

## Государственный первичный эталон единицы напряженности электрического поля в диапазоне частот 0,0003—1000 МГц

В. А. ТИЩЕНКО, В. И. ЛУКЬЯНОВ, В. И. ТОКАТЛЫ

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: otd200@vniiftri.org

*Описан состав и результаты исследований модернизированного государственного эталона, предназначенного для воспроизведения и передачи единицы напряженности электрического поля вторичным эталонам и рабочим средствам измерений.*

**Ключевые слова:** эталон, электрическое поле, средство измерений.

*The composition and the results of studies of modernized State standard designed for reproduction and transmission of the electric field strength unit to secondary standards and working measuring instruments is described.*

**Key words:** standard, electric field strength, measuring instruments.

Усовершенствуемый эталон единицы напряженности электрического поля (НЭП) ГЭТ 45 был создан во ВНИИФТРИ в 1994 г. [1]. Эталон совместно с поверочной схемой обеспечивал единство измерений находящихся в сфере государственного регулирования рабочих средств измерений НЭП (ПЗ — измерителей НЭП и П6 — измерительных электрических антенн), выпускаемых серийно как отечественными, так и зарубежными производителями и применяемых в области информационно-телекоммуникационных технологий, электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности.

В 2002 г. был разработан перечень калибровочных возможностей ВНИИФТРИ в области измерений НЭП (9 позиций) [2], который был принят Международным Бюро мер и весов (МБМВ) и явился основой для взаимного признания результатов калибровок средств измерений НЭП, проводимых в ведущих метрологических институтах разных стран в рамках соответствующего соглашения между национальными метрологическими институтами. В 2005 г. ГЭТ 45 принимал участие в международных ключевых сличениях ССЕМ RF-K20 (сличения в области измерений НЭП на частотах 30, 100, 300, 900 МГц) и ССЕМ RF-K21 (сличения в области измерений антенного фактора дипольных антенн в диапазоне частот 300 — 1000 МГц), которые подтвердили соответствие результатов опорным значениям ключевых сличений [3—5].

Тем не менее, возникла потребность в усовершенствовании первичного эталона ГЭТ 45, которое было проведено в период 2007—2011 г. При этом были решены задачи по модернизации аппаратуры, входящей в состав эталона, и гармонизации с национальными эталонами зарубежных стран путем расширения диапазона воспроизведения НЭП.

Приказом № 288 федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 03.05.2012 г. утвержден усовершенствованный государственный первичный эталон единицы напряженности электрического поля в диапазоне частот 0,0003 — 1000 МГц ГЭТ 45—2011.

Государственный первичный эталон предназначен для воспроизведения и передачи единицы НЭП гармонического поля или его проекции в условиях свободного пространства. Так как единица вольт на метр является производной от основных единиц, при ее воспроизведении используются средства измерений, заимствованные из поверочных схем эталонов метра, времени и частоты, а также силы постоянного тока (напряжения).

Диапазон значений НЭП, воспроизводимых эталоном, составляет 0,2 — 20 В/м. Относительное значение среднего квадратического отклонения (СКО) случайной погрешности результата измерения при воспроизведении единицы по пяти независимым наблюдениям  $S_0$  не превышает  $5 \cdot 10^{-3}$ . Доверительные границы относительной неисключенной систематической погрешности (НСП)  $\Theta_0$  при доверительной вероятности  $P = 0,99$  составляют  $\pm 1,5 \cdot 10^{-2}$ . Относительное значение СКО НСП результата измерения  $S_{\Theta} \leq 6 \cdot 10^{-3}$ . Относительное значение СКО суммарной погрешности результата измерения  $S_{\Sigma} \leq 8 \cdot 10^{-3}$ .

Эталон возглавляет государственную поверочную схему для средств измерений НЭП в диапазоне частот 0,0003 — 2500 МГц и обеспечивает передачу размера единицы НЭП вторичным эталонам, рабочим эталонам и рабочим средствам измерений. В состав первичного эталона входят три эталонные установки на базе плоского конденсатора УЭПЭ-ПК, четырехпроводной линии передачи УЭМПЭ-ЛП4, биконических антенн УЭПЭ-БА.

**Установка УЭПЭ-ПК** имеет следующие характеристики: частотный диапазон 0,0003 — 10 МГц; диапазон НЭП 0,5 — 20 В/м; рабочий объем однородного поля — сфера диаметром  $D = 0,1$  м.

Основной элемент установки — эталонный конденсатор, являющийся преобразователем переменного напряжения в напряженность электрического поля. Между его пластина-

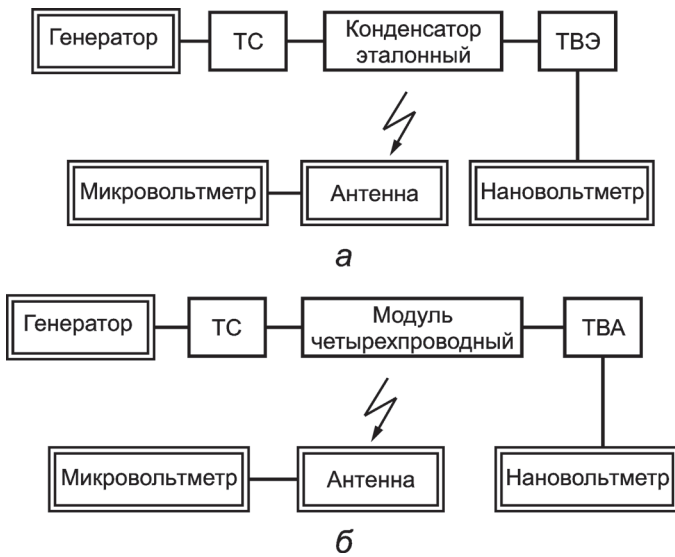


Рис. 1. Структурные схемы установок УЭПЭ-ПК (а) и УЭМПЭ-ЛП4 (б):  
 ТС — симметрирующий трансформатор; ТВЭ — эталонный термовольметр; TBA — термовольтамперметр

ми в пространстве, ограниченном сферой диаметром  $D$ , центр которой совпадает с центром конденсатора, образуется рабочий объем. В нем электрическое поле однородно с заданной точностью. Размеры рабочего объема определяются максимальным размером измерительной антенны  $l$ , помещаемой в него. Если  $l < D$ , то погрешность, обусловленная взаимодействием антенны с пластинами конденсатора, не превышает заданного значения [6].

Вектор напряженности электрического поля в рабочем объеме параллелен оси конденсатора, а его модуль выражается формулой

$$E = KU,$$

где  $E$  — модуль напряженности электрического поля в рабочем объеме, В/м;  $K$  — коэффициент преобразования эталонного конденсатора,  $K = 2 \text{ м}^{-1}$ ;  $U$  — эффективное значение напряжения между пластинами конденсатора, В,

$$U = I[R^2 + (2\pi fL)^2]^{1/2};$$

$I$  — сила тока, протекающего через эталонный термовольметр (ТВЭ), подключенный к пластинам конденсатора, А;

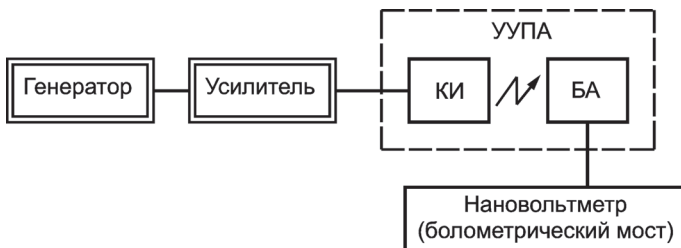


Рис. 2. Структурная схема установки УЭПЭ-БА:

УУПА — устройство для установки и перемещения антенн; KI, BA — комплекты излучающих и биконических антенн

$f$  — частота, Гц;  $R$  — активное сопротивление ТВЭ, Ом;  $L$  — индуктивность, Гн.

Индуктивность  $L$  имеет одинаковое значение для всех ТВЭ вследствие их одинаковой конструкции. В эталонном электрическом поле, создаваемом в рабочей зоне эталонного конденсатора, аттестуются антенны компаратора, используемые при передаче размера единицы эталонным генератором электрического поля. Компаратором, входящим в состав УЭПЭ-ПК, служит электрическая антенна с селективным микровольтметром или транспортируемый эталон напряженности электрического поля ТЭНЭП. Схема функционирования установки приведена на рис. 1, а.

**Установка УЭМПЭ-ЛП4** имеет следующие характеристики:

- частотный диапазон 10 — 30 МГц;
- диапазон НЭП 0,5 — 20 В/м;
- рабочий объем — сфера диаметром  $D = 0,15 \text{ м}$ .

Основной элемент установки — преобразователь напряжения в напряженность электрического поля на базе модуля четырехпроводной линии передачи. Вектор напряженности электрического поля в рабочей зоне направлен горизонтально. При размере антенны  $l = D$  погрешность аттестации, обусловленная неоднородностью электрического поля и взаимодействием измерительной антенны с электродами линии, не превышает заданного значения [7]. Среднее квадратическое значение вектора НЭП в центре рабочей зоны выражается формулой

$$E = k(f)U, U = RI,$$

где  $E$  — напряженность электрического поля, В/м;  $k(f)$  — коэффициент преобразования четырехпроводной линии, на частоте 20 МГц  $k(f) = 1,57 \text{ м}^{-1}$ ;  $U$  — напряжение между электродами линии, В;  $R$  — сопротивление термовольтамперметра (TBA), Ом,  $I$  — сила тока в его термопреобразователе, А.

Сопротивление TBA выбирается из условий согласования с волновым сопротивлением линии и равно 309 Ом. В электрическом поле, создаваемом в рабочей зоне эталонной линии, аттестуются антенны компаратора. Передача размера единицы НЭП подчиненным средствам измерений осуществляется методом компарирования при помощи транспортируемого эталона ТЭНЭП.

Схема функционирования установки УЭМПЭ-ЛП4 приведена на рис. 1, б.

**Установка УЭПЭ-БА** имеет следующие характеристики:

- частотный диапазон 30 — 1000 МГц;
- диапазон НЭП 0,2 — 20 В/м;
- резонансные частоты 80, 150, 200, 300 для антенн с термопреобразователями (АЭБ-ТП) и 300, 600, 900, 1000 МГц для антенн с болометрами (АЭБ-БЛ);
- диапазон частот комплекта антенн-излучателей 30—3000 МГц.

Основным элементом установки УЭПЭ-БА является комплект биконических антенн с термопреобразователями и болометрами. Антенны предназначены для измерения однородного линейно поляризованного электрического поля или его проекции на ось симметрии преобразователя, создаваемого с помощью комплекта излучающих антенн. Напряженность электрического поля, измеряемая эталонными антеннами, вычисляется по формуле

$$E = \alpha \frac{I}{L_d} \sqrt{(\operatorname{Re} Z_a + R)^2 + (\operatorname{Im} Z_a)^2},$$

где  $E$  — напряженность электрического поля, В/м;  $I$  — сила тока, измеренного термопреобразователем или болометром, А;  $R$  — сопротивление термопреобразователя или болометра, Ом;  $\operatorname{Re} Z_a$ ,  $\operatorname{Im} Z_a$  — действительные и мнимые части импеданса антенны, Ом;  $L_d$  — действующая длина антенны, м;  $\alpha$  — коэффициент, определяющий шунтирующее действие развязывающей линии для антенн с болометрами,

$$\alpha = \left| \frac{R}{R + Z_l} \right| \left\| 1 + Z_a \frac{R + Z_l}{R Z_l} \right|,$$

$Z_l = iW \operatorname{tg} kL_p$ ;  $W = 120 \ln [(2a - D)/D]$ ;  $k$  — постоянная распространения,  $\text{м}^{-1}$ ;  $L_p$  — длина отрезка развязывающей линии, м;  $a$ ,  $D$  — расстояние между проводниками и диаметр проводников развязывающей линии, м.

Параметры антенн находят путем электродинамического расчета [8]. Силу тока в антенне определяют в результате измерения напряжения термоЭДС (ТЭДС) нановольтметром или мощности при помощи болометрического моста.

Передача размера единицы от установки УЭПЭ-БА эталонным средствам измерений осуществляется методом замещения эталонной антенны, которую аттестуют в электрическом поле, созданном излучающими антеннами. Для выполнения условий замещения в составе установки имеется устройство перемещения антенн, позволяющее устанавливать центры эталонной и аттестуемой антенн в одну и ту же точку пространства как по расстоянию, так и по высоте с погрешностью не более  $\pm 5$  мм. Устройство оборудовано щитами из радиопоглощающего материала, предохраняющего оператора от электромагнитного облучения.

Схема функционирования установки УЭПЭ-БА приведена на рис. 2.

В состав эталона входит стенд для градуировки термопреобразователей (СГТ), который имеет следующие характеристики:

диапазон установки силы тока 0,1 — 100 мА;

диапазон измерения ТЭДС 0,1 — 25 мВ.

Стенд обеспечивает измерение зависимости между силой тока и ТЭДС в термопреобразователях вакуумных бесконтактных (ТВБ), установленных в эталонных биконических антеннах установки УЭПЭ-БА, термовольтамперметрах установки УЭМПЭ-ЛП4 и термовольтметрах установки УЭПЭ-ПК методом компарирования с постоянным током по измеренному значению ТЭДС. Стенд реализован на основе калибратора постоянного тока. Схема функционирования СГТ приведена на рис. 3.

Принцип работы стенда состоит в предварительной градуировке термопреобразователей на постоянном токе. Далее силу переменного тока и сопротивление термопреобразователя рассчитывают по интерполяционным формулам

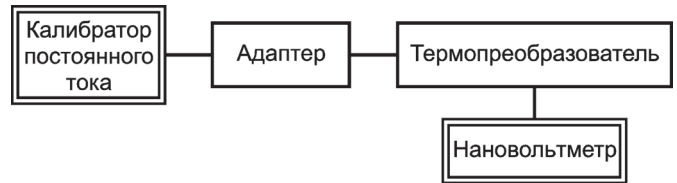


Рис. 3. Структурная схема стенда для градуировки термопреобразователей

$$\left. \begin{aligned} I_T &= x(A_1 + A_2 x^2 + A_3 x^3 + A_4 x^4); \\ R_T &= B_1 + B_2 x^2 + B_3 x^3 + B_4 x^4; \\ x &= \sqrt{U_T}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $I_T$  — ток в термопреобразователе, мА;  $R_T$  — сопротивление термопреобразователя на постоянном токе, Ом;  $U_T$  — ТЭДС, мВ.

Значения коэффициентов  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $i = \overline{1, 4}$  получают из решения системы четырех линейных уравнений, составляемой согласно (1) по результатам градуировки ТВБ на постоянном токе при следующих значениях тока: 0,2; 0,5; 0,8 и 1,1 номинального тока ТВБ.

**Транспортируемый эталон сравнения** имеет следующие характеристики:

диапазон частот 0,1 — 1000 МГц;

диапазон выходных напряжений 1 — 4000 мВ.

Этот эталон используется при передаче размера единицы НЭП от установок УЭПЭ-ПК, УЭПЭ-ЛП4 и УЭМПЭ-БА рабочим эталонам электрического поля. Относительное значение СКО результата измерения при передаче единицы по пяти независимым наблюдениям не превышает  $8 \cdot 10^{-3}$ .

В проект стандарта на поверочную схему, возглавляемую первичным эталоном, внесен ряд изменений, связанных с обеспечением поверки измерительных антенн. В поверочной схеме на рис. 4 в качестве самостоятельной введена ветвь, связанная с поверкой измерительных антенн, в которой передача размера единицы осуществляется не по НЭП, а по величине ей пропорциональной — коэффициенту калибровки (антенному фактору)

$$k_3 = EU,$$

где  $E$  — напряженность электрического поля, В/м;  $U$  — напряжение, В, в сечении выходного разъема антенны с номинальным выходным сопротивлением  $Z_0 = 50$  Ом.

Для этого в поле рабочих эталонов 2-го разряда введены электрические эталонные антенны в диапазоне частот 30 — 1000 МГц и для расширения частотного диапазона до 2,5 ГГц, эталон единицы эффективной площади антенн  $S_3$ , заимствованный из поверочной схемы государственного первичного эталона единицы плотности потока электромагнитной энергии ГЭТ 160 [11].

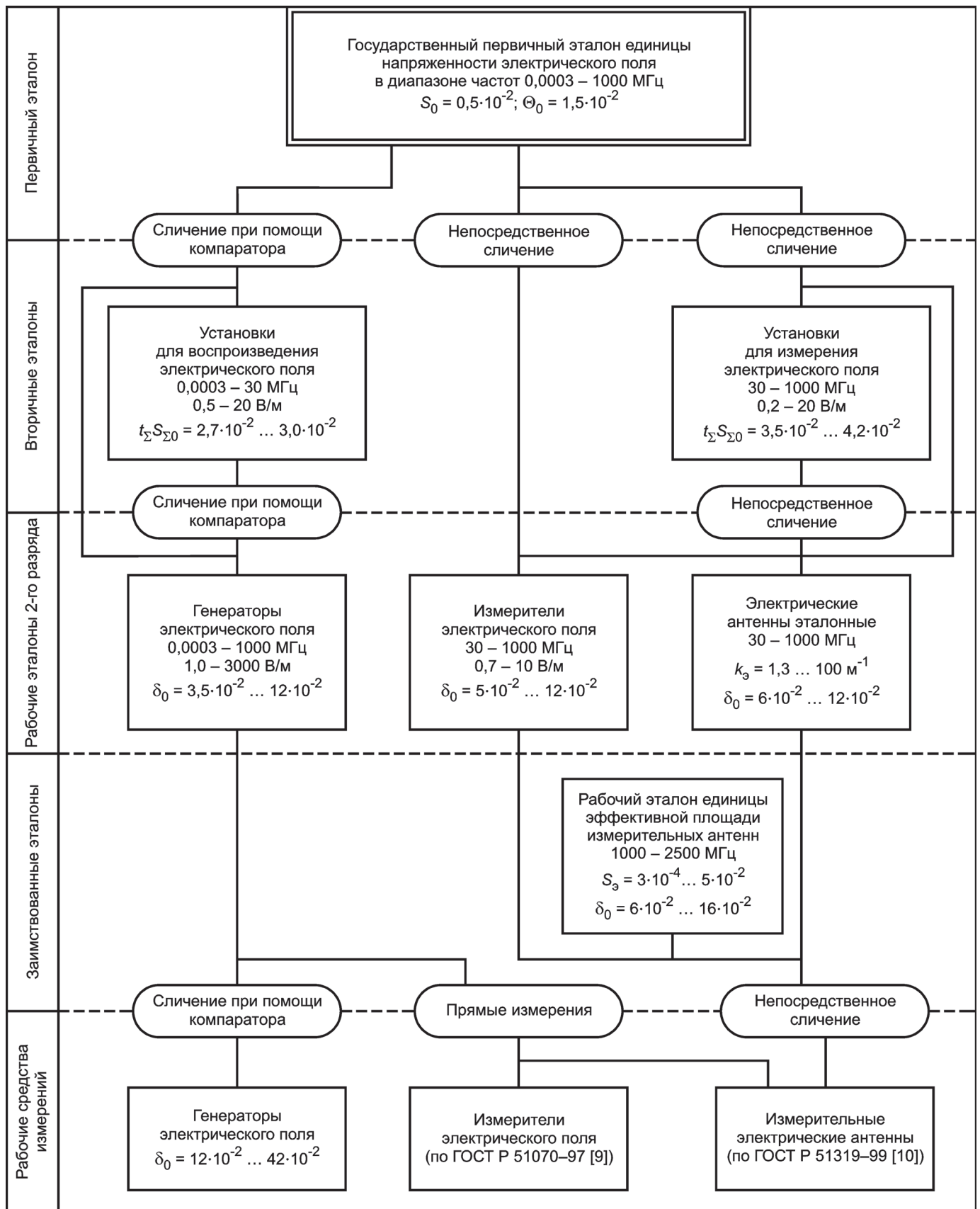


Рис. 4. Государственная поверочная схема для средств измерений напряженности электрического поля в диапазоне частот 0,0003 — 2500 МГц

Литература

1. **Тищенко В. А., Лукьянов В. И., Токатлы В. И.** Государственный первичный эталон единицы напряженности электрического поля в диапазоне частот от 0,0003—1000 МГц // Измерительная техника. 1995. № 1. С. 4—7; **Tishchenko V. A., Luk'yanov V. I., Tokatly V. I.** State primary standard for the unit of electric field strength in the frequency range 0,0003—1000 MHz // Measurement Techniques. 1995. V. 38. N 1. P. 4—8.

2. **Тищенко В. А.** Возможности ВНИИФТРИ в международной системе калибровки средств измерений электромагнитных полей радиочастотного диапазона // Измерительная техника. 2005. № 1. С. 31—35; **Tishchenko V. A.** List of calibration and measurement capabilities of VNIIFTRI in the domain of measurements of electromagnetic fields // Measurement Techniques. 2005. V. 48. N 1. P. 36—41.

3. **Тищенко В. А., Токатлы В. И., Лукьянов В. И.** Ключевые сличения в области измерений напряженности электрического поля CCEM.RF-K-20 // Измерительная техника. 2007. № 9. С. 69—72; **Tishchenko V. A., Tokatly V. I., Luk'yanov V. I.** Key comparisons CCEM.RF-K-20 in the area of electric field strength measurements // Measurement Techniques. 2007. V. 50. N 9. P. 1014—1018.

4. **Pythoud F.** CCEM.RF-K20: Comparison of electrical field strength measurements // Metrologia. 2006. V. 43. Tech. Suppl. 01006.

5. **Knight D. A., Alexander M. J.** Final report on CCEM.RF-K21.F: Intercomparison of tuned dipole antenna factor at 300 MHz and 900 MHz // Metrologia. 2007. V. 44. Tech. Suppl. 01005.

6. **Тищенко В. А., Токатлы В. И.** О калибровке сферической антенны в поле плоского конденсатора // Измерительная техника. 1979. № 10. С. 70—71; **Tishchenko V. A., Tokatly V. I.** Calibration of a spherical antenna in the field of a parallel-plate capacitor // Measurement Techniques. 1979. V. 22. N 10. P. 1264—1266.

7. **Лукьянов В. И.** Электрическое поле источника на базе отрезка четырехпроводной линии передачи // Измерительная техника. 1991. № 7. С. 42—44; **Luk'yanov V. I.** Electrical field of a source based on a segment of a four-wire transmission line // Measurement Techniques. 1991. V. 34. N 7. P. 712—717.

8. **Соколов И. В.** Параметры измерительной биконической антенны // Измерительная техника. 1986. № 11. С. 51—52; **Sokolov I. V.** Parameters of a biconical measuring antenna // Measurement Techniques. 1986. V. 29. N 11. P. 1074—1077.

9. **ГОСТ Р 51070—97.** Измерители напряженности электрического и магнитного полей. Общие технические требования и методы испытаний.

10. **ГОСТ Р 51319—99.** Совместимость технических средств электромагнитная. Приборы для измерения промышленных радиопомех. Технические требования и методы испытаний.

11. **ГОСТ 8.547—2000.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений плотности потока энергии электромагнитного поля в диапазоне частот от 0,3 до 178,4 ГГц.

Дата принятия 18.06.2012 г.

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ  
И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

681.2.088

**Измерение отношения двух нормально  
распределенных случайных величин**

**А. М. РАЙЦИН**

Московский технический университет связи и информатики,  
Москва, Россия, e-mail: arcadiyram@rambler.ru

*Рассмотрены условия, при которых возможно практическое применение характеристик математического ожидания и дисперсии для оценки результатов измерений отношения двух нормально распределенных случайных величин. Приведены расчетные соотношения и показано хорошее совпадение с результатами моделирования при малых относительных погрешностях измерения знаменателя отношения.*

**Ключевые слова:** плотность вероятности, случайная величина, функция распределения, математическое ожидание, дисперсия, доверительная вероятность, доверительный интервал.

*The conditions at which is possible the practical application of expectation characteristics and of variance for estimation of results of measurements of two normally distributed random quantities ratio are considered. The calculated ratios are presented and a good agreement with the simulation results at small relative errors of measurement of ratio denominator is shown.*

**Key words:** probability density, random quantity, distribution function, expectation, variance, confidence probability, confidence interval.

Для получения результатов косвенных измерений весьма часто используется операция деления. Если рассматривать отношение двух центрированных нормально распреде-

ленных случайных величин, то у него отсутствуют математическое ожидание и дисперсия. На практике это означает, что оценки таких величин будут неограниченно возрастать