МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ
(МГС)
INTERSTATE COUNCIL FOR STANDARDIZATION, METROLOGY AND CERTIFICATION
(ISC)

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГОСТ IEC/TR 61000-1-6—2014

Электромагнитная совместимость (ЭМС)

Часть 1-6

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Руководство по оценке неопределенности измерений

(IEC/TR 61000-1-6:2012, IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2015

Предисловие

Цели, основные принципы и основной порядок проведения работ по межгосударственной стандартизации установлены ГОСТ 1.0–92 «Межгосударственная система стандартизации. Основные положения» и ГОСТ 1.2–2009 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Правила разработки, принятия, применения, обновления и отмены»

Сведения о стандарте

1 ПОДГОТОВЛЕН Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр «САМТ-ЭС» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств»

2 ВНЕСЕН Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии Российской Федерации

3 ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 14 ноября 2014 г. № 72-П)

За принятие проголосовали:

Краткое наименование страны по МК (ИСО 3166) 004–97	Код страны по МК (ИСО 3166) 004–97	Сокращенное наименование национального органа по стандартизации
Азербайджан	AZ	Азстандарт
Беларусь	BY	Госстандарт Республики Беларусь
Киргизия	KG	Кыргызстандарт
Молдова	MD	Молдова-Стандарт
Россия	RU	Росстандарт
Таджикистан	TJ	Таджикстандарт

4 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 ноября 2014 г. № 1708-ст межгосударственный стандарт ГОСТ IEC/TR 61000-1-6—2014 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 марта 2015 г.

5 Настоящий стандарт идентичен международному документу IEC/TR 61000-1-6:2012 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 1-6: General — Guide to assessment of measurement uncertainty [Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 1-6. Общие положения. Руководство по оценке неопределенности измерений].

Технический отчет IEC 61000-1-6:2012 подготовлен техническим комитетом ТК 77 IEC Электромагнитная совместимость в сотрудничестве с CISPR (Международный специальный комитет по радиопомехам).

Технический отчет IEC 61000-1-6:2012 представляет собой часть 1-6 серии стандартов IEC 61000 и имеет статус основополагающей публикации ЭМС в соответствии с Руководством IEC 107 Electromagnetic compatibility — Guide to the drafting of electromagnetic compatibility publications (Электромагнитная совместимость. Руководство по разработке публикаций в области электромагнитной совместимости).

Перевод с английского языка (en).

Сведения о соответствии межгосударственных стандартов ссылочным международным стандартам приведены в дополнительном приложении ДА.

Степень соответствия — идентичная (IDT)

6 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет

Содержание

Введение

Стандарты серии МЭК 61000 публикуются отдельными частями в соответствии со следующей структурой:

- часть 1. Общие положения:

общее рассмотрение (введение, фундаментальные принципы), определения, терминология;

- часть 2. Электромагнитная обстановка:

описание электромагнитной обстановки, классификация электромагнитной обстановки, уровни электромагнитной совместимости;

- часть 3. Нормы:

нормы электромагнитной эмиссии, нормы помехоустойчивости (в тех случаях, когда они не являются предметом рассмотрения техническими комитетами, разрабатывающими стандарты на продукцию);

- часть 4. Методы испытаний и измерений:

методы измерений, методы испытаний;

- часть 5. Руководства по установке и помехоподавлению:

руководства по установке, методы и устройства помехоподавления;

- часть 6. Общие стандарты;
- часть 9. Разное.

Каждая часть далее подразделяется на несколько частей, которые могут быть опубликованы в качестве международных стандартов или технических требований/условий, или технических отчетов; некоторые из которых были уже опубликованы, как разделы. Другие будут опубликованы с указанием номера части, за которым следует дефис, а затем номер раздела (например, 61000-6-1).

М Е Ж Г О С У Д А Р С Т В Е Н Н Ы Й   С Т А Н Д А Р Т

Электромагнитная совместимость (ЭМС)

Часть 1-6

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Руководство по оценке неопределенности измерений

**Electromagnetic compatibility (EMC). Part 1-6. General.
Guide to assessment of measurement uncertainty**

Дата введения — 2015—03—01

1 Область применения

Настоящий стандарт содержит методы и общую информацию для оценки неопределенности измерений и представляет собой руководство для понимания общих положений неопределенности измерений в серии стандартов IEC 61000.

Целью настоящего стандарта является: предоставление рекомендаций техническим комитетам, в том числе, разрабатывающим стандарты на продукцию, и органам по оценке соответствия по вопросам формирования бюджетов неопределенности измерений; предоставление возможности сравнивать эти бюджеты в лабораториях, имеющих сходные свойства влияющих величин; согласование обработки неопределенности измерений в комитетах ЭМС МЭК.

Любые факторы, влияющие на неопределенность измерений, упомянутые в настоящем стандарте, следует рассматривать как примеры. Технические комитеты, ответственные за подготовку основополагающих стандартов в области помехоустойчивости, ответственны за определение факторов, вносящих вклад в неопределенность измерений при использовании их основного метода испытаний.

Настоящий стандарт содержит описание применения:

- метода оценки неопределенности измерений (MU);
- математических формул для функций плотности вероятности (ФПВ);
- аналитической оценки статистических оценок;
- поправки результатов измерений;
- документации.

Настоящий стандарт не предназначен ни для обобщения всех величин, влияющих на неопределенность измерений, ни для определения, насколько неопределенность измерений должна быть принята во внимание при определении соответствия требованиям ЭМС.

Примечание – Некоторые из примеров, приведенных в настоящем стандарте, взяты из публикаций IEC, отличающихся от серии IEC 61000, в которых уже реализованы процедуры оценки, представленные здесь. Эти примеры использованы для иллюстрации принципов.

2 Нормативные ссылки

Следующие документы (полностью или частично) являются нормативными ссылками и необходимы для применения настоящего стандарта. Для датированных ссылок применяют только указанное издание. Для недатированных ссылок применяют последнее издание ссылочного документа (включая любые изменения).

Издание официальное

IEC 60050-161:1990 International Electrotechnical Vocabulary (IEV) — Chapter 161: Electromagnetic compatibility
[Международный электротехнический словарь (МЭС). Глава 161. Электромагнитная совместимость]

CISPR 16-1-1:2010 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods — Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus — Measuring apparatus
(Требования к аппаратуре для измерения радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1-1. Аппаратура для измерения радиопомех и помехоустойчивости. Измерительная аппаратура).

CISPR 16-4-2:2011 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods — Part 4-2: Uncertainties, statistics and limit modelling — Measurement instrumentation uncertainty
(Требования к аппаратуре для измерения радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 4-2. Неопределенности, статистика и моделирование норм. Инструментальная неопределенность измерений).

ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the
expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) [Неопределенность измерений. Часть 3: Руководство по выражению неопределенности измерений (GUM:1995), исправленная первая редакция]

3 Термины, определения, обозначения и сокращения

3.1 Термины и определения

В целях настоящего стандарта применены термины по IEC 60050-161, а также следующие термины с соответствующими определениями.

Примечание — Некоторые из важных терминов IEC 60050-161 включены в термины, представленные ниже.

3.1.1 **суммарная стандартная неопределенность** (combined standard uncertainty): Стандартная неопределенность измерений, полученная при использовании частных стандартных неопределенностей измерений, связанных с входными величинами в модели измерений.

[Руководство ISO/IEC 99:2007, термин 2.31, допущенный термин стал предпочтительным (и только) термином]

3.1.2 **уровень доверия** (confidence level): Вероятность, обычно выраженная в процентах, того, что истинное значение статистически оцененной величины находится в пределах предустановленного интервала в окрестности оцененного значения.

[IEC 60050-393:2003, 393-18-31]

3.1.3 **коэффициент охвата** (coverage factor): Числовой коэффициент, используемый в качестве множителя суммарной стандартной неопределенности для получения расширенной неопределенности.

[Руководство ISO/IEC 99:2007, термин 2.36, измененный — Примечание было удалено]

3.1.4 **интервал охвата** (coverage interval): Интервал, содержащий набор значений измеряемой величины с установленной вероятностью, основанной на доступной информации.

[Руководство ISO/IEC 99:2007, термин 2.36, измененный — Истинные значения величины были изменены на значения величины]

3.1.5 **вероятность охвата** (coverage probability): Вероятность того, что набор значений измеряемой величины содержится в пределах указанного интервала охвата.

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, термин 2.37, измененный — Истинные значения величины были изменены на значения величины]

3.1.6 **функция распределения** (distribution function): Функция, задающая каждому значению ξ вероятность того, что случайная переменная величина X будет меньше или равна ξ:

$$G(\xi) = \Pr(X \le \xi).$$

[Руководство ISO/IEC 98-3, Приложение 1:2008, определение 3.2]

3.1.7 **погрешность** (error): Разность значения измеряемой величины и опорного значения величины.

[Руководство ISO/IEC 99:2007, термин 2.16, измененный — Второй принятый термин стал предпочтительным (и только) термином]

3.1.8 **расширенная неопределенность** (expanded uncertainty): Величина, определяющая интервал для результатов измерений, который, как ожидается, охватит бо́льшую часть распределения значений, которые могли обоснованно быть приписаны измеряемой величине.

[Руководство ISO/IEC 98-3:2008, термин 2.3.5, измененный — Примечания 1–3 были удалены]

3.1.9 **электромагнитная совместимость; ЭМС** (electromagnetic compatibility; EMC): Способность оборудования или системы функционировать удовлетворительно в ее электромагнитной обстановке без создания недопустимых электромагнитных помех чему-либо в этой обстановке.

[IEC 60050-161:1990, 161-01-07]

3.1.10 **эмиссия** (emission): Явление, при котором электромагнитная энергия исходит от источника.

[IEC 60050-161:1990, 161-01-08, измененный — Добавление «электромаг-нитный» к термину было удалено]

3.1.11 **уровень эмиссии** (emission level); **уровень эмиссии от источника помех** (emission level from a disturbing source): Уровень определенной электромагнитной помехи, создаваемой конкретным устройством, оборудованием или системой.

[IEC 60050-161:1990, 161-03-11]

3.1.12 **норма эмиссии** (emission limit); **норма эмиссии от источника помех** (emission limit from a disturbing source): Регламентированный максимальный уровень эмиссии источника электромагнитных помех.

[IEC 60050-161:1990, 161-03-12]

3.1.13 **помехоустойчивость** (immunity); **устойчивость к электромагнитной помехе** (immunity to a disturbance): Способность устройства, оборудования или системы функционировать без ухудшения в присутствии электромагнитной помехи.

[IEC 60050-161:1990, 161-01-20]

3.1.14 **норма помехоустойчивости** (immunity limit): Регламентированный минимальный уровень помехоустойчивости.

[IEC 60050-161:1990, 161-03-15]

3.1.15 **испытательный уровень при испытаниях на помехоустойчивость** (immunity test level): Уровень испытательного сигнала, используемого для имитации электромагнитной помехи, при проведении испытаний на помехоустойчивость.

[IEC 60050-161:1990, 161-04-41]

3.1.16 **показание** [indication]: Значение величины, предоставляемое средством измерений или измерительной системой.

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, термин 4.1, измененный — Примечания 1 и 2 были удалены]

3.1.17 **влияющая величина** (influence quantity): Величина, которая не является измеряемой, но влияет на результат измерений.

[IEC 60050-394:2007, 394-40-27, измененный — Примечание было удалено]

3.1.18 **инструментальная неопределенность; ИН** (instrumentation uncertainty; IU); **инструментальная неопределенность измерений; ИНИ** (measurement instrumentation uncertainty; MIU): Параметр, связанный с величиной, характеризующей помеху, создаваемую во время измерения эмиссии или приложенную при испытаниях на помехоустойчивость, который характеризует разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине, индуцированных всеми соответствующими влияющими величинами, которые относятся к средствам измерений или испытательному оборудованию.

Примечание 1 — Термин «инструментальная неопределенность; ИН» предназначен для применения при измерениях эмиссии и испытаниях на помехоустойчивость. В серии стандартов СИСПР 16 используется также термин «инструментальная неопределенность измерений; (ИНИ)».

Примечание 2 — Базируется на IEC 60359:2001, термин 3.1.4

3.1.19 **внутренняя неопределенность измеряемой величины** (intrinsic uncertainty of the measurand): Минимальная неопределенность, которая может быть указана в описании измеряемой величины

Примечание 1 — Теоретически внутренняя неопределенность измеряемой величины может быть получена, если величина была измерена с помощью измерительной системы, имеющей пренебрежимо малую инструментальную неопределенность измерений.

Примечание 2 — Ни одна величина не может быть измерена с постоянно малой неопределенностью, так как любая данная величина определяется или определена при заданном уровне детализации. Если попытаться измерить заданную величину с неопределенностью ниже, чем ее собственная внутренняя неопределенность, то ее необходимо переопределить с более высокой детализацией, так что на самом деле это фактически измерение другой величины. См. также Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008, приложение D, подраздел D.1.1.

Примечание 3 — Результат измерений, выполненный с внутренней неопределенностью измеряемой величины, может быть назван лучшим измерением рассматриваемой величины.

[IEC 60359:2001, термин 3.1.11, измененный — Было добавлено дополнительное пояснение, т. е. Примечание 1]

3.1.20 **уровень** (level); **уровень величины, изменяющейся во времени** (level of a time varying quantity): Значение величины такой, как мощность или величина поля, которое измеряется и/или оценивается регламентированным способом в течение определенного временного интервала.

[IEC 60050-161:1990, 161-03-01, измененный — Примечание было удалено]

3.1.21 **границы погрешности средства измерений** (limits of error of a measuring instrument): Предельное значение погрешности измерений по отношению к известному значению исходной величины, допускаемое спецификациями или правилами для данного измерения, средства измерений или измерительной системы.

[Руководство ISO/IEC 99:2007, термин 4.26, измененный — Термин был уточнен, примечания 1 и 2 были удалены]

3.1.22 **измеряемая величина** (measurand): Конкретная количественная величина, подлежащая измерению.

[IEC 60050-311:2001, 311-01-03]

3.1.23 **измерительная погрешность** (measurement accuracy); **погрешность измерений** (accuracy of measurement); *устаревшее* **точность измерений** (precision of measurement): Близость соответствия между измеренным значением величины и истинным значением измеренной величины.

Примечание 1 — Точность — качественное понятие.

[IEC 60050-311:2001, 311-06-08, измененный — Термин был изменен и заменен двумя терминами, примечание 1 было удалено, примечание 2 было заменено пояснением]

3.1.24 **точность измерений** (measurement precision): Близость соответствия между показателями или значениями измеряемой величины, полученными с помощью повторяющихся измерений для одних и тех же или подобных объектов при определенных условиях.

[Руководство ISO/IEC 99:2007, термин 2.15, измененный — Примечания 1–4 были удалены]

3.1.25 **результат измерений** (measurement result): Набор значений величины, приписываемых измеряемой величине вместе с какой-либо другой имеющейся информацией.

[IEC 60050-311:2001, 311-01-01, исправленное — Термин был изменен, определение расширено. Примечания 1–5 были удалены]

3.1.26 **измерительная система** (measuring system): Полный набор средств измерений и другого оборудования, объединенный для осуществления определенных измерений.

[IEC 60050-311:2001, 311-03-06]

3.1.27 **правильность измерений** (measurement trueness): Близость соответствия между средним бесконечного числа значений повторяющейся измеряемой величины и истинным значением величины.

[Руководство ISO/IEC 99:2007, термин 2.14, измененный — Дан только предпочтительный термин, а примечания 1–3 были удалены]

3.1.28 **неопределенность измерений; НИ** (measurement uncertainty; MU): Неотрицательный параметр, характеризующий разброс значений величины, приписываемых измеренной величине, основанный на используемой информации.

[Руководство ISO/IEC 99:2007, термин 2.26, измененный — Дан только предпочтительный термин, а примечания 1–4 были удалены]

3.1.29 **функция плотности вероятности; ФПВ** (probability density function; PDF): Производная, если она существует, функции распределения:

$$g(\xi) = \frac{dG(\xi)}{d\xi}.$$

Примечание 1 — $g(\xi)d\xi$ называется элементом вероятности:

$$g(\xi)d\xi = \Pr(\xi < X < \xi + d\xi).$$

[Руководство ISO/IEC 98-3:2008, термин 3.3, измененный — Уравнение было изменено]

3.1.30 **случайная погрешность** (random error): Разность между измерением и средним, которое является результатом бесконечно большого числа измерений той же измеряемой величины, осуществляемых при повторяющихся условиях.

[IEC 60050-394:2007, 394-40-33, измененный — Определение было изменено и примечания 1 и 2 были удалены]

3.1.31 **повторяемость** (repeatability); **повторяемость результатов измерений** (repeatability of results of measurement): Близость соответствия между результатами удовлетворительных измерений одной и той же измеряемой величины, осуществляемых при одних и тех же условиях измерений, т. е.:

- по одной и той же методике измерений;
- одним и тем же наблюдателем;
- с помощью одних и тех же средств измерений, использованных при одних и тех же условиях;
- в одной и той же лаборатории;
- в пределах относительно короткого интервала времени.

[IEC 60050-311:2001, 311-06-06, измененный — Примечание было удалено]

3.1.32 **воспроизводимость измерений** (reproducibility of measurements): Близость соответствия между результатами измерений одного и того же значения величины, когда отдельные измерения выполнены при разных условиях измерений таких как:

- принцип измерения;
- метод измерения;
- наблюдатель;
- средства измерений;
- эталоны;
- лаборатория;
- при использования средств измерений в условиях, отличающихся от обычных условий применения;
- по прошествии интервалов времени, относительно длинных по сравнению с длительностью одного измерения.

Примечание 1 — Термин «воспроизводимость» также относится к случаю, когда только определенные из вышеуказанных условий учитываются при условии, что эти положения изложены.

[IEC 60050-311:2001, 311-06-07, измененный — Примечание 1 было удалено, а примечание 2 перенумеровано как примечание 1]

3.1.33 **коэффициент чувствительности** (sensitivity coefficient): Отношение между изменением оценки выходной величины y и соответствующим изменением оценки входной величины x_i.

3.1.34 **стандартное отклонение одного измерения в серии измерений** (standard deviation of a single measurement in a series of measurement): Параметр, характеризующий разброс результата, полученный в серии из n измерений одной и той же измеряемой величины

$$s(q_i) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{j=1}^{n}\left(q_j - \bar{q}\right)^2},$$

где $\bar{q}$ среднее значение n измерений.

[Руководство ISO/IEC 98-3:2008, термин B.2.17, измененный — Термин, определение и уравнение были изменены, а примечания 1–4 удалены]

3.1.35 **стандартное отклонение арифметического среднего серии измерений** (standard deviation of the arithmetic mean of a series of measurements): Параметр, характеризующий разброс арифметического среднего серии независимых измерений одного и того же значения измеряемой величины, выражаемый формулой

Примечание 1 — $s(\bar{q})$ есть стандартная неопределенность для оценивания типа А (см. 5.3), если $\bar{q}$ используется как оценка.

3.1.36 **стандартная неопределенность** (standard uncertainty): Неопределенность измерения, выраженная как стандартное отклонение.

[Руководство ISO/IEC 99:2006, термин 2.30, измененный — Допустимый термин стал предпочтительным (и единственным) термином]

3.1.37 **систематическая погрешность** (systematic error): Разность между арифметическим средним, которое было бы результатом бесконечного числа измерений одной и той же измеряемой величины, осуществляемых при воспроизводимых условиях и истинным значении измеряемой величины.

[IEC 60050-394:2007, 394-40-32, измененный — Определение было изменено, а примечание было удалено]

3.1.38 **допустимое отклонение** (tolerance): Максимальное отклонение значения, разрешенное спецификациями, правилами и т. д. для данной определенной влияющей величины.

3.1.39 **истинное значение** (true value): Фактическое значение величины, которую надо измерить.

Примечание 1 — Оно никогда не может быть известно абсолютно точно, но может быть приближенным (в рамках неопределенности) в соответствии с национальными стандартами).

[IEC 60050-311:2001, 311-01-04, измененный — Дополнение к термину было удалено, определение было изменено, примечания 1–4 были удалены, а примечание 1 было добавлено]

3.1.40 **оценивание по типу А** (type A evaluation): Оценка компонентов неопределенности измерений с помощью статистического анализа измеренных значений величины, полученных при определенных условиях измерений.

[Руководство ISO/IEC 99:2007, термин 2.29, измененный — Допускаемый термин стал предпочтительным (и единственным) термином, а примечания 1–3 были удалены]

3.1.41 **оценивание по типу В** (type B evaluation): Оценка компонентов неопределенности измерений, определенных с помощью других средств, чем при оценивании неопределенности измерений по типу А.

[Руководство ISO/IEC 99:2007, термин 2.29, измененный — Допускаемый термин стал предпочтительным (и единственным) термином, а примеры и примечание были удалены]

3.2 Обозначения

X – выборка значений;

a^+ – верхняя граница величины X;

a^- – нижняя граница величины X;

d – число осей зонда поля;

N – число повторяющихся показаний;

ν – число степеней свободы, $\nu = N - 1$;

ν_X – коэффициент вариации X;

M – число выборок из N повторяющихся показаний;

P – вероятность покрытия;

p – значение вероятности, $p = (1 - P)/2$;

Q_i – случайное показание;

$\overline{Q}$ – среднее значение выборки из N показаний;

$\overline{Q_j}$ – среднее значение j-й выборки из N показаний;

$\overline{\overline{Q}}$ – среднее M выборок из N показаний;

$s(Q_i)$ – экспериментальное стандартное отклонение;

$s(\overline{Q})$ – экспериментальное стандартное отклонение среднего, $s(\overline{Q}) = s(Q_i)/\sqrt{N}$;

$u(Q_i)$ – оценка стандартной неопределенности типа А, $u(Q_i) = \eta(\nu) \cdot s(Q_i)$;

$\eta(\nu)$ – коэффициент, который преобразует экспериментальное стандартное отклонение в стандартную неопределенность типа А;

$u(\overline{Q})$ – оценка стандартной неопределенности среднего типа А, $u(\overline{Q}) = u(Q_i)/\sqrt{N}$;

$t_p(\nu)$ – верхнее пороговое значение t с ФПВ Стьюдента с ν степенями свободы, соответствующее вероятности p на краю;

$X_{\min}$ – нижнее значение (спецификации, допустимого отклонения, охвата) интервала для величины X ;

$X_{\max}$ – верхнее значение (спецификации, допустимого отклонения, охвата) интервала для величины X ;

$G(X)$ – функция распределения величины X , $G(\hat{X}) = \Pr(X \le \hat{X})$, где $\Pr(\cdot)$ обозначает «вероятность того, что»;

$g(X)$ – функция плотности вероятности (ФПВ) величины X , $g(X) = dG(X)/dX$;

$\langle X \rangle$ – ожидаемое значение величины X , $\langle X \rangle = \int X \cdot g(X) dX$;

x – лучшая оценка величины X , $x = \langle X \rangle$;

σ_X^2 – дисперсия величины X , $\sigma_X^2 = \left\langle (X - \langle X \rangle)^2 \right\rangle = \int (X - x)^2 \cdot d(X) dX$;

$u(x)$ – оценка стандартной неопределенности по типу В, $u(x) = \sigma_X$;

X_i – влияющая величина в математической модели измерения;

x_i – лучшая оценка влияющей величины в математической модели измерений;

δX_i – поправка для влияющей величины X_i ;

Y – выходное значение математической модели измерений;

y – лучшая оценка измеряемой величины, с поправкой на все учтенные и значительные систематические влияния;

c_i – коэффициент чувствительности, частная производная относительно X_i модели измерений, оцененной по лучшим оценкам x_i входных величин X_i ;

$u(x_i)$ – стандартная неопределенность лучшей оценки влияющей величины X_i ;

$u_C(y)$ – суммарная стандартная неопределенность лучшей оценки измеряемой величины;

k – коэффициент охвата;

$U(y)$ – расширенная неопределенность лучшей оценки измеряемой величины, $U(y) = k \cdot u_C(y)$.

3.3 Сокращения

CLT	ЦПТ	Центральная предельная теорема
EM	ЭМ	Электромагнитный
EMC	ЭМС	Электромагнитная совместимость
EME	ЭМСР	Электромагнитная среда
EUT	ОИ	Объект испытаний
FAR	БЭК	(Полностью) безэховая камера
GUM	РВН	Руководство по выражению неопределенности измерений
IEC	МЭК	Международная электротехническая комиссия
IFU	ВНП	Внутренняя неопределенность поля
IUM	ВНИВ	Внутренняя неопределенность измеряемой величины
LPU	ЗРН	Закон распространения неопределенности
MIU	ИНИ	Инструментальная неопределенность измерений
MU	НИ	Неопределенность измерений
OATS	ОИП	Открытая измерительная площадка
PDF	ФПВ	Функция плотности вероятности

RSS	КСК	Корень из суммы квадратов
SAC	ПБЭК	Полубезэховая камера
SCU	ССТН	Неопределенность соответствия стандартам
VSWR	КСВН	Коэффициент стоячей волны по напряжению

4 Общие положения

4.1 Обзор

Настоящий стандарт представляет обзорный материал по принципам неопределенности измерений и руководство по вычислению и применению значений неопределенности измерений. Стандарт предназначен для оказания помощи при подготовке стандартов по ЭМС серии стандартов IEC 61000.

4.2 Классификация вкладов в неопределенность измерений

Оцениваемое значение электрической или электромагнитной (ЭМ) величины становится более понятным, когда вместе со значением указывают количественную характеристику неопределенности и степень доверия. Дальнейшее рассмотрение будет в настоящем стандарте сосредоточено на экспериментальных оценках неопределенности вместо оценок, полученных при числовых вычислениях (например, методом моделирования Монте-Карло) которые могут предлагать альтернативные или дополнительные методы оценивания неопределенности.

Неопределенность измерений может быть подразделена на два разных компонента (рисунки 1 и 2):

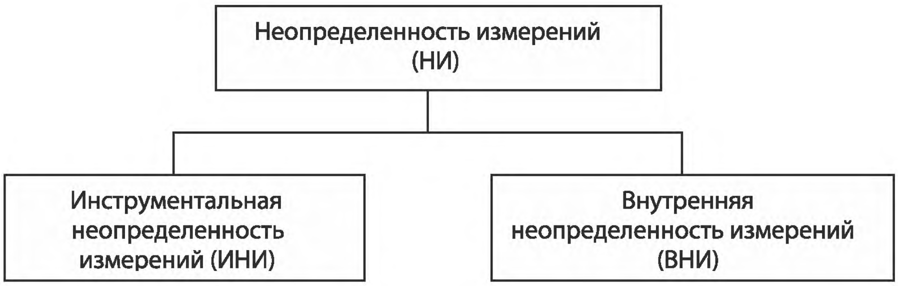


Рисунок 1 – Классификация компонентов неопределенности, связанных с экспериментальной оценкой неопределенности в испытаниях и измерениях ЭМС

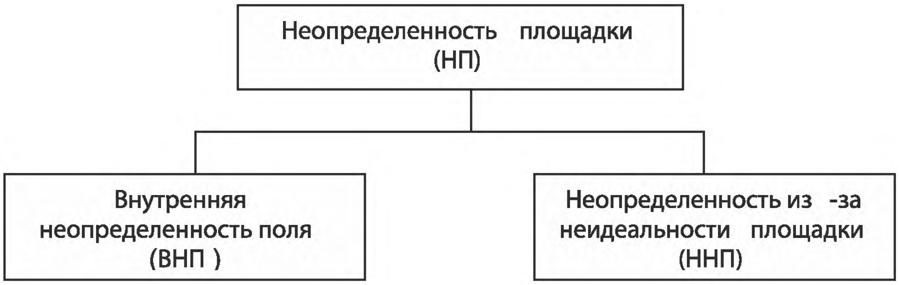


Рисунок 2 – Классификация компонентов неопределенности, связанных с неопределенностью площадки (например, для реверберационных камер)

На рисунке 1 показана классификация вкладов в НИ, которые состоят из двух компонентов:

a) Инструментальная неопределенность измерений (ИНИ), которая показывает вклад средств измерений и испытательного оборудования (например, антенны, датчики, анализаторы, кабели, средства испытаний).

b) Внутренняя неопределенность измерений (ВНИ), которая представляет вклад объекта испытаний (ОИ) (например нестабильность, установка, настройка, недостаточная четкость настройки)

На рисунке 2 показана классификация вкладов неопределенностей площадки, например для реверберационных камер, которые состоят из двух компонентов:

c) внутренняя неопределенность поля (ВНП), которая представляет собой вклад, обусловленный сложностью (ВНП для особенностей излучения, где применимы)

d) недостатки испытательной площадки (ННП).

Примечание — Неопределенность площадки и неопределенность из-за неидеальности площадки одинаковы в случае полубезэховых камер или полностью безэховых камер.

Таким образом, неопределенность измерений имеет значение, только если фактически проходит процесс измерений (т. е. количественная интерпретация электромагнитных величин). В отличие от этого неопределенность площадки присутствует всегда каждый раз, как только происходит ЭМ возбуждение, потому что интересуемая электромагнитная величина физически существует и колеблется независимо от того, имеет ли место процесс измерений. Например, отражения от стены, вызванные идеальным калиброванным эталонным излучателем, помещенным на испытательной площадке, порождают произвольные пространственные колебания поля, включенные в неопределенность площадки. Эти отражения могут быть остаточными [как, например, в полностью безэховой комнате (БЭК)] или преднамеренными (как в реверберационных камерах) и присутствуют безотносительно того, имеется или нет какая-либо дополнительная контрольная антенна или зонд.

В процессе калибровки или верификации измерительной площадки проверяют, что уровень неидеальности площадки находится в приемлемых пределах, но он не влияет и не вносит вклад, обусловленный неопределенностью площадки. Неопределенность измерений может состоять из составляющей инструментальной неопределенности и составляющей, обусловленной неидельностью площадки (например, измерения нормализованного затухания площадки в БЭК).

Примечание 1 — В этой классификации термин «инструментальный» более узок, чем в других документах, например CISPR 16-4-1. В соответствии с CISPR 16-4-1 и CISPR 16-4-2 в полностью безэховых камерах неопределенность площадки обусловлена исключительно неидеальностью площадки и включена в инструментальную неопределенность измерений (ИНИ). Для других испытательных площадок (включая многолучевые электромагнитные среды, например, реверберационные камеры и более общие структуры с затуханием), даже идеальные площадки могут показывать свойственные неопределенности поля как дополнительные компоненты недостатка площадки. Наглядная модель внутренней неопределенности поля (ВНП) описана в 5.2.3.4.

Примечание 2 — В безэховой среде неопределенность измерений при завершенном испытании известна также как неопределенность соблюдения стандартов (НСС) в CISPR 16-4-1. В Руководстве ISO/IEC 99-2007 ВНИВ упомянута как определительная неопределенность (ОН).

4.3 Ограничения Руководства по выражению неопределенности измерений

Руководство по выражению неопределенности измерений (РВН), см. Руководство ISO/IEC 98-3, предлагает теоретическое обоснование, на основе которого был разработан настоящий стандарт. Тем не менее, РВН имеет фундаментальные ограничения. Если эти ограничения превышены, то результаты больше не действительны. По существу теоретическая структура РВН (см. [1]) основана:

a) на законе распределения неопределенности (ЗРН);

b) центральной предельной теореме (ЦПТ).

Чтобы убедиться в том, что оценка неопределенности, осуществленная в соответствии с процедурой, описанной в Руководстве ISO/IEC 98-3, может быть верной, предположения, требуемые для корректности ЗНР и ЦТП, должны быть удовлетворены. Приложение 1 Руководства ISO/IEC 98-3 описывает количественную методику, нацеленную на корректность закона распределения неопределенностей в случаях, где применение Руководства ICO/IEC 98-3 не проводит к достоверным результатам.

ЦПТ применяется, когда:

a) модель измерения линейна или квазилинейна, т. е. она должна быть проверена по крайней мере с пригодным для цели приближением, что измеряемая величина может быть выражена как $Y = c_0 + c_1X_1 + c_2X_2 + \ldots + c_nX_n$;

b) входные величины независимы;

c) $|c_i u(x_i)|$ имеют соизмеримые значения;

d) n достаточно велико (например, $n \geq 3$).

Если требования a)–d) выполняются, то Y приблизительно описывается нормальной плотностью распределения вероятности, имеющей ожидаемое значение y и стандартную неопределенность $u(y)$, где

$$y = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + \ldots + c_n x_n$$

и

$$u(y) = \left[(c_1 u(x_1))^2 + (c_2 u(x_2))^2 + \ldots + (c_n u(x_n))^2 \right]^{1/2}.$$

4.4 Принципы

При измерении эмиссии или испытаниях на помехоустойчивость необходима совокупность средств измерений. ИНИ — фундаментальная характеристика этой совокупности средств измерений.

На более фундаментальных уровнях процесс измерений включает в себя получения цифровых значений некоторых измеряемых величин. Истинные значения измеряемых величин обозначены здесь и далее как x.

Для выполнения измерений требуются некоторые цепи средств измерений (формирующих измерительную систему). Измерительная система будет возвращать числовое значение измеряемой величины, обозначенное как x'. Здесь это оценка истинного значения измеряемой величины x, потому что эти два параметра связаны согласно следующему уравнению

$$\Pr(x' < X < x' + dx') = g(x')dx', \tag{1}$$

где функция истинного значения $g(x')$, является фундаментальной характеристикой измерительной системы. Функция $g(x')$ формально представляется как ФПВ измерительной системы. Функция $g(x')$ — фундаментально статистическая по своей природе, т. е. функция $g(x')$ определяет вероятность того, что заданная величина x' будет возвращена измерительной системой для данного истинного значения x измеряемой величины.

Пример вида функции $g(x)$, характерной для сложных измерительных систем, представлен ниже (см. рисунок 3). Существенно, что приведенная форма — гауссовская. Это значит, что измерительная система наиболее вероятно вернет оценку значения измеряемой величины x', т. е. равную истинному значению измеряемой величины x. Однако значение, возвращаемое измерительной системой x', может отличаться от истинного значения x, соответствующего детерминированным свойствам $g(x)$.

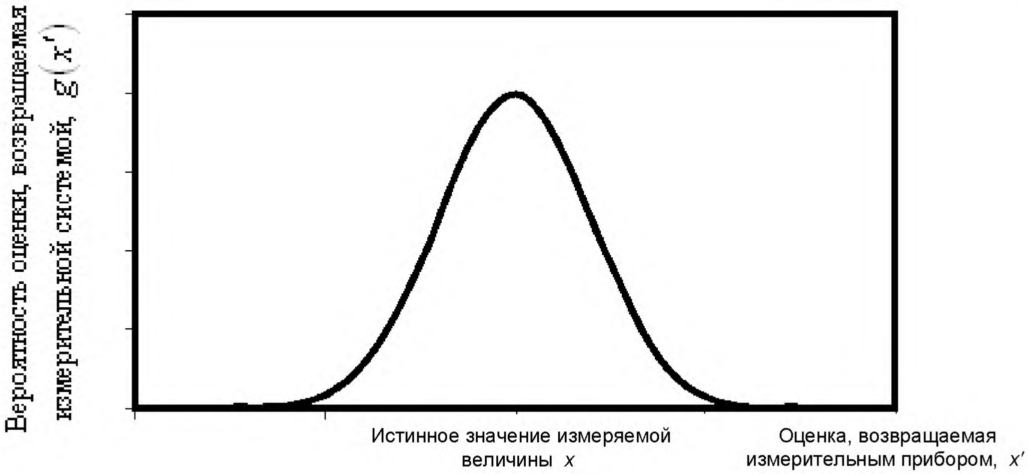


Рисунок 3 – Пример $g(x')$

Функция $g(x)$ сложной измерительной системы имеет фундаментальное значение для интерпретации оценки, предоставляемой измерительной системой, описываемое вспомогательным рисунком 4 и рассмотрением показанных пяти точек *A, B, C, D* и *E*.

Отправной точкой является то обстоятельство, что, если измерительная система возвращает оценку x' истинного значения измеряемой величины x, не существует никаких знаний относительно определенного положения оценки в пределах диапазона $g(x)$.

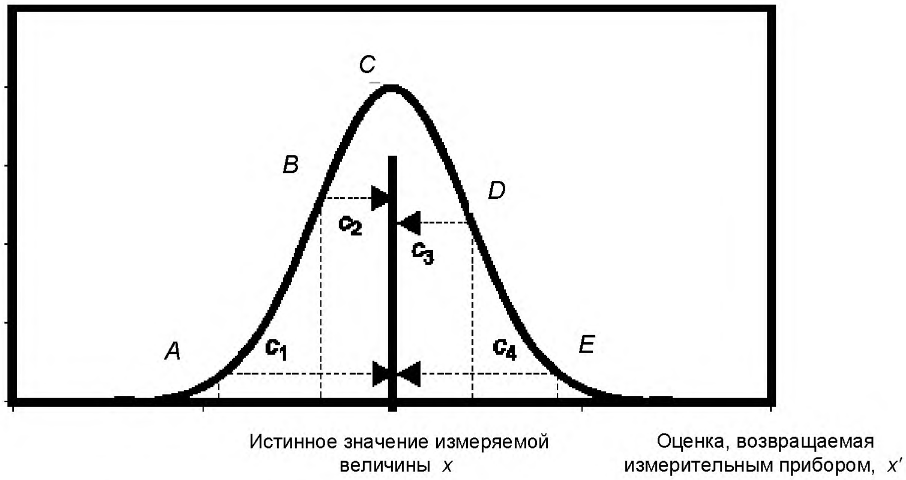


Рисунок 4 – Влияние $g(x')$ на интерпретацию x'

Принимают, что истинное значение измеряемой величины x подвержено измерению с использованием измерительной системы с известной функцией $g(x)$ и получена оценка x'.

Возможно, что во время измерения соотношение между истинным значением измеряемой величины x и оценкой x', возвращаемой измерительной системой, было таким, что:

- в случае, отображенном на рисунке 4 как точка *A*, оценка x' имеет значительно недооцененное истинное значение x, и необходимо сделать поправку c_1 к x', чтобы найти x;
- в случае, отображенном как точка *B*, оценка x' снова имеет недооцененное истинное значение (хотя и не настолько большое как в первом случае) и необходимо сделать поправку c_2 к x', чтобы найти x;

- в случае, отображенном как точка *C*, оценка x' имеет верно предоставляемое значение истинной величины и нет необходимости проводить коррекцию x', чтобы найти x;

в случае, отображенном как точка *D*, оценка x' имеет завышенное значение истинной величины и необходимо сделать поправку c_3 к x', чтобы найти x;

в случае, отображенном как точка *E*, оценка x' имеет слишком завышенное значение истинной величины и необходимо сделать поправку c_4 к x', чтобы найти x.

Это значит, что истинное значение измеряемой величины может существовать вокруг оценки, возвращаемой измерительной системой в соответствии с представленной ФПВ (см. рисунок 5).

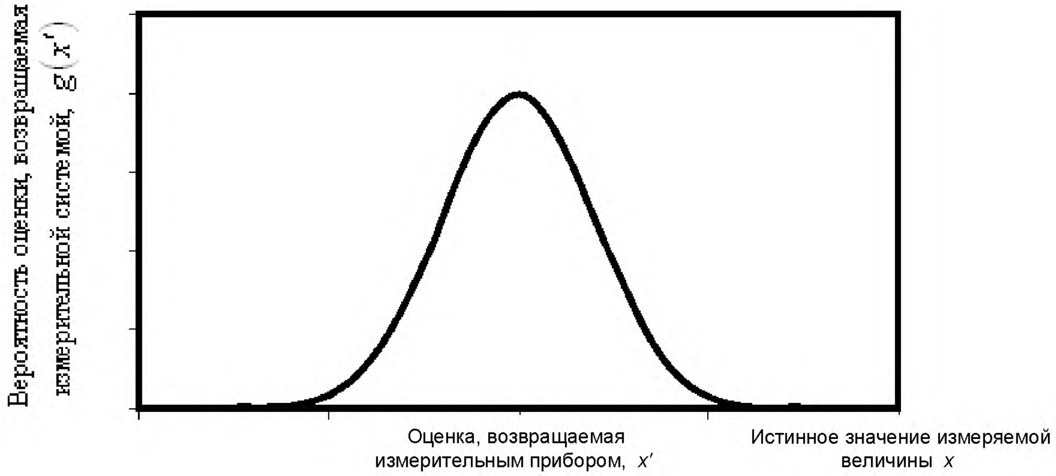


Рисунок 5 – Оценка, возвращаемая измерительной системой

5. Формирование бюджета неопределенности измерений

5.1 Основные шаги

Таблица 1 обобщает шаги вычисления НИ.

Т а б л и ц а 1 – Основные шаги при вычислении НИ

Шаг	Действие	Квалификация испытательной лаборатории	Статистические инструменты
1	Записать точное определение измеряемой или создаваемой величины	Y	
2	Собрать входные величины X_i для НИ (т.е. диаграмму причинно-следственных связей). Определить модель уравнения.	Y	
3	Получить лучшие оценки x_i и ФПВ входных величин. Все предположения должны быть задокументированы.	Y	
4	Вычислить стандартную неопределенность $u(x_i)$ каждой влияющей величины (используя оценки неопределенности либо типа А, либо типа В с применением простого деления с задаваемыми делителями для определенных ФПВ)		Y
5	Оценить коэффициенты чувствительности c_i входных величин	Y	
6	Получить вклады частных составляющих в стандартную неопределенность $u_i = c_i \cdot u(x_i)$		Y
7	Объединить частные вклады для получения «общей стандартной неопределенности» u_C, т.е. используя правило квадратного корня из суммы квадратов		Y
8	Получить расширенную неопреде-ленность U для данного уровня доверия $U = k \cdot u_C$, где k — коэффициент охвата для требуемого уровня доверия		Y

Комментарии к шагам

Шаг 1

Например, при измерении эмиссии на открытой измерительной площадке измеряемой величиной является не просто напряженность поля в месте расположения приемной антенны, а максимальная напряженность электрического поля, дБ(мкВ/м), создаваемая объектом испытаний при горизонтальной и вертикальной поляризациях на заданном расстоянии от объекта на высоте в пределах 1–4 м над заземленной отражающей плоскостью при вращении объекта испытаний в азимутальной плоскости в пределах 360°. Подробное определение измеряемой величины также поможет определить входные величины. Таким же образом детализированное определение может относиться к величинам, которые будут воздействовать на объект испытаний при испытаниях на помехоустойчивость.

Шаг 2

Модель уравнения будет показывать, как вычисляется измеряемая величина, включая все возможные корректирующие факторы. Пример, взятый из CISPR 16-4-2 для измерения тока помех:

$$I = V_r + A_c + Y_T + \delta V_{sw} + \delta V_{pa} + \delta V_{pr} + \delta V_{nf} + \delta M + \delta Z_{cp} + \delta D_{AE} + \delta Z_{AE} + \delta V_{env},$$

где V_r — входное напряжение измерительного приемника;

A_c — затухание в соединительном кабеле;

Y_T — проводимость потерь пробника тока;

$\delta V_{sw} + \delta V_{pa} + \delta V_{pr} + \delta V_{nf}$ — поправки приемника (см. CISPR 16-4-2);

δM — поправка на рассогласование;

δZ_{cp} — поправка к вносимому сопротивлению пробника тока;

δD_{AE} — поправки для погрешностей, вызванных помехами от вспомогательного оборудования (ВО)

δZ_{AE} — поправка для погрешностей, вызванных отклонением полного сопротивления ВО от допускаемого полного сопротивления;

δV_{env} — поправка для влияния окружающей среды на оборудование.

Все величины в этом примере выражают в логарифмических единицах.

Корректировка — это компенсация систематической погрешности. Корректировка может быть известна из протоколов калибровки или внутренних задокументированых оценок испытательной лаборатории. Считается, что корректировка с неизвестной амплитудой равновероятна в сторону положительных или отрицательных значений и принимается равной нулю. Предполагается, что все известные поправки уже были применены в соответствии с моделью. Это выражено уравнением модели. Каждая коррекция (даже нуля) действует так же, как влияющая величина, имеющая приписанную неопределенность.

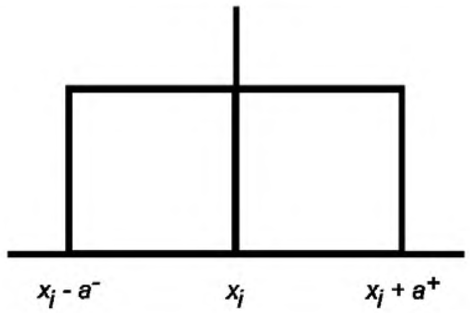
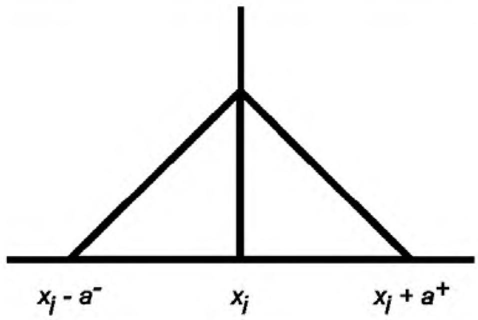
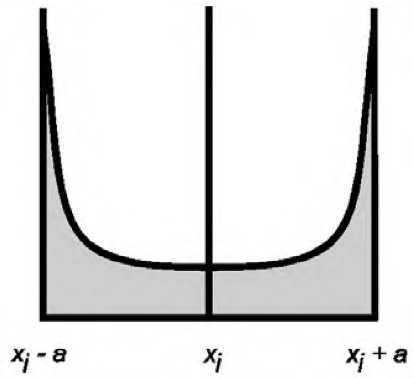
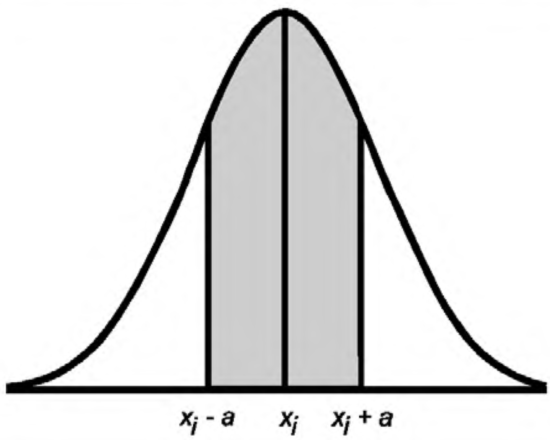
Шаг 3

Список следует записывать в форме таблицы.

Шаг 4

Стандартную неопределенность $u(x_i)$ вычисляют делением доверительного интервала для x_i на коэффициент, который зависит от ФПВ для x_i и от уровня доверия, связанного с интервалом. Для симметричной U-образной, прямоугольной и треугольной ФПВ оцениваемая величина X_i лежит между $(x_i - a)$ и $(x_i + a)$ с уровнем доверия в 100%, $u(x_i)$ принимают как $a/\sqrt{2}$, $a/\sqrt{3}$ или $a/\sqrt{6}$ соответственно, где $a = (a^+ + a^-)/2$ – полуширина интервала. Для нормальной ФПВ делителем будет 2, если доверительный интервал для x_i имеет уровень доверия 95% (значение равно удвоенному экспериментальному стандартному отклонению), или 1, если доверительный интервал для x_i имеет уровень доверия 68% (значение — экспериментальное стандартное отклонение). В случае симметричной и несимметричной ФПВ, ожидаемое значение поправки есть δx_i. В случае, когда ожидаемая величина не может быть вычислена по ФПВ, предполагается, что для исправления результата измерений будет использоваться величина $\delta x_i = c_i\left(a^+ - a^-\right)/2$. Если эта величина незначительна (т. е. очень мала по сравнению со стандартной неопределенностью), то приемлемо использовать среднее значение этих двух границ.

Т а б л и ц а 2 – Выражения, используемые для получения стандартной неопределенности

ФПВ	Выражение для стандартной неопределенности	График
Прямоугольная	$u(x_i) = a/\sqrt{3}$	
Треугольная	$u(x_i) = a/\sqrt{6}$	
U-образная	$u(x_i) = a/\sqrt{2}$	
Нормальная (из оценки стабильности $k = 1$)	$u(x_i) = a$	
Нормальная (из протокола калибровки $k = 2$)	$u(x_i) = a/2$	

Шаг 5

Коэффициенты чувствительности — частные производные функций в модели для измеряемых величин относительно изменения влияющей величины. Если функции модели линейные, выраженные в логарифмических единицах, все коэффициенты чувствительности c_i становятся 1 или 1 ($c_i = 1$ или минус 1), и поэтому не записаны в таблице.

Шаг 6

Если $c_i = 1$ то все $u_i = u(x_i)$.

Шаг 7

Объединенную стандартную неопределенность в случае, если все входящие величины некоррелированы, вычисляют с использованием выражения

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_i c_i^2 u^2(x_i)}.$$

Шаг 8

Расширенную неопределенность вычисляют с использованием $U(y) = k \cdot u_c(y)$. Примеры k: если необходимо описать, что неопределенность ниже или равна $U(y)$ при уровне доверия 95 %, тогда k должно быть равно 2 (более точно 1,96). Если необходимо, чтобы результат измерения был ниже порога с уровнем доверия 95 %, то следует брать *k,* равное 1,64 для сравнения результата измерения R с порогом L $(R + U \le L)$ [2].

5.2 Функции плотности вероятности

5.2.1 Прямоугольная ФПВ

5.2.1.1 Краткий обзор

Прямоугольную ФПВ применяют для величин, имеющих следующие характеристики:

- известно, что они существуют в пределах конечного интервала $\left[a^-, a^+\right]$;

- нет правдоподобной информации, что величина примет заданное значение в пределах известного конечного интервала $\left[a^-, a^+\right]$;

- предполагается, что величина равновероятно примет любое значение в пределах известного конечного интервала $\left[a^-, a^+\right]$;

Прямоугольная ФПВ также известна как равномерная ФПВ.

5.2.1.2 Применение

Прямоугольную ФПВ применяют к величинам, значения которых, как известно, ограничены в пределах некоторого конечного интервала, но для которых нет никакой информации относительно вероятности величины, принимающей данное значение в пределах этого известного, конечного интервала.

Примером для использования прямоугольной ФПВ является установленный изготовителем или стандартом допуск для оценки вклада неопределенности. Этот допуск определяет конечный интервал, в котором значения параметра могут варьироваться, но не предоставляется никакой информации относительно вероятности величины, принимающей любое данное значение в пределах этого интервала.

5.2.1.3 Диаграмма

Прямоугольная ФПВ на интервале $\left[a^-, a^+\right]$ $\left(a^- < a^+\right)$ представляется в виде

$$\begin{cases} g(x) = \dfrac{1}{a^+ - a^-} & \text{для} \quad a^- \le x \le a^+ \\ g(x) = 0 & \text{для} \quad x < a^-, a^+ < x \end{cases} \qquad (2)$$

где a, b обозначают нижнюю и верхнюю границы интервала.

Прямоугольная ФПВ представлена на рисунке 6. Ее высота $1/\left(a^{+}-a^{-}\right)$, потому что площадь под графиком любой ФПВ равна 1.

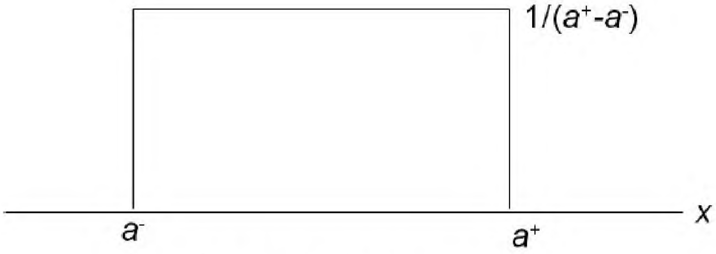


Рис. 6 – Прямоугольная ФПВ

Среднее значение $g(y)$

$$\mu_X=\int_{a^-}^{a^+} x\cdot g(x)dx=\frac{a^-+a^+}{2} \tag{3}$$

Дисперсия $g(y)$ есть квадрат стандартного отклонения σ, которое задается как

$$\sigma_X^2=\int_{a^-}^{a^+}(x-\mu)\cdot g(x)dx=\frac{\left(a^+-a^-\right)^2}{12} \tag{4}$$

следовательно, стандартное отклонение

$$\sigma_X=\frac{\left|a^+-a^-\right|}{2\sqrt{3}} \tag{5}$$

Стандартная неопределенность, связанная с оценкой $\left(a^-+a^+\right)/2$ для X, есть это стандартное отклонение.

Коэффициенты охвата для 95 %, 99 % и 100 % доверительных интервалов X равны соответственно 1,65 (т. е. $95/100\cdot\sqrt{3}$), 1,71 и $\sqrt{3}$.

5.2.1.4 Примеры применения прямоугольной ФПВ

5.2.1.4.1 Цифровые дисплеи

Использование прямоугольной ФПВ возникает естественно, когда средство измерений оснащено цифровым считывающим индикатором. Такой дисплей, естественно, ограничен для считывания значения измеряемой величины конечным числом десятичных цифр, который средство измерения округляет. Предполагается, что индикатор отображает значение в децибелах.

Интервал, содержащий значения измеряемой величины, в этом случае равен $\pm$ половине значения наименьшей значащей цифры; следовательно, если индикатор сообщает значение погрешности одного десятичного разряда, то интервал равен $\pm 0{,}05$ дБ; если показатель сообщает значение погрешности двух десятичных разрядов, то этот интервал равен $\pm 0{,}005$ дБ.

Например, применение стандартной неопределенности к цифровым индикаторам с погрешностью в пределах до одного десятичного разряда, дБ, дает

$$u = \sigma = \frac{0{,}05-(-0{,}05)}{2\sqrt{3}} = 0{,}03, \qquad (6)$$

тогда, как применение стандартной неопределенности к цифровым индикаторам с погрешностью до 2 десятичных разрядов, дБ, будет

$$u = \sigma = \frac{0{,}005-(-0{,}005)}{2\sqrt{3}} = 0{,}003, \qquad (7)$$

где стандартную неопределенность значений в формуле (6) принимают в пределах двух десятичных разрядов, а стандартную неопределенность значений в формуле (7) принимают в пределах трех десятичных разрядов.

5.2.1.4.2 Индикаторы электрического поля

Предпологают, что электрическое поле измеряют датчиками электрического поля с индикатором электрического поля, использующим оптоволокно. Измеряемые величины колеблются между верхним и нижним значениями, и больше ничего неизвестно. Если допустить, что наивысшее и наинизшее значения будут $6{,}64\ \text{В/м}$ и $6{,}38\ \text{В/м}$, соответственно, тогда стандартное отклонение вычисляют по формуле (5) и оно будет равно $0{,}075\ \text{В/м}$. Если предполагаемое значение равно $6{,}51\ \text{В/м}$, относительная неопределенность измерений, дБ, будет вычислена следующим образом

$$20\cdot\lg\left(\frac{6{,}51+0{,}075}{6{,}51}\right) = 0{,}10. \qquad (8)$$

5.2.1.4.3 Диапазон теплового дрейфа генератора сигналов

Когда диапазон теплового дрейфа генератора сигналов, указанный изготовителем, равен $\pm 0{,}01\ \text{дБ}/{}^\circ C$, и измеряемое значение температуры окружающей среды равно $(20\pm 2)\ {}^\circ C$, то интервал между наибольшим и наименьшим значениями ожидается $\pm 0{,}02\ \text{дБ}$. В этом случае стандартное отклонение (неопределенность) вычисляется из уравнения (5) и равно 0,0115 дБ.

5.2.1.4.4 Высота антенны

Если на мачте антенны градуировочная шкала нанесена с миллиметровыми делениями, то интервал для наибольшего и наименьшего значений при одном считывании будет составлять $\pm 0{,}05\ \text{мм}$. Если значение неопределенности приводят к оценке электрического поля с погрешностью $\pm 0{,}01\ \text{дБ}$ в точке наблюдения, то стандартное отклонение (неопределенность) вычисляется по формуле (5) и оно будет равно $0{,}006\ \text{дБ}$.

5.2.2 Треугольная ФПВ

5.2.2.1 Краткий обзор

Треугольную ФПВ применяют для величин, имеющих следующие характеристики:

- известно, что они лежат в конечном интервале $\left[a^-, a^+\right]$;

- имеется информация, допускающая наличие максимальной вероятности, которая существует для некоторого значения с в пределах конечного интервала $\left[a^-, a^+\right]$;

- принято считать, что вероятность изменяется линейно на интервалах от a^- до c и от c до a^+.

5.2.2.2 Применение

Треугольную ФПВ применяют для величин, значения которых, как известно, находятся в некотором ограниченном конечном интервале и для которых известно, что с высокой долей вероятности некоторое заданное значение c попадет в известный конечный интервал. Симметричная треугольная ФПВ обусловлена суммой двух величин, имеющих одинаковые прямоугольные ФПВ. Например, ФПВ появляется при суммировании результатов двух брошенных шестигранных игральных костей, когда у обоих костей ФПВ — прямоугольная.

Примером, где используется треугольная ФПВ, естественно, является ситуация, где должна быть получена разность или сумма двух измеряемых величин, показанных в цифровом виде. В этом случае каждая из измеренных величин имеет прямоугольную ФПВ.

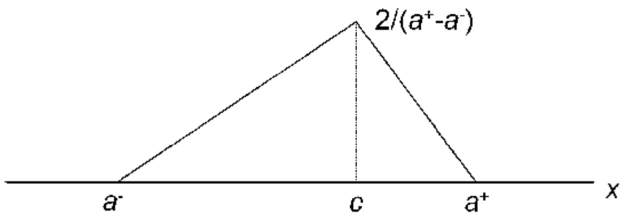
5.2.2.3 Диаграмма

Треугольную ФПВ на интервале $\left[a^{-},a^{+}\right]$ $\left(a^{-}<a^{+}\right)$ выражают

$$g(x)=\begin{cases}\dfrac{2\left(x-a^{-}\right)}{\left(a^{+}-a^{-}\right)\left(c-a^{-}\right)} & \text{для} \quad a^{-}\le x\le c\\ \dfrac{2\left(a^{+}-x\right)}{\left(a^{+}-a^{-}\right)\left(a^{+}-c\right)} & \text{для} \quad c\le x\le a^{+},\\ 0 & \text{для других значений}\end{cases} \tag{9}$$

где a^{-} и a^{+} обозначают верхнюю и нижнюю границы интервала, а c обозначает моду, соответственно.

Треугольная ФПВ показана на рисунке 7. Форма — треугольник, и его вершина равна $2/\left(a^{+}-a^{-}\right)$



Среднее значение $g(x)$ равно

$$\mu_X=\int_{a^{-}}^{a^{+}}xg(x)dx=\frac{a^{-}+a^{+}+c}{3}. \tag{10}$$

Дисперсия $g(x)$ — квадрат стандартного отклонения σ определяют по формуле

$$\sigma_X^2=\int_{a^{-}}^{a^{+}}(x-\mu)g(x)dx=\frac{\left(a^{-}\right)^2+\left(a^{+}\right)^2+c^2-a^{-}a^{+}-a^{-}c-a^{+}c}{18}. \tag{11}$$

Отсюда стандартное отклонение

$$\sigma_X=\frac{\sqrt{\left|\left(a^{-}\right)^2+\left(a^{+}\right)^2+c^2-a^{-}a^{+}-a^{-}c-a^{+}c\right|}}{3\sqrt{2}}. \tag{12}$$

Стандартная неопределенность треугольной ФПВ — это стандартное отклонение.

Если ФПВ симметричная, т.е. мода c является серединой интервала $\left[a^{-},a^{+}\right]$, то стандартная неопределенность

$$\sigma_X = \frac{\left|a^+ - a^-\right|}{2\sqrt{6}}. \quad (13)$$

В этом случае коэффициенты охвата для 95 %, 99 % и 100 % доверительного интервала треугольной ФПВ будут 2,32 (т.е. $95/100 \times \sqrt{6}$), 2,42 и 2,45, соответственно.

Треугольную ФПВ часто используют вместо нормальной ФПВ Гаусса, потому что имеет простое выражение и ее легче применять математически.

5.2.2.4 Примеры применения треугольной ФПВ

Применение: сумма считываний цифровых показателей

Использование треугольной ФПВ возникает, естественно, при суммировании двух показаний, для которых используют два средства измерения, оснащенные цифровым индикатором. Такие дисплеи, конечно, ограничены количеством используемых десятичных разрядов при оценке значения измеряемой величины, поэтому полученный результат округляет значение оценки измеряемой величины.

Например, полная высота антенны должна быть получена из двух вертикально присоединенных антенных мачт, которые дают показания с цифрового дисплея. Если каждый дисплей дает показания с погрешностью одного десятичного разряда, т.е. $\pm 0{,}05$ мм, интервал неопределенности будет с погрешностью (неопределенностью) в $\pm 0{,}1$ мм для суммы двух считываний. В случае, когда мода c является серединой ФПВ, форма ФПВ является симметричной.

Стандартная неопределенность, относящаяся к полной высоте, мм, при использовании треугольной ФПВ будет составлять

$$u = \sigma = \frac{\left|0{,}1 - (-0{,}1)\right|}{2\sqrt{6}} = 0{,}041, \quad (14)$$

где значение стандартной неопределенности имеет три десятичных разряда.

5.2.3 Гауссовская ФПВ

5.2.3.1 Краткий обзор

Гауссовскую (или нормальную) ФПВ применяют к непрерывным (в отличие от дискретных) изменениям величины X, поэтому она проще и удобнее при использовании для моделирования статистических свойств физических величин в области ЭМС.

Гауссовская ФПВ $g(x)$ симметрична, унимодальна, и характеризуется двумя параметрами. Эти два параметра задаются, например, значением среднего $\langle X \rangle$ и стандартным отклонением σ. При таком выборе:

$$g(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\left(x - \langle X \rangle\right)^2}{2\sigma^2}\right] \quad -\infty < x < +\infty. \quad (15)$$

Такая ФПВ является решением дифференциального уравнения

$$\frac{dg(x)}{dx} + \frac{x - \langle X \rangle}{\sigma^2} g(x) = 0 \quad (16)$$

с начальным значением $g(x = 0) = 1/\left(\sigma\sqrt{2\pi}\right)$. В области ЭМС дифференциальное уравнение (16) полезно для представления измеряемых величин, которые характеризуются случайными изменениями.

Выражение функции распределения Гаусса $G(x)$ требует использования специальных функций (т. е. функций, которые не могут быть представлены в виде конечного суммирования, умножения и извлечения корня из других функций) и задается следующим образом

$$G(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int\limits_{-\infty}^{x}\exp\left[-\frac{\left(x'-\langle X\rangle\right)^2}{2\sigma^2}\right]dx'=\frac{1}{2}\left[1+erf\left(\frac{x-\langle X\rangle}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right], \quad (17)$$

где $erf(\ )$ — функция ошибок, которая может быть получена из таблиц или с помощью числовых вычислений.

Хотя нормальная ФПВ имеет область, бесконечную с обеих сторон $[-\infty,+\infty]$, относительно малые и быстро уменьшающиеся значения этой ФПВ для $\left|x-\langle X\rangle\right|/\sigma >> 1$ (т.е. на концах) гарантируют, что эта ФПВ может также часто быть используемой, по крайней мере для хорошей аппроксимации при описании распределений физических величин, которые могут принимать только конечные и/или положительные значения, если значение $\langle X\rangle/\sigma$ достаточно велико (как правило, 5 и более). Для многих практических целей значение величины $\left(x-\langle X\rangle\right)/\sigma$ может тогда быть ограничено интервалом $[-5;+5]$.

Коэффициенты охвата k для двухстороннего доверительного интервала 95 %, 99 % и 99,5 % будут 1,960, 2,576 и 2,807. Для односторонних интервалов соответствующие значения равны 1,645, 1,960 и 2,576.

5.2.3.2 Диаграмма

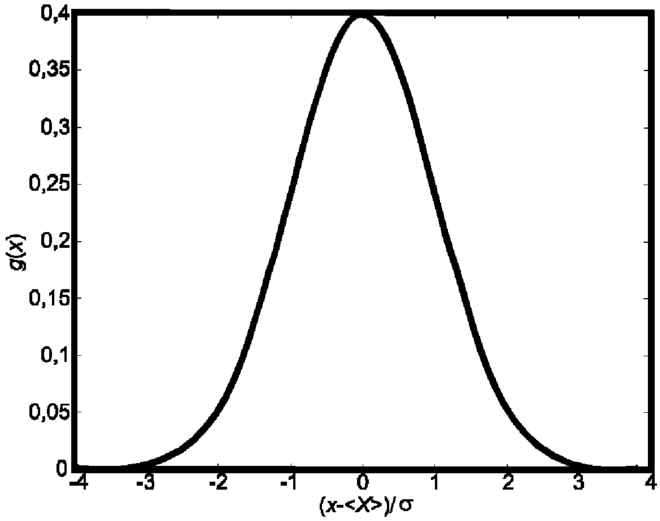


Рисунок 8 – Нормальная ФПВ для стандартизированного X

5.2.3.3 Применения

5.2.3.3.1 Связь с центральной предельной теоремой

Практическая важность нормального распределения обусловлена его фундаментальной ролью в статистическом накоплении и в условиях, где применима центральная предельная теорема. Эта теорема устанавливает, что выборка значений, связанная с набором из N независимых случайных переменных величин, относящихся к ФПВ любого вида (возможно, ассиметричной или дискретной), имеющая конечное среднее значение и конечное стандартное отклонение σ, стремится к нормальному распределению при стремлении числа величин к бесконечности. Ограниченная ФПВ имеет то же среднее значение, но стандартное отклонение, которое также известно как стандартная неопределенность, будет $\sigma/\sqrt{N}$. Кроме того, если сама выборка распределена нормально, то среднее значение выборки имеет нормальную ФПВ для любого (не только для асимптотически большого) значения N.

Более того, нормальная ФПВ служит приближением дискретной биноминальной ФПВ для выборок большой размерности. (Соответствующую корректировку, вероятно, следует применять для выборки небольших размеров.)

Преимущество любой линейной системы состоит в том, что для любых входных произвольных величин, имеющих нормальное распределение, выходные величины имеют то же самое распределение (т. е. в этом случае тоже нормальное).

Нормальность распределения выборки часто является существенным условием для проведения многих статистических процедур с выборками получаемых результатов. Для проверки принадлежности распределения данной измеряемой величины X нормальной ФПВ или обоснованности соответствующего предположения должны быть проведены соответствующие тесты проверки соответствия. Если предположение о нормальном распределении неверно, то становятся доступными следующие альтернативные варианты применения статистических процедур:

- применение процедур без параметров;
- применение преобразования X (т. е. квадратного корня, логарифма и т. д.) для достижения приблизительной нормальности;
- применение других процедур, которые используют более общие распределения, чем нормальное (например, *t*-распределение).

5.2.3.3.2 Оценивание

Значения двух характеристик генеральной совокупности $\langle X \rangle$ и σ обычно неизвестны на практике. В этих случаях их значения следует оценивать из данных как среднее значение выборки $\overline{X}$ и стандартное отклонение выборки s. Таким образом, для возможности сравнения результатов, полученных из тестов или лабораторий и основанных на различных объемах выборки, предпочтительны несмещенные и эффективные оценщики. Для нормальных распределений, выражения для распределения выборки, значений среднего и стандартного отклонения $\overline{X}$ и s могут быть наглядно [3] получены, потому что только для нормальных распределений $\overline{X}$ и s статистически независимы [4]. Для неизвестных значений $\langle X \rangle$ и σ распределение $\overline{X}$ имеет *t*-распределение Стьюдента

5.2.3.3.3 ФПВ суммы, разности, произведения, отношения, квадратных величин и извлечения корней из величин с нормальной ФПВ

Иногда требуются распределение и неопределенность для произвольных величин, которые получены при элементарных операциях (сложение, вычитание, умножения или деление) для двух произвольных нормальных величин. Например:

- импеданс может быть вычислен с помощью отношения произвольно колеблющихся электрических и магнитных полей;
- энергия, интенсивность и мощность переменных полей — все пропорциональны квадрату поля (во временно́й области) или квадрату величины сложного поля (в частотной области); величина поля пропорциональна квадратному корню из напряженности поля;

Для нормально распределенных и статистически независимых величин X и Y, ФПВ их суммы, разности, произведения и отношения может быть выражена в сокращенной форме. Сумма или разность имеет тоже нормальную ФПВ со средними значениями $\langle X \rangle \pm \langle Y \rangle$ и дисперсией $\sigma_X^2 + \sigma_Y^2$. Если X и Y коррелированны, тогда должен быть добавлен член, пропорциональный коэффициенту корреляции. Произведение X и Y имеет ФПВ МакДональда [5] (частный случай ФПВ Бесселя К), в то время как их отношение имеет ФПВ Коши [6]. Квадрат действительной величины X имеет ФПВ хи-квадрат с одной степенью свободы. На этой основе могут быть получены ФПВ одномерных и многомерных (векторных) областей (действительных или комплексных) и распределения связанных с ними выборок. Например, распределение модуля выборки X с нулевым средним значением есть распределение квадратного корня из суммы квадратов синфазного и квадратурного компонентов, то есть распределение Релея или хи-квадрат с двумя степенями свободы

Обобщая, амплитуда поля или другой измеряемой величины с постоянной составляющей (например, общий несимметричный сигнал), который сравним с переменной составляющей (компонентом симметричного сигнала) $(\langle X \rangle \neq 0)$ имеет распределение Накагами–Райса, хотя синфазные и квадратурные компоненты все еще имеют нормальную ФПВ.

5.2.3.4 Пример

Гармоническое электрическое поле E, воздействует на приемную антенну при испытаниях на фиксированном расстоянии и при фиксированной ориентации по отношению к передающей антенне. Если передающая и приемная антенна подключены к векторному анализатору цепей, то может быть обнаружено изменение фазы. Измеряемое электрическое поле может быть рассмотрено как вектор, имеющий действительную (E') и мнимую (E'') части. Перемещения двух антенн в разные места внутри БЭК будет вызывать случайные колебания комплексного электрического поля из-за остаточных отражений от стен камеры, которые могут быть охарактеризованы через нормализованное затухание площадки (НЗП). Действительная (E') и мнимая (E'') части поля показывают случайные изменения с нормальным законом распределения относительно их средних значений. Как правило, их средние значения будут различаться, в то время как их стандартные отклонения равны $(\sigma_{E'} = \sigma_{E''} = \sigma)$.

Например, для действительной части

$$g(e') = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(e' - \langle E' \rangle)^2}{2\sigma^2}\right] \quad \textit{для} \quad -\infty < e' < +\infty. \tag{18}$$

Для случая возмущенных колебаний поля с отношением сигнал-шум (СШО) 20 дБ и 10 дБ с учетом средних значений $\langle E' \rangle$ и $\langle E'' \rangle$, т. е. $\sigma = 1$ $\langle E' \rangle = 0{,}3 \langle E'' \rangle$, симметричный 95% доверительный интервал для E' в этом случае будет

$$\left[\langle E' \rangle - 1{,}960\sigma,\ \ \langle E' \rangle + 1{,}960\sigma\right] = \left[0{,}804 \langle E' \rangle,\ \ 1{,}196 \langle E' \rangle\right].$$

Величина электрического поля $A = |E| = \sqrt{\left(E'^2 + E''^2\right)}$ тогда имеет ФПВ

$$f_A(a) = \frac{a}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{a_0^2 + a^2}{2\sigma^2}\right) \cdot I_0 \cdot \left(\frac{a_0 a}{\sigma^2}\right), \quad a \geq 0 \tag{19}$$

где $a_0 = \sqrt{\left(\langle E' \rangle^2 + \langle E'' \rangle^2\right)} = 10{,}54\sigma$ — величина среднего поля и

I_0 — модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Соответствующий ассиметричный 95 %-ный доверительный интервал для A будет тогда $[8{,}63\sigma,\ \ 12{,}54\sigma]$.

Для меньших СШО асимметрия доверия с учетом a_0 или σ больше. Для полей с нулевым средним значением, A распределено по Рэлею с 95 %-ным доверительным интервалом, определяемым $[0{,}225\sigma,\ \ 2{,}715\sigma]$. Это показывает, например, внутреннюю неопределенность поля в идеальной реверберационной камере в отсутствие прямого облучения оборудования при тестировании объекта испытаний.

5.2.4 U-образная ФПВ

5.2.4.1 Краткий обзор

Чтобы ввести U-образную ФПВ, удобно рассмотреть простейшую ситуацию, в которой генератор с коэффициентом отражения по выходу Γ_e непосредственно связан с измерителем мощности, имеющим коэффициент отражения по входу Γ_r. Даже в идеальном случае, когда как генератор, так и измеритель мощности будут отлично откалиброваны, показания измерителя мощности P_M, не будут равны выходной мощности, установленной на генераторе, P_G. Это происходит из-за рассогласования выхода генератора и входа измерителя мощности. Связь между P_M и P_G будет выглядеть следующим образом

$$P_G / P_M = |1 - \Gamma_e \Gamma_r|^2.$$

Так как обычно неудобно оценивать коэффициент коррекции $|1-\Gamma_e\Gamma_r|^2$ из-за того, что:

a) амплитуда и фаза величины $\Gamma_e\Gamma_r$ должны быть известны во всем интересующем диапазоне частот;

b) амплитуда $\Gamma_e\Gamma_r$ достаточно мала,

коррекцию рассматривают в статистическом смысле.

Если максимальная амплитуда величины $\Gamma_e\Gamma_r$ в интересующем диапазоне частот известна, $K=|\Gamma_e\Gamma_r|_{MAX}$, и фаза ϕ величины $\Gamma_e\Gamma_r$ предполагается равномерно распределенной в интервале от 0 до 2π, то произвольная переменная X может быть связана с поправкой на рассогласование с помощью выражения

$$X=\left|1-Ke^{j\varphi}\right|^2$$

5.2.4.2 График

ФПВ X выглядит следующим образом

$$g(X)=\frac{1}{\pi\sqrt{\left[X-(1-K)^2\right]\left[(1+K)^2-X\right]}} \qquad (20)$$

для $(1-K)^2<X<(1+K)^2$ и $g(X)=0$ в противном случае ФПВ симметрична относительно ожидаемого значения $x=1+K^2$, и стандартное отклонение будет равно $u(x)=\sqrt{2K}$. U-образная ФПВ показана на рисунке 9.

Обычно в ЭМС приняты логарифмические единицы, следовательно, произвольная переменная будет равна $10\lg(X)$. ФПВ $10\lg(X)$ также является U-образной, но асимметричной в пределах $\delta X^{\pm}=20\lg(1\pm K)$. Ожидаемое значение $10\lg(X)$ будет равно нулю (0 дБ), и стандартное отклонение будет приблизительно равно

$$\sigma=K\frac{20\lg(e)}{\sqrt{2}}=6{,}14K \qquad (21)$$

Это приближение верно для любых практических значений K от 0 до 1.

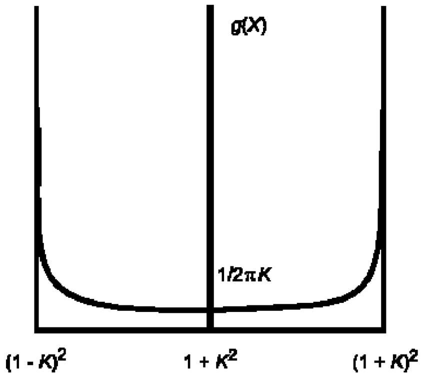


Рисунок 9 – U-образная ФПВ

5.2.4.3 Применение

Простейшее практическое приложение рассматривает два устройства, соединенных вместе электрическим кабелем. Сигнал через кабель будет проходить от одного устройства — источника, к другому устройству — приемнику.

При измерениях излучаемых помех простейшее практическое приложение включает в себя измерительную антенну, соединенную с измерительным приемником кабелем определенной длины.

При испытаниях на помехоустойчивость при воздействии излучаемых помех, простейшая интерпретация включает в себя выход усилителя мощности, соединенного с излучаемой антенной через кабель определенной длины.

Измерение электромагнитных излучений и испытания на помехоустойчивость обычно подразумевают использование некоторого числа образцов оборудования, выполняющего раздельные функции, которые должны быть расположены в различных местах и, следовательно, требуют кабели для соединения их воедино. Так, при измерениях излучаемых помех, излучающую антенну ставят выше заземленной плоскости открытой измерительной площадки (ОИП), в то время как измерительный приемник находится на некотором расстоянии от нее. Также при испытании на устойчивость к излучению антенну ставят в полубезэховой (ПБЭК) или полностью безэховой камере (БЭК), в то время как генератор сигналов и соединенный с ним усилитель мощности находятся на некотором расстоянии от нее, обычно вне камеры.

Для всех разъемов можно измерить КСВН относительно общего сопротивления.

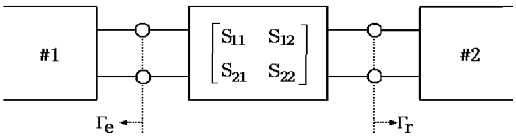


Рисунок 10 – Пример схемы

На рисунке 10 приведен пример части системы для испытаний на помехоустойчивость. Предполагается, что цепи #1 и #2 являются генератором сигналов и усилителем мощности соответственно. Цепи #1 и #2 соединены с центральной частью, которая выражается через свои S-параметры.

Центральная часть может на практике состоять из следующих элементов:

- единственного кабеля, соединяющего цепи #1 и #2;
- нескольких кабелей и необходимых разъемов, которые соединяют цепи #1 и #2;
- сложного каскада кабелей с разъемами и аттенюаторами или без них.

Любой сигнал, проходящий между цепями #1 и #2, будет подвергаться отражению и ослаблению при любом рассогласовании импедансов. Эти рассогласования появляются на границе:

- между цепью #1 и центральной цепью;
- между центральной цепью и цепью #2.

Коэффициент коррекции для рассогласования δM представляется как

$$\delta M = 20\lg\left|(1-\Gamma_e S_{11})(1-\Gamma_r S_{22}) - S_{21}^2\Gamma_e\Gamma_r\right| \qquad (22)$$

где Γ_e – коэффициент отражения на выходному порту генератора;

Γ_r – коэффициент отражения на входном порту усилителя;

S_{11} – коэффициент отражения на входном порту центральной цепи;

S_{22} – коэффициент отражения на выходном порту центральной цепи;

S_{21} – коэффициент передачи центральной цепи.

Каждый коэффициент отражения — комплексная величина. Однако известна только амплитуда, потому что спецификации, предоставляемые производителями, содержат только значения КСВН. Поэтому напряженность излученного электрического поля или мощность цепи не может быть откалиброванна с использованием точных коэффициентов коррекции δM. Неопределенность из-за рассогласования появляется в силу недостатка информации о фазе коэффициентов отражения. Поэтому наихудшая неопределенность формулируется с использованием максимума и минимума δM, которые выражаются следующим уравнением, основанным на (22):

$$\delta M^{\pm} = 20\lg\left[1 \pm \left(|\Gamma_e||S_{11}| + |\Gamma_r||S_{22}| + |\Gamma_e||\Gamma_r||S_{11}||S_{22}| + |\Gamma_e||\Gamma_r||S_{21}|^2\right)\right] \quad (23)$$

ФПВ δM описывает U-образную ФПВ. Стандартное отклонение ФПВ будет выглядеть следующим образом

$$\sigma = \frac{\delta M^{+} - \delta M^{-}}{2\sqrt{2}} \quad (24)$$

Таким образом, стандартное отклонение является стандартной неопределенностью рассогласования импедансов.

5.2.4.4 Примеры вычисления неопределенности

Когда параметры цепи указаны в спецификации производителя, как показано в случае 1 таблицы 3, вычисленные при использовании равенства (23) максимум и минимум δM равны 0,626 дБ и –0,675 дБ соответственно. Тогда стандартную неопределенность вычисляют при помощи равенства (24) и она равна 0,46 дБ. Если параметры цепи приведены в спецификации производителя, как указано в случае 2 таблицы 3, то, как и в другом случае, максимум и минимум δM равны 1,71 дБ и –2,12 дБ соответственно. Стандартную неопределенность вычисляют так же и она равна 1,35 дБ. Разность между абсолютным значением максимума δM и минимума δM мала, если значения коэффициентов отражения малы. Стандартную неопределенность $u(x_i)$ приблизительно вычисляют как в следующем равенстве

$$u(x_i) = \frac{|\delta M^{-}|}{\sqrt{2}} \quad \textit{для} \quad K < 0{,}3. \quad (25)$$

Т а б л и ц а 3 – Примеры параметров цепи

Параметры	Случай 1	Случай 2
Коэффициент отражения Γ_e	0,2 (КСВН = 1,5)	0,333 (КСВН = 2,0)
Коэффициент отражения Γ_r	0,333 (КСВН = 2,0)	0,5 (КСВН = 3,0)
S-параметр S_{11}	0,056 (–25 дБ)	0,1 (–20 дБ)
S-параметр S_{22}	0,032 (–32 дБ)	0,1 (–20 дБ)
S-параметр S_{12}	0,89 (–1,0 дБ)	0,89 (–1,0 дБ)
S-параметр S_{21}	0,89 (–1,0 дБ)	0,89 (–1,0 дБ)

Если измеряется коэффициент отражения усилителя мощности, включая кабель, соединяющий входной порт усилителя, центральная цепь может быть исключена. В этом случае равенство (23) упрощается к приведенному ниже виду, т. к. S_{11} и S_{22} центральной схемы равны нулю, а S_{12} и S_{21} равны 1:

$$\delta M^{\pm} = 20\lg\left[1 \pm |\Gamma_e||\Gamma_r|\right]. \quad (26)$$

5.3 Понятие оцениваний неопределенности типов А и В

5.3.1 Общие сведения

Оценивание стандартной неопределенности классифицируется по типу А или типу В в зависимости от метода оценки. Оценивание по типу А осуществляется путем статистического анализа значений измеряемых величин. Оценивание по типу В выполняется при помощи других средств, отличающихся от оценивания по типу А. Стоит отметить, что оценивания по типу А и В являются взаимоисключающими. Поэтому при заполнении бюджета неопределенности сразу становится ясно, есть ли вклад в неопределенность от оценивания одного или другого типа. Для разработки стандартов классификационная схема типов А и В не является проблематичной.

Еще одна важная классификация относится к характеру погрешности измерений: погрешность, которая в повторных измерениях остается неизменной или меняется в предсказуемом (ожидаемом) направлении называются систематической погрешностью. С другой стороны, погрешность, которая в повторяющихся измерениях изменяется непрогнозируемо, называется случайной погрешностью. Классификация погрешностей на систематические и случайные, совершенно противоположная типам А и В, требует обдумывания, так как отсылает каждого к опыту физического мира. Другие определения систематических и случайных погрешностей допускается давать исходя из способа их оценивания (т.е. на основании действующих определений). Систематическая погрешность — это разность среднего значения, которое может быть получено из бесконечного числа измерений одной и той же измеряемой величины и значения этой измеряемой величины. Случайная погрешность — разность измеряемого значения и среднего, которое будет результатом бесконечного числа измерений этой измеряемой величины. В обоих случаях измерения осуществляют с помощью одинаковых методик измерений, одинаковыми операторами, одинаковыми измерительными системами, в одинаковых рабочих условиях, в одном месте и при выполнении повторяемых измерений одинаковых или похожих объектов в течение короткого промежутка времени (повторяющиеся условия).

Оценка систематической погрешности требует наличия стабильности исходной величины, для которой известно, что ее отклонение от неизвестного значения измеряемой величины априори мало относительно оценки систематической погрешности (см. примечание 1). Это обычная практика при калибровке оборудования. Рассмотрим случай, где стандартный источник высокочастотного напряжения используется для калибровки приемника. Исходное значение амплитуды напряжения должно отличаться от фактического значения производимого источником, меньше, чем на погрешность приемника (т. е. быть величиной одного порядка), указанную в спецификации прибора.

В принципе, оценка систематических и случайных погрешностей требовала бы вычисления среднего значения бесконечного числа измерений. На практике число измерений N должно быть достаточно велико, чтобы отклонение между средним значением выборки из N измерений и того же значения для бесконечных измерений было мало с учетом оценки систематических и случайных погрешностей (см. примечание 1). Это отклонение может быть охарактеризовано как экспериментальное стандартное отклонение среднего значения, которое уменьшается пропорционально $1/\sqrt{N}$ при возрастании N.

Примечание 1 — Повторение аргументов присуще оцениванию как систематических, так и случайных погрешностей.

Последующий текст связан с неопределенностью, а не с погрешностями, и говорит о неопределенностях, происходящих из-за систематических или случайных эффектов, а не о систематических или случайных погрешностях. Неопределенность связана с вероятностью, в то время как погрешность связана с детерминизмом. К оценке надежности измерений гораздо удобнее применять вероятностный подход, а не детерминированный. Тем не менее, оперирование терминами погрешностей часто бывает полезно, поскольку они опираются на значительный опыт. Кроме того, характеристики средств измерений даны в терминах точности их измерений, которая является комбинацией правильности измерений, тесно связанной с систематическими погрешностями, и точности измерений, тесно связанной со случайными погрешностями.

Иногда одна и та же погрешность в зависимости от обстоятельств может быть классифицирована как систематическая или случайная. Например, погрешность амплитуды приемника на фиксированной частоте может быть классифицирована как систематическая, т. к. показания не меняются при повторном измерении на той же частоте. Однако эта же погрешность амплитуды приемника проявляется как случайная во всем частотном диапазоне приемника, так как произвольно меняется при переходе от одной частоты к другой. Разработчик приемника затем определяет предел погрешности (неопределенности), в котором случайная частота определяет погрешность, ограниченную во всем частотном диапазоне приемника. Неоднозначность систематической и случайной классификации является одной из причин для введения классификации типов А и типа В. Поэтому, неопределенности классифицируется в соответствии с путем, при помощи которого они оценены, а не в зависимости от их природы.

Примечание 2 — Это верно, если источник стабилен и создает сигнал, амплитуда которого намного больше, чем уровень шума приемника.

5.3.2 Оценивание стандартной неопределенности по типу А

Оценивание по типу А состоит в определении наилучшей оценки q величины Q и стандартной неопределенности путем статистического анализа выборки N повторяющихся показаний Q_i, где $i = 1,2,\ldots,N$. Наилучшая оценка выражается средним арифметическим значением $\overline{Q}$ показаний

$$\overline{Q} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} Q_i , \tag{27}$$

в таком случае $q = \overline{Q}$.

Необходимо отметить, что заглавную букву, в данном примере Q, в одно и то же время используют здесь для обозначения:

a) названия величины;

b) уникального, хотя и неизвестного значения величины;

c) любого произвольного значения, связанного с этой величиной.

Значения могут отличаться в зависимости от контекста. Строчную букву используют для наилучшей оценки величины, следовательно, q является наилучшей оценкой Q.

Мера дисперсии случайных значений Q_i в окрестности $\overline{Q}$ задана экспериментальным стандартным отклонением $s(Q_i)$:

$$s(Q_i) = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(Q_i - \overline{Q}\right)^2} . \tag{28}$$

Экспериментальное стандартное отклонение равно среднеквадратичному значению отклонений Q_i от $\overline{Q}$. Принимают, что показания независимы; поэтому нет причин полагать, что между ними существует значительная связь. Среднее значение квадратов вычисляют с помощью деления на $N-1$ вместо деления на N. Этот выбор может быть оправдан несколькими аргументами. Во-первых, дисперсия не может быть оценена исходя из одного показания. Как следствие, если пытаться оценить уравнение (28) в случае $N = 1$, то будет получена неопределенность вида 0/0, а не ошибочное нулевое значение, полученное заменой N на $N-1$ в уравнении (28). Во-вторых, число независимых отклонений равно $N-1$, так как исходя из уравнения (27), $\sum_{i=1}^{N}\left(Q_i - \overline{Q}\right) = 0$. Поэтому при делении на N может быть получена более оптимистичная оценка дисперсии. Число $\nu = N-1$ называется числом степеней свободы. Одну степень свободы фиксируют путем выбора среднего арифметического в качестве центрального значения для вычисления отклонения. В общем случае число степеней свободы — это разность числа независимых показаний и числа параметров, полученных на основе показаний. Необходимо отметить, что если дисперсию вычисляют около значения, которое не было получено путем объединения выборки показаний (например, значения, полученного из усреднения генеральной совокупности данных, или эталонного, или известного значения), более целесообразным будет деление на N, а не на $N-1$ потому что никакая степень свободы не фиксирована выбором центрального значения, и $\nu = N$.

Арифметическое значение выборки N случайных значений также является случайным значением. Это означает, что если вычисляют арифметическое значение каждой выборки M, полученной из N случайных показаний, то получены M значений $\overline{Q_j}$, $j = 1,2,\ldots,M$, которые меняются случайно. Очевидно, что чем больше N, тем меньше отклонение (в среднем) среди значений $\overline{Q_j}$. Например, чтобы оценить дисперсию значений $\overline{Q_j}$ вокруг основания общего среднего $\overline{\overline{Q}} = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}\overline{Q}_j$, допускается использовать уравнение (28), чтобы получить

$$s\left(\overline{Q}_j\right) = \sqrt{\frac{1}{M-1}\sum_{j=1}^{M}\left(\overline{Q}_j - \overline{\overline{Q}}\right)^2}. \tag{29}$$

Может быть показано (см. [7]), что $s\left(\overline{Q}_j\right) >> s\left(\overline{Q}\right)$, где $s\left(\overline{Q}\right)$ — экспериментальное стандартное отклонение среднего.

$$s\left(\overline{Q}\right) = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i=1}^{N}\left(Q_i - \overline{Q}\right)^2} \tag{30}$$

или

$$s\left(\overline{Q}\right) = \frac{s(Q_i)}{\sqrt{N}}, \tag{31}$$

где $s\left(\overline{Q}\right)$ — количественное описание распределения значений $\overline{Q}$ в окрестности $\overline{\overline{Q}}$.

Если M большое, как это подразумевается в равенстве (29), то экспериментальное стандартное отклонение среднего показывает оценку отклонения между средним выборки N наблюдений и средним бесконечного числа наблюдений. Равенство (30) очень полезно, потому что оно допускает необязательность M выборок из N наблюдений как в уравнении (29) для того чтобы оценить надежность среднего значения выборки из N наблюдений, и становиться возможным опираться на одну выборку.

Равенство (31) требует некоторых комментариев. С возрастанием N оценка дисперсии случайных наблюдений $s(Q_i)$, которая тоже является случайной, имеет тенденцию становиться более и более надежной. Может быть показано (см. [7] и Руководство ISO/IEC 98-3, приложение Е), что относительная дисперсия $s(Q_i)$ примерно равна $\sqrt{2(N-1)}$ при $N \geq 3^2$ (см. примечание 1). Следовательно, $s(Q_i)$ стремится к константе при N, стремящемся к бесконечности, и $s\left(\overline{Q}\right)$ стремится к нулю. Таким образом, стандартное отклонение экспериментального среднего может быть уменьшено увеличением числа измерений. Это дает довольно очевидный результат благодаря тому факту, что среднее N наблюдений стремится к константе при увеличении N. Менее очевидно то, что дисперсия среднего уменьшается пропорционально $1/\sqrt{N}$.

Примечание 1 — То же самое верно для $s\left(\overline{Q}\right)$ благодаря равенству (28). Также относительная дисперсия равна 76 % при $N = 2$ (см. Руководство ISO/IEC 98-3, Приложение Е, таблица Е.1).

Важная рекомендация: не следует путать экспериментальное стандартное отклонение со стандартным отклонением экспериментального среднего. Они представляют собой отличающиеся величины, используемые для ответа на два абсолютно различных вопроса. Экспериментальное стандартное отклонение может быть использовано для оценки повторяемости измерений или воспроизводимости измерений, так как они являются величинами, направленными на описание возможностей средства измерений и/или метода, обеспечивающих хорошее согласование результатов. Повторяемость измерений или воспроизводимость измерений не должна зависеть от числа N повторяемых измерений, которые выбираются для их оценки, как если бы при использовании среднего экспериментального стандартного отклонения. Не ожидается, в частности, что они будут уменьшаться при увеличении N. С другой стороны, неопределенность среднего арифметического серии показаний обычно уменьшается при увеличении длины серии, и она соответствующе описывается экспериментальным стандартным отклонением среднего. В общем, выбор между экспериментальным стандартным отклонением и экспериментальным стандартным отклонением среднего продиктован принятой измерительной моделью.

Экспериментальное стандартное отклонение или экспериментальное стандартное отклонение среднего являются необходимым шагом, но не конечным результатом оценки неопределенности типа А. Действительно, мы говорили о ненадежности экспериментального стандартного отклонения, особенно если число показаний N мало. Например, при $N = 10$, т. е. относительно большом числе повторных измерений, относительная дисперсия этого параметра будет около 24 %.

Гораздо предпочтительнее иметь значение неопределенности, которое можно было бы считать точным для всех ее последующих использований. В самом деле, интерпретация неопределенности более конкретная, вычисления ее легче (см. примечание 1), и выбор согласуется с результатом оценивания по типу В, где вычисление результата оценки не является неопределенным. Ценою точности является несколько большее значение неопределенности. Если Q придерживается нормальной ФПВ, тогда и экспериментальное стандартное отклонение, и экспериментальное стандартное отклонение среднего увеличатся на соответствующий коэффициент $\eta(v) > 1$, чтобы получить оценивание стандартной неопределенности по типу А $u(Q_i)$:

$$u(Q_i) = \eta(v) \cdot s(Q_i) \tag{32}$$

и оценивание стандартной неопределенности среднего по типу А $u(\overline{Q})$:

$$u(\overline{Q}) = \frac{u(Q_i)}{\sqrt{N}}, \tag{33}$$

где

$$\eta(v)\begin{cases} 6{,}48 & v = 1 \\ 2{,}20 & v = 2 \\ \sqrt{\dfrac{v}{v-2}} & v \ge 3. \end{cases} \tag{34}$$

Выбор значений $\eta(v)$ для интервала $1 \le v \le 99$ (т. е. $2 \le N \le 100$) показан в таблице 4. $\eta(1)$ и $\eta(2)$ — числовые значения, полученные как $t_{0,025}(1)/t_{0,025}(\infty)$ и $t_{0,025}(2)/t_{0,025}(\infty)$ соответственно. $t_p(v)$ является верхним критическим значением t-ФПВ Стьюдента с η степенями свободы, соответствующим вероятности p на краю. Действительно, $t_{0,025}(1) = 12{,}71$ и $t_{0,025}(\infty) = 1{,}96$, следовательно, $t_{0,025}(1)/t_{0,025}(\infty) = 6{,}48$. Далее $t_{0,025}(2) = 4{,}30$, поэтому $t_{0,025}(2)/t_{0,025}(\infty) = 2{,}20$. Значение вероятности p связано с вероятностью охвата P, которую принимают для окончательного описания неопределенности, т. е. $p = \frac{1-P}{2}$ (например, $P = 0{,}95$ подразумевает $p = 0{,}025$). При $N \ge 3$ получается $t_p(v)/t_p(\infty) \approx \sqrt{v/(v-2)}$ независимо от значения p.

Примечание 2 — Такой подход позволяет избавиться от концепции эффективных степеней свободы и использования формулы Велч-Саттерсвэйта (см. Руководство ISO/IEC 98-3, приложение G).

Таблица 4 — Значения коэффициента расширения $\eta(v)$, который приводит стандартное отклонение к Типу А стандартной неопределенности

v	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\eta(v)$	6,48	2,20	1,73	1,41	1,29	1,22	1,18	1,15	1,13

v	10	11	12	13	14	19	29	49	99
$\eta(v)$	1,12	1,11	1,10	1,09	1,08	1,06	1,04	1,02	1,01

Стандартная неопределенность типа А и стандартная неопределенность среднего типа А являются результатом оценки типа А стандартной неопределенности.

Пример 1

Оценка и проверка повторяемости измерений. Стадия оценки: оценивают неповторяемость (например, ежегодно) с помощью формулы (32) путем объединения относительно большого числа N независимых показаний (например, $N = 10$) для получения $u(Q_i)$. Стадия проверки: воспроизводимость может быть быстро проверена (например, ежемесячно) с помощью двух показаний Q_1 и Q_2, полученных при использовании одинаковых процедур измерения, настройки и одинакового оборудования, применяемых для определения $u(Q_i)$. Если $|Q_1 - Q_2| > 1,96 \cdot \sqrt{2} \cdot u(Q_i)$, то можно утверждать с вероятностью ошибки менее 5 %, что измерение, приводящее к ранее оцененной дисперсии $u(Q_i)$, проводилось не при тех же условиях повторяемости. Предметом (объектом) этого примера могут быть выбраны ток, подаваемый с помощью датчика объемного тока, пиковое значение электростатического разряда, время нарастания импульса тока короткого замыкания и т. д.

Примечание 3 — Разность $Q_1 - Q_2$ соответствует нормальной ФПВ, с ожидаемым значением, равным 0 и стандартным отклонением $\sqrt{2} \cdot u(Q_i)$.

Пример 2

Оценивание однородности поля в плоскости однородного поля (ПОП) при испытании на устойчивость к излучаемому электромагнитному полю, описываемому в IEC 61000-4-3. Неоднородность поля может быть оценена с помощью уравнения (32). Так как амплитуда поля является положительной величиной с большой дисперсией, результат вычислений обычно выражается в бюджете неопределенности с использованием логарифмических единиц. Удобно преобразовывать результаты измерений поля из В/м в дБ (В/м), чтобы вычислить дисперсию значений, выраженных в дБ (В/м), для получения результата в децибелах.

5.3.3 Оценивание стандартной неопределенности по типу В

Во многих случаях лучшая оценка и стандартная неопределенность величины

получаются не с помощью статистического анализа выборок наблюдений, а при использовании доступной информации о значениях, которые могут достигаться теми же величинами. Имеющаяся информация может состоять из спецификации средств измерений производителя, отчетов о калибровке, технических примечаний и указаний по применению, научной литературы, предыдущего опыта (в том числе записи данных).

Например, известно, что инструментальная погрешность приемника, соответствующего требованиям CISPR 16-1-1, для синусоидального напряжения должна быть в пределах ±2 дБ. Тем самым установлено, что предел (или допускаемое значение) погрешности приемника должно быть ±2 дБ. Неизвестна фактическая инструментальная погрешность на конкретной частоте и при конкретных настройках приемника, но известно, что это, безусловно, граница допустимого интервала. Оценивание неопределенности по типу В состоит в том, что погрешность измерений является случайной величиной Е, принимающей значения в допустимом интервале (E_{min}, E_{max}). В примере $E_{min} = -2$ дБ, а $E_{max} = +2$ дБ. С рациональной точки зрения более вероятно, что E будет ближе к центру допустимого интервала, чем к его границам. Более консервативные предположения показывают, что E равномерно распределяется в допустимом интервале. Это предположение выбирается более часто, по крайней мере, если нет возражений. В общих чертах значения E распределены на допустимом интервале в соответствии со статистическим распределением, которое соответствует допустимой информации. В примере приемника, если рассматривается консервативная точка зрения, ФПВ погрешности является константой, отличной от нуля внутри допустимого интервала, и равна нулю вне его. Такая ФПВ называется прямоугольной или равномерной. В противном случае может быть выбрана треугольная ФПВ, если есть убедительные доказательства того, что значения сконцентрированы в окрестности центра интервала.

Эти положения объясняются следующей математической формулой. Статистическое распределение погрешности описывается ФПВ $g(E)$, которая может быть определена как

$$\Pr\left(\hat{E} < E < \hat{E} + d\hat{E}\right) = g\left(\hat{E}\right)dE, \tag{35}$$

где $\Pr\left(\hat{E} < E < \hat{E} + d\hat{E}\right)$ — вероятность того, что E лежит между $\hat{E}$ и $\hat{E} + dE$, и dE — бесконечно малый интервал. Функция $g(E)$ является плотностью, потому что описывает вероятность, приходящуюся на бесконечно малый интервал погрешности. В таком случае единица измерений ФПВ является обратной к единицам измерений величины E (вероятность — безразмерная величина).

ФПВ имеют следующие общие свойства:

$$g(E) \geq 0 \quad \text{для любого} \quad E; \tag{36}$$

$$\int g(E)dE = 1 \quad \text{интеграл по всем возможным значениям } E. \tag{37}$$

В примере, приведенном выше, $\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} g(E)dE = 1$. В общих чертах интервал $(E_{\min}, E_{\max})$ включает в себя большую часть p возможных значений E, где обычно $p = 1$ или $p = 0{,}95$, следовательно

$$\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} g(E)dE = p. \tag{38}$$

Свойство (37) позволяет получить математическое выражение прямоугольной ФПВ. Действительно, так как площадь прямоугольника единична и ширина основания равна $E_{\max} - E_{\min}$, то ее высота равна $1/(E_{\max} - E_{\min})$. В случае треугольной ФПВ ширина основания опять равна $E_{\max} - E_{\min}$, а высота в этом случае равна $2/(E_{\max} - E_{\min})$.

С учетом знания ФПВ, можно вывести наилучшую оценку E погрешности измерений и стандартной неопределенности по типу В. Для этого необходимо рассмотреть значение $Eg(E)dE$, являющееся результатом частной погрешности значения E и вероятности достижения значений погрешности в узкой окрестности E. Если просуммировать $Eg(E)dE$ по всем возможным значениям E, получают взвешенное среднее, называемое ожидаемым значением E или кратко $\langle E \rangle$, где

$$\langle E \rangle = \int Eg(E)dE \tag{39}$$

интеграл по всем возможным значениям E. Можно легко показать, что $\langle E \rangle$ является предельным значением арифметического среднего бесконечно большой выборки возможных значений E. Это свойство может быть продемонстрировано оценкой вероятности в формуле (35) с отношением между числом значений выборок, попадающих в интервал $\left(\hat{E},\hat{E}+\Delta E\right)$ и общим числом значений выборок. ΔE показывает ширину интервала, содержащего значительное число значений выборок. Наконец, в схеме оценки типа B ожидаемое значение является аналогом среднего арифметического, которое является лучшей оценкой в схеме оценки типа A. Следовательно, лучшей оценкой погрешности измерений будет $e=\langle E\rangle$. Таким образом, интегрирование в формуле (39) может быть упрощено для симметричной ФПВ. Для симметричных распределений, таких как прямоугольное и треугольная ФПВ, $e=1/2\cdot\left(E_{\min}+E_{\max}\right)$.

Если рассмотреть теперь величину $E-\langle E\rangle$, которая соответствует отклонению между значением частной погрешности и лучшей оценкой погрешности, взвешенное среднее квадратов отклонения может быть вычислено следующим образом

$$\left\langle\left(E-\langle E\rangle\right)^2\right\rangle=\int\left(E-\langle E\rangle\right)^2 g(E)dE\ . \tag{40}$$

(Интегрирование снова идет по всем возможным значениям E.)

Необходимо заметить, что член в левой части уравнения (40) является ожидаемым значением квадрата отклонения $\left(E-\langle E\rangle\right)^2$ и называется дисперсией E, обычно обозначаемой, как σ_E^2. В продолжение линии рассуждений в предыдущем абзаце, может быть показано, что дисперсия есть предельное значение квадрата экспериментального стандартного отклонения бесконечно большой выборки возможных значений E. Вывод — стандартная неопределенность по типу B есть квадратный корень из дисперсии, т. е.

$$u(e)=\sqrt{\int\left(E-\langle E\rangle\right)^2 g(E)dE}, \tag{41}$$

где для однородных обозначений со стандартной неопределенностью по типу A принимают $u(e)=\sigma_E$. Решая интеграл в формуле (41), находят в случае прямоугольной ФПВ

$$u(e)=\frac{E_{\max}-E_{\min}}{\sqrt{12}}, \tag{42}$$

в то время, как в случае треугольной ФПВ получают

$$u(e)=\frac{E_{\max}-E_{\min}}{\sqrt{24}}. \tag{43}$$

Если возвратиться к предыдущему примеру, можно рассмотреть погрешность амплитуды приемника при $E_{\min}=-2$ дБ и $E_{\max}=+2$ дБ. Если ФПВ — прямоугольная, то $u(e)=1{,}2$ дБ. Если ФПВ — треугольная, то $u(e)=0{,}8$ дБ. В обоих случаях, благодаря симметрии, лучшая оценка погрешности равна $e=0$ дБ.

Пример 1

Стандартная неопределенность по типу B получена из отчета о калибровке (т. е. усиление антенны для ЭМС), устанавливая лучшую оценку и охватывающий интервал, соответствующий вероятности охвата 95 %, для нормальной ФПВ. Необходимо заметить, что в значении эффективной степени свободы нет необходимости [можно утверждать в отчете о калибровке: в любом случае, при делении $E_{max}-E_{min}$ на $2\cdot 1{,}96$ = 3,92 получают $u(e)$].

П р и м е ч а н и е – Символ E используют в местах, более подходящих для X, потому что пример, приведенный здесь, имеет отношение к погрешности измерений. Тем не менее полученные результаты — общие.

5.4 Статистики выборок

5.4.1 Общие соображения

В некоторых практических ситуациях при испытаниях и измерениях ЭМС неопределенность измерения (НИ) оценивается на основе относительно малого набора измеряемых данных. Ниже приведены несколько примеров:

- в межлабораторных сравнениях число измеряемых значений величин (это число будет равно числу участвующих лабораторий) обычно составляет порядка 10 и менее, а не сто или более;
- при угловом сканировании объекта испытаний во время проверки экранирования, помехоустойчивости или эмиссии число ракурсов для объекта испытаний, расположенного в ПБЭК, строго ограничено по экономическим причинам;
- при измерении высоты при измерении излучаемых помех в безэховой среде число высот и угловых ориентаций объекта испытаний ограничено;
- число шагов лопастного смесителя при испытаниях в реверберационных камерах, как правило, порядка нескольких десятков за один оборот (минимум 12), например при работе в окрестности наименьшей рабочей частоты.

Ограничение размера набора данных вызвано экономическими трудностями или в связи с более фундаментальными физическими ограничениями.

В то время как статистические данные ансамбля и ФПВ (например, нормальная ФПВ) дают асимптотически точные оценки ожидаемого значения и доверительные интервалы для бесконечно большой выборки наборов данных, ИН может ощутимо увеличиться для «малых» наборов выборок, как правило, для $N = 40$ или менее статистически независимых выборок. (Значение N зависит от статистической независимости значений наблюдений, которая должна быть исследована отдельно.) Статистики ансамбля и распределения ансамблей соответствуют идеальному случаю, при котором N стремится к бесконечности.

Распределение в окрестности среднего значения [стандартное отклонение, доверительные границы (предел) и т. д.)] сильно зависит от размера выборки. Сопоставимы только результаты испытаний для постоянного N.

Строго говоря, статистические данные выборки (например, стандартное отклонение выборки), рассчитанные исходя из заданного набора данных, применимы только к этому набору. Однако (особенно для не слишком малого N) вычисленные статистические данные выборки служат хорошим приближением для тех же статистических данных выборок других (повторяющихся) наборов данных, связанных с одной и той же величиной, измеряемой при идентичных условиях измерений.

5.4.2 Выборочное среднее и выборочное стандартное отклонение

Выборочное среднее измеряемой (оцениваемой) величины X (например, комплексного поля, амплитуды поля, плотности мощности или энергии и т. д.) определяют следующим образом

$$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^{N} X_i}{N}, \tag{44}$$

где X_i — i-е значение выборки;

$\overline{X}$ — оценка для ансамбля значений $\langle X \rangle$.

Выборочное экспериментальное стандартное отклонение X определяют следующим образом

$$s_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(X_i - \overline{X}\right)^2}{N-1}}. \tag{45}$$

Выборочное стандартное отклонение $\overline{X}$ (также известное как стандартное отклонение погрешности $\overline{X}$) определяют следующим образом

$$s_{\overline{X}} = \frac{s_X}{\sqrt{N}}. \tag{46}$$

Примечание — Определение $s_{\overline{X}}$ требует, чтобы N выборных значений были статистически независимы, в то время как на $\overline{X}$ не накладывается никаких ограничений.

5.4.3 Выборочный коэффициент вариации

Для нецентрированных ФПВ X (которые являются обычным случаем в ЭМС) коэффициент вариации $v_X = \sigma_X/\mu_X$ служит мерой относительной неопределенности X; так как он дает информацию об относительных (противоположно абсолютному) уровнях колебаний X. В общем случае это понятие особенно полезно, если ФПВ X неизвестна. Если данные представляют повторяющиеся измерения величины X, которая является предметом случайных колебаний (например, шум), тогда $1/v_X$ представляет собой СШО для набора данных.

Примечание – Коэффициент вариации применим только для линейных, а не для логарифмических величин.

На практике коэффициент вариации ансамбля и его выборочное значение оценивают, основываясь на выборочных значениях среднего и стандартного отклонения. Среднее значение выборочного коэффициента вариации может быть оценено как отношение выборочного среднего к выборочному стандартному отклонению:

$$n_X = \frac{\overline{X}}{s_X}. \tag{47}$$

Так как $\overline{X}$ и s_X случайные величины (см. 5.3.2), то и n_X сама по себе случайная величина, которая меняется от одного набора выборки к другому. Для нормальной ФПВ X выборочное стандартное отклонение коэффициента вариации равно $v_X\sqrt{\left(1+2v_X^2\right)}\Big/\sqrt{(2N)}$.

5.4.4 Ограничения выборочно-статистических доверительных интервалов

Так же как и любая другая выборочная статистика, значение (т. е. положение) верхней $\left(\xi^+\right)$ и нижней $\left(\xi^-\right)$ границ $\eta\%$ доверительного интервала $\xi^{\pm}_{(1\pm\eta/100)/2}$ изменяется, и, следовательно, приобретает неопределенность, когда размер выборки N конечен. Это связано с тем, что от выборки к выборке вариации эмпирического выборочного распределения между наборами выборок определяют такую вероятность, при которой измеряемая величина не превысит указанного значения изменений. Только определяемый ФПВ ансамбль имеет доверительные границы, которые имеют детерминированные значения (т. е. фиксированные положения), в то время как границы для изменения выборок и распределения выборок — случайные величины. Случайные доверительные пределы и их выборочные значения представляют в виде $\Xi^{\pm}_{(1\pm\eta/100)/2}$ и $\xi^{\pm}_{(1\pm\eta/100)/2}$ соответственно.

Для симметричного 95%-ного доверительного интервала и генеральной совокупности X с ФПВ $g(X)$ и функцией распределения $G(X)$ общие выражения для стандартной погрешности верхней и нижней границ и коваривации $\Xi^{\pm}_{(1\pm\eta/100)/2}$ будут:

$$\sigma\left(\Xi^{+}_{0,975}\right) = \sqrt{\frac{0,025\times 0,975}{\left[g\left(G^{-1}(0,975)\right)\right]^2 N}}, \qquad \sigma\left(\Xi^{-}_{0,025}\right) = \sqrt{\frac{0,025\times 0,975}{\left[g\left(G^{-1}(0,025)\right)\right]^2 N}}, \tag{48}$$

а для стандартной нормальной ФПВ для X:

$$\sigma\left(\Xi^{+}_{\text{0б975}}\right)=\sigma\left(\Xi^{-}_{0,025}\right)\cong\frac{2,671}{\sqrt{N}}\sigma_X=\frac{1,363}{\sqrt{N}}\xi^{+}_{0,975}=-\frac{1,363}{\sqrt{N}}\xi^{-}_{0,025}. \tag{49}$$

Соответствующие значения для других доверительных уровней и для мощности или напряженности поля случайных электромагнитных полей (полного и прямоугольных компонентов) приведены в [3].

Например, для выборки из $N=10$, 100 или 1000 независимых измеренных значений величины нормально распределенного поля, эмпирически определенные верхняя и нижняя границы симметричного 95 % доверительного интервала для этих величин имеют стандартное отклонение 43,1 %, 13,6 %, 4,3 % соответственно. Для сравнения: при доверительном уровне 99 % стандартные отклонения будут 59,9 %, 18,9 %, 5,9 % соответственно. Таким образом, чем больший доверительный уровень выбран для измеряемой величины, тем большую неопределенность положения границ выборочного-статистического доверительного интервала этой измеряемой величины при данном числе значений выборок получат в итоге. В противном случае, для выбранного доверительного уровня доверительный интервал будет шире, а положение границ, связанных с доверительным интервалом, станет одновременно размытыми при уменьшении размера выборки. Точные границы могут появиться только для параметров бесконечно больших совокупностей выборок. Таким образом, определение доверительного интервала, основанного на очень малых выборках данных, имеет ограниченное практическое значение. На практике приемлемые значения для σ_Ξ зависят не только от σ_X, но и от относительной неопределенности σ_X/μ_X, которая считается приемлемой. Размер выборки может быть оценен для учета размытости границы, например вычитанием $2\sigma_\Xi$ из нижней граница и прибавлением $2\sigma_\Xi$ к верхней границе процентиля распределения совокупности, который определяется доверительным интервалом.

5.4.5 Выборочное распределение и выборочная статистика среднего значения

5.4.5.1 Общие положения

Более полная статистическая информация и характеристика значений выборки даются их выборочным распределением.

Для случайного X, распределение выборки которого известно или принято, что оно будет иметь вид нормальной ФПВ, выборочное распределение X является *t* ФПВ Стьюдента или ФПВ Бесселя в зависимости от того, рассматривается ли X в своей (безразмерной) выборочно-стандартизованной форме или (размерной) нестандартизованной форме соответственно [8]. Учет формы важен для сравнения измеряемых данных X с теоретическими ФПВ, в то время как последнее актуально при оценке действительного значения тестируемой физической величины (например, силы поля в вольтах на метр а, не в децибелах по отношению к среднему значению как исходному значению).

5.4.5.2 Поле комплексных значений или ток

Для нормально распределенного X распределение выборки $\overline{X}$ (при рассмотрении как случайной величины по отношению ко всем возможным наборам данных значений N, не следует путать со стандартным отклонением выборки, которое имеет первостепенное значение) является также нормальным, со средним значением $\langle X\rangle$ и стандартным отклонением $\sigma_X/\sqrt{N}$:

$$g\left(\overline{x};N\right)=\sqrt{\frac{N}{2\pi\sigma^2}}\exp\left[-\frac{N\left(\overline{x}-\langle X\rangle\right)^2}{2\pi\sigma^2}\right]. \tag{50}$$

Если X имеет ФПВ, отличную от нормальной ФПВ, то ФПВ выборки X, среднее значение выборки и стандартное отклонение выборки вычисляют обычно сложнее. Ситуация часто осложняется еще и тем, что только для нормального X выборочное среднее и стандартное отклонение выборки статистически являются независимыми величинами. Поэтому, когда величина ансамбля поля является (или может быть прослежена) только нормальной ФПВ, могут быть получены точные результаты. Например, амплитуда или плотность энергии несмещенного идеального случайного поля (прямолинейные компоненты или векторное поле) все еще могут быть вычислены [3]. В большинстве других случаев, выборочно-статистическая характеристика обязательно ограничена стандартным отклонением выборки и/или доверительным интервалом выборки, для которых общие выражения остаются в силе.

5.4.5.3 Мощность (плотность энергии, интенсивность)

ФПВ среднего значения выборки мощности или интенсивности W для идеального поля $(\langle E\rangle = 0)$ примет вид

$$g(\overline{w};N) = \frac{(dN)^{dN/2}}{\Gamma(dN)\sigma_{\overline{W}}}\left(\frac{\overline{w}}{\sigma_{\overline{W}}}\right)^{dN-1}\exp\left(-\sqrt{dN}\,\frac{\overline{w}}{\sigma_{\overline{W}}}\right), \qquad (51)$$

где $\Gamma(dN)$ представляет полную гамма функцию. Здесь d относится к числу осей антенны или датчика поля. Например, для проволочной антенны или одноосного датчика $d=1$; для винтовой антенны, поддерживающей лево- и правокруговую поляризацию, $d=2$; для трехосных датчиков поля с внутренним соединением $d=3$.

Среднее выборки и стандартное отклонение выборки дается выражениями:

$$\langle\overline{W}\rangle = d\sigma_E^2 = 2d\sigma^2 \qquad \sigma_{\overline{W}} = 2\sqrt{\frac{d}{N}}\sigma^2, \qquad (52)$$

где $\sigma_E^2 = 2\sigma^2$ есть отклонение кругового комплексного значения поля E с σ, выражающей стандартное отклонение фазной или квадратурной составляющей.

Симметричный доверительный интервал для доверительного уровня $\eta\%$ получается из функции распределения с помощью аналитических или числовых решений:

$$\frac{\gamma\left(dN, \sqrt{dN}\,\dfrac{\xi_{(1\pm\eta/100)/2}}{\sigma_{\overline{W}}}\right)}{\Gamma(dN)} = \frac{1\pm\eta/100}{2}, \qquad (53)$$

где $\gamma(dN)$ — неполная гамма-функция.

5.4.5.4 Амплитуда поля

Для среднего выборки напряженности поля $\overline{A}$ для несмещенного поля $(\langle E\rangle = 0)$

$$g(\overline{a};N) = \frac{2\left[d - \left(\dfrac{\Gamma\left(dN+\frac{1}{2}\right)}{\Gamma(dN)}\right)^2\right]^{dN}}{\Gamma(dN)\sigma_{\overline{A}}}\left(\frac{\overline{a}}{\sigma_{\overline{A}}}\right)^{2dN-1}\exp\left\{-\left[dN - \left(\left(\frac{\Gamma\left(dN+\frac{1}{2}\right)}{\Gamma(dN)}\right)^2\right)\right]\left(\frac{\overline{a}}{\sigma_{\overline{A}}}\right)^2\right\} \qquad (54)$$

со средним значением выборки и стандартным отклонением выборки, определяемыми по формулам

$$\langle\overline{A}\rangle = \sqrt{2}\,\frac{\Gamma\left(dN+\frac{1}{2}\right)}{\Gamma(dN)}\sigma, \qquad \sigma_{\overline{A}} = \sqrt{\frac{2}{N}\left[dN - \left(\frac{\Gamma(dN)+\frac{1}{2}}{\Gamma(dN)}\right)^2\right]}\sigma. \qquad (55)$$

Доверительный интервал для доверительного уровня η% получается из функции распределения $\bar{A}$ путем аналитических или числовых решений уравнения (56).

$$\frac{\gamma\left(dN,\left[dN-\left(\frac{\Gamma\left(dN+\frac{1}{2}\right)}{\Gamma(dN)}\right)^2\right]\left(\frac{\xi_{(1\pm\eta/100)/2}}{\sigma_{\bar{A}}}\right)^2\right)}{\Gamma(dN)}=\frac{1\pm\eta/100}{2}. \tag{56}$$

Рисунки 11 и 12 показывают пределы доверительных интервалов 95 %, 99 % и 99,5 % для $\overline{W}$ и $\bar{A}$ как функции от N для измерений, использующих проволочную антенну или одноосный датчик поля $(d=1)$.

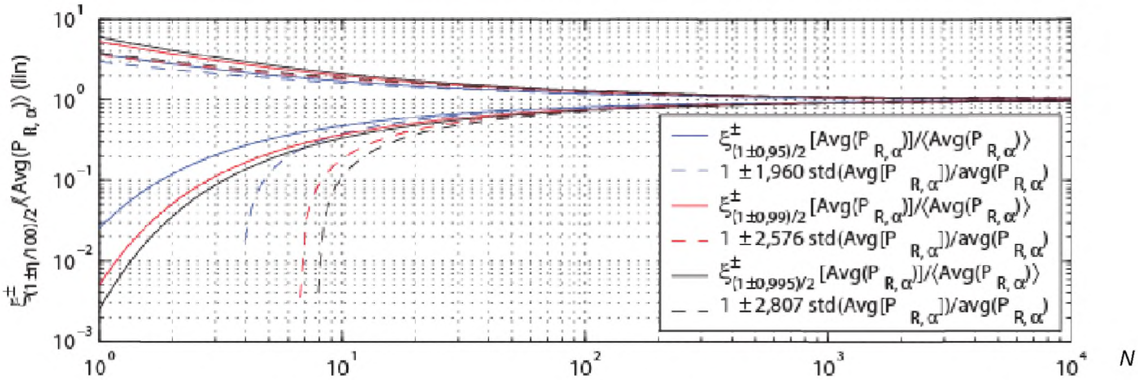


Рисунок 11 – Границы (пределы) доверительных интервалов 95 %, 99 % и 99,5 % для $\overline{W}$ как функции от N для измерений при использовании прямолинейной антенны или одноосного датчика поля

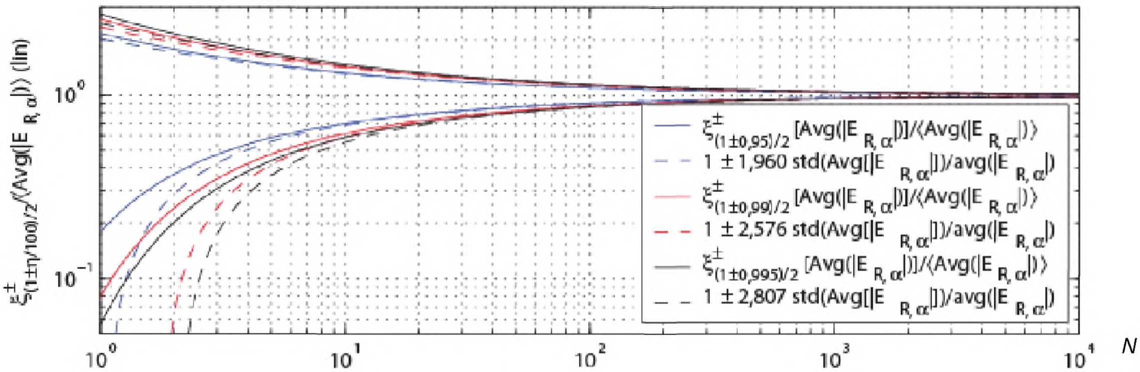


Рисунок 12 – Границы доверительных интервалов 95 %, 99 % и 99,5 % для $\bar{A}$ как функции от N измерений при использовании прямолинейной антенны или одноосного датчика поля

5.4.6 Распределение выборки и стандартное отклонение статистик выборки

5.4.6.1 Общие положения

Стандартное отклонение выборки — случайная переменная, варьирующаяся от выборки к выборке при фиксированном размере выборки N. Следовательно, имеет смысл охарактеризовать ее выборочной ФПВ и статистиками выборки.

5.4.6.2 Поле комплексных значений или ток

Для выборки поля или тока с круговой нормальной ФПВ Гаусса стандартное отклонение выборки имеет ФПВ χ с N степенями свободы, т. е.

$$g(s_X;N)=\frac{2}{\Gamma\left(\frac{N-1}{2}\right)\sigma_{s_X}}\left[\frac{N-1}{2}-\left(\frac{\Gamma\left(\frac{N}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{N-1}{2}\right)}\right)^2\right]^{\frac{N-1}{2}}\left(\frac{s_X}{\sigma_{s_X}}\right)^{N-2}\exp\left[-\left[\frac{N-1}{2}-\left(\frac{\Gamma\left(\frac{N}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{N-1}{2}\right)}\right)^2\right]\left(\frac{s_X}{\sigma_{s_X}}\right)^2\right] \quad (57)$$

с выборочным средним и выборочным стандартным отклонением, определяемыми по формулам

$$\langle s_X\rangle=\sqrt{\frac{2}{N-1}}\frac{\Gamma\left(\frac{N}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{N-1}{2}\right)}\sigma_X, \qquad \sigma_{s_X}=\sqrt{1-\frac{2}{N-1}\left(\frac{\Gamma\left(\frac{N}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{N-1}{2}\right)}\right)^2}\,\sigma_X. \quad (58)$$

5.4.6.3 Мощность (плотность энергии, интенсивность)

Для мощности или интенсивности W несмещенного поля $(\langle E\rangle=0)$

$$g(s_W)=\frac{\left(dN-\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{2}\left(dN-\frac{1}{2}\right)}}{\Gamma\left(dN-\frac{1}{2}\right)\sigma_{s_W}}\left(\frac{s_W}{\sigma_{s_W}}\right)^{\left(dN-\frac{3}{2}\right)}\exp\left(-\sqrt{dN-\frac{1}{2}}\,\frac{s_W}{\sigma_{s_W}}\right) \quad (59)$$

с выборочным средним и выборочным стандартным отклонением:

$$\langle s_W\rangle=\sigma_W, \qquad \sigma_{s_W}=\frac{\sigma_W}{\sqrt{dN-\frac{1}{2}}}. \quad (60)$$

5.4.6.4 Амплитуда поля

Для напряженности опять же несмещенного поля ФПВ S_A будет

$$g(s_A;N)=\frac{2\left[dN-\frac{1}{2}-\left(\frac{\Gamma(dN)}{\Gamma\left(dN-\frac{1}{2}\right)}\right)^2\right]^{dN-\frac{1}{2}}}{\Gamma\left(dN-\frac{1}{2}\right)\sigma_{s_A}}\left(\frac{s_A}{\sigma_{s_A}}\right)^{2(dN-1)}\exp\left(-\left[dN-\frac{1}{2}-\left(\frac{\Gamma(dN)}{\Gamma\left(dN-\frac{1}{2}\right)}\right)^2\right]\left(\frac{s_W}{\sigma_{s_W}}\right)^2\right) \quad (61)$$

с выборочным средним и выборочным стандартным отклонением, описываемыми в виде:

$$\langle S_A \rangle = \frac{1}{\sqrt{dN-\frac{1}{2}}} \frac{\Gamma(dN)}{\Gamma\left(dN-\frac{1}{2}\right)} \sigma_A, \qquad \sigma_{S_A} = \sqrt{1-\frac{1}{dN-\frac{1}{2}}\left(\frac{\Gamma(dN)}{\Gamma\left(dN-\frac{1}{2}\right)}\right)^2}\,\sigma_A. \tag{62}$$

Рисунок 13 показывает пределы 95%-ного доверительного интервала для S_X как функцию от N при использовании для измерений прямолинейной антенны $(d=1)$, с учетом ее нормального приближения.

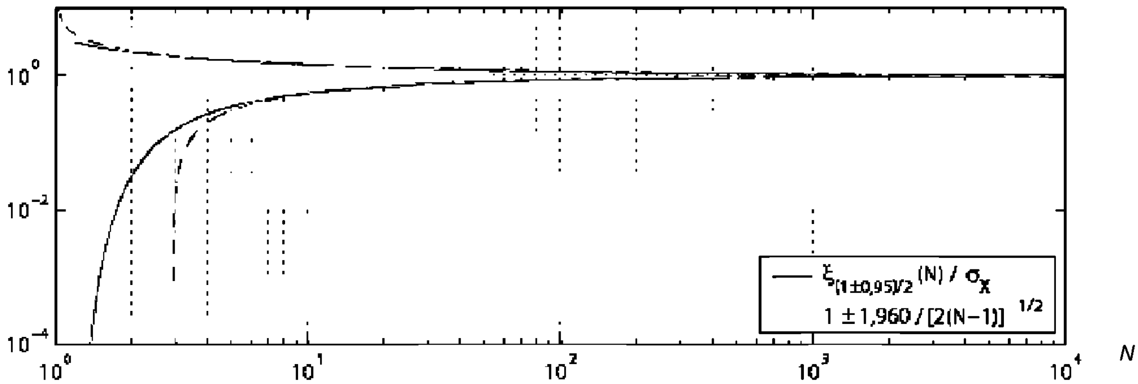


Рисунок 13 – 95%-ный доверительный интервал для S_X как функция от N, при использовании для измерений одноосного датчика

5.5 Преобразование из линейных величин в децибелы и наоборот

5.5.1 Общие положения

Преобразование из линейных (например, мВ/м, мВт и т. д.) в логарифмические единицы, т. е. в децибелы [например, дБ (мВ/м), дБ (мВт) и т. д.] или наоборот является нелинейным преобразованием [9]. Таким образом, ФПВ электромагнитных измеряемых величин и физических величин таких, как напряженность поля, мощность и т. д., при выражении через децибелы, отличается от применяемых ФПВ к тем же величинам, но выраженных в линейных единицах.

Определение ФПВ существенно для вычисления преобразования неопределенности. На основании преобразованных ФПВ оценка дисперсии и доверительного интервала проводят обычным способом.

5.5.2 Нормально распределенные изменения

5.5.2.1 Комплексные поля

В общем случае, вероятность получения отрицательных значений фазных или квадратурных компонентов не является несущественной. Следовательно, преобразование в дБ является в этом случае невозможным. Однако если ФПВ в основном сконцентрировано в окрестности центрального значения (подразумевающего, что $\sigma/\mu \ll 1$), то вероятность получения отрицательных результатов может быть исключена, и преобразование возможно.

Для

$$F = 20\lg(E) \tag{63}$$

с

$$g_E(E)=\frac{\exp\left(-\frac{(E-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}{\sqrt{2\pi}\sigma} \qquad (64)$$

ФПВ F имеет вид

$$g_F(F)=\frac{\exp\left[-\frac{(F-20\lg(\mu))^2}{2\left(\frac{20\sigma}{\ln 10}\right)^2}\right]}{\sqrt{2\pi}\frac{20\sigma}{\ln 10}} \qquad (65)$$

Эта преобразованная ФПВ может также быть использована в случаях, где изначальная ФПВ — приблизительно нормальная Гауссовская, с учетом ЦПТ, например для ФПВ максимального значения напряженности поля или мощности.

5.5.2.2 Напряженность поля (χ - распределенная линейная величина)

Для напряженности поля формула преобразования выглядит как

$$B=20\lg(A) \qquad (66)$$

и в итоге для трансформированной ФПВ

$$g_B(B)=C\frac{\ln 10}{20}10^{\frac{B}{20}}g_A\left(A=10^{\frac{B}{20}}\right), \qquad (67)$$

в которой C — константа нормализации.

Среднее значение B будет

$$\langle B\rangle=\int_{-\infty}^{+\infty}20\lg(X)g_A(A=X)dX\,. \qquad (68)$$

Обратное преобразование из децибел в вольты дает

$$g_A(A)=\frac{20}{A\cdot\ln(10)}g_B(B=20\lg(A)) \qquad (69)$$

со значением среднего

$$\langle A\rangle=\int_{-\infty}^{+\infty}\exp\left(\frac{X\cdot\ln(10)}{20}\right)g_B(B=X)dX\,. \qquad (70)$$

В частности, для величины А, распределенной по закону Релея, т. е. для

$$g_A(A) = \frac{A \cdot \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right)}{\sigma^2}, \tag{71}$$

получают

$$g_B(B) = C\frac{\ln 10}{20\sigma^2}10^{\frac{B}{20}}\exp\left(-\frac{10^{\frac{B}{20}}}{2\sigma^2}\right), \tag{72}$$

где $C = e$ для $\sigma = 1/\sqrt{2}$.

Рисунок 14 показывает ФПВ величины B для величины A, распределенной по закону Релея при фиксированном значении σ.

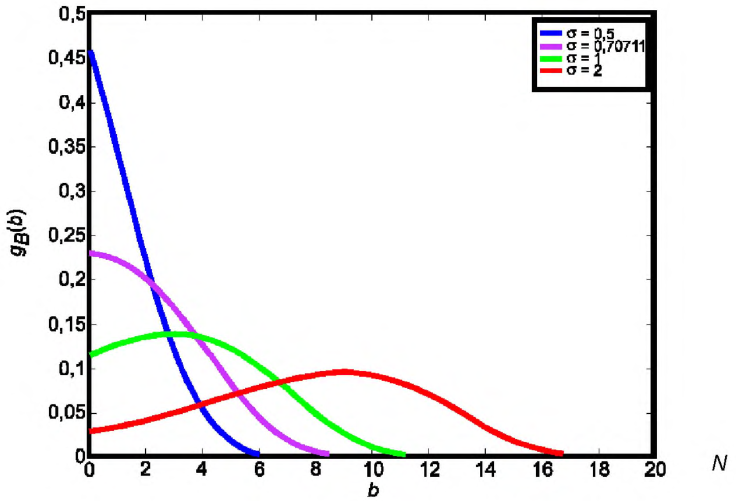


Рисунок 14 – ФПВ B для величины A, распределенной по закону Релея, при выбранных значениях σ

5.5.2.3 Мощность, интенсивность, плотность энергии (χ^2-распределенная линейная величина)

Для интенсивности поля, плотности энергии или мощности формы преобразования описываются следующим образом

$$V = 10\lg(R). \tag{73}$$

Получают

$$g_V(V) = C\frac{\ln 10}{10}10^{\frac{V}{10}}g_R\left(R = 10^{\frac{V}{10}}\right) \tag{74}$$

со значением среднего

$$\langle V\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} 10\lg(X)g_R(R = X)dX. \tag{75}$$

Обратное преобразование из децибел относительно одного ватта в ватты имеет вид

$$g_R(R) = \frac{10}{R\cdot\ln(10)}g_V(V = 10\lg(R)) \tag{76}$$

со средним значением

$$\langle R\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{X\cdot\ln(10)}{10}\right)g_V(V = X)dX. \tag{77}$$

Для экспоненциально распределенной величины R, т. е. для

$$g_R(R) = \frac{\exp\left(-\frac{R}{2\sigma^2}\right)}{2\sigma^2}, \tag{78}$$

получают

$$g_V(V) = C\frac{\ln 10}{20\sigma^2}10^{\frac{V}{10}}\exp\left(-\frac{10^{\frac{V}{10}}}{2\sigma^2}\right), \tag{79}$$

что совпадает с результатом для напряженности поля в децибелах, распределенной по закону Рэлея.

Примечание – Может быть показано, что совпадение ФПВ поля и мощности для единиц в децибелах верно для любой пары ФПВ A и R, а не только для пары Релеевской и экспоненциальной ФПВ.

Значение среднего

$$\langle V\rangle = 10\lg\left(2\sigma^2\right) - 2{,}507, \tag{80}$$

которое показывает, что усреднение логарифмических значений (например, при выполнении измерений с использованием анализатора цепей для условий, изменяющихся во времени, с усреднением сигнала) дает возрастание значения среднего, которое меньше примерно на 2,5 дБ, чем при линейном усреднении.

5.5.3 Равномерно распределенные изменения

Приведенные результаты, в которых сигнал постоянен и шум имеет нормальную ФПВ, могут быть распространены и на другие ФПВ, например, для случая, когда колебания вокруг постоянного значения распределены равномерно.

В частности, если X имеет равномерное распределение на интервале $[a,b]$ в линейных единицах [т. е. сосредоточена вокруг значения $(a+b)/2$ с половиной ширины $(b-a)/2$], то его преобразование в децибелы относительно одного вольта, вычисляемое как $Y = 20\lg_{10}(X)$, имеет ФПВ

$$g_Y(Y) = \frac{\ln 10}{20(b-a)}10^{\frac{Y}{20}}, \tag{81}$$

в то время как ее преобразование в децибелы, вычисленное с помощью выражения $Z = 10\lg_{10}(X)$, имеет ФПВ

$$g_Z(Z) = \frac{\ln 10}{10(b-a)} 10^{\frac{Z}{10}} \qquad (82)$$

Для обратного преобразования из равномерной ФПВ величины в децибелах в линейные единицы для полей или напряжений ФПВ будет

$$g_X(X) = \frac{20}{(b-a)\ln(10)} \cdot \frac{1}{X}. \qquad (83)$$

6 Применение неопределенности измерений

Некоторые количественные параметры распределения, определенные в применяемых основополагающих стандартах[1], могут иметь соответствующее допускаемое отклонение. Если в основополагающем стандарте отсутствует требование о допустимом отклонении для величины q, неопределенность измерений, присваиваемая этой величине, должна быть получена из результатов калибровки средств измерений, используемых для измерения этой величины, и из других входных величин (например, температурного дрейфа, долгосрочного дрейфа). В общем случае разница между показываемым значением при калибровке q_i и значением, полученным в калибровочной лаборатории, q_c, является систематической погрешностью, которая может быть исправлена в процессе использовании средства измерений. В таком случае эта разница не будет частью общего бюджета неопределенности измерений (см. технологическую схему на рисунке 15).

[1] Например стандарты серии IEC 61000-4

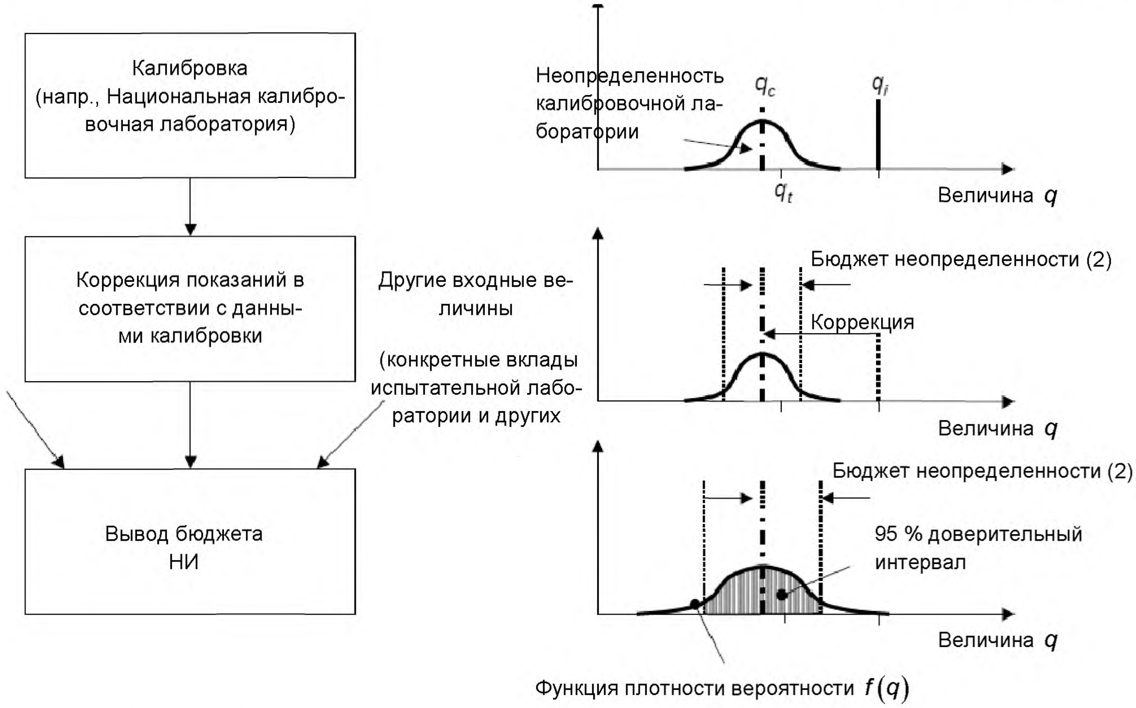


Рисунок 15 – Бюджет неопределенности измерений для величины, полученной в испытательной лаборатории

На рисунке 15 q_i, q_t и q_c — значения, показанные средством измерений, который необходимо калибровать, истинное значение (которое, тем не менее, неизвестно в большинстве случаев) и значение, полученное с помощью калибровочной лаборатории, соответственно.

При калибровке в калибровочной лаборатории средство измерений, которое необходимо откалибровать, будет давать указанное значение q_c. Средства измерений, использованные для калибровки калибровочной лабораторией, будут давать значение q. Так как средства измерений, используемые калибровочной лабораторий, имеют неопределенность измерений, истинное значение q_t будет находится в окрестности q_c.

Путем коррекции показаний средств измерений поправкой c, q_i и q_c будут иметь одинаковое значение. Бюджет неопределенности (1) на этой стадии будет включать в себя только неопределенность калибровочных лабораторий, как установлено в сертификате калибровки.

Так как средство измерений может быть подвержено влиянию других величин, которые не присутствуют при калибровке, эти другие входные значения следует учитывать в бюджете неопределенности (2).

Неопределенности измерений необходимо также учитывать, если соответствующий основополагающий стандарт требует, чтобы определенная величина лежала в допустимых пределах, описываемых нижним и верхним допустимыми пределами, как показано на рисунке 15. В принципе, процедура, показанная выше, дополняется шагом обработки, когда проверяется выполнение требований к доверительности.

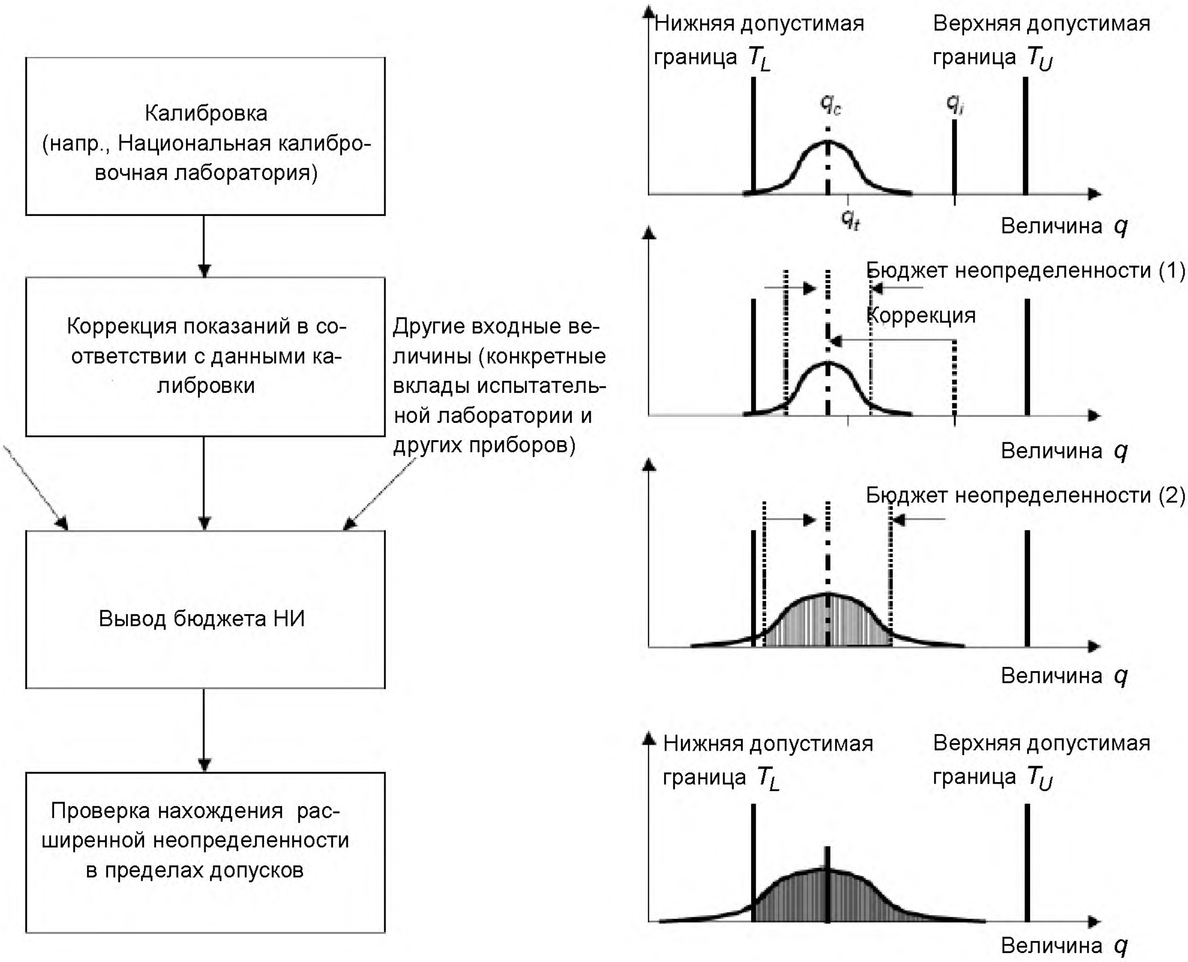
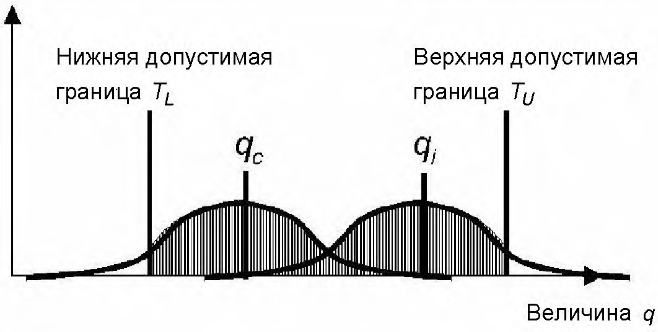
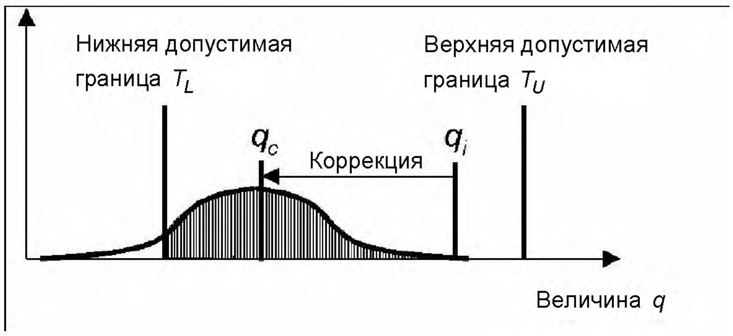
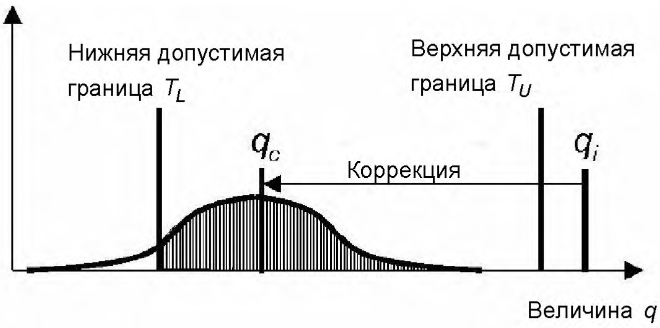
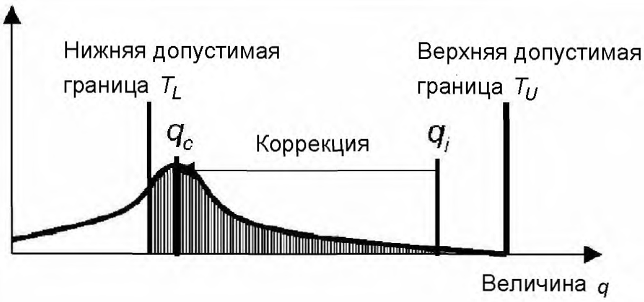
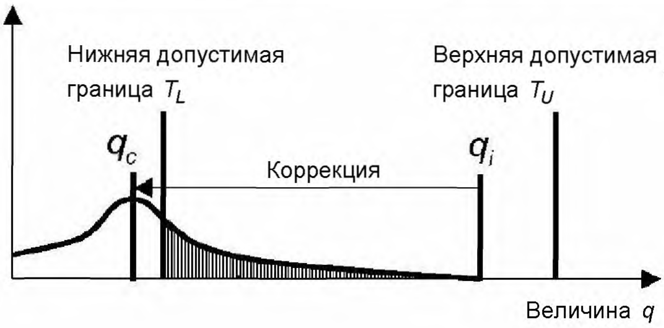


Рисунок 16 – Отношение между бюджетами неопределенности измерений для величины, полученной в испытательной лаборатории, и допустимыми границами для этой величины в применяемом основополагающем стандарте

На рисунке 16 T_L и T_U являются нижним и верхним пределом доверительного интервала соответственно, требуемыми применяемым основополагающим стандартом.

В случае, когда значение, показанное средством измерений, уже находится внутри допускаемой полосы, коррекция не нужна. Рисунок 17 показывает несколько ситуаций, когда и как средство измерений подходит для испытаний или измерений в соответствии с применяемым основополагающим стандартом, устанавливающем допустимые отклонения.

Показание прибора уже находится в допустимой полосе. Коррекция не используется. Прибор может быть применен для испытаний.	
Показание прибора уже находится в допустимой полосе. Коррекция используется для увеличения качества измерений. Прибор может быть применен для испытаний	
Показание прибора находится вне допустимой полосы. Коррекция используется. После коррекции (полученной из результатов калибровки) скорректированное значение находится в пределах допустимой полосы. Прибор может быть применен для испытаний.	

Показание прибора находится внутри или вне допустимой полосы. После коррекции (полученной из результатов калибровки) скорректированное значение находится вне допустимой полосы. Прибор не может быть применен для испытаний.	
Показание прибора измерений находится внутри или вне допустимой полосы. После коррекции скорректированное значение находится внутри допустимой полосы, но в серой зоне (либо $q_c - НИ < T_L$, либо $q_c + НИ > T_U$), т. е. статистически оно не может быть оценено (подтверждено), при нахождении истинного значения внутри или вне допустимой полосы. Прибор может быть применен[1].	
Показание прибора находится внутри или вне допустимой полосы. После коррекции скорректированное значение находится вне допустимой полосы, но в серой зоне (либо $q_c + НИ > T_L$, либо $q_c - НИ < T_U$), т. е. статистически не может быть подтверждено нахождение истинного значения внутри или вне допустимой полосы. Прибор не следует применять[1].	

[1] Данный подход отличается от других подходов, приводимых в литературе, потому что допустимые отклонения, установленные в стандартах, входящих в серию стандартов 61000-4-х, были определены без учета неопределенности.

Рисунок 17 – Ситуации, показывающие, когда и как средство измерений подходит для испытаний или измерений в соответствии с применяемым основополагающим стандартом, устанавливающим допустимые отклонения

7 Документирование вычисления неопределенности измерений

Установление неопределенности измерений в соответствии с настоящим руководством должно быть задокументировано в отчете. Отчет должен включать в себя все элементы, представленные в таблице 1. Отчет должен содержать всю информацию, необходимую для восстановления бюджета неопределенности. В частности, должно быть отражено следующее:

- идентификация измеряемых величин;
- определения влияющих величин применительно к измерительной цепи;
- определение категории для каждой влияющей величины, т. е. тип А или тип В;
- определение применяемой ФПВ, используемой для каждой влияющей величины;
- определение применяемой математической формулы, используемой для каждой ФПВ;
- вычисленная стандартная неопределенность для каждой составляющей;
- коэффициент чувствительность c_i;
- вычисленная общая стандартная неопределенность;
- коэффициент охвата k, обычно $k = 2$ (для 95%-ной доверительной вероятности);
- вычисленная расширенная неопределенность.

Значение неопределенности может быть выражено в децибелах или в процентах. Все значения неопределенности должны быть выражены с не более чем тремя значащими цифрами (например 2,35 дБ или 12,4 %). Примеры бюджетов неопределенности приведены в приложениях А и В. Необходимо заметить, что значение неопределенности не должно равняться нулю, т. е. нулевых значений следует избегать.

П р и м е ч а н и е — Преобразование из децибел в проценты или наоборот может быть вычислено путем преобразования $10^{\frac{(величина\_в\_дБ)}{20}} \times 100$.

Приложение А
(справочное)

Примеры оценки неопределенности измерений при измерении эмиссии

А.1 Обозначения

А.1.1 Общие обозначения

X_i – влияющая величина;

x_i – оценка X_i;

δX_i – поправка для влияющей величины;

$u(x_i)$ – стандартная неопределенность x_i;

c_i – коэффициент чувствительности;

y – результат измерений, (оценка измеряемой величины), скорректированная для всех распознанных значительных систематических эффектов;

$u_c(y)$ – суммарная стандартная неопределенность y;

$U(y)$ – расширенная неопределенность y;

k – коэффициент охвата;

a^+ – верхняя абсцисса ФПВ;

a^- – нижняя абсцисса ФПВ.

А.1.2 Обозначения и определения измеряемых величин в примерах

E – максимальная напряженность электрического поля, дБ (мкВ/м), при горизонтальной и вертикальной поляризациях в заданном диапазоне перемещения по высоте и на заданном горизонтальном удалении от объекта испытаний, который вращается в пределах 360° по азимуту.

А.1.3 Обозначения входных величин, общие для всех измерений помех

a_C – затухание в линии связи между приемником и антенной, дБ;

δM – поправка для погрешности, вызванной рассогласованием, дБ;

V_r – считываемое напряжение приемника, дБ (мкВ);

δV_{SW} – поправка из-за неточности измерения синусоидального напряжения приемником, дБ;

δV_{nf} – поправка из-за влияния шума приемника, дБ.

А.1.4 Обозначения входных величин, введенных для измерений излучаемых помех

G_p – усиление предусилителя;

δG_p – поправка для нестабильности усиления предусилителя;

F_a – антенный фактор, дБ (В/м);

$\delta F_{a\ f}$ – поправка из-за погрешности интерполяции антенного фактора, дБ;

$\delta F_{a\ dir}$ – поправка из-за направленности антенны, дБ;

$\delta F_{a\ ph}$ – поправка из-за расположения фазового центра антенны, дБ;

$\delta F_{a\ cp}$ – поправка из-за кроссполяризации антенны, дБ;

δS_{VSWR} – поправка из-за коэффициента стоячей волны неидеальной площадки, дБ;

δA_{NT} – поправка из-за влияния материала поворотного стола на результаты измерений, дБ;

δd – поправка из-за неточности расстояния до антенны, дБ;

δh – поправка из-за неточности высоты поворотного стола, дБ.

А.2 Пример бюджета неопределенности для измерения излучаемых помех в диапазоне от 1 до 18 ГГц

Измеряемую величину E вычисляют путем использования следующего уравнения модели

$$E = V_r + a_C + G_p + F_a + \delta V_{SW} + \delta V_{nf} + \delta G_p + \delta M + \delta F_{af} + \delta F_{adir} + \delta F_{aph} + \delta F_{acp} + \delta S_{VSWR} + \delta A_{NT} + \delta d + \delta h .$$

Влияющая величина	X_i	Неопределенность, связанная с x_i			$\lvert c_i \rvert \ u(x_i)$[b]
		дБ	ФПВ	Коэффи-циент охвата	дБ
Считывание приемника 1) [a]	V_r	0,1	Нормальная	$k = 1$	0,10
Затухание: антенна-приемник 2)	a_C	0,2	Нормальная	$k = 2$	0,10
Усиление предусилителя 11)	G_p	0,2	Нормальная	$k = 2$	0,10
Антенный фактор 6)	F_a	1,0	Нормальная	$k = 2$	0,50
Коррекции приемника:					
Синусоидальное напряжение 3)	δV_{SW}	1,5	Нормальная	$k = 2$	0,75
Нестабильность усиления предусилителя 11)	δG_p	1,2	Прямоугольная		0,70
Влияние уровня шума, 1–6 ГГц 4)	δV_{nf}	$+0,7/0,0$	Прямоугольная		0,4
Влияние уровня шума, 6–18 ГГц 4)	δV_{nf}	$+0,1/0,0$	Прямоугольная		0,58
Рассогласование: антенна-предусилитель 5)	δM	$+1,3/-1,5$			1,00
Рассогласование: предусилитель-приемник 5)	δM	$+1,2/-1,4$			0,92
Коррекции антенны:					
Частотная интерполяция антенного фактора 7)	$\delta F_{a\ f}$	0,3	Прямоугольная		0,17
Разница направленности 8)	$\delta F_{a\ dir}$	$+3,0/-0,0$	Прямоугольная		0,87
Положение фазового центра 9) на 3 м	$\delta F_{a\ ph}$	0,3	Прямоугольная		0,17
Кроссполяризация 10)	$\delta F_{a\ cp}$	0,9	Прямоугольная		0,52
Коррекция площадки:					
Неидеальность площадки 12)	δS_{VSWR}	3,0	Треугольная		1,22
Влияние материала поворотного стола, 1–6 ГГц 13)	δA_{NT}	1,5	Прямоугольная		0,87
Влияние материала поворотного стола 6–18 ГГц 13)	δA_{NT}	2,0	Прямоугольная		1,15
Расстояние удаленности 14) на 3 м	δd	0,3	Прямоугольная		0,17
Высота стола 15)	δh	0,0	Нормальная	$k = 2$	0,00

Пронумерованные компоненты 1)–5) пояснены в пункте А.3, компоненты 6)–15) — в пункте А.4.
[a] Верхние индексы ссылаются на пронумерованные комментарии в А.1 и А.2.
[b] Все $\lvert c_i \rvert = 1$, см. 5.1 (основные шаги).

Следовательно, расширенная неопределенность будет:

$$U(E) = 2u_C(E) = \begin{cases} 5{,}18 \text{ дБ для } 1-6 \text{ ГГц} \\ 5{,}46 \text{ дБ для } 6-18 \text{ ГГц}. \end{cases}$$

А.3 Обоснование для оценок входных величин, общих для всех измерений помех в таблице А.1 (комментарии 1–5)

Примечания, следующее за комментарием, предназначены для предоставления руководства пользователей этого технического отчета. Следующие примечания применены к входным величинам, указанным с верхним индексом "$^{x)}$" (например $^{1)}$) в пункте А.3 и (например $^{6)}$) в пункте А.4.

1) Считывания приемника будут меняться по причинам, которые включают в себя нестабильность измерительных систем и погрешности интерполяции шкалы измерений.

Оценка V_r — среднее значительного числа считываний, со стандартной неопределенностью, дающейся экспериментальным стандартным отклонением среднего $(k = 1)$.

2) Предполагается, что оценка затухания a_C связи между приемником и антенной будет доступна из отчета о калибровке, вместе с расширенной неопределенностью и коэффициентом охвата.

Примечание — Если оценка затухания a_C получена из данных производителя для проводника или аттенюатора, то может быть принята прямоугольная ФПВ, имеющая полуширину, равную конкретному доверительному интервалу производителя. Если учитывается кабель совместно с аттенюатором с данными производителя для кабеля и аттенюатора, то a_C имеет два компонента, каждый из которых имеет свою прямоугольную ФПВ.

3) Предполагается, что оценка поправки δV_{SW} к погрешности приемника для синусоидального напряжения будет доступна из отчета о калибровке вместе с расширенной неопределенностью и коэффициентом охвата.

Примечание — Если отчет о калибровке указывает только то, что точность приемника синусоидального напряжения находится в пределах доверительного интервала, согласно CISPR 16-1-1 (± 2 дБ), то оценка поправки δV_{SW} должна быть принята равной нулю с прямоугольной ФПВ, имеющей полуширину 2 дБ.

4) Для излучаемых помех шум приемника может влиять на результаты измерения около допуска к излучаемым помехам

Отклонение δV_{nf} оценивают в пределах между нулем и $+0{,}7$ дБ. Несмотря на то что отклонение асимметрично, поправку оценивают в нуль, как если бы отклонение было бы симметрично в окрестности измеренного значения с прямоугольной ФПВ, имеющей полуширину 0,7 дБ. Поправка любого детектора из-за влияния шума будет зависеть от типа сигнала (например, импульсный или немодулированный) и СШО и будет изменять показания уровня шума. Уровень сигнала для СШО выбирают равным норме излучаемой эмиссии, т. к. это критично для установления соответствия. Значение 0,7 дБ взято из рисунка А.1 для $СШО = 20$ дБ. СШО получено для коэффициента шума 6 дБ с использованием выражения

$$E_{NP} = V_{NP} + F_a + a_C = -67 + 10\lg F_N + 10\lg B_N + w_{PN} + F_a + a_C, \tag{A.1}$$

E_{NP} – эквивалентная напряженность поля, соответствующая уровню шума при пиковом детектировании, дБ (мкВ/м);

V_{NP} – уровень шума при пиковом детектировании, дБ (мкВ);

F_a – антенный фактор для частоты приемника, дБ (В/м);

a_C – ослабление соединительного кабеля антенны, дБ;

F_N – коэффициент шума измерительного приемника, т.е. число;

$10\lg F_N$ – коэффициент шума измерительного приемника, дБ;

B_N – ширина шумовой полосы измерительного приемника, Гц;

w_{PN} – весовой коэффициент шума для пикового детектора, дБ;

–67 – абсолютный уровень шума, дБ (мкВ), на 1 Гц ширины полосы, определяемый по формуле $10\lg(kT_0 \times 1 \text{ Гц}/P_{1мкВ})$ (k – постоянная Больцмана, T_0 = 293,15 К, $P_{1мкВ}$ — мощность, вырабатываемая 1 мкВ на нагрузке 50 Ом).

При измерениях излучаемых помех диапазон частот от 1 до 18 ГГц будет разделен на поддиапазоны: от 1 до 6 ГГц (где учитываются нормы эмиссии CISPR 22) и от 6 до 18 ГГц [со средним значением помех 58 дБ (мкВ/м) и пиковым значением 74 дБ (мкВ/м) (взяты из CIS/I/106/CDV в качестве основания для норм эмиссии)].

Коэффициент шума системы $10 \cdot \lg F_N = 6$ дБ предполагается до 6 ГГц. Для диапазона частот свыше 6 ГГц, предполагается, что $10 \lg F_N = 4$ дБ, т.е. предусилитель подсоединен к антенне. Использование данных рисунка А.1 при минимальном значением СШО = 22 дБ ниже 6 ГГц и 19 дБ свыше 6 ГГц, приводит к отклонениям до 0,5 дБ (ниже 6 ГГц) и отклонениям до 0,8 дБ (свыше 6 ГГц).

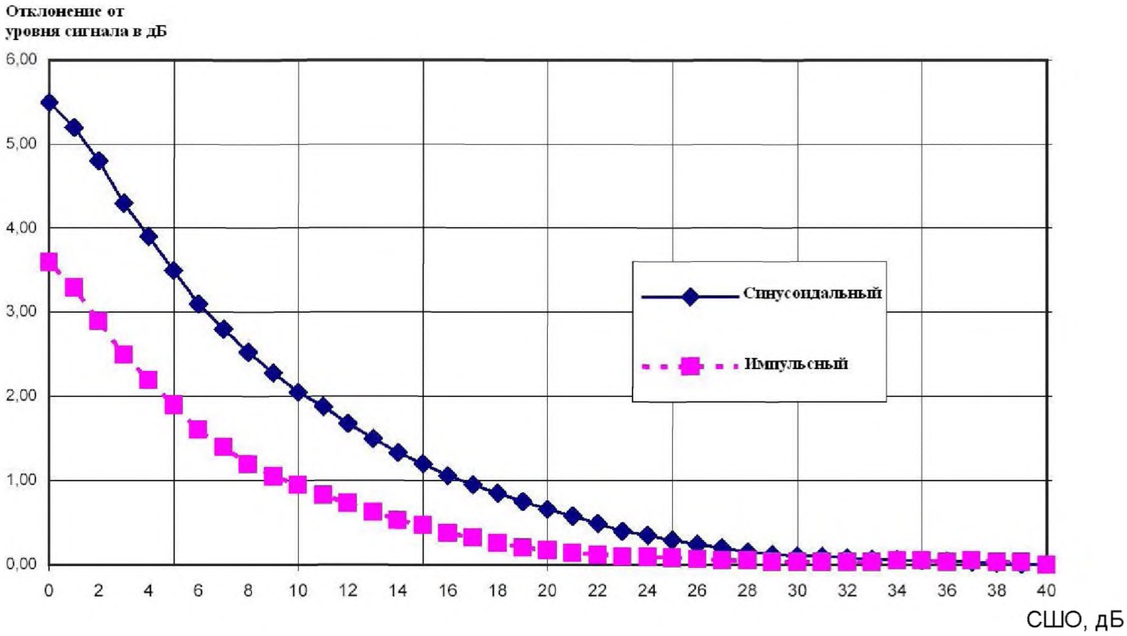
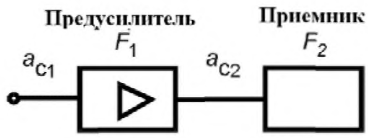


Рисунок А.1 – Отклонение показания пикового детектора от уровня сигнала на входе приемника для двух случаев: синусоидальный сигнал и импульсный сигнал (частота повторения импульсов 100

Примечание — Коэффициент шума системы N_{fsyst} — коэффициент шума системы, состоящей из измерительного приемника, предусилителя и соединительного кабеля (кабелей), которая «видна» из антенного порта. Это определяет шум и СШО для сигнала на предельном уровне. F_1 и F_2 — коэффициенты шума предусилителя и измерительного приемника, a_{C1} и a_{C2} — ослабления, дБ, двух соединяющих проводов. $G_1 = 10\lg(g_1)$ — разность коэффициента предусилителя, дБ и ослабления a_{C2} $\left(G_1 = G_{pr} - A_{C2}\right)$. Коэффициент шума N_{ftot} — коэффициент шума F_{tot}, относящий к входу предусилителя, дБ. Для того чтобы поддерживать низкий шум системы, затухание a_{C1} соединения между антенной и предусилителем должно поддерживаться максимально низким.

$$F_{tot} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{g_1}, \qquad N_{ftot} = 10\lg F_{tot}, \qquad N_{fsyst} = a_{C1} + N_{ftot}.$$



5) Неопределенность рассогласования

Общие положения

В общем случае, приемный порт антенны будет соединен с портом 1 двухпортового устройства, порт 2 которого завершается приемником с коэффициентом отражения Γ_r. Двухпортовое устройство может быть кабелем, аттенюатором, аттенюатором и кабелем вместе или некоторой комбинацией компонентов, которые могут быть выражены своими S-параметрами. Поправка из-за рассогласования тогда будет

$$\delta M = 20\lg\left|(1-\Gamma_e S_{11})(1-\Gamma_r S_{22}) - S_{21}^2\Gamma_e\Gamma_r\right| \qquad (A.2)$$

где Γ_e — коэффициент отражения на выходном порту антенны, когда она установлена для измерений помех. Все параметры учитывают применительно к сопротивлению 50 Ом.

Когда известна только величина или величина экстремумов параметров, невозможно вычислить δM, но ее экстремальное значение $\delta M^{\pm}$ примет вид:

$$\delta M^{\pm} = 20\lg\left[1 \pm \left(|\Gamma_e||S_{11}| + |\Gamma_r||S_{22}| + |\Gamma_e||\Gamma_r||S_{11}||S_{22}| + |\Gamma_e||\Gamma_r||S_{21}|^2\right)\right]. \qquad (A.3)$$

ФПВ δM приблизительно U-образная, с шириной не более чем $\left(\delta M^{+} - \delta M^{-}\right)$ и стандартным отклонением не более полуширины, деленной на $\sqrt{2}$. Хотя U-образная ФПВ асимметрична в логарифмических величинах, поправка остается равной нулю, потому что ожидаемое значение отклонения равно нулю.

Излучаемые помехи

Для измерения излучаемых помех выше 1 ГГц, КСВН антенны принимают $s_{wr} \le 2,0:1$, подразумевающий $|\Gamma_e| \le 0,33$. Также принимают, что для присоединения к приемнику используется хорошо согласованный кабель $\left(|S_{11}| << 1,\ |S_{22}| << 1\right)$ с минимумом ослабления 1 дБ на 1 ГГц $\left(|S_{21}| \approx 0,9\right)$, а ослабление приемника равно 0 дБ, при котором в соответствии с CISPR 16-1-1 КСВН $s_{wr} \le 3,0:1$ обеспечивает $|\Gamma_r| \le 0,5$.

Если использован внешний по отношению к приемнику предусилитель, то неопределенность из-за рассогласования следует учитывать дважды, т. е. между портом антенны и входным портом предусилителя и между выходным портом предусилителя и входным портом приемника. Для предусилителя принимают, что входной и выходной КСВН $s_{wr} \le 2,0:1$. Использование внешнего предусилителя учитывают для диапазона частот выше 1 ГГц.

Оценка поправки δM равна 0 с U-образной ФПВ с шириной, равной разности $\left(\delta M^{+} - \delta M^{-}\right)$.

П р и м е ч а н и е 1 — Выражения для δM^{+} и δM^{-} показывают, что поправка из-за рассогласования может быть уменьшена при увеличении ослабления хорошо подобранной двухпортовой цепи, предшествующей приемнику. Недостатком является снижение чувствительности измерений.

П р и м е ч а н и е 2 — Для некоторых антенн при некоторых частотах s_{wr} может быть намного больше, чем 2,0:1.

П р и м е ч а н и е 3 — Меры предосторожности могут быть необходимы для того, чтобы убедиться, что сопротивление, которое «видит» приемник, соответствует требованиям CISPR 16-1-4 $s_{wr} \le 2,0:1$ при использовании сложной антенны.

П р и м е ч а н и е 4 — Если эквивалент сети или поглощающие клещи откалиброваны на выходном порту аттенюатора, подключенного непосредственно к ним, то влияние полного сопротивления испытуемого оборудования на поправку из-за рассогласования будет уменьшено при возрастании затухания аттенюатора в соответствии с выражением

$$|\Gamma_e| \le |\Gamma_a| + 0,5 \times 10^{a/20},$$

где Γ_e — коэффициент отражения;

а — затухание аттенюатора, дБ.

П р и м е ч а н и е 5 — Дополнительно соображения по поводу уравнения (А.3):

a) при несуществующей или слишком слабой корреляции слагаемых линейное суммирование может быть заменено корнем квадратным из суммы квадратов;

b) из-за обычно малой величины слагаемых применимо дальнейшее приближение (где δM — стандартное отклонение нормальной ФПВ, дБ), приводящее окончательно к виду

$$\delta M \approx 6,14\sqrt{\left(|\Gamma_e||S_{11}|\right)^2 + \left(|\Gamma_r||S_{22}|\right)^2 + \left(|\Gamma_e||\Gamma_r||S_{21}|^2\right)^2}.$$

А.4 Обоснование для оценки влияющих конкретных величин для метода измерения излучаемых помех в диапазоне от 1 до 18 ГГц (комментарии с 6) по 15))

6) Принимают, что оценка антенного фактора для свободного пространства F_a доступна в отчетах о калибровке вместе с расширенной неопределенностью и коэффициентом охвата.

7) При вычислении антенного фактора путем интерполяции между частотами, на которых имеются доступные данные, неопределенность связана с тем, что антенный фактор зависит от интервала частот между точками калибровки и изменением антенного фактора с частотой. Графическое построение зависимости калиброванного антенного фактора от частоты помогает визуализировать ситуацию.

Оценка поправки $\delta F_{a\ f}$ из-за интерполяции антенного фактора равна нулю с прямоугольной ФПВ, имеющей полуширину 0,3 дБ.

Примечание 1 — Для любой частоты, для которой имеется калибровочный коэффициент антенны, коррекция не обязательно должна быть рассмотрена.

8) Направленность приемной антенны определяет значение величины w уравнения (9) CISPR 16-2-3:2010, которое используют для рассуждения о необходимости сканировании высоты антенны. Значение w вычисляют на основе предположения об истинности критерия дальней зоны. На малых измерительных расстояниях измерения оказываются в зоне Френеля, а не в дальней зоне. Фактическое значение w как меры образа приемной антенны — отличие от значения, полученного с помощью уравнения (9).

Влияние свойств приемной антенны на неопределенность также зависит от частоты, размера объекта испытаний и измерительного расстояния. Результирующее значение неопределенности не является простым.

На высоких частотах некоторые приемные антенны имеют несколько лепестков вместо одного главного лепестка. Это может стать причиной появления дополнительной инструментальной неопределенности, которая не рассматривается в настоящем стандарте.

Оценка поправки δF_{adir} составляет +1 дБ (т. е. принимают, что эта поправка будет применена) с прямоугольной ФПВ, имеющей полуширину в 1,5 дБ, принимая, что размеры объекта испытаний больше, чем часть раскрыва излучающей антенны w .

Примечание 2 — Для измерения излучаемых помех в БЭК выше 1 ГГц, номинальное измерительное расстояние равно 3 м (см. CISPR 16-2-3). Если используется другая дистанция, например 1 м, то будет применено преобразование результатов для 1 м в результаты излучений, применяемых для первичного измерительного расстояния 3 м. На практике такие преобразования часто проводят, полагая, что излучения от объекта испытаний на конкретном измерительном расстоянии могут быть преобразованы в другое расстояние применением равенства свободного пространства (20 дБ/декада или зависимость $1/r$). Однако точное преобразование очень сильно зависит от типа объекта испытаний, используемого измерительного расстояния и частоты. Измерения выше 1 ГГц проводят в зоне Френеля и упрощенное правило преобразования свободного пространства не используют. Тем не менее CISPR 16-2-3 рекомендует использовать правило преобразования свободного пространства. Это может внести значительные неопределенности из-за преобразования измерительного расстояния, которые должны быть тщательно проанализированы.

9) Изменение положения фазового центра с частотой для логопериодической или двойной ребристой рупорной антенны вызывает отклонения от требуемого удаления. Принимают, что расстояние от антенны до объекта испытаний измеряют от средней точки антенны, что приводит к поправке, равной нулю.

Для логопериодической или двойной ребристой рупорной антенны оценка поправки δF_{aph} равна нулю и имеет прямоугольную ФПВ с полушириной, оцененной с учетом влияния погрешности ±0,1 м в местоположении, принимая, что напряженность поля обратно пропорциональна расстоянию..

10) Считается, что кроссполяризационная составляющая для рупорной антенны незначительна. Оценка коррекции $\delta F_{a\ cp}$ для кроссполяризационной составляющей логопериодической антенны равна нулю с прямоугольной ФПВ, имеющей полуширину 0,9 дБ, соответствующую уровню кроссполяризованной компоненты минус 20 дБ согласно CISPR 16-1-4.

11) Калиброванные предусилители используют либо перед измерительным приемником, либо встраиваются в измерительный приемник, но вариации усиления внешнего предусилителя не учитываются при калибровке. Принимают, что оценка коэффициента предусилителя G_p доступна в отчете о калибровке вместе с расширенной неопределенностью и коэффициентом охвата. Любые отклонения усиления (нестабильности из-за изменений температуры и ухудшения состояния) с изменением частоты должны быть приняты во внимание как дополнительная неопределенность, особенно для внешних усилителей. Оценка поправки δG_p для усиления равна нулю с прямоугольной ФПВ, имеющей полуширину 0,7 дБ.

12) Измеряемый КСВН площадки дает показатели влияния неидеальности площадки на измерения помех. Допустимое отклонения для КСВН площадки по CISPR 16-1-4, равно 6 дБ.

Предлагают два метода вывода неопределенности измерений, связанной с БЭК, соответствие которой было подтверждено с использованием метода измерений S_{VSWR} в соответствии с CISPR 16-1-4 по результатам измерений S_{VSWR}.

Метод 1

Поверхность, которая удовлетворяет допуску 6 дБ по S_{VSWR}, не будет вызывать погрешности измерений излучаемых помех более 6 дБ. Полезное сравнение между S_{VSWR} и отклонением из-за потерь передачи для площадки 3 м приведено в документе CISPR/A/838/INF. В этом документе максимуму S_{VSWR} 6 дБ грубо соответствует максимум отклонения 4 дБ от потерь передачи. Принимая, что потери передачи имеют ФПВ Гаусса и значение 4 дБ не превышается во всем диапазоне частот, значение 4 дБ считают соответствующим расширенной неопределенности при коэффициенте охвата $k = 3$ (что соответствует очень высокому доверительному уровню), т. е. стандартная неопределенность равна 1,33 дБ.

Оценка поправки δS_{VSWR} равна нулю со стандартной ФПВ, имеющей полуширину 4 дБ и коэффициент охвата $k = 3$.

Метод 2

Измеряемое значение S_{VSWR} делят на 2 , чтобы прийти к отклонению δS_{VSWR} из-за неидеальной поверхности. В случае треугольной ФПВ может быть принято во внимание, что S_{VSWR} — максимум из 15 (или 20) результатов сравнительного измерения. Для S_{VSWR} = 6 дБ треугольная ФПВ приведет к стандартной неопределенности 1,22. Также оценка поправки в этом случае равна нулю.

Примечание 3 — Если для метода 1 измеряемая величина S_{VSWR} меньше 6 дБ, оценка коррекции δS_{VSWR} может быть принята равной нулю со стандартной ФПВ, имеющей полуширину $4(S_{VSWR}/6)$ дБ и коэффициентом охвата $k = 3$. Если для метода 2 измеряемая величина S_{VSWR} меньше 6 дБ, оценка коррекции δS_{VSWR} может быть принята равной нулю. Измеряемую величину S_{VSWR} делят на 2, чтобы прийти к δS_{VSWR}. При использовании треугольной ФПВ, результирующая неопределенность будет равна $c_i \times u(x_i) = S_{VSWR}/2\sqrt{6}$.

13) CISPR 16-1-4 описывает метод для оценки влияния материала стола ниже 1 ГГц. Метод для диапазона частот выше 1 ГГц находится в стадии разработки. Эффект может привести к значительной неопределенности. Предполагают, что ориентировочное значение составляет 1 дБ с прямоугольной ФПВ.

14) Погрешность в удаленности возникает в результате погрешности при определении периметра объекта испытаний и измерения расстояния. Оценка коррекции δd для поправки из-за удаленности равна нулю с прямоугольной ФПВ, имеющей полуширину оцененную из принятия максимальной погрешности разделения $\pm 0{,}1$ м и того, что напряженность поля обратно пропорциональна расстоянию в пределах этого диапазона расстояний.

15) Измерения напряженности поля выше 1 ГГц проводят в квазисвободном пространстве. Номинальная высота стола не определена. Поэтому не может быть дано никакой неопределенности для эффекта изменения высоты стола.

Приложение B
(справочное)

Пример оценки неопределенности измерений при установке уровня испытания на помехоустойчивость

B.1 Общие обозначения

X_i – влияющая величина;

x_i – оценка X_i;

δX_i – поправка для влияющей величины;

$u(x_i)$ – стандартная неопределенность x_i;

c_i – коэффициент чувствительности;

y – результат измерений (оценка измеряемой величины), скорректированы для всех распознанных значительных систематических эффектов;

$u_C(y)$ – суммарная стандартная неопределенность y;

$U(y)$ – расширенная неопределенность;

k – коэффициент охвата;

a^+ – верхняя абсцисса ФПВ;

a^- – нижняя абсцисса ФПВ.

B.2 Обозначения и определения измеряемой величины

E – напряженность электрического поля, дБ (В/м), при горизонтальной и вертикальной поляризациях в точке плоскости однородного поля на конкретной частоте в интервале от 80 до 1000 МГц

Уровень испытания при воздействии электрического поля — поле, создаваемое в отсутствии испытуемого оборудования и без сигнала обратной связи от измерителя поля к контроллеру (регулятору) (в измерительной установке, которая изображена на рисунке 7 IEC 61000-4-3:2006). Принимают, что оборудование, которое используют в процессе калибровки, также используют для генерации уровня испытания электрического поля (за исключением датчика поля). Установка частоты и амплитуды генератора те же, что и установленные в процессе калибровки. По существу неопределенностью уровня испытания при воздействии электрического поля является неопределенность уровня поля, генерируемого в процессе калибровки, увеличенная из-за нестабильности системы генерации поля и неповторяемости настройки.

B.3 Обозначения входных величин

E_m – показание датчика поля, непосредственное или преобразованное в дБ (В/м);

CF – коэффициент калибровки датчика поля;

δLin – поправка из-за нелинейности датчика поля;

δIso – поправка из-за отклонения датчика поля, обусловленного изотропией;

δInt – поправка из-за частотной интерполяции частот коэффициентов калибровки датчика поля;

δUni – поправка из-за неоднородности поля по плоскости однородного поля;

δHar – поправка из-за гармоник поля;

$\delta \mathrm{Re}s$ – поправка из-за ограниченного амплитудного разрешения контура управления с обратной связью.

B.4 Пример бюджета неопределенности для высокочастотных испытаний на устойчивость к излучениям от 80 МГц до 1 ГГц

Измеряемая величина — испытательный уровень электрического поля E, вычисляемый при использовании:

$$E = E_m + CF + \delta Lin + \delta Iso + \delta Int + \delta Uni + \delta Har + \delta \mathrm{Re}s.$$

Т а б л и ц а В.1 – Бюджет неопределенности для испытаний на устойчивость к излучениям (80 МГц – 1000 МГц)

Источник неопределенности	X_i	Неопределенность x_i		c_i	$u(x_i)$, дБ
		Значе-ние, дБ	ФПВ		
Показание датчика поля [1)]	E_m	0,8	Нормальная $k=1$	1	0,80
Коэффициент калибровки датчика поля [2)]	CF	1,7	Нормальная $k=2$	1	0,85
Коррекции датчика поля:					
Нелинейность [3)]	δLin	0.5	Прямоугольная	1	0,29
Изотропия [4)]	δIso	0,5	Прямоугольная	1	0,29
Интерполяция частот [5)]	δInt	0,5	Прямоугольная		
Неоднородность поля внутри плокости однородного поля UFA [6)]	δUni	1,5	Нормальная $k=1$	1	1,5
Присутствие гармоник [7)]	δHar	0,5	Прямоугольная		0,29
Амплитудное разрешение контура с обратной связью [8)]	δRes	0,3	Прямоугольная		0,17
			$\sum u(x_i)^2$		3,98
			$u_c(y)=\sqrt{\sum u(x_i)^2}$		1,99
			Расширенная вероятность $U(y)$ $(k=2)$		3,99
Пронумерованные компоненты 1)–8) пояснены в В.3.					

В.5 Обоснование для оценок входных величин

1) Неопределенность показаний включает в себя:

а) Нестабильность генератора, усилителя мощности, датчика поля и измерителя мощности (тип А) и порождаемая ими неповторяемость.

b) Связи (тип А).

c) Удаления и изменения положения передающей антенны, датчика поля и поглощающего материала (тип А).

Она может быть оценена как объединенная стандартная неопределенность вкладов а), b) и с).

2) Неопределенность коэффициента калибровки зонда поля (сенсор поля плюс измеритель поля) обусловлена неточностью калибровки. Это вклад типа В, определенный в сертификате калибровки зонда поля как расширенная неопределенность с коэффициентов охвата $k=2$, соответствующая вероятности покрытия 95 % (нормальная ФПВ).

3) Линейность датчика поля определена производителем датчика. Это вклад типа В, имеющий прямоугольную ФПВ. Ожидаемое значение поправки равно нулю.

4) Отклонение изотропии определяется производителем датчика поля. Это вклад типа В, имеющий прямоугольную ФПВ. Ожидаемое значение поправки равно нулю.

5) Коэффициент калибровки датчика поля известен в пределах ограничений точности калибровки на частотах калибровки. Предполагается, что на любой частоте из промежутка калибровочных частот коэффициент калибровки может достигать любого значения из тех, которые указаны в документах калибровки и соответствует калибровочным частотам. Это вклад типа В, имеющий прямоугольную ФПВ. Максимум отклонения между смеж-

ными коэффициентами калибровки может быть отнесен к ширине прямоугольной ФПВ. Ожидаемое значение поправки равно нулю.

6) Поле вне плоскости однородного поля неоднородно. Отчасти это связано с характером передающей антенны и неидеальным поведением БЭК. Среднеквадратичное отклонение поля в каждой точке от среднего поля в пределах плоскости однородного поля есть мера неоднородности поля. Это вклад типа А, оцениваемый как стандартное отклонение поля на 16 точках плоскости однородного поля. Поле преобразуется в дБ (В/м) до вычисления стандартного отклонения. Худшее значение в диапазоне частот от 80 до 1000 МГц может быть отнесено к стандартному отклонению. Ожидаемое значение этой поправки равно нулю.

7) Измеритель поля реагирует на среднеквадратичное значение поля, полученное наложением поля на основной частоте и на ее гармониках. Предполагается, что одна гармоника электрического поля имеет амплитуду по крайней мере на 6 дБ ниже, чем фундаментальная. Это приводит к максимальной погрешности около 1 дБ. Это вклад типа В и предполагается, что ФПВ погрешности — прямоугольная. Ожидаемое значение этой коррекции равно минус 0,5 дБ.

8) Этот вклад неопределенности появляется из-за дискретного размера шага высокочастотного генератора сигнала и оборудования, контролирующего контур управления с обратной связью в течение процесса установки уровня испытания. Это вклад типа В, имеющий прямоугольную ФПВ. Ожидаемое значение этой поправки равно нулю.

Примечание — Показание датчика поля корректируются на минус 0,5 дБ из-за вышеизложенного пункта 7).

Библиография

Публикации IEC

IEC 60050-101:2001	International Electrotechnical Vocabulary — Part 101: Mathematics (Международный электротехнический словарь. Часть 101. Математика)
IEC 60050-300:2001	International Electrotechnical Vocabulary — Electrical and electronic measurements and measuring instruments — Part 312: General terms relating to electrical measurements — Part 313: Types of electrical measuring instruments — Part 314: Specific terms according to the type of instrument (Международный электротехнический словарь. Электрические и электронные измерения и измерительные приборы. Часть 312. Общие термины, относящиеся к электрическим измерениям. Часть 313. Типы электроизмерительных приборов. Часть 314. Характерные определения в зависимости от типа прибора)
IEC 60050-393:2003	International Electrotechnical Vocabulary — Part 393: Nuclear instrumentation — Physical phenomena and basic concepts (Международный электротехнический словарь. Часть 393. Ядерные приборы. Физические явления и основные понятия)
IEC 60050-394:2007	International Electrotechnical Vocabulary — Part 394: Nuclear instrumentation — Instruments, systems, equipment and detectors Международный электротехнический словарь. Часть 394. Ядерные приборы. Приборы, системы, оборудование и детекторы)
IEC 60390:2001	Electrical and Electronic measurement equipment — Expression of performance Электрическое и электронное измерительное оборудование. Выражение производительности)
IEC 61000-4 (all parts)	Electromagnetic compatibility (EMC) [Электромагнитная совместимость (ЭМС)]
IEC 61000-4-3:2006	Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-3: Testing and measurement techniques — Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test Amendment 1:2007 Amendment 2:2010 [Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-3. Методы испытаний и измерений. Испытания на устойчивость к излученному радиочастотному электромагнитному полю. Изменение 1:2007, Изменение 2:2010]
CISPR 16 (all parts)	Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods (Технические требования к аппаратуре для измерения радиопомех и помехоустойчивости и методы измерения)
CISPR 16-1-4:2010	Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus — Antennas and test sites for radiated disturbance measurements (Технические требования к аппаратуре для измерения радиопомех и помехоустойчивости и методы измерения. Часть 1-4. Аппаратура для измерения радиопомех и помехоустойчивости. Антенны и испытательные площадки для измерений излучаемых помех)

CISPR 16-2-3:2010	Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 2-3: Methods of measurement of disturbances and immunity — Radiated disturbance measurements Amendment 1:2010 (Технические требования к аппаратуре для измерения радиопомех и помехоустойчивости и методы измерения. Часть 2-3. Методы измерения помех и помехоустойчивости. Измерения излучаемых помех. Поправка 1:2010)
CISPR/TR 16-4-1	Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-1: Uncertainties, statistics and limit modeling — Uncertainties in standardized EMC tests (Технические требования к аппаратуре для измерения радиопомех и помехоустойчивости и методы измерения. Часть 4-1. Методы измерения помех и помехоустойчивости. Часть 4-1. Неопределенности, статистики и моделирование норм. Неопределенности в стандартизованных испытаниях ЭМС)
CISPR 22:2008	Information technology equipment — Radio disturbance characteristics — Limits and methods of measurement (Оборудование информационных технологий. Характеристики радиопомех. Нормы и методы измерений)
ISO/IEC Guide 98-3/Suppl.1:2008 (JCGM 101:2008)	Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) — Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method Technical Corrigendum 1:2009 [Неопределенность измерений — Часть 3: Руководство по выражению неопределенности измерений (GUM: 1995). Дополнение 1. Распространение распределения с использованием метода Монте-Карло. Техническая поправка 1:2009]
ISO/IEC Guide 99:2007	International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) (Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины)

Другие публикации

European Telecommunications Standards Institute (ETSI)	Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM): Uncertainties in the measurement of mobile radio equipment characteristics — Part 1, Technical Report TR 100 028-1, Dec.2001 (Электромагнитная совместимость и радиочастотный спектр. Неопределенность в измерении характеристик мобильного радиооборудования. Часть 1. Технический отчет TR 100 028-1, декабрь 2001)
European Telecommunications Standards Institute (ETSI)	Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM): Uncertainties in the measurement of mobile radio equipment characteristics — Part 2, Technical Report TR 100 028-2, Dec.2001 (Электромагнитная совместимость и радиочастотный спектр. Неопределенность в измерении характеристик мобильного радиооборудования. Часть 2. Технический отчет TR 100 028-2, декабрь 2001)
European Accreditation (EA): EA-4/02: M3003	Expression of the uncertainty of measurement in calibration, Dec. 1999 (Выражение неопределенности измерений при калибровке, декабрь 1999)
UK Accreditation Service (UKAS): M3003	The expression of uncertainty and confidence in measurement, 2nd ed. 2007 (Выражение неопределенности и достоверности измерений, 2-е изд. 2007)

M. Kendall and A. Stuart	The advanced theory of Statistics. 4th ed. Vol. 1, Charles Griffin, London, 1997. (Продвинутая теория статистик. 4-е изд. Том 1, Чарльз Гриффин, Лондон, 1997 год)
I.A. Harris and F.L. Warner	Re-examination of mismatch uncertainty when measuring microwave power and attenuation, IEE Proc., Vol. 128, Pt. H., No.1 Feb. 1981 (Пересмотр несоответствия неопределенности при измерении мощности СВЧ и затухания, ИИЭ Proc., Vol. 128, Pt. H., № 1 Февраль 1981]
D. Carpenter	A demystification of the U-shaped probability distribution, Proc. IEEE International Symposium on EMC, Boston, USA 2003 (Демистификация U-образного распределения вероятности, ИИЭЭ, Международный симпозиум по электромагнитной совместимости, Бостон, США 2003)
D. Carpenter	A further demystification of the U-shaped probability distribution, Proc. IEEE International Symposium on EMC, Chicago, USA 2005 (Дальнейшая демистификация U-образного распределения вероятности, ИИЭЭ. Международный симпозиум по электромагнитной совместимости, Бостон, США 2003]

Ссылки

[1] C.F.M. Carrobi, ‘The GUM Supplement I and the uncertainty evaluations of EMC measurements’, IEEE-EMC Newsletter, Issue 225, Spring 2010, pp. 53-57

(Дополнение 1 GUM и оценивания неопределенности измерений ЭМС)

[2] UK Accreditation Service (UKAS): LAB 34, Edition 1, Aug. 2002

(Служба аккредитации Великобритании. LAB 34)

[3] L.R. Arnaut, ‘Measurement uncertainty in reverberation chambers — I. Sample statistics’, Report TQE 2, Ed, 2.0, National Physical Laboratory, Teddington, U.K., Dec. 2008. [http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/TQE2.pdf]

(Неопределенность измерения в реверберационных камерах. 1. Статистики выборки)

[4] H. Cramer, Mathematical Methods of Statistics. Princeton University Press, Princeton, 1946

(Математические методы статистики)

[5] L.R. Arnaut, ‘Time-domain measurement and analysis of mechanical step transitions in mode-tuned reverberation chambers’, NPL Report DEM-EM-012, October 2006

(Измерение и анализ во временной области механических шаговых переходов в реверберационных камерах с настройкой моды)

[6] T.T. Soong, ‘Probabilistic Modelling and Analysis in Science and Engineering’, Wiley, 1981

(Вероятностное моделирование и анализ в науке и инженерной деятельности)

[7] J.R. Taylor, An Introduction to Error Analysis, 2nd edition, University Science Books, Sausalito (CA), 1997

(Введение в анализ ошибок)

[8] L.R. Arnaut, ‘Sampling distributions of random electromagnetic fields in mesoscopic or dynamical systems’/ Phys. Rev. E, vol. 80, no. 3, 036601, 2009.

(Распределения выборок случайных электромагнитных полей в мезоскопических или динамических системах)

[9] C.F.M. Carobbi, ‘The use of logarithmic units in the uncertainty evaluations of EMC measurements’, IEEE-EMC Newsletter, Issue 224, Winter 2010, pp, 46-50

(Использование логарифмических единиц при оценивании неопределенности в измерениях ЭМС)

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии межгосударственных стандартов ссылочным международным стандартам

Таблица ДА. 1

Обозначение и наименование международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование межгосударственного стандарта
IEC 60050-161: 1990 Международный электротехнический словарь. Глава 161. Электромагнитная совместимость	–	ГОСТ 30372–95 Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения
IEC 60050-161:1990 Международный электротехнический словарь. Глава 161. Электромагнитная совмес-тимость	–	ГОСТ 30372—95[1] Совместимость техничес- ких средств электромагнитная. Термины и определения
CISPR 16-1-1:2010 Требования к аппаратуре для измерения радио-помех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1-1. Аппаратура для измерения параметров радиопомех и помехоустойчивости. Измеритель-ная аппаратура	–	ГОСТ 30805.16.1.1—2013 Требования к аппаратуре для измерения параметров индустриальных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1-1. Аппаратура для измерения параметров индустриальных радиопомех и помехоустойчивости. Приборы для измерения индустриальных радиопомех (CISPR 16-1-1:2006, MOD)
CISPR 16-4-2:2011 Требования к аппаратуре для измерения радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 4-2. Неопределенности, статистика и моделирование норм. Инструментальная неопределенность измерений	IDT	ГОСТ CISPR 16-4-2—2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров индустриальных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 4-2. Неопределенности, статистика и моделирование норм. Неопределенность измерений, вызываемая измерительной аппаратурой (CISPR 16-4-2:2011, IDT)
ISO/IEC Guide 98-3:2008 Неопределенность измерений. Часть 3: Руководство по выражению неопределенности измерений	–	*

*Соответствующий межгосударственный стандарт отсутствует. До его утверждения рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного документа.

Примечание — В настоящей таблице использовано следующие условные обозначения степени соответствия стандартов:
- IDT – идентичные стандарты;
- MOD – модифицированные стандарты.

[1] На территории Российской Федерации действует ГОСТ Р 50397—-2011.

УДК 621.396/.397.001.4:006.354 МКС 33.100 IDT

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, измерения в области электромагнитной совместимости, точность измерений, неопределенность измерений, оценка неопределенности измерений

Подписано в печать 24.03.2015. Формат 60x84⅛.
Усл. печ. л. 8,37. Тираж 32 экз. Зак. 1360

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»,
123995 Москва, Гранатный пер., 4.
www.gostinfo.ru info@gostinfo.ru