiocepej, *Collection of reports of the All-Union Symposium*, Novosibirsk, September 18–22, 1973, Novosibirsk, Siberian Scientific Research Institute of Metrology, 1974. (In Russ.)
37. Rabinovich B. E., Metodika summirovaniya chastnykh pogreshnostej v oblasti radiotekhnicheskikh izmerenij, *Voprosy radioelektroniki. Seriya Radioizmeritel'naja tehnika*, 1961, vol. 4, pp. 3–22. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 30.05.2022; одобрена после рецензирования 06.07.2022; принята к публикации 08.07.2022.
The article was submitted 30.05.2022; approved after reviewing 06.07.2022; accepted for publication 08.07.2022.