

Безэховые экранированные камеры: физические принципы и классификация

Илья Романов, Сергей Лютаев (Москва)

В статье проводится обзор основных физических принципов работы безэховых экранированных камер, а также материалов и конструкций, используемых для обеспечения испытаний оборудования на электромагнитную совместимость.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время важной задачей является обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронного оборудования различного назначения. Здесь можно выделить такие области, как аппаратура управления, радиолокация, радиомаскировка, радиопротиводействия, радиоразведка, связь, медицина, транспорт и др. К примеру, медицинский томограф является источником электромагнитных помех большой мощности. Его работа не должна сказываться на работоспособности оборудования, расположенного поблизости. Нарушение штатной работы медицинского оборудования может привести к выходу его из строя или к потере человеческой жизни. Кроме того, необходимо уменьшать электромагнитный фон в помещении, где расположен томограф, с целью увеличения его разрешающей способности и динамического диапазона. Часто мощные источники радиоизлучения являются частью технологического оборудования.

Увеличение числа излучающих приборов, приёмопередающих систем на Земле и в околоземном пространстве привело к значительному росту уровня электромагнитного фона, особенно в городской местности. В условиях

сильной электромагнитной «загрязнённости» сложно решить задачу настройки чувствительных устройств и систем. Для этого применяют экранированные камеры (ЭК) – «помещения, способные разделить электромагнитную обстановку внутри и во вне», в том числе полубезэховые и безэховые экранированные камеры (ПБЭК, БЭК) [1–3]. Незаменимые при испытаниях на электромагнитную совместимость, БЭК являются инструментом, способным:

- в ограниченной области пространства снизить электромагнитный фон;
- обеспечить экранирование источников электромагнитного излучения от измерительной (испытательной) аппаратуры и персонала и уменьшить на них электромагнитное воздействие;
- обеспечить пространственную однородность электромагнитного поля.

Экранированные камеры часто используют для обеспечения электромагнитной совместимости оборудования, сохранности информации (или самого факта её существования) и средств её хранения (например, файловый сервер, вычислительный сервер и др.), противодействия средствам радиоэлектронной разведки, устройствам радиоборьбы и радиоподавления.

В годы рассвета радиоэлектронной промышленности в XX веке на промышленных предприятиях создавались экранированные и безэховые камеры, которые со временем перестали использоваться по назначению. Наличие современных разнообразных экранирующих и радиопоглощающих материалов и комплектующих позволяет восстановить свойства этих БЭК.

Уровень электромагнитного фона является важной характеристикой, которая определяет разрешающую способность измерительной аппаратуры для регистрации электромагнит-

ных помех от их источника при испытаниях на электромагнитную совместимость. Чем ниже фоновые шумы, тем выше разрешающая способность измерительной аппаратуры. БЭК обеспечивает уменьшение уровня внешнего электромагнитного фона на величину до 100 дБ [1].

ОСНОВЫ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Работа экранированных камер основана на ряде фундаментальных механизмов взаимодействия электромагнитного поля и вещества. Рассмотрим некоторые из них.

Экранирование электрического поля

Принцип экранирования электрического поля внутри камеры основан на компенсации внешнего поля $\vec{E}_{\text{внеш}}$ внутренним полем $\vec{E}_{\text{внут}}$ (см. рис. 1), возникающим в камере (клетка Фарадея). При помещении электрически замкнутой камеры во внешнее электрическое поле свободные электроны движутся вдоль силовых линий напряжённости электрического поля к положительному потенциалу. Положительно заряженные ионы в материале камеры неподвижны. Разделение зарядов создаёт поле $\vec{E}_{\text{внут}}$, направленное в противоположную внешнему $\vec{E}_{\text{внеш}}$ сторону и равное по величине. Суммарная напряжённость электрического поля при этом стремится к нулю: $\vec{E}_{\text{сумм}} = \vec{E}_{\text{внеш}} + \vec{E}_{\text{внут}} \rightarrow 0$.

Экранирование магнитного поля

Магнитное поле взаимодействует с движущимися зарядами (электрическим током) и магнитными материалами. Можно выделить два основных способа экранирования магнитного поля:

- механизм шунтирования магнитного поля экраном;
- механизм экранирования магнитного поля вихревыми токами.

Механизм шунтирования магнитного поля экраном применяется для защиты от постоянного и медленно изменяющегося переменного магнитного поля. Экран изготавливаются из ферромаг-

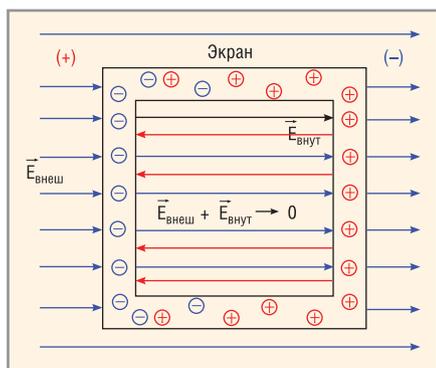


Рис. 1. Экранирование электрического поля

ИСПЫТАНИЯ НА ЭМС

квалификационные
предквалификационные

**АККРЕДИТОВАННАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ
АО «ТЕСТПРИБОР» ПРЕДЛАГАЕТ ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ:**

- На устойчивость к изменениям в системе электропитания.
- Измерение уровня электромагнитных помех (помехоэмиссии).
- На восприимчивость к кондуктивным помехам.
- На устойчивость к воздействию электростатических разрядов.
- На устойчивость к воздействию магнитных полей.
- На устойчивость к воздействию электромагнитных полей.
- На измерение коэффициента экранирования различных материалов, используемых для защиты от электромагнитных излучений в диапазоне частот до 18 ГГц.
- Выездные испытания.



ТЕСТПРИБОР

По результатам прохождения испытаний выдается протокол, который является основанием для получения сертификата соответствия. По требованию Заказчика испытания проводятся под контролем ВП МО РФ.

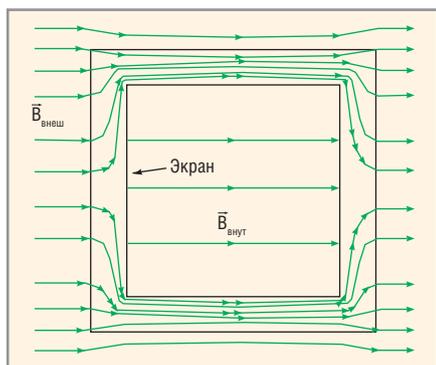


Рис. 2. Экранирование магнитного поля методом шунтирования

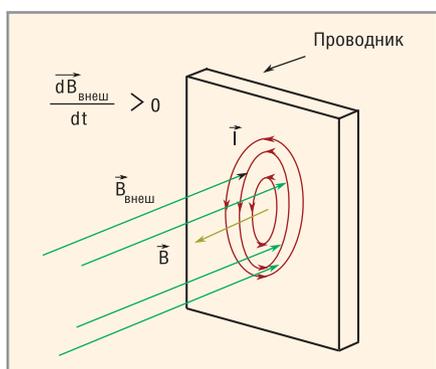


Рис. 3. Экранирование магнитных полей вихревыми токами

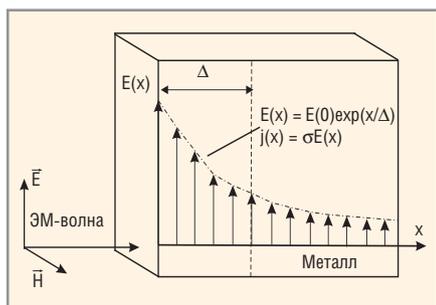


Рис. 4. Экранирование электромагнитного поля

нитных материалов с большой относительной магнитной проницаемостью $\mu > 1$ (сталь, пермаллой).

При наличии экрана линии магнитной индукции (см. рис. 2) проходят, в основном, по его стенкам, которые обладают малым магнитным сопротивлением по сравнению с воздушным пространством внутри экрана.

Отметим, что для обеспечения высокой эффективности шунтирования магнитного поля необходимо обеспечить низкое «сопротивление» магнитному полю (высокую магнитную проницаемость μ) по всему объёму экранирующего материала. Этого легко добиться, например, если стенки экранированных камер состоят их цельных листов. Если экранированная камера построена по сборно-разборной технологии,

то необходимо чтобы в местах соединения сборных панелей обеспечивалось низкое магнитное сопротивление магнитному полю, т.е. не оставалось зазоров, а материал уплотнителя обладал, в том числе, высокой магнитной проницаемостью. Чем толще экран и чем меньше швов, стыков, тем экранирование эффективнее.

Механизм экранирования магнитного поля вихревыми токами работает на высоких частотах (см. рис. 3). Если на поверхность металлического экрана падает изменяющееся во времени магнитное поле с плотностью магнитного потока $\vec{E}_{\text{внеш}}$ в материале, согласно закону индукции Фарадея, наводится вихревое электрическое поле, пропорциональное скорости изменения плотности магнитного потока $|\text{d}\vec{E}_{\text{внеш}}/\text{d}t|$. Если материал обладает проводимостью ($\sigma > 0$), то электрическое поле вызывает вихревой ток I определённой плотности в толщине материала. Этот ток, в свою очередь, является источником магнитного поля (с плотностью магнитного потока \vec{B} , которое направлено противоположно относительно возбуждающего поля $\vec{B} = -\vec{E}_{\text{внеш}}$). Суперпозиция возбуждающего и индуцированного полей формирует суммарный магнитный поток в материале экрана и в экранированной области на противоположной от источника стороне.

Метод экранирования магнитного поля вихревыми токами работает только тогда, когда внешнее поле изменяется во времени. При этом экранирование проявляется в любом материале, способном проводить электрический ток, и который не обязательно должен обладать относительной магнитной проницаемостью, т.е. быть ферромагнетиком.

Таким образом, чтобы обеспечить высокую эффективность экранирования магнитного поля в экранированных камерах, изготовленных по сборно-разборной конструкции, необходимо обеспечить низкое электрическое сопротивление в местах соединения сборных панелей. Это достигается путём применения специальных материалов для покрытия панелей и выбором уплотнителя.

Методы шунтирования и вихревых токов действуют совместно. На низких частотах преобладает механизм шунтирования, а при повышении частоты – механизм вихревых токов. Для магнитных материалов на частотах в десятки килогерц магнитная прони-

цаемость резко уменьшается, что приведёт к увеличению толщины скин-слоя и резко снижению эффективности экранирования за счёт механизма шунтирования. Для достижения высокого уровня экранирующих свойств экранированных камер необходимо обеспечить низкое электрическое и магнитное сопротивление в местах швов и соединения панелей.

Экранирование электромагнитного поля

При экранировании электромагнитного поля рассматривается электромагнитная волна, прошедшая вглубь металлической поверхности (см. рис. 4). При падении электромагнитной волны на поверхность реального металла, практически независимо от угла падения, волна, которая прошла в металл, распространяется перпендикулярно его поверхности. В этом направлении существует поток энергии в металл, который определяется вектором Пойтинга \vec{P} . Электрическое поле вызывает ток проводимости и нагревание металла, амплитуды полей затухают по мере распространения волны вглубь металла. Плотность тока уменьшается по тому же закону, что и электрическое поле. В слое толщиной Δ поле и плотность тока затухают в e -раз относительно поверхности металла. Размер этой поверхности определяется формулой:

$$\Delta = \sqrt{2 / \omega \times \mu \times \mu_0 \times \sigma},$$

где Δ – толщина скин-слоя, ω – циклическая частота, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, μ – относительная магнитная проницаемость, σ – проводимость. Отношение толщины металлических стен камеры к толщине скин-слоя определяет её экранирующие свойства.

Нетрудно заметить, что, для того чтобы увеличить экранирующие свойства камер, необходимо увеличивать электрическую проводимость σ (уменьшать электрическое сопротивление) и магнитную проницаемость стенок экранированных камер, особенно в местах швов и соединений сборных панелей (в случае ЭК, выполненных по сборно-разборной технологии).

Снижение уровня шумов способом экранирования электромагнитных полей является в настоящее время наиболее распространённым методом при конструировании экранированных камер.

СВОЙСТВА БЕЗЭХОВЫХ ЭКРАНИРОВАННЫХ КАМЕР

Основным свойством экранированных камер, полубезэховых и безэховых экранированных камер является снижение фона при испытаниях на ЭМС в части эмиссии электромагнитных полей (см. рис. 5).

Полубезэховые и безэховые экранированные камеры обладают свойством изолировать окружающее пространство снаружи камеры от электромагнитных полей, наводимых внутри камеры.

В дополнение к предыдущим свойствам, БЭК обеспечивают однородное поле в рабочей плоскости за счёт снижения коэффициента (уровня) стоячей волны в камере. Это достигается с помощью применения поглощающих материалов и особой их конструкции. Работа БЭК основана на двух эффектах: экранирование электромагнитного поля замкнутой проводящей оболочкой и поглощение радиоволн внутренним покрытием.

Если одна из поверхностей (обычно пол) БЭК не покрыта радиопоглощающим материалом, такая камера называется полубезэховой. Если в камере не предусмотрено покрытие поглощающим материалом, такая камера называется экранированной. Согласно принятым в Российской Федерации ГОСТ Р 50414-92, ГОСТ CISPR 16-1-4-2013 БЭК могут отличаться размером, типом проводящей оболочки, типом поглощающего материала, конструкцией (быть разборной или неразборной), формой, но принцип действия будет оставаться одним и тем же [1, 2].

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭКРАНИРОВАННЫХ КАМЕР

Экранированные камеры могут быть разделены по нескольким критериям [3]. Рассмотрим основные из них.

1. По принципу:

- экранированная камера;
- полубезэховая экранированная камера;
- безэховая экранированная камера;
- полуоткрытая экранированная камера.

2. По типу радиопоглощающего материала (РПМ):

- радиопоглощающие материалы с электрическим поглощением (узкодиапазонные интерференционного типа, широкодиапазонные многослойные, широкодиапазонные шиповидные);

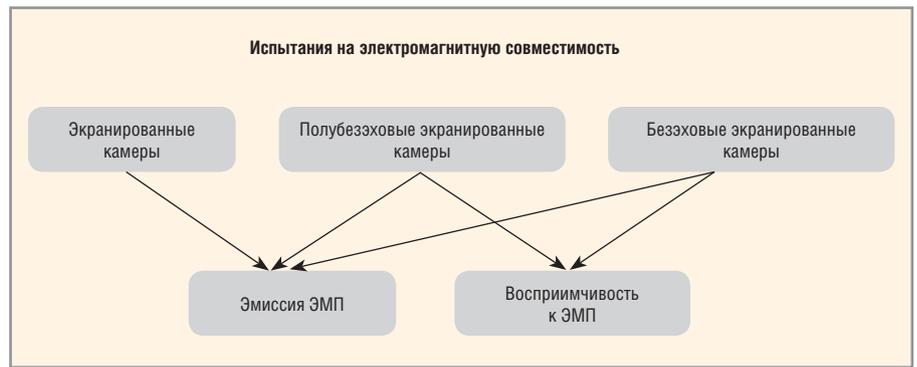


Рис. 5. Применение различных типов экранированных камер при испытаниях на электромагнитную совместимость

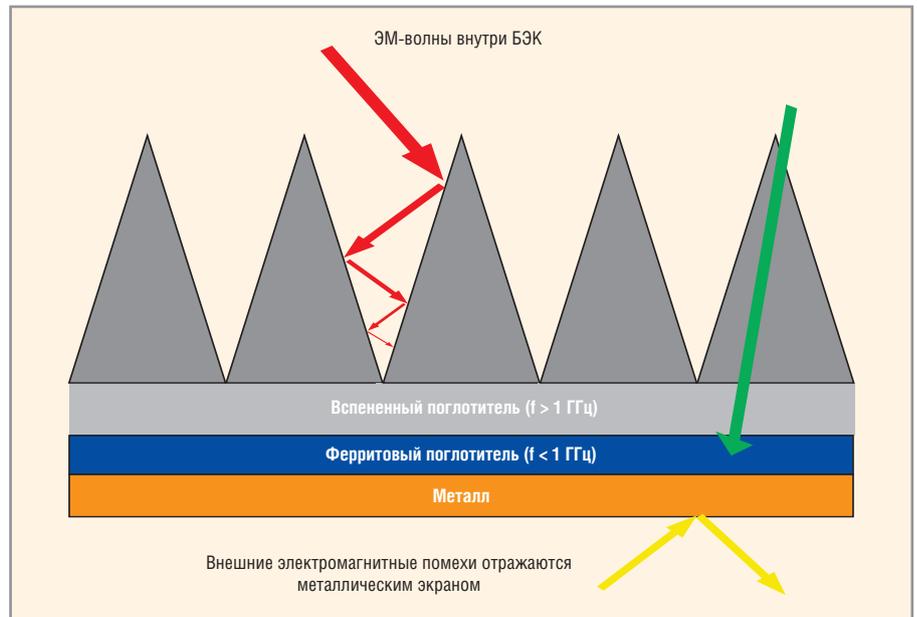


Рис. 6. Схема распространения электромагнитных волн на поверхностях БЭК (комбинированные РПМ) [4]

- радиопоглощающие материалы с магнитным поглощением;
- комбинированные радиопоглощающие материалы.

На рисунке 6 представлена схема распространения электромагнитной волны на поверхности безэховой экранированной камеры, которая представляет собой последовательное наложение на металлическую конструкцию радиопоглощающих материалов с различными свойствами и различных форм. Пирамидальный поглотитель представляет собой объёмный материал, например, состоящий из вспененного пенополистирола или пенополиуретана, с внесённым радиопоглощающим материалом (графит, железо и др.), такой концентрацией и состава, чтобы обеспечить поглощение радиоволн во всём их объёме. Вспененный материал позволяет обеспечить необходимые массогабаритные характери-

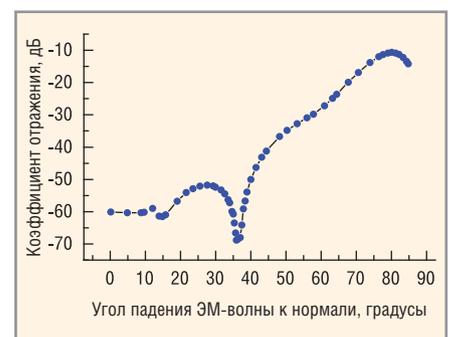


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения ЭМ-волны пирамидального поглотителя от угла падения к нормали [4]

стики, которые особенно важны при монтаже камеры. Вспененный поглотитель обычно эффективно поглощает электромагнитные волны выше 1 ГГц, а радиопоглощающие характеристики зависят от формы поглотителя (основание пирамиды) и угла падения радиоволны (см. рис. 7). Феррито-

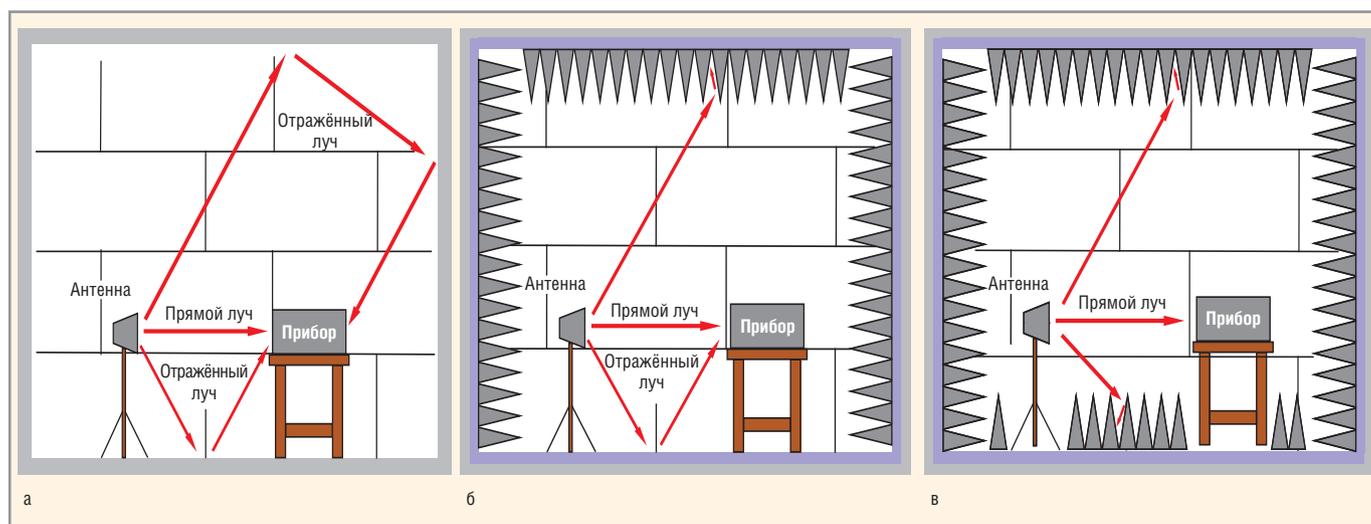


Рис. 8. Распространение электромагнитного излучения (геометрическое приближение) в различных типах камер: а – ЭК; б – ПБЭК; в – БЭК

вый поглотитель имеет плоскую форму и эффективен на частотах до 1 ГГц. Это ещё один критерий экранированных камер.

3. По форме:

- прямоугольные БЭК;
- профилированные БЭК;
- рупорные БЭК;
- БЭК с регулируемой торцевой стенкой;
- пирамидальные БЭК;
- БЭК с криволинейными стенами;
- БЭК с несколькими облучателями;
- биконические БЭК;
- универсальные БЭК, антенные залы.

В настоящее время наибольшее распространение получили прямоугольные и рупорные БЭК. Это, прежде всего, связано с их простой геометрической формой, что позволяет использовать простые, унифицированные по форме материалы и комплектующие для камер, различающихся габаритными размерами.

4. По размеру:

- большие БЭК;
- компактные БЭК;
- мини БЭК (боксы).

5. По конструктивному исполнению:

- сварные БЭК;
- сборно-разборные БЭК.

Преимуществами сварных БЭК является их меньшая стоимость. Кроме того, коэффициент экранирования у них на низких частотах теоретически выше. Недостатком является отсутствие возможности повторного монтажа.

Сборно-разборные БЭК конструктивно состоят из металлических панелей с экранирующими прокладками. Их конструкция позволяет при необходимости перемещать камеру с сохранением экранирующих свойств.

АО «ТЕСТПРИБОР» изготавливает и поставляет сборно-разборные экранированные (ТЕКО-Э), полубезэховые экранированные (ТЕКО-ПБЭК) и безэховые экранированные (ТЕКО-БЭК) камеры требуемых размеров с рабочим пространством 3, 5 и 10 м, соответствующие нормативным документам ГОСТ Р 50414-92 и ГОСТ CISPR 16-1-4-2013.

На рисунке 8 представлены траектории «лучей» (геометрическое приближение) излучающей антенны в процессе испытаний на восприимчивость к электромагнитному полю в различных типах камер.

В экранированной камере (см. рис. 8а) электромагнитная волна, излучённая антенной, в процессе распространения претерпевает многократное переотражение от стен, потолка и пола камеры. При этом за счёт интерференции волн формируется стоячая волна, и рабочая плоскость является неоднородной.

В случае распространения волны в БЭК и ПБЭК (см. рис. 8б и 8в) величина поля отражённой волны от поверхностей камеры значительно меньше падающей. Поэтому вклад стоячей волны в распределение поля незначителен, а поле в рабочей области однородно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ основных типов экранированных камер, а также поглощающих материалов, показывает, что наиболее удобными с точки зрения эксплуатации и монтажа являются сборно-разборные камеры со вспененным радиопоглощающим материалом. Для достижения высоких экранирую-

щих свойств подобных камер необходимо обеспечить высокую удельную проводимость и магнитную проницаемость в местах соединения металлических панелей. Такая задача успешно решается при совместном выполнении следующих условий:

- подбор материала и покрытия панелей и уплотнительных материалов согласно техническим требованиям;
- применение отработанной технологии сборки (монтажа) экранирующей камеры;
- обеспечение непрерывного контроля качества электрических и радиофизических характеристик сборной конструкции (особенно в местах соединений панелей).

АО «ТЕСТПРИБОР» является одной из немногих компаний в России, имеющих технологию сборки и контроля экранирующих свойств таких камер.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 50414-92. Оборудование для испытаний. Камеры экранированные. М. Госстандарт России. 1992.
2. ГОСТ CISPR 16-1-4-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1–4. Аппаратура для измерения радиопомех и помехоустойчивости. Антенны и испытательные площадки для измерения излучаемых помех. М. Стандартинформ. 2015.
3. Мицмахер М.Ю., Торгованов В.А. Безэховые камеры СВЧ. М. Радио и связь. 1982.
4. Foley Alexandra. Modeling an RF Anechoic Chamber Using Periodic Structures. www.comsol.com/blogs/modeling-rf-anechoic-chamber-using-periodic-structures.

ВЫСТАВКА СРЕДСТВ
И ТЕХНОЛОГИЙ НК



ОТРАСЛЕВЫЕ
КРУГЛЫЕ СТОЛЫ
«НК В ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

1 - 3 МАРТА 2017, МОСКВА

ЕЖЕГОДНЫЙ ВСЕРОССИЙСКИЙ ФОРУМ

ВЫСТАВКА СРЕДСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ НК

Более 100 экспонентов

- Разработчики и поставщики оборудования
- Сервисные компании
- Учебные и сертификационные центры
- Специализированные издания
- Национальные общества НК

- Руководители и ведущие специалисты-эксперты компаний авиационной, атомной, химической, нефтехимической, нефтяной, газовой, металлургической отраслей

Более 3200 посетителей

ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА

Круглые столы по вопросам применения НК в отраслях:

- Авиация и космос
- Строительство
- Промышленная безопасность
- Атомная промышленность
- Металлургия и машиностроение
- Электроэнергетика
- Железнодорожный транспорт
- Нефтегазовый комплекс
- НК в сварке

Межотраслевые направления и специальные темы:

- Антитеррористическая безопасность
- Обучение
- Медицинская диагностика
- Стандартизация
- Метрология и техническое регулирование
- Контроль покрытий



МОСКВА, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

www.expo.ronktd.ru

ОРГАНИЗАТОР

