



РЧ-ТЕСТ, ПОВЕРКА И ЭМС: НОРМАТИВНЫЙ РАЗРЫВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

*Красик Татьяна Яковлевна,
Инженер по РЧ-испытаниям, Израиль*

E-mail: tatyanakrasik12@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается системный разрыв между нормативными требованиями метрологии и электромагнитной совместимости (ЭМС) применительно к испытаниям и поверке измерительных систем, используемых при разработке и сертификации беспроводного оборудования. Анализируются узлы таких систем, наиболее уязвимые к радиочастотным (РЧ) воздействиям, и механизмы влияния РЧ-помех на метрологические характеристики; поверочная схема рассматривается как электромагнитная задача. Разрыв показан как свойство нормативной системы, а не как дефект какой-либо отдельной методики: класс методик поверки, по которым работают аккредитованные лаборатории, полностью соответствует метрологической нормативной базе; разрыв не обнаруживается изнутри каждой из нормативных рамок по отдельности и становится видимым только на их пересечении. Выводы опираются на двойную позицию автора: разработку методик поверки многоканальных прецизионных измерительных систем и работу в аккредитованной РЧ/ЭМС-лаборатории, включая измерения миллиметрового диапазона. Предложены расчётные методы и направления сближения двух нормативных систем.

Ключевые слова: РЧ-испытания, беспроводное оборудование, поверка средств измерений, электромагнитная совместимость, миллиметровый диапазон, неопределённость измерений, CMRR, джиттер АЦП, аккредитованная лаборатория.

1. Введение

Современные многоканальные измерительные установки представляют собой сложные программно-аппаратные комплексы, включающие высокоскоростные аналого-цифровые преобразователи, прецизионные источники опорного напряжения, дифференциальные измерительные каналы милливольтного уровня, интерфейсы передачи данных и разнотипные датчиковые входы. Метрологическое обеспечение таких систем требует разработки детальных методик поверки, регламентирующих условия, средства и процедуры подтверждения соответствия нормированным характеристикам.

Действующая нормативная база в области метрологии традиционно определяет условия поверки через ограниченный набор физических параметров окружающей среды: температуру, относительную влажность и атмосферное давление [1]. Этот подход, сложившийся в эпоху преимущественно аналоговых и низкочастотных средств измерений, не учитывает электромагнитную обстановку в зоне поверки как самостоятельный влияющий фактор.

Между тем высокоскоростные цифровые интерфейсы, входящие в состав современных измерительных установок, являются одновременно источниками электромагнитных помех и объектами воздействия внешнего радиочастотного (РЧ) излучения. Вопросы электромагнитной совместимости (ЭМС) решаются в рамках отдельной нормативной базы (стандарты серий IEC 61000 и CISPR [4, 5, 6, 7]), ориентированной на обеспечение функциональной устойчивости оборудования в условиях эксплуатации, но не интегрированной с метрологическими процедурами подтверждения характеристик точности.

Настоящая статья опирается на двойную позицию автора в области РЧ-испытаний и метрологического обеспечения измерительных систем для беспроводной техники. С одной стороны, это разработка методик поверки многоканальных прецизионных измерительных систем: высокоскоростных АЦП, дифференциальных каналов милливольтного уровня, фазоизмерительных и датчиковых трактов. С другой стороны, это работа в аккредитованной РЧ/ЭМС-лаборатории, выполняющей сертификационные измерения беспроводного оборудования, включая миллиметровый диапазон. Класс методик поверки, с которыми работает автор и которые применяют аккредитованные лаборатории, полностью соответствует действующей метрологической нормативной базе [1]; разрыв не является дефектом какой-либо отдельной методики и не может быть устранён в её рамках, поскольку электромагнитная обстановка отсутствует в метрологическом нормативном фреймворке как класс влияющих величин. Он наблюдаем только с позиции, совмещающей обе нормативные рамки. В задачах беспроводной техники он выражен острее всего в миллиметровых полосах, где основной инструмент нормирования устойчивости к излучаемому полю, IEC 61000-4-3 [4], заканчивается на 6 ГГц. Статья преследует три цели: показать, что разрыв носит системный, а не частный характер; разобрать, какие узлы измерительных систем уязвимы и через какие физические механизмы; наметить пути сближения двух нормативных систем.

2. Нормативный разрыв между метрологией и ЭМС

2.1. Условия поверки в действующих методических документах

Типовые условия поверки для прецизионных многоканальных измерительных установок устанавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ 8.395 [1] и включают нормирование температуры (20 ± 5)°С, относительной влажности от 30 до 80%, атмосферного давления от 84 до 106 кПа. Никаких требований к электромагнитной обстановке в зоне поверки действующие методики не содержат.

Применительно к оборудованию с высокоскоростными АЦП (частоты дискретизации от единиц до сотен МГц), прецизионными дифференциальными

каналами (уровни сигналов единицы–десятки мВ) и фазоизмерительными трактами (погрешность 0,1–0,2°) этот перечень представляется недостаточным. Документы IЛАС-G8 [2] упоминают электромагнитную обстановку как возможный источник неопределённости, однако не устанавливают методологии её количественной оценки применительно к РЧ-воздействиям.

2.2. Система стандартов ЭМС и её границы

Стандарты устойчивости для измерительного оборудования (IEC 61326-1 [7], EN 55035) устанавливают уровни РЧ-воздействий и критерии качества функционирования, сформулированные в терминах работоспособности, а не метрологической точности. Оборудование признаётся устойчивым, если оно продолжает работать в соответствии со спецификацией производителя, которая, как правило, задана со значительным запасом по отношению к нормированным погрешностям поверки.

Образуется зона, не охваченная ни одной из систем: влияние реальной РЧ-обстановки на метрологические характеристики непосредственно при поверке. Её анализ составляет предмет настоящей работы.

Таблица 1

Нормативное покрытие условий поверки: метрология и ЭМС

Параметр среды	Методика поверки (ГОСТ)	ЭМС-стандарты	Статус
Температура окружающей среды	Нормируется (20±5°С)	Нормируется	✓ Покрыто
Относительная влажность	Нормируется (30–80%)	Нормируется	✓ Покрыто
Атмосферное давление	Нормируется (84–106 кПа)	Нормируется	✓ Покрыто
Фоновое РЧ-излучение в зоне поверки	Не нормируется	CISPR 11/32	✗ Разрыв
Кондуктивные РЧ-помехи	Не нормируется	IEC 61000-4-6	✗ Разрыв
Электростатические разряды	Не нормируется	IEC 61000-4-2	✗ Разрыв
Магнитное поле (50 Гц)	Не нормируется	IEC 61000-4-8	✗ Разрыв
РЧ → точность при поверке	Не нормируется	Не нормируется	✗ Не покрыто нигде

3. РЧ-уязвимые узлы прецизионных измерительных установок

3.1. Высокоскоростные аналого-цифровые преобразователи

Современные измерительные установки включают АЦП с частотами дискретизации от десятков кГц до десятков МГц. Аналоговая полоса пропускания входного каскада АЦП, как правило, существенно превышает

частоту Найквиста: она, а не частота дискретизации, определяет чувствительность к РЧ-сигналам окружающей среды. Классический механизм воздействия: алиасинг. РЧ-сигнал, попавший в аналоговую полосу входного каскада и не подавленный антиалиасинговым фильтром, отображается в рабочую полосу частот как ложная составляющая, неотличимая от полезного сигнала. Однако характеристика антиалиасингового фильтра проектируется исходя из типовых уровней помех при нормальной эксплуатации; при поверке РЧ-обстановка никак не нормируется. Фактическая степень подавления алиасов оказывается величиной неконтролируемой.

Таблица 2

Соответствие стандартов ЭМС и узлов измерительной установки

Стандарт ЭМС	Вид воздействия	Диапазон частот	Затрагиваемые узлы
IEC 61000-4-3 [4]	Излучаемое электромагнитное поле	80 МГц – 6 ГГц	АЦП, USB, аналоговые входы
IEC 61000-4-6 [5]	Кондуктивные РЧ-помехи	0,15 – 80 МГц	Датчиковые входы, цепи питания
IEC 61000-4-2	Электростатический разряд	—	Входные каскады, разъёмы
IEC 61000-4-8	Магнитное поле пром. частоты	50/60 Гц	Мостовые схемы, трансформаторы
CISPR 32 [6]	Эмиссия (излучаемая и кондукт.)	0,15 МГц – 1 ГГц	USB, цифровые интерфейсы
EN 55035 / IEC 61326 [7]	Устойчивость измерит. оборудования	Комплекс	Вся измерительная система

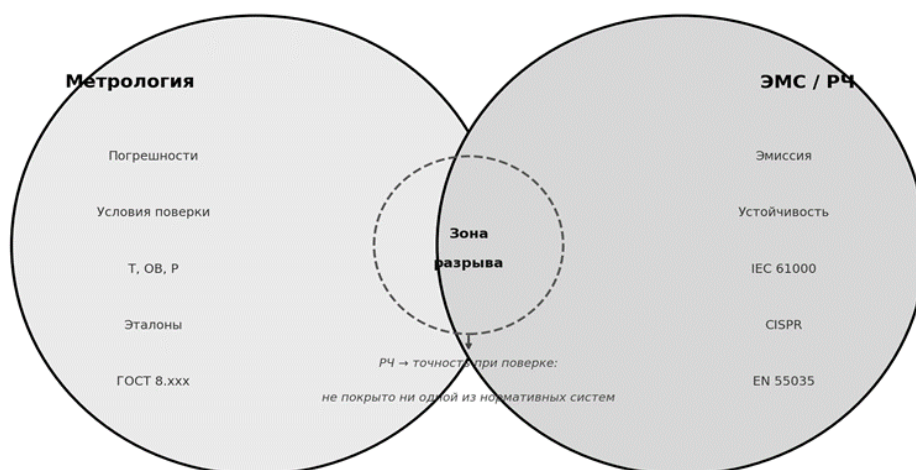


Рис. 1 Нормативный разрыв: зона неохваченных требований

Зона пересечения кругов (влияние РЧ-обстановки на метрологические характеристики при поверке) не покрыта ни метрологической, ни ЭМС-нормативной системой.

3.2. Дифференциальные каналы и мостовые схемы

Дифференциальные входные каскады и мостовые измерительные схемы работают с сигналами на уровне единиц и десятков мВ. В РЧ-диапазоне уязвимость определяется деградацией CMRR (Common-Mode Rejection Ratio) с ростом частоты. Если на частоте 50 Гц CMRR типичного прецизионного усилителя составляет 100–120 дБ, то в диапазоне 1–10 МГц он снижается до 40–60 дБ [8, 9]. В рамках упрощённой модели первого порядка с единственным полюсом на частоте f_c эта зависимость описывается как $CMRR(f) = CMRR_0 - 20 \cdot \log_{10}(f/f_c)$ для $f > f_c$; реальные усилители могут иметь более сложную многополюсную характеристику. Даже при РЧ-уровнях, которые выглядят безобидно, дифференциальная погрешность канала способна выйти за пределы нормированной.

3.3. Фазовые измерительные каналы

Типичная допускаемая погрешность фазовых каналов составляет $\pm 0,2^\circ$. В пересчёте на временной интервал по формуле $\Delta t = \varphi / (360^\circ \cdot f)$ при рабочих частотах 50–100 кГц это соответствует 5,6–11 нс (при росте частоты допустимый временной интервал уменьшается). РЧ-помехи, воздействующие на цепи синхронизации, вносят фазовый шум и джиттер. В схемах с аппаратными компараторами или цифровыми фазовыми детекторами джиттер тактового сигнала переводится непосредственно в временную погрешность и, следовательно, в погрешность фазового измерения. В ЦОС-реализациях связь опосредована: джиттер АЦП снижает SNR процесса оцифровки, что увеличивает шум оценки фазы алгоритмическими методами. Количественная зависимость предельного SNR от джиттера тактовой частоты t_j описывается соотношением [3]:

$$SNR_{jitter} = -20 \cdot \log_{10}(2\pi \cdot f_{in} \cdot t_j)$$

Это выражение, принятое в IEEE Std 1241 [3], задаёт верхнюю границу достижимого SNR при данном джиттере. При $f_{in} = 100$ кГц и $t_j = 100$ пс предельный SNR составляет $-20 \cdot \log_{10}(2\pi \cdot 10^5 \cdot 10^{-10}) \approx 84$ дБ, что соответствует теоретическому пределу 14-разрядного АЦП (~86 дБ). Для крайних сочетаний параметров: $t_j=500$ пс и $f_{in}=100$ кГц \rightarrow SNR ≈ 70 дБ; $t_j=100$ пс и $f_{in}=1$ МГц \rightarrow SNR ≈ 64 дБ; $t_j=500$ пс и $f_{in}=1$ МГц \rightarrow SNR ≈ 50 дБ. РЧ-воздействие на опорный генератор способно перевести прецизионный АЦП в другой класс точности, на несколько разрядов ниже паспортного.

3.4. Датчиковые интерфейсы ICP и USB

Интерфейсы типа ICP с токовым питанием (единицы мА) используют длинные кабели, функционирующие как антенны для РЧ-сигналов в диапазоне 1–500 МГц. РЧ-напряжение проникает в измерительный тракт через несколько механизмов: (1) через несимметричность экранирования кабеля: конечная поверхностная импедансная связь оплётки создаёт дифференциальное напряжение на входе. Количественно этот механизм описывается через передаточный импеданс экрана Z_0 (Transfer Impedance, передаточный импеданс; IEC 62153-4-3):

$$V_{\text{omner}} = Z_0 \cdot l \cdot I_m^c$$

где Z_0 [Ом/м]: передаточный импеданс оплётки; l : длина кабеля; I_m^c : синфазный ток на оплётке. При типичных значениях для кабелей ICP-интерфейса ($Z_0 \approx 0,1-1$ Ом/м на частоте 10–100 МГц, $l = 2-5$ м, $I_m^c \approx 1-10$ мА) напряжение на входе измерительного тракта составляет $V_{\text{omner}} = 0,2-50$ мВ, что вполне сопоставимо с нормированными погрешностями прецизионных каналов.

Два других механизма определяются свойствами самого входного каскада. (2) Ограниченное ослабление синфазной составляющей при РЧ-частотах создаёт дифференциальное напряжение даже без дефектов экрана. (3) При высоких уровнях воздействия нелинейное детектирование на защитных элементах переносит РЧ-оглабающую в низкочастотный диапазон. Для механизма (3) в режиме квадратичного детектирования на защитном диоде:

$$V^{ec} \approx \alpha \cdot V^{Af^2}$$

где $\alpha = I_s R / (2V^T)$: коэффициент нелинейности; $V^T = 26$ мВ: тепловой потенциал; I_s : ток насыщения диода. Формула справедлива в режиме малого сигнала ($V^{Af} \ll V^T = 26$ мВ); при более высоких уровнях она даёт оценку снизу, так как реальный V^{ec} возрастает быстрее квадратичного закона. Даже в оценочном приближении при $V^{Af} = 100$ мВ и типичных параметрах защитного TVS-диода V^{ec} составляет единицы мВ, то есть РЧ-наводка создаёт постоянное смещение нуля прямо в диапазоне нормированных погрешностей канала. Квадратичная зависимость $V^{ec} \propto V^{Af^2}$ объясняет, почему экранирование кабелей снижало наблюдаемые отклонения на 10–20 дБ (раздел 5.3): снижение V^{Af} в 3 раза даёт уменьшение V^{ec} в 9 раз (≈ 19 дБ). Результат обоих механизмов: появление постоянной составляющей или низкочастотного шума в измерительном тракте.

Интерфейс USB 2.0 High Speed (480 Мбит/с), стандартный для современных измерительных установок, генерирует широкополосную эмиссию: основные спектральные составляющие находятся в районе 240 МГц (половина битовой скорости, Найквист для NRZ/NRZI) и 480 МГц (тактовая частота битового потока), а также на кратных частотах 12 МГц (USB Full Speed токены, передаваемые поверх HS-канала); применяемый в стандарте SSC (spread spectrum clocking) снижает пиковые уровни, распределяя мощность по полосе $\approx \pm 0,25\%$. Иначе говоря, источник РЧ-помех конструктивно встроены в поверочную схему.

**Уязвимые узлы и механизмы
РЧ-воздействия на метрологические характеристики**

Узел установки	Частота РЧ-помехи	Механизм воздействия	Влияние на погрешность поверки
Высокоскоростной АЦП	1 МГц – 100 МГц	Алиасинг: РЧ-сигнал в аналоговой полосе АЦП отображается в рабочую полосу	Ложные составляющие в спектре, деградация SNR
Дифф. вход мВ-уровня	0,01 – 30 МГц	Деградация CMRR с ростом частоты; при $V_{cm}=1$ В, $U_k=0,1$ В порог $\pm 0,05\%$ превышает уже в диапазоне десятков кГц	Смещение нуля, дополнительная погрешность канала
Фазовый измерит. канал (тактир.)	1 – 100 МГц	РЧ-помеха на цепи ФАПЧ и тактирования → джиттер → погрешность фазы (непосредственно в аппаратных детекторах, опосредованно в ЦОС)	Погрешность измерения угла фазового сдвига
Опорный генератор	1 МГц – 100 МГц	Джиттер тактовой частоты от ЭМП → деградация SNR АЦП	Нестабильность временной базы, рост погрешности временной базы
ICP датчиковый вход	1 МГц – 500 МГц	Наводка РЧ в кабеле: несимметричность экранирования + нелинейное детектирование при высоких уровнях	Постоянная составляющая, низкочастотный шум
USB 2.0 High Speed интерфейс	≥ 120 МГц (широкополосно)	Внутренняя эмиссия в поверочной схеме	Системная помеха для аналоговых цепей

4. Поверочная схема как электромагнитная задача

4.1. Внутренние источники ЭМП

Типичная поверочная схема для многоканальной измерительной установки включает несколько приборов, соединённых кабелями различной длины и типа, управляющий компьютер с USB-интерфейсом и источники опорных сигналов. Эмиссия USB 2.0 High Speed в диапазоне 240–480 МГц (см. раздел 3.4) может превышать предел CISPR 32 класс В [6]. Системный блок компьютера служит ещё одним широкополосным излучателем. Поверочная схема ещё до включения поверяемого прибора формирует собственную электромагнитную обстановку.

4.2. Петли заземления

Неправильно организованная система заземления создаёт петли, эффективно принимающие магнитную составляющую РЧ-поля [10]. Для одиночного проводника длиной l первый ($\lambda/2$) резонанс происходит при $f = c/(2l)$: для $l = 1$ м это ≈ 150 МГц. Замкнутая петля с периметром P резонирует при $f = c/P$: для $P = 1$ м резонанс при 300 МГц, для $P = 2$ м (типичная поверочная схема с проводниками длиной 0,5–1 м между приборами) резонанс при ≈ 150 МГц. Заземляющие контуры типичных поверочных схем резонируют в диапазоне 100–300 МГц, где USB-интерфейсы и беспроводные сервисы излучают наиболее интенсивно.

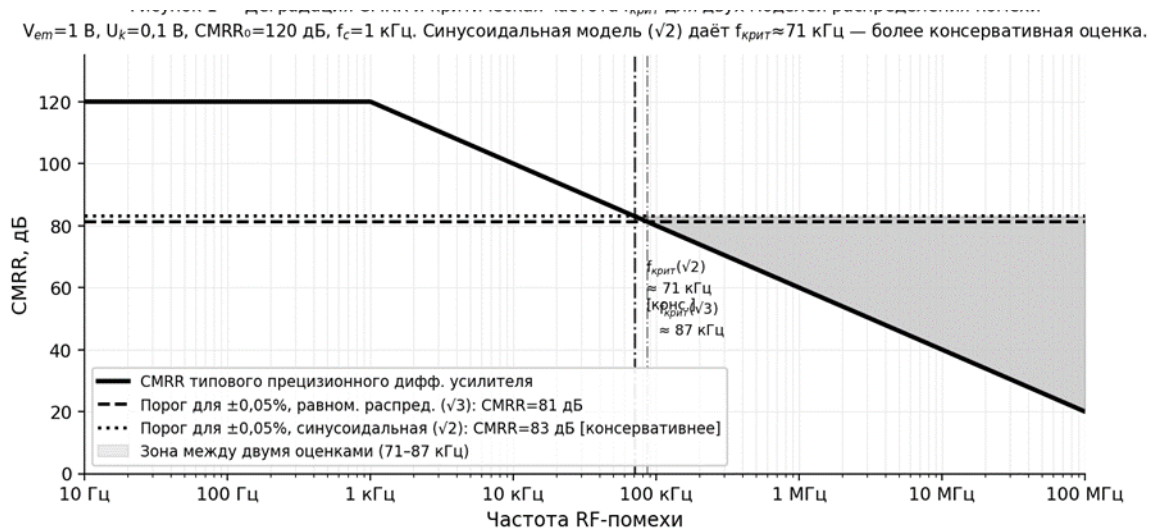


Рис. 2 Деградация CMRR и критические частоты для двух моделей распределения помехи

Прямоугольная модель ($\sqrt{3}$): $CMRR_{треб}=81$ дБ $\rightarrow f_{крит}\approx 87$ кГц.
 Синусоидальная ($\sqrt{2}$, более консервативная): $CMRR_{треб}=83$ дБ $\rightarrow f_{крит}\approx 71$ кГц.
 При одинаковой амплитуде помехи синусоидальная модель даёт и $PЧ$ на 22% выше. $V_{em}=1$ В, $U_k=0,1$ В, $CMRR_0=120$ дБ, $f_c=1$ кГц.

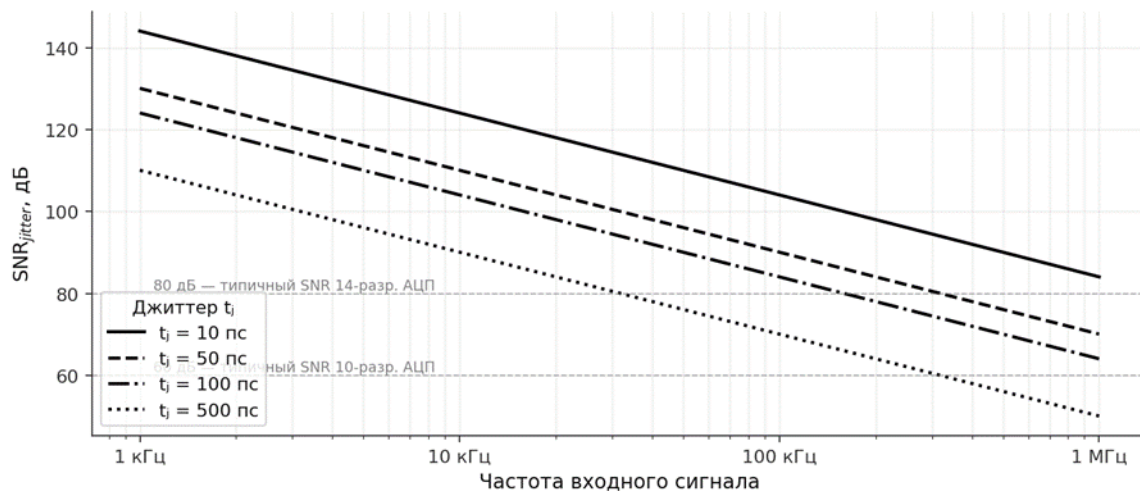


Рис. 3 Предельный SNR АЦП как функция джиттера и частоты входного сигнала (IEEE Std 1241)

При $f_{in}=100$ кГц и $t_j=100$ пс SNR ограничен ~ 84 дБ (14-разр. АЦП). Для крайних сочетаний $t_j=500$ пс и $f_{in}=1$ МГц: SNR ≈ 50 дБ (полный диапазон: 50–84 дБ). Горизонтальные линии обозначают идеальный SNR 14- и 10-разрядных АЦП.

Электромагнитное поле, излучаемое такой петлёй, оценивается по формуле малой рамочной антенны:

$$E [\text{мкВ/м}] = 1,316 \cdot 10^4 \cdot f^2 \cdot I \cdot A / r$$

где f : частота в МГц; I : ток в А; A : площадь петли в м^2 ; r : расстояние до точки измерения в м. Коэффициент $1,316 \cdot 10^4$ получен из формулы дальней зоны для малого магнитного диполя ($\mu\text{ол/с}$, пересчитанного в единицы мкВ/м) [8]. Для петли с периметром 1 м ($A \approx 0,06 \text{ м}^2$), током $I = 10 \text{ мА}$, частотой $f = 240 \text{ МГц}$ (USB HS) и $r = 3 \text{ м}$: $E \approx 1,316 \cdot 10^4 \cdot 240^2 \cdot 0,01 \cdot 0,06 / 3 \approx 150\,000 \text{ мкВ/м} = 104 \text{ дБмкВ/м}$. Предел CISPR 32 класс В на этой частоте составляет 40 дБмкВ/м, нормируемый на расстоянии 10 м; пересчёт к точке наблюдения $r = 3 \text{ м}$ даёт $40 + 20 \cdot \log_{10}(10/3) \approx 50 \text{ дБмкВ/м}$. Превышение $\approx 53 \text{ дБ}$ возникает непосредственно внутри поверочной схемы. Методики поверки предписывают заземление средств поверки без детализации топологии соединений; в ЭМС-инженерии применяется заземление по схеме «звезда» с явным контролем площадей петель [10].

4.3. Воспроизводимость между лабораториями

Метрологическая лаборатория характеризуется, как правило, относительно низким уровнем фонового РЧ-излучения. Объекты эксплуатации (производственные предприятия, телекоммуникационные узлы, испытательные стенды) имеют существенно иную электромагнитную обстановку. Поскольку методики поверки не нормируют РЧ-условия, результаты поверки одного и того же прибора в разных условиях (лаборатория, объект) могут различаться на величину, превышающую допускаемую погрешность; это различие при стандартной процедуре поверки не выявляется.

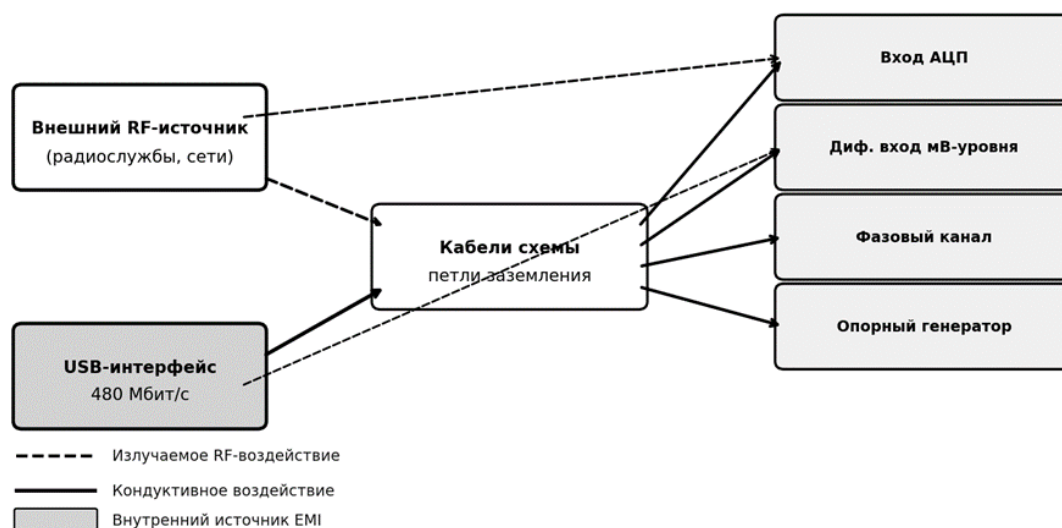


Рис. 4 Пути РЧ-воздействия на поверочную схему

Пунктирные стрелки: излучаемое РЧ-воздействие; сплошные: кондуктивное; серый блок: внутренний источник ЭМП (USB-интерфейс).

Таблица 4

РЧ-среда в типовых условиях проведения поверки

Место проведения поверки	Характер РЧ-обстановки	Контроль электромагнитных условий	Воспроизводимость
Метрологическая лаборатория	Относительно низкий фон	Отсутствует	Частичная
Экранированная камера ЭМС-лаборатории	Контролируемый, нормируемый	Полный	Обеспечена
Производственный объект	Высокий, непредсказуемый	Отсутствует	Не обеспечена
Испытательный стенд	Высокий (собственное оборудование)	Отсутствует	Не обеспечена
Объект связи / телеком	Очень высокий (антенные системы)	Отсутствует	Не обеспечена

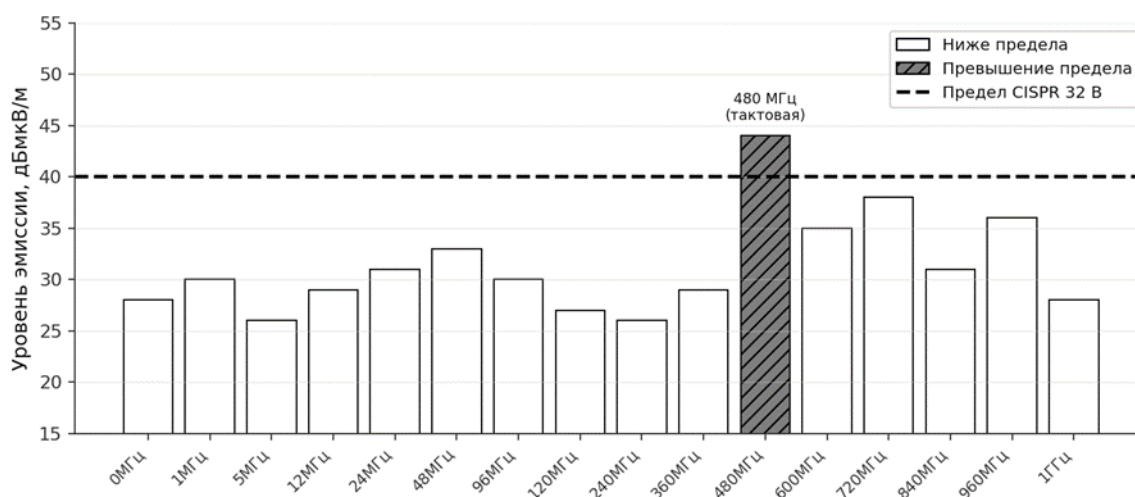


Рис. 5 Спектр эмиссии USB 2.0 High Speed и предел CISPR 32 класс B

Заштрихованные столбцы: превышение предела CISPR 32 класс B (40 дБмкВ/м). USB-интерфейс в поверочной схеме является источником ЭМП для собственных аналоговых цепей.

5. Опыт работы в аккредитованной ЭМС-лаборатории

5.1. Экранированные камеры как поверочная среда

ЭМС-лаборатория располагает экранированными безэховыми камерами с нормированным уровнем фонового РЧ-излучения (менее -10 дБмкВ/м) и коэффициентом экранирования свыше 80 дБ. Применение такой среды для поверки прецизионного оборудования позволило бы практически исключить вклад РЧ-условий из бюджета неопределённости или ограничить его известной верхней границей.

5.2. Поведение прецизионных аналоговых узлов при ЭМС-испытаниях

Практика испытаний показывает: при воздействии кондуктивных РЧ-помех по IEC 61000-4-6 [5] уровня жёсткости 1 (1 В, э.д.с.) аналоговые каналы мВ-уровня демонстрируют отклонения показаний, достигающие нескольких единиц младших разрядов АЦП, что сопоставимо с нормированными погрешностями прецизионных каналов. При уровне 2 (3 В) отклонения выходят за пределы допустимых погрешностей поверки, хотя оборудование сохраняет функциональную работоспособность в соответствии с критериями ЭМС-стандартов. Вывод прямой: ЭМС-стандарты проверяют работоспособность, а не точность. Между этими понятиями есть разрыв, который они не закрывают.

5.3. Практические наблюдения на производственных объектах

При поверке оборудования непосредственно на производственных объектах наблюдались отклонения показаний каналов мВ-уровня, коррелирующие с работой силовых преобразователей и систем беспроводной связи. Экранирование соединительных кабелей снижало эти отклонения на 10–20 дБ. Поверка при этом выполнялась корректно и в полном соответствии с методикой: в предписанных методикой условиях прибор подтверждал нормированные характеристики, и выданное свидетельство о поверке отражало этот результат верно. Неконтролируемой оставалась не процедура поверки, а РЧ-обстановка объекта эксплуатации, которая в метрологическом нормативном фреймворке не нормируется и в бюджет неопределённости не входит; на объекте с интенсивным РЧ-фоном фактическая неопределённость могла существенно превышать нормированную, и этот вклад действующей процедурой не выявляется.

5.4. Опыт разработки методик для оборудования миллиметрового диапазона

Практика разработки методик испытаний для оборудования E-band (71–86 ГГц) в аккредитованной лаборатории обнажает тот же нормативный разрыв в ещё более острой форме. Стандарт IEC 61000-4-3, основной инструмент нормирования устойчивости к излучаемому полю, ограничен частотой 6 ГГц. Выше этой границы стандартизованные методики испытаний на устойчивость отсутствуют. Разработчик методики для оборудования, рабочий диапазон которого начинается там, где заканчивается IEC 61000-4-3, лишён нормативной опоры при формулировании требований к ЭМ-условиям испытаний. Задача, которую настоящая статья ставит для прецизионных измерительных установок в диапазоне до единиц гигагерц, для миллиметрового диапазона не решена даже на уровне постановки.

6. Технические методы снижения РЧ-воздействий на поверочную схему

6.1. Учёт РЧ-составляющей в бюджете неопределённости (GUM-подход)

РЧ-составляющую следует включать в бюджет неопределённости поверки в соответствии с методологией GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, JCGM 100:2008). В действующих методиках поверки

прецизионных многоканальных установок бюджет неопределённости, как правило, содержит составляющие от нестабильности образцовых мер, температурного коэффициента канала, разрешения цифрового отсчёта и случайного шума. Составляющая от РЧ-воздействий в бюджет не включается, поскольку условия поверки по ЭМ-параметрам не нормируются. Между тем её порядок величины сопоставим с контролируруемыми составляющими, а для поверки вне специализированной лаборатории она может их превышать.

Стандартная неопределённость от РЧ-воздействия для i -го измерительного канала определяется через передаточный коэффициент канала к РЧ-помехе $H_{RF}(f)$ и уровень фонового поля E_{bg} в зоне поверки. При равномерном распределении воздействия в диапазоне $[0; E_{bg_max}]$:

$$u_{RF}(f) = E_{bg_max} \cdot |H_{RF}(f)| / \sqrt{3}$$

где E_{bg_max} : максимальный уровень фонового электрического поля в рабочем диапазоне частот АЦП [В/м]; $H_{RF}(f)$: передаточный коэффициент от напряжённости поля к отклонению показания канала [мВ·м/В], определяемый экспериментально или по паспортным данным на восприимчивость; делитель $\sqrt{3}$ соответствует стандартной неопределённости равномерного распределения типа В (GUM, п. 4.3.7). Суммарная стандартная неопределённость с учётом РЧ-составляющей:

$$u_c = \sqrt{(u_{cal}^2 + u_{temp}^2 + u_{RF}^2 + u_{noise}^2)}$$

Допустимый предельный уровень фона E_{lim} , при котором вклад u_{RF} не превышает 30% суммарной неопределённости (что обеспечивает увеличение u_c не более чем на 4,4% относительно случая $u_{RF} = 0$):

$$E_{lim} = 0,3 \cdot u_c \cdot \sqrt{3} / |H_{RF}(f)|$$

Это выражение даёт количественный критерий для нормирования ЭМ-условий поверки: методика должна предписывать, что фоновый уровень поля в зоне поверки не превышает E_{lim} , вычисленного для наиболее чувствительного узла установки. Для 16-разрядного АЦП с $u_{cal} \approx 0,01\%$ FS и типичным $H_{RF} \approx 50$ мВ·м/В на частоте 10 МГц E_{lim} составляет единицы мВ/м, что соответствует уровню специализированной экранированной зоны, но не стандартного поверочного помещения в промышленной зоне.

6.2. Расчёт требуемого коэффициента экранирования зоны поверки

Если поверка проводится не в экранированной камере ЭМС-лаборатории, а в типовом помещении или на производственном объекте, возникает задача оценки требуемого коэффициента экранирования (SE, Shielding Effectiveness) для локальной защиты зоны поверки. Коэффициент экранирования определяется как:

$$SE [\text{дБ}] = 20 \cdot \log_{10}(E_{\text{ext}} / E_{\text{int}})$$

где E_{ext} : напряжённость поля снаружи экрана (фоновое поле в помещении); E_{int} : допустимый уровень E_{lim} внутри зоны поверки. Требуемый SE:

$$SE_{\text{req}} = 20 \cdot \log_{10}(E_{\text{ext}} / E_{\text{lim}})$$

Рассмотрим два характерных случая. Случай 1: поверочная метрологическая лаборатория в административном здании. Типичный $E_{\text{ext}} \approx 0,1\text{--}1$ В/м (мобильные сети, Wi-Fi); требуемый $E_{\text{lim}} = 5$ мВ/м (см. раздел 6.1). Тогда $SE_{\text{req}} = 20 \cdot \log_{10}(1 / 0,005) = 46$ дБ. Случай 2: поверка на телекоммуникационном объекте или вблизи базовой станции. Типичный $E_{\text{ext}} \approx 5\text{--}10$ В/м (диапазон 700–2600 МГц); $E_{\text{lim}} = 5$ мВ/м. Тогда $SE_{\text{req}} = 20 \cdot \log_{10}(10 / 0,005) = 66$ дБ. Экранированная камера ЭМС-лаборатории с $SE \geq 80$ дБ [11] перекрывает оба сценария с запасом. Локальный экранирующий бокс или ЭМС-палатка ($SE \approx 40\text{--}60$ дБ в диапазоне до нескольких сотен МГц) перекрывает случай 1, но недостаточен для случая 2 без дополнительных мер.

6.3. Требование к антиалиасинговой фильтрации как метрологическому параметру

Антиалиасинговый фильтр (ААФ) является первым барьером на пути РЧ-помех в цифровой тракт АЦП. В документации на измерительные установки ААФ, как правило, характеризуется полосой пропускания и крутизной спада, однако требования к ослаблению в полосе задержки, сформулированные в метрологических терминах, то есть связанные с допускаемой погрешностью АЦП, отсутствуют. Минимально необходимое ослабление ААФ на частоте РЧ-помехи f_{RF} :

$$A_{\text{req}}(f_{\text{RF}}) [\text{дБ}] \geq 20 \cdot \log_{10}(V_{\text{RF}} / U_{\text{alias_max}})$$

где V_{RF} : напряжение РЧ-помехи на входе аналогового каскада [В]; $U_{\text{alias_max}}$: максимально допустимый уровень ложного спектрального компонента от алиасинга, определяемый из условия не превышения нормированной погрешности канала. Для 14-разрядного АЦП с диапазоном $FS = 2$ В и допускаемой погрешностью $\delta = 0,01\%$ FS: $U_{\text{alias_max}} = 0,0001 \cdot 2 = 0,2$ мВ. При уровне РЧ-помехи на аналоговом входе $V_{\text{RF}} = 100$ мВ: $A_{\text{req}} = 20 \cdot \log_{10}(100 / 0,2) = 54$ дБ. Для $V_{\text{RF}} = 1$ В (типичный сценарий ИЕС 61000-4-6 уровень жёсткости 2): $A_{\text{req}} = 74$ дБ, что выполняется лишь для ААФ 6–8-го порядка или ААФ с LC-структурой эллиптического типа. Указанное требование следует включать в методики поверки как верифицируемый параметр при первичной поверке или после ремонта.

6.4. CMRR как нормируемый параметр на рабочих частотах поверки

Из анализа раздела 3.2 следует, что CMRR дифференциальных каналов снижается с ростом частоты и на типичных частотах РЧ-помех может оказаться недостаточным для обеспечения нормированной погрешности поверки. Условие

метрологической достаточности CMRR на частоте f формулируется из соотношения максимально допустимого дифференциального напряжения U_{diff_max} от синфазной помехи V_{cm} :

$$CMRR_{req}(f) [\text{дБ}] \geq 20 \cdot \log_{10}(V_{cm} / U_{diff_max})$$

где $U_{diff_max} = \delta_{norm} \cdot V_{FS} / 100$ (максимально допустимое дифференциальное напряжение от паразитного источника при нормированной погрешности δ_{norm} (%) и полной шкале V_{FS}). Для $\delta_{norm} = 0,05\%$, $V_{FS} = 10$ В: $U_{diff_max} = 5$ мВ. При синфазной помехе $V_{cm} = 1$ В (типичный уровень для промышленной среды): $CMRR_{req} = 20 \cdot \log_{10}(1 / 0,005) = 46$ дБ. Верификацию CMRR на рабочих частотах и на этом уровне требований следует включать в методику поверки, а не ограничиваться паспортным значением при 50 Гц.

Практически: методика поверки должна включать проверку CMRR на частоте наиболее интенсивной синфазной помехи в рабочей полосе установки. Для дифференциальных каналов с нормированной погрешностью менее 0,1% это означает верификацию CMRR в диапазоне 1–100 кГц на уровне не менее 46 дБ. Значение CMRR(f) получается из стандартной процедуры подачи синфазного сигнала через делитель с точно известным коэффициентом разбаланса, адаптированной к диапазону РЧ-частот (использование генератора РЧ-сигналов вместо низкочастотного источника).

6.5. Ограничение площади заземляющих петель: расчётный метод

Заземляющие петли поверочной схемы (раздел 4.2) являются одновременно приёмными антеннами для магнитного поля и источниками наводимой ЭДС. Из закона электромагнитной индукции ЭДС, наводимая в контуре площадью A при магнитной индукции $B(f)$ на частоте f :

$$U_{emf} = 2\pi \cdot f \cdot B(f) \cdot A$$

Из условия $U_{emf} \leq U_{lim}$ (допустимая ЭДС от внешнего поля) максимально допустимая площадь петли:

$$A_{max} = U_{lim} / (2\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot H(f))$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $H(f)$: напряжённость магнитного поля в зоне поверки [А/м]; U_{lim} : допустимая наводка в цепях заземления, принимаемая равной U_{diff_max} из раздела 6.4. Для $f = 50$ Гц (промышленная помеха), $H = 1$ А/м (типично для производственного объекта) и $U_{lim} = 5$ мВ: $A_{max} = 0,005 / (2\pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1) \approx 12,7$ м²; ограничение на частоте 50 Гц практически не критично для типовых поверочных схем. Для $f = 10$ кГц (типичный силовой преобразователь) и $H = 100$ А/м (поле на расстоянии $\sim 0,1$ м от проводника с током ~ 100 А): $A_{max} = 0,005 / (2\pi \cdot 10000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 100) \approx 6,3$ см², что соответствует контуру с периметром около 10 см. Такое ограничение

обосновывает применение заземления по схеме “звезда” с кратчайшими проводниками и twisted-pair соединениями: реально достигаемые площади петель при такой топологии составляют 1–5 см², что удовлетворяет требованию с запасом.

6.6. Предварительный мониторинг РЧ-фона и критерий годности зоны поверки

В методику поверки следует включать обязательное предварительное измерение РЧ-фона в зоне поверки как условие начала процедуры. По аналогии с тем, как методика предписывает выдержку прибора для выравнивания температуры, она должна предписывать и измерение максимальной напряжённости электрического поля E_{max} в рабочем диапазоне частот АЦП и сравнение с нормированным порогом E_{lim} из раздела 6.1. Критерий годности зоны поверки:

$$E_{max}(f) \leq E_{lim} \text{ при всех } f \in [f_{min}; f_s/2]$$

где f_{min} : нижняя граница полосы, в которой CMRR деградировал ниже $CMRR_{req}$ (определяется по характеристике из раздела 3.2); $f_s/2$: частота Найквиста АЦП (граница аналоговой полосы антиалиасингового фильтра). Фактически это аналог процедуры определения фонового уровня (ambient check) в ЭМС-испытаниях по IEC 61000-4-3 [4], адаптированный к метрологическим задачам. Технически мониторинг выполняется портативным анализатором спектра или калиброванным широкополосным приёмником с антенной в зоне размещения поверяемого прибора; продолжительность измерения составляет не менее 30 с для охвата нестационарных источников (импульсные блоки питания, циклические передатчики). Результат мониторинга фиксируется в протоколе поверки как условие проведения измерений, по аналогии с регистрацией температуры и влажности. Если критерий $E_{max} \leq E_{lim}$ не выполняется, поверка не начинается до устранения источника помехи или переноса в надлежащее помещение.

7. Направления нормативного сближения

7.1. Электромагнитные условия в методиках поверки

Первый практический шаг: ввести в методики поверки прецизионных высокоскоростных установок раздел «Электромагнитные условия поверки». Его содержание вытекает непосредственно из расчётных методов раздела 6. Раздел должен устанавливать: предельный уровень фонового поля E_{lim} в рабочем диапазоне частот АЦП, вычисляемый по формуле из раздела 6.1 для наиболее чувствительного узла установки; обязательное предварительное измерение E_{max} по процедуре раздела 6.6 как условие начала поверки с фиксацией результата в протоколе; требования к топологии заземления поверочной схемы (максимально допустимую площадь контуров A_{max} из раздела 6.5 для каждого диапазона рабочих частот); требования к экранированию соединительных кабелей с нормированием передаточного импеданса Z_0 . Каналы с нормированной погрешностью менее 0,05% следует поверять только в зонах, в которых

выполняется критерий $E_{\max} \leq E_{\lim}$, либо в экранированных камерах с SE_{req} из раздела 6.2.

7.2. РЧ-устойчивость как метрологический параметр

Введение в нормативные документы на прецизионное оборудование характеристики РЧ-устойчивости в метрологических терминах позволит включать вклад РЧ-воздействий в бюджет неопределённости поверки на основе паспортных данных изготовителя, без специальных измерений при каждой поверке. Конкретное наполнение этой характеристики вытекает из методов раздела 6: изготовитель должен нормировать передаточный коэффициент $H_{\text{RF}}(f)$ (отклонение показания канала на единицу напряжённости внешнего поля) в диапазоне от f_c до $f_s/2$; минимально необходимое ослабление антиалиасингового фильтра A_{req} на стандартных испытательных частотах IEC 61000-4-3 и IEC 61000-4-6; значение $CMRR(f)$ не только на частоте 50 Гц, но и в диапазоне, где $CMRR$ деградирует до уровня $CMRR_{\text{req}}$ из раздела 6.4. Располагая этими данными, поверительная лаборатория подставляет H_{RF} и фактически измеренное E_{\max} в формулу u_{RF} и получает составляющую неопределённости без дополнительных экспериментов. Стандарт IEC 61326-1 [7] является наиболее естественной площадкой для введения такой характеристики: его действующая редакция оперирует критериями функциональной работоспособности, переход к метрологическим критериям точности составляет логичное следующее дополнение.

7.3. Взаимодействие метрологических и ЭМС-структур

Аккредитованная ЭМС-лаборатория обладает инфраструктурой, непосредственно применимой для двух задач, которые метрологические лаборатории самостоятельно решить не могут. Первая: экспериментальное определение передаточного коэффициента $H_{\text{RF}}(f)$ для конкретного типа установки путём измерения отклонения показаний каналов при воздействии калиброванного РЧ-поля в экранированной безэховой камере (по методике, аналогичной IEC 61000-4-3 [4], но с фиксацией метрологических, а не функциональных откликов). Результатом служит экспериментальная зависимость $H_{\text{RF}}(f)$, пригодная для подстановки в бюджет неопределённости. Вторая задача: верификация самих методик поверки. Проведение поверки в экранированной камере (контролируемые ЭМ-условия) и в стандартном помещении (неконтролируемые) с последующим сравнением результатов даёт количественную оценку вклада ЭМ-условий в межлабораторную воспроизводимость. В документах IEC 61000-4-3 [4] заложена концептуальная основа для учёта таких источников неопределённости; предложенная схема взаимодействия является конкретной реализацией этой концепции.

8. Заключение

Нормативный разрыв между метрологией и ЭМС в задачах испытаний и поверки измерительных систем для беспроводной техники носит системный характер. Разрыв возникает не из неполноты отдельных методик, а из-за того, что электромагнитная обстановка как класс влияющих величин отсутствует в метрологическом нормативном фреймворке; ни одна из нормативных рамок не

покрывает эту зону самостоятельно. Разрыв усиливается с ростом рабочих частот: в миллиметровых полосах беспроводной техники инструменты нормирования устойчивости к излучаемому полю ограничены 6 ГГц, где зона без нормирования максимальна. Действующие методики поверки не нормируют электромагнитную обстановку в зоне поверки. Между тем высокоскоростные АЦП, дифференциальные каналы мВ-уровня, фазоизмерительные тракты и датчиковые интерфейсы к РЧ-воздействиям принципиально чувствительны; это не зависит от того, учтено ли воздействие в методике.

Поверочная схема рассмотрена как электромагнитная задача: внутренние источники ЭМП, петли заземления и различные места проведения поверки формируют электромагнитную обстановку, не нормируемую ни метрологическими документами, ни стандартами ЭМС в их метрологическом аспекте. Экспериментальные данные раздела 5 подтверждают, что эта обстановка способна вывести показания прецизионных каналов за пределы допускаемых погрешностей поверки при уровнях воздействия, которые ЭМС-стандарты формально признают допустимыми.

В настоящей работе предложен комплекс расчётных методов, переводящих нормативный разрыв из концептуальной проблемы в решаемую инженерную задачу. GUM-формализм (раздел 6.1) даёт количественный критерий для нормирования ЭМ-условий поверки; расчётные методы разделов 6.2–6.5 формулируют конкретные требования к экранированию, фильтрации, CMRR и топологии заземления; мониторинг РЧ-фона (раздел 6.6) замыкает цикл непосредственно в протоколе поверки. Экспериментальная верификация $H_{RF}(f)$ для конкретных классов установок и её включение в паспортные данные составляет следующий шаг.

Пути понятны. Методики поверки должны включать требования к электромагнитным условиям. Нормативные документы на прецизионное оборудование должны содержать характеристику РЧ-устойчивости в метрологических терминах. Метрологические и ЭМС-структуры нужно организационно сближать, а не держать в параллельных нормативных мирах. Свидетельство о поверке удостоверяет соответствие в условиях, которые методика нормирует. Пока электромагнитная обстановка в этот перечень не включена, оно молчит о неопределённости, которая при эксплуатации может оказаться определяющей.

Литература:

1. ГОСТ 8.395-80. ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования. М.: Издательство стандартов, 1981.
2. ILAC-G8:09/2019. Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity. Sydney: ILAC, 2019.
3. IEEE Std 1241-2010. IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters. New York: IEEE, 2011.

SCIENCE TIME

4. IEC 61000-4-3:2020. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-3: Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test. Geneva: IEC, 2020.
5. IEC 61000-4-6:2013. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-6: Testing and measurement techniques - Immunity to conducted disturbances induced by radio-frequency fields. Geneva: IEC, 2013.
6. CISPR 32:2015. Electromagnetic compatibility of multimedia equipment - Emission requirements. Geneva: IEC, 2015.
7. IEC 61326-1:2012. Electrical equipment for measurement, control and laboratory use - EMC requirements - Part 1: General requirements. Geneva: IEC, 2012.
8. Ott H.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. Hoboken: Wiley, 2009. 872 p.
9. Kester W. (ed.). The Data Conversion Handbook. Burlington: Analog Devices / Newnes, 2005. 1023 p.
10. Morrison R. Grounding and Shielding: Circuits and Interference. 6th ed. Hoboken: Wiley, 2016. 238 p.