

ЭТАЛОНЫ

Научная статья

УДК 006.91:621.317.7.089.68::53.09.62


<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-1-5-15>



Метод «сопротивление – частота» (Rf-метод) как альтернатива для прецизионного измерения коэффициента взаимной индукции эталонной кварцевой меры КС-4 из состава Государственного первичного эталона единиц магнитных величин ГЭТ 12–2025

В. Н. Хорев, Д. И. Беляков , А. Е. Шилов, С. Л. Воронов , А. А. Никитин

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,
г. Санкт-Петербург, Россия

 d.i.belyakov@vniim.ru

Аннотация: В рамках метрологического обеспечения Государственного первичного эталона единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции ГЭТ 12–2025 с интервалом в пять лет проводятся прецизионные измерения геометрических параметров обмоток кварцевой меры КС-4.

Однако традиционная процедура измерений КС-4 – долговременная и затратная, потому что требует применения специального оборудования, сложных методов и трудоемкого учета погрешностей. Оптимизировать процедуру измерений возможно, если взамен разработать альтернативную возможность определения константы КС-4 без потери точности. Исследования в этом направлении ведут в лаборатории государственных эталонов в области магнитных измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», сотрудниками которой являются авторы настоящей статьи.

Авторы статьи сосредоточили поиск альтернативной возможности определения константы КС-4 на методе «сопротивление – частота» (Rf-метод). Измерительный эксперимент включал порядка 20 серий измерений. Было использовано оборудование из состава ГЭТ 12–2205 и реализована методика определения константы КС-4 на основании измерений частоты и сопротивления.

В результате исследования была доказана жизнеспособность предлагаемого альтернативного метода. Установленная на данной итерации эксперимента погрешность альтернативного метода в пять раз превышает погрешность традиционного геометрического метода определения константы. Однако выявлены потенциальные возможности улучшения характеристик точности альтернативного метода. Результаты представленного в статье исследования станут основой для дальнейших экспериментов по развитию Rf-метода после совершенствования использованного оборудования и программного обеспечения. При получении в дальнейшем положительных результатов Rf-метод будет внедрен в процедуру метрологического обеспечения Государственного первичного эталона ГЭТ 12–2025. Публикация стала вкладом в отраслевую дискуссию, вызванную происходящим в метрологическом сообществе переопределением единиц Международной системы единиц (SI) и возросшей точностью

измерений единиц сопротивления и частоты. Представленный в статье экспериментальный материал придаст импульс к поиску оптимальных решений по совершенствованию отечественной эталонной базы в области магнитных измерений.

Ключевые слова: Государственный первичный эталон, методы измерений магнитных величин, средства измерений магнитных величин, коэффициент взаимной индукции, магнитный поток, прецизионные измерения

Для цитирования: Метод «сопротивление – частота» (Rf-метод) как альтернатива для прецизионного измерения коэффициента взаимной индукции эталонной кварцевой меры КС-4 из состава Государственного первичного эталона единиц магнитных величин ГЭТ 12–2025 / В. Н. Хорев [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2026. Т. 22, № 1. С. 5–15. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-1-5-15>

Статья поступила в редакцию 24.09.2025; одобрена после рецензирования 02.03.2026; принята к публикации 25.03.2026.

MEASUREMENT STANDARDS

Researched Article

The Resistance-Frequency Method (Rf-method) as an Alternative for Precision Measurement of the Mutual Inductance Coefficient of the KC-4 Reference Quartz Measure from the State Primary Standard for Units of Magnetic Quantities GET 12–2025

Vyacheslav N. Khorev, Denis I. Belyakov ✉, Alexander E. Shilov, Sergey L. Voronov , Aleksei A. Nikitin

D. I. Mendeleev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia
✉ d.i.belyakov@vniim.ru

Abstract: As part of the metrological assurance of the State Primary Standard for Units of Magnetic Induction, Magnetic Flux, Magnetic Moment, and Magnetic Induction Gradient GET 12–2025, precision measurements of the geometric parameters of the KC-4 quartz gauge windings are carried out at five-year intervals.

However, the traditional measurement procedure for the KC-4 is time-consuming and costly, as it requires the use of special equipment, complex methods, and labor-intensive error accounting.

It is possible to optimize the measurement procedure by developing, instead, an alternative method of determining the KC-4 constant without loss of accuracy. Research in this direction is being conducted at the Laboratory of State Standards in the Field of Magnetic Measurements of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology, whose staff are the authors of the article.

The authors of the article focused their search for an alternative method of determining the KC-4 constant based on the resistance-frequency method (Rf-method). The measurement experiment comprised

approximately 20 measurement series. Equipment from GET 12–2205 was used, and a procedure for determining the KC-4 constant based on frequency and resistance measurements was implemented.

As a result of the study, the viability of the proposed alternative method was proven. The error of the alternative method established in this iteration of the experiment is five times higher than that of the traditional geometric method for determining the constant. However, potential opportunities for improving the accuracy characteristics of the alternative method were identified.

The results of the study presented in this article will serve as a foundation for further experiments on the development of the Rf-method after improving the equipment and software used. If positive results are obtained in the future, the Rf-method will be implemented into the metrological assurance procedure of the State Primary Standard GET 12–2025.

The publication contributes to the field-specific discussion prompted by the ongoing redefinition of the International System of Units (SI) within the metrological community and the increased measurement accuracy of resistance and frequency units. The experimental material presented in the article will provide an impetus for the search for optimal solutions to improve the national reference base in the field of magnetic measurements.

Keywords: State Primary Standard, measurement methods for magnetic quantities, measuring instruments for magnetic quantities, mutual inductance coefficient, magnetic flux, precision measurements

For citation: Khorev VN, Belyakov DI, Shilov AE, Voronov SL, Nikitin AA. The resistance-frequency method (Rf-method) as an alternative for precision measurement of the mutual inductance coefficient of the KC-4 reference quartz measure from the State Primary Standard for Units of Magnetic Quantities GET 12–2025. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2026;22(1):5–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-1-5-15>

The article was submitted 24.09.2025; approved after reviewing 02.03.2026; accepted for publication 25.03.2026.

Введение

Метрологическое обеспечение магнитных измерений в Российской Федерации опирается на разработанный ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» Государственный первичный эталон единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции ГЭТ 12–2025¹.

Первичное воспроизведение единицы магнитного потока в составе ГЭТ 12–2025 обеспечивается на основе кварцевой меры KC-4, регламент эксплуатации которой предполагает систематические процедуры прецизионных измерений геометрических параметров обмоток.

Однако такая процедура – длительная и дорогостоящая. Так, например, в работе [1]

¹ Об утверждении Государственного первичного эталона единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции : Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) от 16 октября 2025 года № 2230.

процедура измерения геометрических размеров кварцевой катушки с аналогичными точностными требованиями заняла около года.

В качестве альтернативного предлагается рассмотреть метод «сопротивление – частота» (Rf-метод) определения точного значения постоянной KC-4.

Цель публикации – описать исследование возможности прецизионного измерения коэффициента взаимной индукции эталонной кварцевой меры KC-4 из состава ГЭТ 12–2025 альтернативным методом.

Материалы и методы

Описание традиционного метода

Магнитный поток Φ в ГЭТ 12–2025 [2] воспроизводится при помощи эталонной меры KC-4 с током в соответствии с уравнением

$$\Phi = K_{\Phi} \cdot I, \quad (1)$$

где K_{Φ} – геометрическая постоянная меры KC-4 по магнитному потоку, которая определяется расчетным путем по измерениям геометрических размеров первичной и вторичной обмоток

меры КС-4 (Вб/А, или Гн); I – сила тока в первичной обмотке.

Диапазон передаваемых с заданной точностью значений отношения магнитного потока к силе тока ГЭТ 12–2025 составляет от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ Вб/А.

Данный диапазон определяется:

- непосредственно эталонной мерой КС-4, покрывающей диапазон от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ Вб/А;
- получающим единицу от КС-4 многозначным делителем магнитного потока ДМП-1, покрывающим диапазон от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ Вб/А практически без потери точности.

Таким образом, неопределенность передачи во всем диапазоне ГЭТ 12–2025 определяется неопределенностью передачи единицы эталонной меры КС-4.

Эталонная мера КС-4 представляет собой кварцевый соленоид (рис. 1) с двумя обмотками, причем возможна выставка 72 значений константы K_{Φ} (от 1 до 72) в соответствии с заданным числом витков вторичной обмотки. Благодаря специальной конструкции КС-4 все 72 значения K_{Φ} строго пропорциональны числу витков с погрешностью менее 0,0005 %.

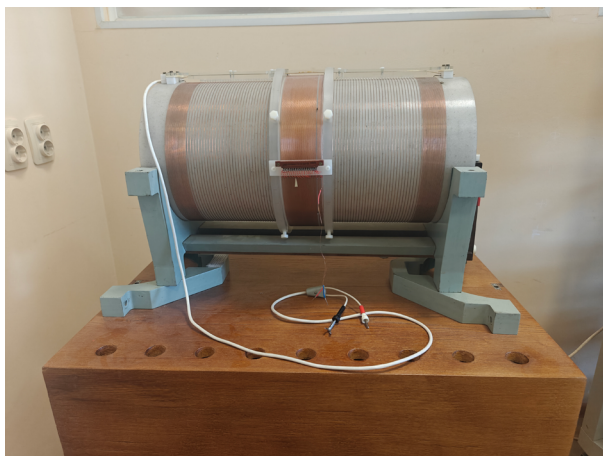


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 1. Внешний вид кварцевой меры КС-4

Fig. 1. Appearance of the КС-4 quartz gauge

Максимальное значение K_{Φ} (при 72 витках) составляет $K_{КС4} = 1,00028$ мВб/А.

Константа катушки K_{Φ} определена при помощи расчета на основе прецизионных

линейных измерений геометрических размеров первичной и вторичной обмоток.

Выполнены измерения:

а) первичной обмотки:

- диаметров витков по 4 сечениям – с погрешностью не более 1,5 мкм;

- расстояний между витками по 4 образующим – с погрешностью не более 1 мкм;

б) вторичной обмотки:

- диаметры витков – с погрешностью 30 мкм.

Расчет постоянной КФ выполнен по формуле Сноу², выражающей коэффициент взаимной индуктивности между цилиндрической обмоткой и круговым витком через эллиптические интегралы от геометрических параметров обмоток.

Точное измерение силы постоянного тока представляет собой рутинную процедуру: вторичным эталонам передается значение отношения магнитного потока к силе тока (значение постоянной катушки магнитного потока). Передача осуществляется при помощи эталонного компаратора средств измерений магнитного потока и магнитного момента (далее – ЭКПМ) разностным индукционным методом на постоянном токе [3].

Схожую процедуру передачи нижестоящим эталонам значения отношения магнитного потока к силе тока используют в NIM [4]. Отличие заключается в том, что источником эталонного магнитного потока в разностном индукционном методе у них выступает не эталонная кварцевая катушка, а вольт-секундный калибратор на эффекте Джозефсона. Использование такого калибратора позволяет китайским коллегам добиться неопределенности типа А на уровне 2 ppm. Данный метод вызывает некоторые противоречия, поскольку вольт-секундный калибратор на эффекте Джозефсона формирует магнитный поток в виде меандра, в то время как катушка взаимной индукции нижестоящего эталона формирует колоколообразный сигнал. Правомочность применимости данного подхода требует отдельного исследования.

Альтернативным разностному индукционному методу является подход

² Snow, Chester. A Simplified Precision Formula for the Inductance of a Helix with Corrections for the Lead-In Wires, NBS Journal of Research Vol. 9, RP479, June 1932.

непосредственной передачи единицы прецизионному флюксметру. Появление современных прецизионных высокоскоростных интеграторов-флюксметров на базе ПЛИС [5, 6] делает данный подход перспективным. Более перспективным видится использование предварительно калиброванного по эталонному магнитному потоку прецизионного высокоскоростного флюксметра на базе ПЛИС в разностном индукционном методе.

В табл. 1 приведен бюджет неопределенностей результатов измерения при воспроизведении и передаче размера единицы отношения магнитного потока к силе тока. В данном примере в качестве сличаемой катушки выступает входящий в состав ЭКПМ делитель магнитного потока ДМП-1 при значении 1 мВб/А. Суммарное среднее квадратическое отклонение (стандартная неопределенность u_c) воспроизведения и передачи единицы отношения магнитного потока к силе тока $S_{\Sigma_0} = 0,0015 \%$.

Суммарное среднее квадратическое отклонение (стандартная неопределенность) воспроизведения и передачи единицы отношения магнитного потока к силе тока составляет $S_{\Sigma_0} = u_c = 0,0014 \%$.

При воспроизведении и передаче единицы магнитного потока (Вб) в бюджет неопределенностей добавляется только неопределенность измерения силы тока при коэффициенте влияния 1. Если для измерения тока применить мультиметр Agilent 3458А из состава первичного эталона, то добавленная неопределенность достаточно мала ($u < 0,00005 \%$) и расчет суммарного СКО для магнитного потока дает значение $S_{\Sigma_0} = 0,0015 \%$.

Описание метода

«сопротивление – частота» (Rf-метод)

Значительный прогресс точности воспроизведения и измерения единиц частоты [7] и сопротивления [8] позволяет предложить

Таблица 1. Бюджет неопределенностей при воспроизведении и передаче единицы отношения магнитного потока к силе тока, Вб/А

Table 1. Uncertainty budget for the reproduction and transfer of the unit of the ratio of magnetic flux to current strength, Wb/A

	Значение	Тип оценки / распределение	Вклад внеопределенность, %
Диаметр первичной обмотки КС-4, мм	269,291	В / равномерное	0,000 64
Диаметр провода, мм	0,768	В / равномерное	0,000 42
Длина первичной обмотки КС-4, мм	460,803	В / равномерное	0,000 37
Геометрия обратного провода (наклон), мм	-0,5	В / равномерное	0,000 58
Диаметр вторичной обмотки КС-4, мм	287,54	В / равномерное	0,000 86
Температура, °С	20	В / равномерное	0,000 33
Разностный магнитный поток, мкВб (N = 70)	3,9	В / равномерное	0,000 27
Сила тока, А	1,5	В / равномерное	0,000 05
Влияющие факторы, мкВб	$0 \pm 0,3$	В / нормальное	0,000 08
Статистика, мкВб	1,1	А / нормальное	0,000 30
Выходная величина, мВб/А	0,975 0		$u_c = 0,001 44 \%$

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

Примечание. В строке «Влияющие факторы» указана суммарная оценка влияния величин, которые могут меняться случайным образом во времени, но статистически не проявляются в ходе измерений и оцениваются по типу В. К ним относятся магнитное окружение, установочные погрешности, электромагнитное взаимодействие, намагниченность преобразователей и т. п.

альтернативный метод определения постоянной эталонной катушки.

Предлагаемый к исследованию в настоящей работе Rf-метод определения точного значения постоянной КС-4 основан на точном измерении электрического сопротивления R и частоты переменного тока f . Частота должна быть относительно низкой, но хорошо измеряемой (квазипостоянные напряжения измеряются значительно хуже, чем напряжения с частотой от нескольких Гц), так как ГЭТ 12–2025 в части магнитного потока предназначен для работы на постоянном токе. Схема измерений представлена на рис. 2.

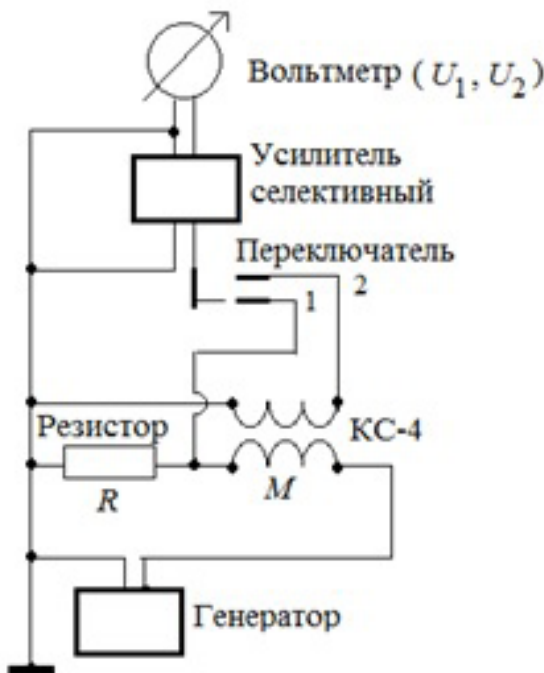


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 2. Схема измерений: вольтметр показывает U_1 , U_2 при соответствующих положениях переключателя

Fig. 2. Measurement scheme: the voltmeter displays U_1 , U_2 at the respective switch positions

Наблюдаемое на схеме падение напряжения на резисторе R определяется по формуле

$$U_1 = R \cdot I, \quad (2)$$

где R – значение сопротивления резистора, Ом; I – сила тока в первичной обмотке, А.

Напряжение на выходе вторичной обмотки КС-4 определяется по формуле

$$U_2 = 2\pi \cdot f \cdot K_\Phi \cdot I, \quad (3)$$

где f – частота подаваемого в первичную обмотку КС-4 тока, Гц; K_Φ – постоянная меры КС-4 по магнитному потоку, Вб/А; I – сила тока в первичной обмотке, А.

Поскольку ток в резисторе R и в первичной обмотке КС-4 общий, можно записать:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{2\pi \cdot f \cdot K_\Phi}{R}. \quad (4)$$

Отсюда следует:

$$K_\Phi = \frac{R \cdot U_2}{2\pi \cdot f \cdot U_1} = 0,15915494 \cdot \frac{R \cdot U_2}{f \cdot U_1}. \quad (5)$$

Значения силы тока и коэффициента усиления усилителя знать не требуется, поэтому они не входят в формулу измерений, хотя должны быть достаточно стабильны. Указанные значения выбирают из соображений обеспечения удовлетворительного уровня сигнала и максимальной точности эксперимента. Для повышения точности измерения отношения двух напряжений целесообразно:

- оба напряжения измерять одним вольтметром, используя переключатель;

- путем регулировки частоты выбирать режим $U_1 \approx U_2$.

В таком случае:

- формула выглядит как

$$M_{\text{мгн}} \approx 159 \cdot \frac{R_{\text{Ом}}}{f_{\text{Гц}}}; \quad (6)$$

- погрешность вольтметра также (в первом приближении) из отношения близких напряжений из результата исключается.

Подлежащие измерению приближенные значения частоты f при условии $U_1 \approx U_2$, записанные исходя из номиналов прецизионных резисторов (0,1; 1; 10 Ом) и измеряемого значения K_Φ (1 мВб/А), обобщены в табл. 2.

Наблюдаемые в табл. 2 данные свидетельствуют: для реализации поставленной задачи пригодна единственная рабочая частота – 159 Гц (точнее – 159,1549 Гц).

Описание измерительного эксперимента Аппаратура

В измерительном эксперименте использованы (рис. 3):

Таблица 2. Приближенные значения измеряемой частоты
Table 2. Approximate values of the measured frequency

КФ, мВб/А	R, Ом		
	0,1	1	10
	f, Гц		
0,1	1,6	16	159
1	16	159	1 592
10	159	1 592	15 915

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

Примечание. В таблице полужирным начертанием выделена наиболее пригодная для решения поставленной задачи частота.

- прецизионный генератор 81150А;
- мера электрического сопротивления безреактивная МС3080М, 1 Ом;
- прецизионный селективный усилитель СУ-159, специально разработанный для данного исследования с частотой настройки $(159,15 \pm 1)$ Гц; добротностью не менее 100; полосой пропускания не менее ± 2 Гц и не более ± 4 Гц;
- мультиметр 3458А в режиме АС-вольтметра;
- частотомер 53131А;
- тумблер с ручным управлением (в качестве переключателя).



Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 3. Аппаратура для измерительного эксперимента

Fig. 3. Equipment for measuring experiment

Процедура

Оператор подбирал частоту генератора, приближая отношение U_2/U_1 как можно ближе к единице. Затем устанавливал положение 1 тумблера и запускал на вольтметре 3458А режим измерения по специально составленной программе. Далее программа в автоматическом режиме производила серию из n измерений (отсчетов); вычисляла среднее значение серии K_{row} и СКО среднего S_{row} ; выдавала сигнал об окончании серии.

Следует отметить, что специально разработанный для эксперимента усилитель СУ-159 характеризуется крутизной передаточной характеристики на уровне -40 дБ/декаду, что исключает значимое влияние высших гармоник со входа генератора.

По сигналу программы оператор фиксировал два полученных числа, переводил тумблер в положение 2 и вновь запускал программу измерения. Так повторялось не менее ($N = 5$) раз.

Далее оператор самостоятельно обрабатывал полученные N измерения (вычислял среднее значение КФср и СКО S среднего, $i = 1, \dots, N$). На практике S превысил S_{row} , что объясняется изменениями условий при переходе от одной серии к другой (нестабильностью тока, коэффициента усиления, температуры, уровня помех и т. п.).

В качестве статистической погрешности измерений было принято значение S .

Результаты и обсуждение

Выводы эксперимента

В ходе эксперимента было проведено порядка 20 серий измерений. В результате в одном

из измерений $K_{\Phi} = 1,000\,274$ совпало с паспортным значением $K_{\Phi} = 1,000\,28$ при статистической погрешности $0,000\,286\%$.

Тем не менее, значение по всей выборке измерений оказалось значительно хуже.

При построении бюджета неопределенности в качестве значащих параметров были определены:

- неопределенность измерений значений сопротивления, частоты и отношений напряжений;
- нестабильность тока и коэффициента усиления;
- частотная зависимость катушки.

Бюджет неопределенности измерения постоянной КФ обобщен в табл. 3.

Выводы данного эксперимента свидетельствуют: погрешность альтернативного метода составляет $0,007\%$ – это почти в пять раз превышает погрешность традиционного геометрического метода ($0,001\,5\%$).

Выводы исследования

В результате исследования была доказана жизнеспособность предлагаемого альтернативного метода.

На данной итерации эксперимента установлено: погрешность альтернативного метода в пять раз превышает погрешность традиционного геометрического метода определения константы. Наибольший вклад в бюджет неопределенности внесли нестабильность тока

и случайная составляющая измерений. Этот факт открывает потенциальные возможности улучшения характеристик точности альтернативного метода.

В частности, внедрение в программное обеспечение комплекса синхронизированной с измерением процедуры контроля тока с последующим внесением поправочного коэффициента позволит существенно уменьшить влияние нестабильности тока на итоговую погрешность.

Уменьшить СКО измерений возможно, улучшив внешнюю магнитную обстановку эксперимента, задействовав компенсации внешнего магнитного поля Земли, а также вариаций магнитного поля Земли и промышленных помех. Предлагается организовать следующую итерацию эксперимента не в городских условиях, а в рабочем объеме комплекса ЭТМК из состава ГЭТ 12–2025 на магнитной станции ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» в Токсово [9].

Заключение

В статье рассмотрен метод «сопротивление – частота» (Rf-метод) с целью изучения возможности его применения в качестве альтернативы для определения точного значения постоянной КС-4.

Измерительный эксперимент включал порядка 20 серий измерений. Установлено:

- 1) жизнеспособность предлагаемого альтернативного метода;

Таблица 3. Бюджет неопределенности измерения постоянной КФ

Table 3. Uncertainty budget for the measurement of the Faraday constant

Источник ошибки	Значение погрешности, %	Способ оценки погрешности	Экв. СКО, %
Измерение R	0,002	макс	0,001 2
Измерение f	0,000 5	макс	0,000 3
Измерение U_m/U_r	0,001	макс	0,000 6
Нестабильность тока	0,008	макс	0,004 6
Нестабильность усиления	0,001	макс	0,000 6
Частотная зависимость	0,000 1	макс	0,000 1
Статистика	0,005	СКО	0,002 0
Суммарное СКО результата измерения S_{Σ}			0,007 0

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

2) на данной итерации эксперимента погрешность альтернативного в пять раз превышает погрешность традиционного геометрического метода определения константы;

3) существует потенциальные возможности повышения точности альтернативного метода.

Главный вывод исследования свидетельствует о том, что Rf-метод содержит резерв для повышения точности измерения. Потенциал Rf-метода заключается в улучшении (или дополнительном контроле) нестабильности тока, а также в улучшение магнитной обстановки.

Исследование возможности метода «сопротивление – частота» (Rf-метод) дало материал для дальнейшей разработки оптимальных условий его применения в качестве альтернативы традиционному методу определения точного значения постоянной КС-4.

Результаты исследования станут основой для проведения дальнейших экспериментов по развитию Rf-метод после совершенствования используемых в работе оборудования (внедрение в экспериментальный комплекс оборудования системы компенсации магнитных полей магнитной станции ВНИИМ в Токсово) и программного обеспечения (измерение и учет нестабильности тока).

При получении в дальнейшем положительных результатов Rf-метод будет внедрен в процедуру метрологического обеспечения ГЭТ 12–2025.

На основании дальнейшего эксперимента, в случае его успешного завершения, авторы планируют дальнейшую публикацию по описанной проблематике.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Conflict of interest: The authors declare the absence of any obvious or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Вклад авторов: Все авторы внесли свой вклад в концепцию и дизайн исследования. Хорев В. Н. – концептуализация, методология, верификация данных, проведение исследований, создание черновика рукописи, визуализация, руководство исследованием; Беляков Д. И. – создание используемого в исследовании программного обеспечения, верификация данных, проведение исследований, создание и редактирование рукописи; Шилов А. Е. – создание использованных в исследовании нестандартных электротехнических устройств; Воронов С. Л. – верификация данных, проведение исследований; Никитин А. А. – верификация данных, проведение исследований.

Contribution of the authors: All authors contributed to the concept and design of the study. Khorev V. N. – conceptualization, methodology, data validation, investigation, writing the draft, visualization, supervision; Belyakov D. I. – software development for the study, data validation, investigation, writing and editing a manuscript; Shilov A. E. – development of non-standard electrical devices used in the study; Voronov S. L. – data validation, investigation; Nikitin A. A. – data validation, investigation.

Финансирование: Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

Funding: This research did not receive financial support in the form of a grant from any governmental, for-profit, or non-profit organizations.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Determination of the tesla-to-ampere ratio for the KRISSE/VNIIM γ -experiment / V. Y. Shifrin [et al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1999. Vol. 48, Iss. 2. P. 196–199. <https://doi.org/10.1109/19.769562>.
2. Развитие эталонной базы в области измерений магнитной индукции и магнитного потока / Д. И. Беляков [и др.] // Измерительная техника. 2017. № 12. С 28–31.
3. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю. В. Афанасьев [и др.]. Ленинград : Энергия. Ленингр. отделение, 1979. 320 с.
4. Applications of programmable Josephson voltage standard on magnetic measurements / Z. Wang [et al.] // Electrical & Electronic Measurements Promote Industry 4.0 : 23rd IMEKO TC4 International Symposium, Xi'an, 17–20 September 2019 / IMEKO [et al.]. Xi'an : IMEKO, 2019. P. 200–204.
5. Metrological characterization of an enhanced fast digital integrator for magnetic measurements / P. Arpaia [et al.] // Measurement in Research and Industry : XXI IMEKO World Congress, Prague, 30 August – 4 September 2015 / IMEKO [et al.]. Prague : IMEKO, 2015.
6. Батраков А. М., Ильин И. В., Павленко А. В. Прецизионные цифровые интеграторы сигналов с точной синхронизацией // Автотометрия. 2015. Т. 51, № 1. С. 62–69.
7. Семенов Ю. П., Кривицкая Е. В., Самодуров И. А. От квантового сопротивления Холла к резисторам квадратурного моста // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио. 2022. № 1 (77). С. 294–298.
8. Результаты совершенствования Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1 / И. Б. Норец [и др.] // Альманах современной метрологии. 2022. № 3 (31). С. 8–21.
9. Эталонные комплексы ВНИИМ для метрологического обеспечения магнитных измерений геомагнитного и гипогеомагнитного диапазонов. Текущее состояние и перспективы развития / Д. И. Беляков [и др.] // Магнитные измерения: новые разработки и их метрологическое обеспечение : Тезисы докладов I Всероссийского симпозиума, Санкт-Петербург, 25–26 февраля 2025 г. / ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева». Санкт-Петербург : ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 2025. С. 10–11.

REFERENCE

1. Shifrin VY, Park PG, Khorev VN, Choi ChH, Lee S. Determination of the tesla-to-ampere ratio for the KRISSE/VNIIM γ -experiment. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1999;48(2):196–199. <https://doi.org/10.1109/19.769562>.
2. Belyakov DI, Khorev VN, Shilov AE, Shifrin VY. Development of a reference database for measuring magnetic induction and magnetic flux. *Measurement Techniques*. 2017;12:28–31. (In Russ.).
3. Afanas'ev YuV, Studencov NV, Khorev VN, Chechurina EN, Shchelkin AP. Measuring instruments for magnetic field parameters. Leningrad: Energiya. Leningradskoe Otdelenie; 1979. 320 p. (In Russ.).
4. Wang Z, Li H, Gao Yu, Lu Yu, He Q. Applications of programmable Josephson voltage standard on magnetic measurements. In: *Electrical & Electronic Measurements Promote Industry 4.0 : 23rd IMEKO TC4 International Symposium*, 17–20 September 2019, Xi'an, China. Xi'an: IMEKO; 2019. P. 200–204.
5. Arpaia P, Cimmino P, D'Arco M, Fiscarelli L, Parrella A. Metrological characterization of an enhanced fast digital integrator for magnetic measurements. In: *Measurement in Research and Industry" : XXI IMEKO World Congress*, 30 August – 4 September 2015, Prague, Czech Republic. Prague: IMEKO; 2015.
6. Batrakov AM, Il'yin IV, Pavlenko AV. Precision digital signal integrators with accurate synchronization. *Avtometriya*. 2015;51(1):62–69. (In Russ.).
7. Semenov YuP, Krivickaya EV, Samodurov IA. From quantum Hall resistance to quadrature bridge resistors. *Nauchno-tehnicheskaya konferenciya Sankt-Peterburgskogo NTO REHS im. A. S. Popova, posvyashchennaya Dnyu radio*. 2022;1(77):294–298. (In Russ.).
8. Norets IB, Smirnov YuF, Glazov EY, Fedotov VN. Results of improvement of the state primary standard of units of time, frequency and the national time scale GET 1. *Al'manac of Modern Metrology*. 2022;3(31):8–21. (In Russ.).
9. Belyakov DI, Khasiev IS, Krivcov EP, Shilov AE, Voronov SL. VNIIM reference complexes for metrological support of magnetic measurements in the geomagnetic and hypogeomagnetic ranges. Current state and development prospects. In: *Magnetic Measurements: New Developments and Their Metrological Support: Abstracts of the I All-Russian Symposium*, 25–26 February 2025, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: D. I. Mendeleev Institute for Metrology; 2025. P. 10–11. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хорев Вячеслав Никодимович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории госэталонов в области магнитных измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: khorev@vniim.ru

Беляков Денис Игоревич – канд. техн. наук, руководитель лаборатории госэталонов в области магнитных измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: d.i.belyakov@vniim.ru

Шилов Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории госэталонов в области магнитных измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: a.e.shilov@vniim.ru

Воронов Сергей Леонидович – старший научный сотрудник лаборатории госэталонов в области магнитных измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: s.l.voronov@vniim.ru
<https://orcid.org/0009-0001-0397-8392>

Никитин Алексей Александрович – техник лаборатории госэталонов в области магнитных измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: a.a.nikitin@vniim.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vyacheslav N. Khorev – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Laboratory of State Standards in the Field of Magnetic Measurements, D. I. Mendeleev Institute for Metrology
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: khorev@vniim.ru

Denis I. Belyakov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of State Standards in the Field of Magnetic Measurements, D. I. Mendeleev Institute for Metrology
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: d.i.belyakov@vniim.ru

Alexander E. Shilov – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Laboratory of State Standards in the Field of Magnetic Measurements, D. I. Mendeleev Institute for Metrology
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: a.e.shilov@vniim.ru

Sergey L. Voronov – Senior Researcher the Laboratory of State Standards in the Field of Magnetic Measurements, D. I. Mendeleev Institute for Metrology
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: s.l.voronov@vniim.ru
<https://orcid.org/0009-0001-0397-8392>

Aleksei A. Nikitin – Technician at the Laboratory of State Standards in the Field of Magnetic Measurements, D. I. Mendeleev Institute for Metrology
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: a.a.nikitin@vniim.ru