

УДК 621.317.2

Обзор исследований в области разработки и применения реверберационных камер для испытаний на электромагнитную совместимость

Демаков А. В., Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р.

Актуальность: обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) является одной из основных задач, возникающих при разработке критичных радиоэлектронных средств (РЭС) с учетом их защиты от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. Увеличение плотности монтажа печатных плат, миниатюризация и интеграция электронной компонентной базы, а также увеличение частоты полезного сигнала и снижение уровня напряжений электропитания приводят к уменьшению уровня восприимчивости РЭС к электромагнитному полю (ЭМП). Испытания узлов и блоков РЭС на помехоэмиссию и помехоустойчивость являются дорогостоящими, поскольку требуют сложной измерительной оснастки (антенн, усилителей мощности, генераторов, анализаторов спектра и т.д.), а также специальных безэховых камер. Потребность в дешевых испытательных установках, с одновременным сохранением адекватности результатов, полученных с их помощью, приводит к поиску альтернативных средств для проведения испытаний, одним из которых является электромагнитная реверберационная камера (РК). Последние десятилетия характеризуются бурным развитием исследований различных аспектов работы РК, отраженных в многочисленных публикациях. **Целью работы** является систематизация современного состояния исследований по разработке РК и методов проведения испытаний с их помощью. **Результаты и их новизна:** работа содержит обзор существующих конструкций РК, методов разработки, оценки эффективности работы и особенностей испытаний, проводимых с их помощью. Элементами новизны работы являются выявленные общие подходы к проектированию РК. В частности, анализ показал следующее. Для обеспечения равномерного распределения ЭМП в рабочем объеме РК применяется процедура перемешивания типов волн, которая может быть осуществлена как посредством размещения в корпусе РК механических рассеивающих элементов, так и за счет изменения параметров сигнала (модуляция входного воздействия, изменение положения передающей антенны), возбуждающего ЭМП внутри рабочего объема РК. Показано, что на начальных этапах проектирования применяются аналитические модели для получения грубых оценок распределения ЭМП, а для получения точных результатов используются численные методы, позволяющие учесть при анализе ЭМП реальную конструкцию антенн, смесителей и других элементов конструкции РК. **Практическая значимость:** результаты исследования будут полезны техническим специалистам для понимания процессов возбуждения и оценки ЭМП внутри РК, а также при разработке новых технических решений РК.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, радиоэлектронные средства, реверберационная камера, помехоэмиссия, помехоустойчивость.

Библиографическая ссылка на статью:

Демаков А. В., Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р. Обзор исследований в области разработки и применения реверберационных камер для испытаний на электромагнитную совместимость // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 2. С. 151–190. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-02/09-Demakov.pdf>

Reference for citation:

Demakov A. V., Komnatnov M. E., Gazizov T. R. Review of research in the development and application of reverberation chambers for electromagnetic compatibility tests Systems of Control, Communication and Security, 2018, no. 2, pp. 151–190. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-02/09-Demakov.pdf> (in Russian).

Актуальность

Защита радиоэлектронных средств (РЭС) от преднамеренного силового воздействия электромагнитного поля (ЭМП) является одним из ключевых направлений исследований в области электромагнитной совместимости (ЭМС). Подобные исследования связаны с интенсивным развитием мощных источников СВЧ-излучения военного назначения и потенциальной возможностью их применения для противоправных действий. Поэтому актуально изучение механизмов и закономерностей поражающего действия излучаемых электромагнитных импульсов, определение критериальных уровней функционального поражения, а также разработка методов и средств для защиты РЭС [1]. Непреднамеренное электромагнитное излучение от РЭС также может быть использовано для несанкционированного доступа к информации и распознавания объектов. Как правило, данные исследования направлены на уменьшение помехоэмиссии РЭС, что способствует в будущем увеличению критической напряженности поля их функционального поражения [2].

Для обеспечения и проверки устойчивой работы проводится комплекс испытаний разрабатываемых РЭС на ЭМС [3]. В соответствии со стандартами [4-6], испытания на помехоустойчивость и помехоэмиссию проводят с применением реверберационной камеры (РК), внутри которой возбуждается ЭМП высокой напряженности с минимальными затратами на усиление подводимой мощности.

На текущий момент в отечественной литературе представлены результаты исследований вопросов излучения и регистрации негармонических широкополосных электромагнитных импульсов, разработан аналитический метод расчета полей во временной области от сложных структур и взаимодействия полей с объектами, построена нелинейная теория ЭМП связанных (не свободных) зарядов [7, 8]. Посредством экспериментальных, аналитических и численных методов исследована стойкость сверхвысокочастотных полупроводниковых приборов и радиоприемных устройств дециметрового и сантиметрового диапазона длин волн к направленным и случайным электромагнитным воздействиям различной частоты, длительности и формы [9]. Выполнена оценка влияния электромагнитных импульсов на работу электронно-компонентной базы РЭС [10, 11], также активно ведутся исследования, связанные с повышением помехоустойчивости критичных РЭС [12, 13] и структурированы основные положения по конструированию РЭС с учетом требований обеспечения ЭМС [14]. Однако в отечественной научной литературе отсутствует обзор, систематизирующий информацию о существующих конструкциях РК, методах перемешивания типов волн, способах формирования и статистических свойствах однородно-распределенного ЭМП. Цель работы – представить современное состояние исследований по разработке РК и методов проведения испытаний с их помощью.

1. Описание элементов конструкции РК

Устройство РК описано в военном стандарте MIL-STD 1377 [15] для измерения эффективности экранирования (ЭЭ) кабелей, входящих в состав радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) специального назначения [16]. Типовая кон-

струкция РК состоит из экранированного корпуса, внутри которого расположены передающая и приемная антенны, а также рассеивающий элемент (смеситель) (рис. 1).

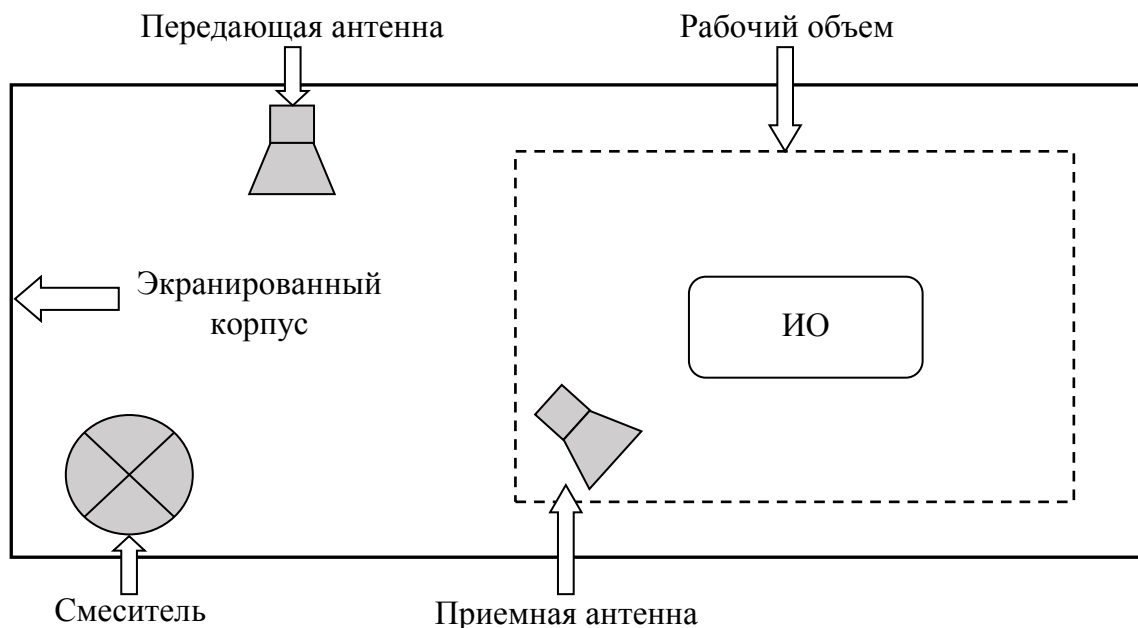


Рис. 1. Основные элементы конструкции РК [15]

При подведении сигнала к передающей антенне внутри экранированного корпуса возбуждается ЭМП, которое представляет собой суперпозицию возбуждаемых типов волн (мод). В области низких частот (порядка сотен мегагерц) в РК возбуждается ограниченное число типов волн, суперпозиция которых не позволяет формировать ЭМП с требуемой однородностью, что объясняет существование нижней граничной частоты рабочего диапазона РК.

Частоты возбуждаемых типов волн внутри экранированного корпуса могут быть вычислены по выражению для прямоугольного резонатора:

$$f_{m,n,p} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{H}\right)^2 + \left(\frac{p}{W}\right)^2},$$

где L, H, W – длина, высота и ширина экранированного корпуса, m, n, p – целые положительные числа, c – скорость света.

Число возбуждаемых типов волн N может быть определено как [17]

$$N(f) = \frac{8\pi}{3} \cdot V \cdot \frac{f^3}{c^3} - (L + H + W) \cdot \frac{f}{c} + \frac{1}{2},$$

где f – частота, V – объем корпуса.

Множественное отражение подводимой электромагнитной волны (ЭМВ) от стен корпуса образует структуру стоячей волны с неравномерными по амплитуде областями. Традиционно для обеспечения однородного распределения ЭМП внутри РК прибегают к изменению пространственного положения смесителя, что приводит к изменению граничных условий РК. Таким образом, ЭМП в РК считается статистически однородным, если в пределах заданной погрешности усредненные по всем положениям смесителя значения пространственной

ориентации и амплитуд напряженности одинаковы во всем рабочем объеме. Границы рабочего объема определяются расстоянием $\lambda / 4$ от стен корпуса, передающей антенны, смесителя [18]. При этом ИО будет подвергаться воздействию одного и того же ЭМП, независимо от его местоположения и ориентации внутри рабочего объема. Аналогично испытаниям на помехоустойчивость, при измерении помехоэмиссии принимаемая антенной мощность не будет зависеть от местоположения и ориентации ИО, что является ключевым преимуществом РК для воспроизводимости испытаний на ЭМС [19].

2. Методы перемешивания типов волн

Методы перемешивания типов волн разделяют на две основные группы: механические и электрические. К первой группе относят методы, основанные на расположении во внутреннем объеме РК рассеивающих металлических конструкций, а также на использовании экранирующих корпусов особой формы. Во вторую группу входят методы, согласно которым изменение во времени граничных условий распространения ЭМВ внутри РК достигается с помощью электронных средств.

2.1 Механические методы перемешивания типов волн

При проектировании РК широкое распространение получили смесители типа «Z-Fold» (рис. 2). Конструкция смесителя разработана в 1997 году совместно с компанией Lindgren RF и Центром разработки надводного вооружения ВМС США для проведения испытаний коммерческой РЭА и систем вооружения согласно IEC 1000-4-3 [20] в диапазоне частот от 80 МГц. Особенностью данного вида смесителей является механическая прочность конструкции и минимальные требования к системе вращающих смесители двигателей. Определено, что ориентированные друг напротив друга два смесителя данного типа позволяют добиться более высокой равномерности распространения ЭМП в рабочем объеме камеры [21].

Смеситель типа «Vent-plates» представляет собой восемь одинаковых прямоугольных металлических лопастей, размещенных на четырех плечах (рис. 3). Каждая панель может устанавливаться под любым углом относительно вертикали, что делает смеситель реконфигурируемым и позволяет вручную оптимизировать процесс перемешивания типов волн. Конструкция данного смесителя разработана на основе исследований [22] с использованием генетических алгоритмов. Оптимизируемая модель представляет собой конструкцию смесителя, в сферическом объеме вокруг которого размещены элементарные диполи и мониторы поля. В качестве целевой функции при оптимизации выбрано максимальное отклонение от среднего значения по амплитуде напряженности ЭМП, вычисленного в точках наблюдения поля в диапазоне частот 200–600 МГц. Параметрами оптимизации в исследовании являлись углы наклона металлических пластин, входящих в состав рассматриваемых конструкций смесителей. Определена оптимальная конструкция и выявлено, что линейное увеличение размеров смесителя увеличивает однородность поля в рабочем объеме, что может быть использовано при проектировании РК

больших размеров. Также на основе исследований сделан вывод, что равномерное распределение ЭМП может быть получено при оптимальной траектории перемещения смесителя простой формы.



Рис. 2. Смеситель «Z-fold» [21]

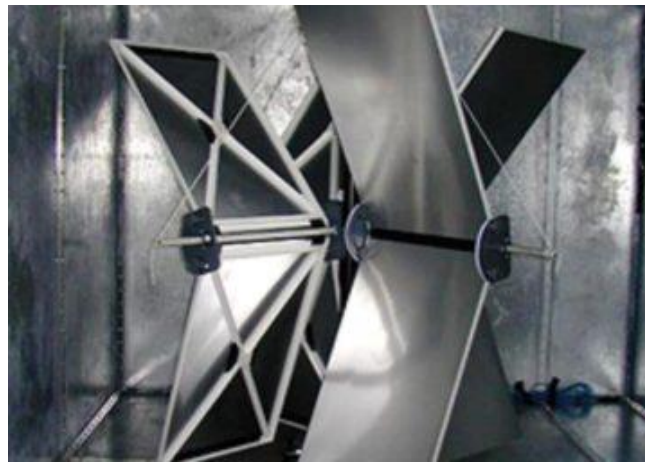


Рис. 3. Смеситель «Bend-plates» [22]

Конструкция нерегулярного реконфигурируемого смесителя [23] представляет собой расположенные на разных высотах дисковые платформы, на которых размещены прямоугольные металлические переотражатели ЭМВ (рис. 4). В отличие от конструкций, разрабатываемых с применением алгоритмов оптимизации, данный тип смесителя является простым в изготовлении, что позволяет вносить изменения в конструкцию и гибко настраивать РК под определенные требования испытаний.

Известно, что увеличение размеров механического смесителя приводит к уменьшению отклонения напряженности ЭМП во внутреннем объеме РК [22], однако при этом уменьшается рабочий объем. На данный момент ведутся исследования по оптимизации внутреннего пространства РК и нахождению оптимального расположения отражающих элементов. В работе [24] представлена конструкция РК, рабочий объем которой заключен в цилиндр, вокруг которого расположен массив из восьми Z-образных смесителей (рис. 5). Оптимальное расположение смесителей было получено на основе строгого анализа резонансных типов волн и электродинамического моделирования. Показано, что при данном расположении смесителей существенно расширяется рабочий объем и увеличивается амплитуда напряженности электрического поля. Однако данный способ реализации РК усложняет механизм двигателей для управления положением смесителей и увеличивается общий вес камеры.

Для увеличения рабочего пространства РК применяют смесители настенного исполнения, которые представляют собой несколько рядов прямоугольных отражателей, соединенных между собой петлями. При помощи линейного двигателя конструкция смесителя приводится в движение, изменяя взаимную ориентацию рассеивающих элементов, и тем самым изменяя граничные условия распространения ЭМВ в РК (рис. 6). Также возможно регулировать траекторию перемещения рассеивающих элементов, гибко настраивая РК под необходимые условия проведения испытаний [25].



Рис. 4. Нерегулярный реконфигурируемый смеситель [23]

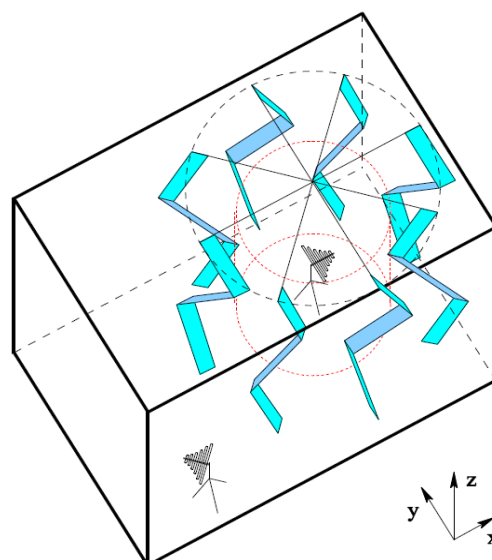


Рис. 5. РК с расположением восьми смесителей типа “Z-fold” по периметру рабочего объема [24]

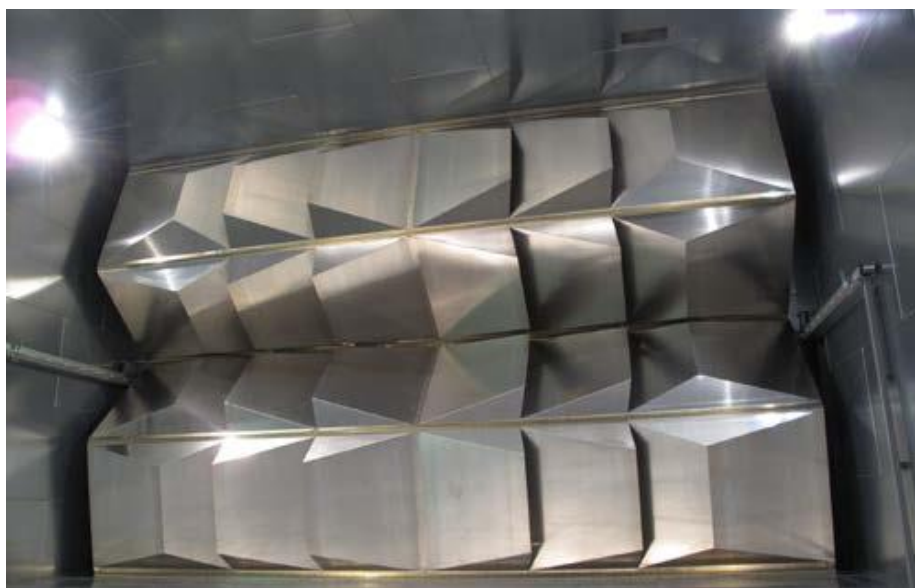


Рис. 6. Смеситель настенного исполнения [25]

Помимо прямоугольных рассеивающих элементов, в РК применяются конструкции сложной формы. Прямоугольная форма смесителей приводит к появлению локальных неоднородностей ЭМП в рабочем объеме РК, однако использование смесителей в форме полусферы позволяет устранить данный недостаток, а также снизить нижнюю граничную частоту рабочего диапазона РК [26]. Преимущественно, в РК используется ступенчатое вращение смесителя вокруг собственной оси, однако недостаточно изучены спиральные траектории вращения, с помощью которых возможно получить большее число положений смесителя, при которых распределения ЭМП в РК будут некоррелированными [27].

В большинстве случаев при проектировании РК используют параллелепипедную форму экранированного корпуса, что объясняется удобством структуры для анализа и простотой сборки конструкции. Однако поверхности кривой формы можно использовать для увеличения средней плотности типов волн на низких частотах за счет их фокусирующих свойств, и, как следствие, снижения нижней граничной частоты рабочего диапазона. На основе этого в Национальной Физической лаборатории Великобритании разработан корпус РК с цилиндрическим основанием и полусферическими формами на вершинах, внутри которого находится рабочая зона (рис. 7). Способ создания реверберации является высокоэффективным, поскольку вся мощность подводимого сигнала рассеивается в энергию ЭМП внутри экранированного корпуса. В отличие от РК со смесителями в виде вращающихся металлических лопастей, данный механизм не приводит к уменьшению рабочего объема [28]. Эти преимущества также позволяют упростить анализ вероятностных характеристик ЭМП в рабочем объеме [29, 30]. Для данной формы корпуса показатель качества Q_c может быть вычислен как

$$Q_c = Q_0 \sqrt{\frac{f}{c} \left[1 + \zeta \frac{c}{f} \right]^{-1}},$$

где ζ – переменная, зависящая от формы экранирующего корпуса РК (для сферической формы $\zeta = [9(4\pi/3)^{-1/3}/16] / R$), а Q_0 – может быть найдена как

$$Q_0 = (3/2)(V/S)\sqrt{\pi\mu\sigma},$$

где S – площадь поперечного сечения, μ и σ – магнитная проницаемость и проводимость металла экранирующего корпуса.

Оценка нижней граничной частоты для предельного случая $f_{min} \geq \zeta c$ может быть представлена как

$$f_{min} \approx \left[\frac{16R\zeta}{3N_{BW}Q_0} \right]^2 c,$$

а для $f_{min} \leq \zeta c$:

$$f_{min} \approx \left[\frac{N_{BW} \cdot Q_0}{8\pi V} \right]^{2/5} c,$$

где N_{BW} – число типов волн, вносящих наибольший вклад в результирующее ЭМП.

На основе исследований по гибридизации акустической и электромагнитной РК, разработана РК на основе тканевого металлизированного материала (рис. 8). В составе конструкции отсутствуют смесители, а эффект реверберации достигается за счет “встряхивания” гибких стен корпуса. Данная техника перемешивания типов волн создает значительный сдвиг резонансных частот, за счет чего рабочий диапазон охватывает более низкие частоты по сравнению с жесткой конструкцией корпуса РК. Подобные РК широко применяются для испытаний аппаратуры, входящей в состав радиолокационных и спутниковых систем, а также летательных аппаратов. По аналогии разрабатываются РК, в которых изменение граничных условий обеспечивается

за счет применения вибростенда в составе конструкции [31]. Для более точного аналитического описания статистических свойств ЭМП на разных частотах используют несколько видов функций распределения вероятностей. Данный подход апробирован на РК с тканевой основой при анализе компонент напряженности электрического поля в 5000 частотных точках, в диапазоне частот от 200 МГц до 4 ГГц. Выявлена сходимость статистических свойств измеренных данных с рассматриваемыми функциями распределения [32].



Рис. 7. РК сферической формы [28]



Рис. 8. РК на основе тканевого проводящего материала [32]

2.2 Электронные методы перемешивания типов волн

Возможность электрического перемешивания типов волн была обоснована в исследованиях РК с механическим перемешиванием, в которых рассмотрена модуляция входного сигнала для изменения граничных условий [33, 34]. Методы электронного перемешивания типов волн изначально разрабатывались для решения проблем, присущих механическим методам, таких как большой занимаемый объем смесителей внутри экранированного корпуса и необходимость применения мощных двигателей для их перемещения.

Если предполагать, что РК представляет собой эргодическую стационарную динамическую систему, то статистические свойства ЭМП в рабочем объеме камеры останутся неизменными, если для изменения граничных условий будет использовано изменение частоты входного воздействия. Частотный метод перемешивания типов волн заключается в использовании в качестве задающего воздействия частотно-модулированного сигнала. Первые исследования в данном направлении связаны с использованием гауссова импульса для возбуждения ЭМП в РК при проведении испытаний на помехоустойчивость. Формирование требуемого задающего воздействия с заданной длительностью выполнялось с помощью узкополосных фильтров. Основным преимуществом частотного метода перемешивания

является формирование однородного ЭМП в реальном времени без ожидания полного цикла перемешивания и усреднения характеристик поля для их анализа. В ранних работах на примере [35] показано, что время, требуемое для проведения одного испытания в РК с частотным методом перемешивания, в 200 раз меньше по сравнению с временными затратами при испытании в РК с механическим перемешиванием. Оценка распределения ЭМП в РК с частотным перемешиванием типов волн может быть выполнена на основе анализа отклонения времени задержки распространяемого в РК сигнала вместо прямых измерений напряженности электрического поля. Систематический и случайный джиттер, выявляемый в принимаемом сигнале, дает достаточную информацию для анализа эффективности перемешивания типов волн. Кроме того, информация о фазе принятого сигнала используется для оценки когерентности и мгновенной энергии. Предложенный метод может быть использован для имитации ЭМП, возбуждаемых вследствие переходных процессов при задержке питания и отключении РЭС [36].

РК на низких частотах характеризуется конечным числом возбуждаемых типов волн, что в итоге приводит к неоднородному распределению ЭМП в нижней области диапазона рабочих частот. Для уменьшения неоднородности разработан метод возбуждения РК с помощью нескольких антенн [37]. Перемешивание типов волн осуществляется с помощью многоэлементной антенной системы. Основная идея данного механизма возбуждения заключается в использовании когерентных задающих воздействий, не перекрывающихся по частоте. Однако применение данного подхода не приводит к росту однородности поля в рабочем объеме. Тем не менее, использование частично коррелированных сигналов для возбуждения ЭМП в РК позволяет добиться приемлемых характеристик формируемого поля [38]. Данный подход был апробирован в РК объемом 13 м^3 , в которой пять конических монополюсных антенн были размещены ортогонально вертикальным стенкам. За счет корреляции между задающими воздействиями отклонение напряженности поля в рабочем объеме не превышало 3 дБ на частотах от 100 МГц по сравнению с РК с металлическими смесителями, для которой данное условие соблюдается на частотах выше 400 МГц. Данный метод эффективен, когда амплитуда и фаза подводимых к антеннам сигналов управляются одновременно с помощью синхронизированных сигнальных модуляторов. Используемый в работе [39] подход позволяет учесть все взаимные связи между передающими антеннами и структурой РК посредством вычисления собственных и взаимных импедансов. Показано, что механизм перемешивания типов волн при помощи массива антенн применим для проведения испытаний в низкочастотной области (от 100 МГц).

Перемешивание типов волн за счет реактивно нагруженных антенн заключается в возбуждении ЭМП в РК несколькими реактивно-нагруженными антеннами [40]. Особенность метода заключается в том, что каждая антенна будет принимать часть энергии ЭМП из внутреннего объема РК, а затем повторно излучать её с дополнительной фазовой задержкой, тем самым

имитируя перемещение стен корпуса и изменяя граничные условия, что соответствует требованиям международного стандарта [49].

Перемешивание типов волн за счет изменения положения передающей антенны впервые было рассмотрено в работе [41] на примере возбуждения ЭМП в РК с помощью вращающегося дипольного излучателя. Анализ статистических данных принятой антенной мощности в рабочем объеме производился на частотах 500 МГц и 1 ГГц. Полученные на основе измеренных данных кривые функции распределения удовлетворительно согласуются с идеализированными [42-44]. На основе строгого анализа возбуждаемых типов волн в РК наблюдалось, что с ростом числа вращаемых по линейной траектории излучателей увеличивается однородность ЭМП. По критерию согласования статистических характеристик измеряемого ЭМП с идеализированными функциями распределения предлагаемый подход не уступает механическому методу перемешивания, что говорит о возможности его применения при разработке РК [45, 46].

Метод с коммутационным перемешиванием ЭМВ в РК основан на изменении граничных условий без использования механических смесителей и массива антенн. На данный момент метод не получил экспериментального подтверждения своей эффективности, однако суть метода заключается в установке вместо смесителей нескольких металлических пластин разного размера на заданном расстоянии от внутренних стен корпуса камеры. При помощи электрического контакта между пластинами, который создается с помощью коммутационных переключателей, граничные условия внутри РК изменяются, а каждая комбинация соединенных с корпусом пластин соответствует определенному распределению поля в рабочем объеме. Таким образом, для РК с N пластинами общее количество некоррелированных распределений ЭМП составит $2N$ [16].

3. Оценки эффективности РК

Оценка показателей качества работы РК выполняется при помощи метрики, основанной на статистическом анализе измеренных значений напряженности электрического поля. Для решения данной задачи РК принято рассматривать как эргодическую стационарную динамическую систему. Эргодическими системами в статистической физике принято называть стационарные динамические системы, у которых среднее значение ансамбля реализаций процесса в системе эквивалентно усредненному значению ансамбля реализаций по времени. Таким образом, через достаточно долгое время каждая статистическая характеристика множества состояний процесса будет равномерно распределена по всему пространству системы. Данное предположение позволяет описать будущее состояние процесса без его точного математического описания. Результирующее ЭМП внутри РК может быть представлено как бесконечная сумма возбуждаемых типов волн, которые зависят от формы, размера, потерь и диэлектрических свойств экранирующего корпуса. В свою очередь, все типы возбуждаемых волн имеют собственный вклад в результирующее поле, которое определяется в зависимости от типа

источника ЭМВ, ориентации и положения смесителей. Изменение положения приемной антенны, вращение смесителя или изменение частоты входного воздействия не влияют на распределение вероятностей, характеризующее результирующее распределение поля в РК.

Для оценки эффективности работы РК выделяют четыре группы показателей [47]:

1. Показатели однородности ЭМП – усредненные (по пространственному положению смесителей) значения напряженности ЭМП не должны отличаться более чем на 3 дБ в рабочем диапазоне частот. В идеализированном случае ЭМП в рабочем объеме считается однородным:

$$\langle |E_x|^2 \rangle = \langle |E_y|^2 \rangle = \langle |E_z|^2 \rangle = \frac{E_0^2}{3},$$

где знак $\langle \cdot \rangle$ означает усреднение по ансамблю реализаций для каждого положения смесителя, E_0 – постоянная величина напряженности ЭМП.

Коэффициент анизотропии $A_{\alpha\beta}$ и полный коэффициент анизотропии A_{tot} определяют равномерность поляризации. Они могут быть рассчитаны как:

$$A_{tot} = \sqrt{\frac{A_{xy}^2 + A_{yz}^2 + A_{zx}^2}{3}},$$

$$A_{\alpha\beta} = \frac{\frac{|E_\alpha|^2}{P_i} - \frac{|E_\beta|^2}{P_i}}{\frac{|E_\alpha|^2}{P_i} + \frac{|E_\beta|^2}{P_i}},$$

где α, β – индекс прямоугольной компоненты электрического поля для заданного положения смесителя, $|E_\alpha|$ и $|E_\beta|$ – измеренные компоненты напряженности электрического поля в заданной точке рабочего объема, P_i – мощность, подводимая к передающей антенне для заданного положения смесителя.

Коэффициент анизотропии $A_{\alpha\beta}$ можно рассматривать как нормализованное значение расстояния между двумя декартовыми компонентами поля. Граничные случаи, когда $A_{\alpha\beta} = +1$ или $A_{\alpha\beta} = -1$, характеризуют идеальную линейную поляризацию поля в плоскости $\alpha\beta$, а в случае $A_{\alpha\beta} = 0$ поле считается изотропным. Полный коэффициент анизотропии A_{tot} является общей метрикой, определяющей нормированное среднеквадратичное значение трех измеренных компонент поля. Поскольку значения величин $|E_\alpha|$ и $|E_\beta|$ заранее неизвестны, то коэффициенты анизотропии необходимо рассматривать как случайные величины с определенными функциями распределения в соответствии с этапом цикла перемешивания типов волн. Для удобства величины $A_{\alpha\beta}$ и A_{tot} определяются как функции усредненных значений поля. Усредненные коэффициенты анизотропии позволяют оценить производительность РК как функцию частоты. Пороговые уровни данных показателей для РК со «средним» (-5 дБ) и «качественным» (-10 дБ)

перемешиванием типов волн с обоснованием данных величин представлены в работе [48].

Коэффициенты неоднородности поля аналогичны коэффициентам анизотропии и определяются как:

$$I_{tot} = \sqrt{\frac{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2}{3}},$$

$$I_\alpha(r_1, r_2) = \frac{\frac{|E_\alpha(r_1)|^2}{P_i} - \frac{|E_\alpha(r_2)|^2}{P_i}}{\frac{|E_\alpha(r_1)|^2}{P_i} + \frac{|E_\alpha(r_2)|^2}{P_i}},$$

где r_1 и r_2 – точки расположения датчиков поля, $I_\alpha(r_1, r_2)$ и I_{tot} – коэффициенты неоднородности поля, приводят к их усредненным значениям аналогично показателям анизотропии.

Наиболее известная метрика оценки однородности поля представлена в руководстве к стандарту Европейского космического агентства ECSS [49], согласно которому однородность поля определяется с помощью прямых измерений напряженности поля в восьми точках, определяющих границы рабочего объема. Датчики напряженности электрического поля должны быть расположены на расстоянии не менее $\lambda_{нгр} / 2$ ($\lambda_{нгр}$ – нижняя граничная длина волны РК) от стен корпуса, смесителей и антенн. Измерения должны быть проведены не менее чем на 45 частотах, разнесенных в логарифмическом масштабе. Минимальное количество пространственных положений смесителя должно составлять не менее 10. Изначально определяется максимум амплитуды каждой составляющей напряженности электрического поля, возникающей при полном вращении смесителя ($\varphi_j = \varphi_1, \dots, \varphi_N$), после чего данная величина нормируется на среднюю подводимую к РК мощность P_i :

$$\tilde{E}_{\alpha,i} = \frac{\max_{\varphi_j = \varphi_1, \dots, \varphi_N} |E_\alpha(r_i)|_{\varphi_j}}{\sqrt{P_i}},$$

где α – индекс прямоугольной компоненты электрического поля, j – положение смесителя, $i = 1, \dots, 8$ – номер датчика.

Отклонение между измеренными значениями рассчитывается для отдельных компонент $\langle \tilde{E}_\alpha \rangle$ и абсолютной величины напряженности электрического поля $\langle \tilde{E}_{total} \rangle$ по выражениям:

$$\langle \tilde{E}_\alpha \rangle = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \tilde{E}_{\alpha,i},$$

$$\langle \tilde{E}_{total} \rangle = \frac{1}{24} \sum_{\alpha=\{x,y,z\}} \sum_{i=1}^8 \tilde{E}_{\alpha,i}.$$

Девияция для прямоугольных составляющих σ_α и абсолютного значения σ_{total} напряженности электрического поля в рабочем объеме определяются как

$$\sigma_{\alpha} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (\tilde{E}_{\alpha,i} - \langle \tilde{E}_{\alpha} \rangle)}{8-1}},$$

$$\sigma_{total} = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=\{x,y,z\}} \sum_{i=1}^8 (\tilde{E}_{\alpha,i} - \langle \tilde{E}_{\alpha} \rangle)}{24-1}}.$$

Значение девиации $\sigma_{\xi_{dB}}$, выраженной в децибелах, находится как

$$\sigma_{\alpha_{dB}} = 20 \log_{10} \frac{\sigma_{\alpha} + \langle \tilde{E}_{\alpha} \rangle}{\langle \tilde{E}_{\alpha} \rangle}.$$

При анализе распределения ЭМП также оцениваются основные показатели РК, такие как минимальная рабочая частота, вносимые потери, максимально допустимые габариты ИО.

Обобщенный показатель качества РК Q характеризует зависимость амплитуды напряженности возбуждаемых электрической и магнитной составляющих ЭМП от подводимой к РК мощности. Однако расчет данного показателя для большого числа типов волн нецелесообразен, поэтому на практике используется базовое определение Q , которое в 2 раза превышает отношение энергии, накопленной за цикл перемешивания, к энергии, рассеиваемой за цикл:

$$Q = \frac{\omega \cdot \varepsilon \cdot \bar{E}^2 \cdot V}{2P} = \frac{\omega \cdot \bar{B}^2 \cdot V}{2\mu P},$$

где V – рабочий объем, P – подводимая мощность, ω – циклическая частота.

Для одномерного случая данный показатель может быть увеличен в 3 раза для учета энергии остальных двух составляющих ЭМП, а также выражен через среднеквадратическое отклонение напряженности электрического поля σ^2 :

$$Q = \frac{3 \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \sigma^2 \cdot V}{P}.$$

Известно, что величина Q распределена по закону Фишера-Снедекора (F -распределение) [50]. При заданном рабочем объеме среднее арифметическое значение величины Q (в отличие от среднего гармонического) проявляется в явную асимптотическую зависимость от геометрических размеров РК. В асимптотическом высокочастотном пределе обратная зависимость величины Q от частоты определяется дисбалансом между коэффициентами качества для TM - и TE -типов волн, а также соотношениями размеров РК [51].

В качестве дополнительного показателя эффективности РК можно использовать волновое сопротивление РК, которое определяется на основе статистических свойств напряженности электрического и магнитного полей. Данная метрика может быть использована для проведения аналогии с испытательными устройствами, принцип работы которых основан на распространении квази-поперечных волн ($TEM/GTEM$ -камеры, полосковые линии) [52].

2. Статистические показатели – все характеристики ЭМП внутри РК считаются случайными величинами, характеризующимися собственными функци-

ями распределения вероятности. Усредненная выборка напряженности поля в каждой точке рабочего объема должна соответствовать ожидаемому распределению. В идеализированном случае все статистические параметры ЭМП являются постоянными величинами. Детальная оценка статистических свойств измеренных значений производится путем сравнения гистограммы распределения с предполагаемым идеальным распределением данных параметров.

3. Показатель подобия ЭМП – распределение ЭМП в рабочем объеме для каждого пространственного положения смесителя должно в значительной мере отличаться. Пространственное распределение ЭМП в РК для фиксированного положения смесителя представляет собой сложную модальную структуру, представляющую собой суперпозицию конечного числа резонансных типов волн, а при изменении граничных условий РК структура ЭМП изменяется. Изменение структуры поля при изменении граничных условий является качественным показателем РК. Анализ подобия ЭМП выполняется с использованием автокорреляционной функции, которая показывает, насколько N измерений в одной точке рабочего объема схожи с N измерениями в другой точке. Автокорреляционная функция находится как

$$\rho(r) = \frac{1}{N} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)(x_{i+r} - \langle x \rangle)}{s_x^2},$$

где: N – число положений смесителя; x_1, x_2, \dots, x_N – последовательность измеренных значений компоненты ЭМП; $\langle x \rangle$ – усредненное значение, s_x^2 – дисперсия измеренной компоненты.

Случай, когда $|\rho| = 1$, соответствует строгой автокорреляции оцениваемой величины, а при $|\rho| \approx 0$ автокорреляция оцениваемой величины отсутствует. На практике достаточно сложно добиться отсутствия автокорреляции даже для некоррелируемых данных. В руководстве [49] указано, что при $|\rho| < 0,37$ ЭМП считается некоррелированным, однако в работе [53] предложен более высокий порог для оценки корреляционных характеристик ЭМП в РК. На практике достаточно сложно оценить подобие ЭМП с помощью автокорреляционной функции ввиду большого числа исходных данных, в связи с этим применяется автокорреляционная функция с единичным сдвигом («lag-1 autocorrelation function»).

4. Показатель диффузии поля – множественные отражения ЭМВ внутри РК создают «диффузное» поле. Сигналы, распространяющиеся при таком распределении, характеризуются длительными временными задержками и узкой полосой частот, в которой проявляется их когерентность. Понятие диффузного поля тесно связано с понятием однородности поля, в котором отсутствует определенное направление распространения ЭМВ в рабочем объеме. В исследованиях, связанных с применением РК для анализа систем связи и имитации многолучевого канала распространения радиоволн, предлагается ряд показателей эффективности для РК как источника диффузного поля. В реальных условиях распространения радиоволн, в которых работает беспроводная связь, многолучевой канал распространения представляет собой комбинацию прямого и

побочного распространения радиоволн. Большинство показателей диффузии ЭМП в РК основывается на модели стационарного некоррелированного рассеяния (рис. 9), которая используется для исследования систем беспроводной связи.

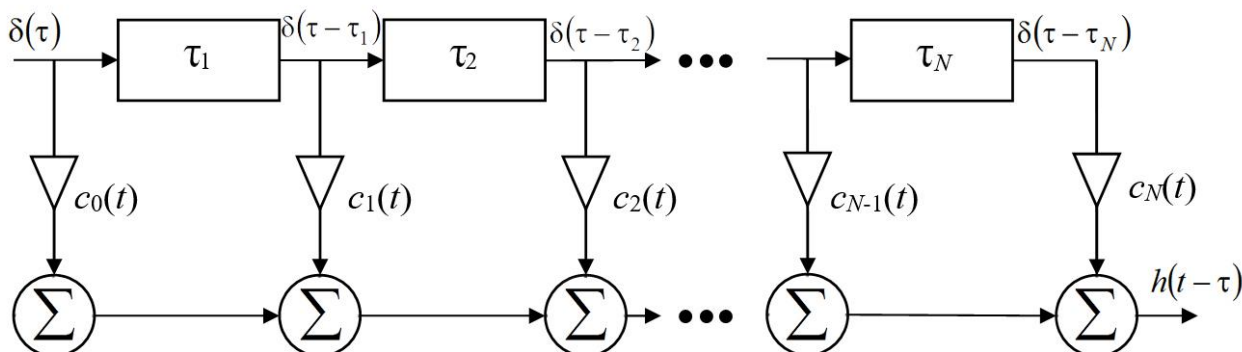


Рис. 9. Модель стационарного некоррелированного рассеяния с линиями задержки для стохастического канала связи

В приведенной модели (рис. 9) функция $h(t, \tau)$ представляет собой дискретно-временную импульсную характеристику канала распространения радиоволн. Коэффициенты $c_i(t)$ описывают изменение амплитуды и фазы i -го отражения входного импульса. Таким образом, импульсную характеристику можно записать как

$$h(t, \tau) = \sum_{i=0}^N c_i(t) \delta(\tau - \tau_i).$$

Импульсная характеристика обычно определяется для n -го состояния перемешивания типов волн и определяется как результат обратного преобразования Фурье (ОПФ) коэффициента передачи S_{21} между передающей и приемной антеннами:

$$h_n(t) = ОПФ(S_{21n}(f)).$$

Для испытаний систем связи стандарта GSM РК применяется для имитации канала распространения радиоволн вне прямой видимости. За счет использования ряда механических смесителей совместно с внесением радиопоглощающего материала внутрь экранирующего корпуса РК возможна имитация канала распространения с различной вероятностью битовой ошибки (от $8,015 \cdot 10^{-4}$ до $1,215 \cdot 10^{-2}$) [54]. На примере имитации канала распространения сигналов с OFDM- и CDMA-модуляцией показано, что при возбуждении РК узкополосным сигналом возникают неустраняемые ошибки в принимаемом сигнале в процессе вращения смесителя, а использование для данной цели широкополосного сигнала приводит к малым изменениям средней принимаемой мощности и средней напряженности электрического поля во внутреннем объеме РК [55, 56].

В таблице 1 приведены основные измеряемые в РК величины и представлены их эмпирически определенные функции распределения вероятности.

Таблица 1 – Функции распределения вероятности величин, подлежащие измерению при определении показателей качества РК [47]

Величины	Описание	Функция распределения вероятности
E_{α}^{\parallel} E_{α}^{\perp} H_{α}^{\parallel} H_{α}^{\perp}	Синфазная (\parallel) и квадратурная (\perp) составляющие ($\alpha = x, y, z$) E или H -поля	Нормальное распределение (распределение Гаусса)
$ E_{\alpha} $ $ H_{\alpha} $	Составляющая напряженности E или H -поля	Хи-распределение с двумя степенями свободы (распределение Рэлея)
$\angle E_{\alpha}$ $\angle H_{\alpha}$	Составляющая фазы E или H -поля	Равномерное распределение в диапазоне $[0, 2\pi)$
$ E_{\alpha} ^2$ $ H_{\alpha} ^2$	Составляющая плотности энергии E или H -поля	Распределение Хи-квадрат с двумя степенями свободы (экспоненциальное распределение)
$ E $ $ H $	Полная амплитуда E или H -поля	Хи-распределение с шестью степенями свободы
$ E ^2$ $ H ^2$	Полная плотность энергии E или H -поля	Распределение Хи-квадрат с шестью степенями свободы
Q	Обобщенный показатель качества	Распределение Фишера-Снедекора (F -распределение) с шестью и четырьмя степенями свободы
Z^{\parallel} Z^{\perp}	Синфазное \parallel и квадратурное \perp волновое сопротивление	Распределение Пирсона VII-типа
$\angle Z$	Фаза волнового сопротивления	Равномерное распределение в диапазоне $[0, 2\pi)$
$ Z $	Абсолютное значение волнового сопротивления	Лог-логистическое распределение

4. Моделирование и разработка РК

Современные РК разрабатываются с использованием аналитических моделей и численных методов, с помощью которых возможно оценить основные показатели качества работы на этапе проектирования. Суперпозиция ряда плоских ЭМВ со случайным направлением распространения позволяет симитировать стохастически однородное ЭМП в РК. Использование конечного ряда плоских ЭМВ, отобранных на основе теории спектральных выборок, позволяет ускорить процесс численного анализа и эффективно вычислять токи, наводимые на ИО [57, 58]. На основе данного подхода разработана модель РК, ЭМП в которой представляется как суперпозиция 100 плоских ЭМВ, а численное интегрирование для получения результирующего ЭМП выполнено

методом Монте-Карло [59]. Для предварительного анализа РК применяются грубые модели, которые используются для оценки уровней воздействия на ИО в рабочем объеме и сравнения с результатами численного анализа, выполненного на основе других математических методов [60]. При моделировании учет влияния смесителей на распределение ЭМП приводит к увеличению скорости сходимости результатов, а для дискретизации модели целесообразно применять полиномы второго порядка [61]. Разрабатываемые модели позволяют проводить анализ конструкции РК как во временной, так и в частотной областях [62], а также с учетом потерь на излучение и отражение ЭМВ [63].

Точная оценка нижней граничной частоты рабочего диапазона РК может быть выполнена на основе совместного анализа нескольких показателей качества, основанных на энергетических характеристиках и напряженности электрического поля, а также определения соответствия измеренных показателей априорному закону распределения [64, 65]. В работах [66-69] исследуется метод выявления локальных областей с высокой неоднородностью напряженности ЭМП на основе представления ЭМП в РК как суперпозиции ряда плоских ЭМВ, предполагая эргодичность первых двух моментов амплитуды углового спектра. Вычисление максимального значения амплитуды напряженности электрического поля выполняется исходя из его среднеквадратичного значения и обратного коэффициента вариации функции распределения амплитуды рассматриваемой выборки измеренных данных.

Современные исследования, связанные с разработкой и использованием РК для проведения испытаний РЭА, направлены на более детальное изучение переходных процессов, возникающих в процессе перемешивания типов волн, и более точную оценку статистических характеристик ЭМП в установившемся режиме. Определено, что изменение во времени граничных условий для механических и электрических методов перемешивания типов волн должно выполняться с определенной скоростью. Превышение предельного значения скорости перемешивания может привести к значительной неравномерности ЭМП, что необходимо учитывать при калибровке и измерениях [70].

Применение взаимнокорреляционной функции напряженности электрического поля при различных положениях смесителя позволяет определить усредненный процесс перемешивания типов волн. Исходя из предположения о статистической эквивалентности переходов смесителя в любом заданном временном промежутке $t = t - t_0$ в течении каждого перехода, стационарные последовательности измеренных величин напряженности электрического поля при перемешивании были получены путем транспонирования (нестационарных) измеренных временных откликов. Статистический анализ ряда измеренных подобных последовательностей является альтернативой индивидуальному анализу отдельных положений смесителя [71]. Для анализа переходных процессов при перемешивании предложено рассматривать распределения Вейбулла для описания статистических характеристик компонент напряженности электрического поля E_R [72-74]. Известные распределения компонент напряженности E_R являются частными случаями распределения Вейбулла, что можно использовать для определения

статистических свойств ЭМП в неустановившемся режиме РК. Для определения числа независимых положений механического смесителя, при которых распределения поля в РК будут некоррелированными, производится измерение напряженности электрического поля в заданном числе точек рабочего объема при различных положениях смесителя с последующей проверкой на их линейную корреляцию. В качестве порога корреляции используется коэффициент Пирсона, который корректируется в зависимости от числа точек наблюдения [75]. В отличие от методов, основанных на расчете автокорреляционной функции измеренных данных, метод пространственных степеней свободы требует меньшего времени для вычисления и обеспечивает меньшее смещение оценки для коррелированных выборок. Определение числа независимых выборок может быть использовано для объяснения неопределенности измерений с изменением частоты, положений смесителя и занимаемого ИО объема пространства [76]. Для анализа распределения ЭМП с конечным числом возбуждаемых типов волн используются статистические методы, основанные на обобщенном распределении экстремальных значений, не требующие априорного закона распределения ЭМП [77]. Ускорение процесса расчёта статистических характеристик может быть выполнено путем использования двумерной нормировки. Данный подход заключается в представлении результатов, полученных методом предельной вероятности, в виде упрощенных функций с использованием техники нормализации. Также возможно представление кумулятивных функций распределения как замкнутых кривых без применения численного интегрирования [78].

Также одно из направлений исследований при разработке РК ориентировано на использование несовершенных сред реверберации для проведения испытаний. Для анализа статистических свойств ЭМП в несовершенных реверберационных средах разрабатываются нелинейные физические модели [79]. В [80] представлена методика измерения помехоэмиссии крупных промышленных устройств, испытание которых в аккредитованных РК невозможно ввиду крупных габаритов ИО. Представлено сравнение статистических характеристик излучаемой эмиссии ЭМП в РК и неидеальных реверберационных помещениях, таких как промышленная мастерская и офис. Показано, что результаты измерения составляющих ЭМП в неидеальных средах реверберации отличаются от данных, полученных в образцовой РК, не более чем на 5–10 дБ. Показано, что статистические характеристики ЭМП, полученные в неидеальных РК, совпадают с характеристиками ЭМП для образцовой РК, а разница между измеренными значениями компонент ЭМП может быть учтена с помощью поправочных коэффициентов.

Однако остается ряд нерешенных задач в рамках проблемы разработки РК, в частности, связанных с возникновением локальных областей с высокой неоднородностью напряженности ЭМП, которые выявляются как при численном анализе, так и при реальных измерениях. Причиной данного явления принято считать конечность числа типов волн, определяющих результирующее поле внутри РК, однако это предположение не получило прямого экспериментального доказательства [81].

5. Измерения в РК

Учитывая особенности конструкции и распределения ЭМП, методы испытаний на ЭМС с применением РК также обладают рядом отличий от других испытательных устройств. При испытаниях на помехоустойчивость воздействующее на ИО ЭМП не зависит от диаграммы направленности передающей антенны [82]. Мощность, рассеиваемая передающей антенной, вдвое превышает мощность, рассеиваемую в той же самой антенне в режиме приема [83]. Также стоит отметить, что оценка излучаемой ИО мощности не может быть выполнена точно без априорных данных о поляризационных свойствах и амплитуде формируемого ЭМП [84]. Изначально РК использовались для испытаний на помехоустойчивость благодаря возможности формировать ЭМП высокой напряженности, однако доказано, что РК является взаимным устройством, что может быть использовано для проведения испытаний на помехоэмиссию [85]. Экспериментально данное предположение было подтверждено на основе измерений ЭМП от микрополосковых линий в диапазоне частот от 200 МГц до 2 ГГц, которые согласуются с результатами теоретического анализа. В то же время в работе [86] показано, что возможно измерение эмиссии сложных печатных плат в широком диапазоне частот. Испытания на помехоэмиссию также могут проводиться во временной области в отличие от классического подхода со свипированием по частоте. При таком подходе к измерению не требуется предварительная калибровка РК перед проведением испытаний, а усреднение принятой мощности антенной в процессе перемешивания типов волн может быть выполнено с помощью анализатора спектра [87].

Помимо испытаний на ЭМС, РК широко применяются для оценки экранирующих свойств корпусов блоков РЭА. В стандарте [20] описана процедура измерения ЭЭ с использованием РК на основе метода вложенных камер. Исследуемый корпус с расположенными внутри смесителями помещают в рабочий объем РК и проводят сравнение усредненных значений напряженности электрического поля с экраном и без экрана для определения количественной меры затухания поля внутри корпуса. Предложенный метод измерения применим только для крупногабаритных корпусов с размерами более 2 метров, поскольку в корпусах с малыми размерами отсутствует место для расположения смесителей и антенн. Данная методика была модифицирована с учетом размеров вложенного корпуса и апертуры, что позволило получить более точные оценки ЭЭ корпусом [88]. Для упрощения процедуры измерения ЭЭ крупногабаритных корпусов, применяемых в электронной промышленности, используются методы измерения ЭЭ во временной области с помощью двух антенн. Предлагаемые измерения во временной области позволяют значительно сократить время испытания, однако для получения точных результатов необходимо использовать антенны с высоким КПД [89]. Измерение ЭЭ малогабаритных корпусов выполняется посредством измерения напряженности электрического поля монополюсом в трех точках объема внутри корпуса [90]. Выявлено, что полученные значения ЭЭ зависят от пространственной ориентации приемного монополя внутри кор-

пуса как в области низких, так и высоких частот. Для решения данной неоднозначности применяется метод многоточечного отбора, согласно которому на основе измеренных напряженностей электрического поля в ряде точек пространства корпуса рассчитываются среднее и минимальное значения ЭЭ корпусом [91]. По сравнению с методом пробных испытаний [92], измерения на основе предлагаемого метода являются повторяемыми и позволяют получить больше данных о распределении ЭМП внутри исследуемого экрана. В работе [93] предложена конструкция проводной антенны для измерения ЭЭ исследуемого корпуса. Конструкцию антенны располагают внутри исследуемого экранящего корпуса, что позволяет более точно оценить ЭЭ в широком диапазоне частот. С помощью РК также возможно измерение ЭЭ планарных образцов материалов, устанавливаемых в апертуру пустотелого прямоугольного экранящего корпуса. Для упрощения процедуры измерения ЭЭ планарных материалов вместо корпуса также используются ТЕМ-камеры [94, 95]. Для оценки ЭЭ различных коаксиальных кабелей разработана методика на основе численных методов, которая заключается в суммировании плоских ЭМВ со случайными параметрами в частотной области и вычислении тока, индуцированного в экран кабеля, с помощью метода конечных разностей во временной области [96]. По найденному току в экране определяется напряжение на нагрузке кабеля, которое сравнивается с усредненным значением напряжения на нагрузке для каждого положения механического смесителя. Выполнено сравнение между результатами численного анализа и экспериментом, которое выявило удовлетворительную сходимость.

Помимо измерений помехоэмиссии, помехоустойчивости и экранящих свойств различных РЭС в РК проводят измерения среднего коэффициента поглощения объектов произвольной формы [97]. Оценка коэффициента поглощения основана на сравнении значений эффективного сечения поглощения ИО и радиопоглощающего материала той же формы. Данный метод применим для численного моделирования, посредством которого возможно формирование материала поглотителя произвольной формы. Оценка эффективного сечения поглощения объектов с потерями также может быть выполнена на основе измерения мощности, рассеиваемой ИО при падении плоской ЭМВ [98]. РК используется в данном случае как источник плоской ЭМВ, а среднее значение эффективного сечения поглощения определяется за счет изменения направления распространения ЭМВ путем изменения граничных условий РК. Представленные математические модели на основе предложенного метода для определения эффективного сечения поглощения сферы и цилиндра показывают удовлетворительную сходимость с результатами эксперимента. Также показано, что объекты, расположенные близко друг к другу, могут иметь эффективное сечение поглощения, отличное от суммы отдельных поперечных сечений для каждого объекта. Также РК применяются для проведения биомедицинских исследований [99-103]. Например, в [104] выполнен численный анализ удельной мощности поглощения биологическими объектами в РК с помощью метода моментов, метода конечных разностей во временной области и гибридного метода. Показано, что для оценки среднего коэффициента поглощения определенного

органа животного целесообразно использование гибридного метода ввиду меньших затрат на вычислительные ресурсы. Кроме того, современные исследования в области РК также направлены на измерение характеристик направленности антенн [105, 106].

Заключение

Представлен обзор современного состояния исследований в области разработки РК. Акцентируется внимание на проведении испытаний на ЭМС в РК. Описаны различные варианты исполнения элементов конструкции, наиболее часто используемых при разработке РК и обеспечивающих равномерное распределение ЭМП. Приведены различные показатели для оценки эффективности работы РК, основанные на статистическом анализе измеренной напряженности электрического поля в точках рабочей зоны. Описаны современные подходы к разработке РК, включающие анализ конструкции РК с помощью аналитических методов и электродинамического моделирования.

Результаты проведенного анализа отечественной и зарубежной литературы будут полезны техническим специалистам для понимания процессов возбуждения и оценки ЭМП внутри РК, а также при разработке новых технических решений РК.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.

Литература

1. Беличенко В. П., Буянов В. И., Кошелев В. И. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. – Новосибирск: Наука, 2015. – 473 с.
2. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий / Под ред. Т. Р. Газизова. – Томск: Томский государственный университет, 2002. – 206 с.
3. Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р. О совместных климатических и электромагнитных испытаниях радиоэлектронной аппаратуры // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2014. № 4. С. 67-78.
4. DO-160. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment. 2010.
5. ГОСТ РВ 6601-001-2008. Оборудование бортовое авиационное. Общие требования к восприимчивости при воздействии электромагнитных помех и методики измерения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 49 с.
6. SAE J 1113/27. Immunity to radiated electromagnetic fields - mode stir reverberation method. 2005.
7. Сахаров К. Ю. Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров. – М.: МИЭМ, 2006. – 159 с.
8. Подосенов С. А., Потапов А. А., Соколов А. А. Импульсная электродинамика широкополосных радиосистем и поля связанных структур / под ред. А. А. Потапова. – М.: Радиотехника, 2003. – 720 с.

9. Усыченко В. Г., Сорокин Л. Н. Стойкость сверхвысокочастотных радиоприемных устройств к электромагнитным воздействиям. – М.: Радиотехника, 2017. – 288 с.
10. Ключник А. В., Пирогов Ю. А., Солодов А. В., Тюльпаков В. Н. Влияние радиоимпульсов высокого уровня мощности на работу смесителей // Радиотехника и электроника. 2011. № 3. С. 375-378.
11. Пирогов Ю. А., Солодов А. В. Повреждение интегральных микросхем в полях радиоизлучения // Журнал Радиоэлектроники. 2013. № 6. С. 1-38. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun13/15/text.pdf> (дата обращения 11.05.2018).
12. Помехозащита радиоэлектронных систем управления летательными аппаратами и оружием / под ред. В. Н. Лепина. – М.: Радиотехника, 2017. – 416 с.
13. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / под ред. В. И. Кравченко. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
14. Князев А. Д., Кечиев Л. Н., Петров Б. В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учётом электромагнитной совместимости. – М.: Радио и связь, 1989 – 224 с.
15. MIL-STD-1377. Department of defense test method standard: effectiveness of cable, connector, and weapon enclosure shielding and filters in precluding hazards of electromagnetic radiation to ordnance (HERO), measurement of (20 Aug 1971). 1971.
16. Serra R., Marvin A. C., Moglie F., Primiani V. M., Cozza A., Arnaut L. R., Huang Y., Hatfield M. O., Klingler M., Leferink F. Reverberation chambers a la carte: An overview of the different mode-stirring techniques // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. 2017. Vol. 6. № 1. P. 63-78. doi: 10.1109/МЕМС.2017.7931986.
17. Liu B. H., Chang D. C., Ma M. T. Eigenmodes and the composite quality factor of a reverberating chamber, NBS Technical Note 1066. – National Bureau of Standards, 1983. 62 p.
18. Hill D. A. Boundary fields in reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2005. Vol. 47. № 2. P. 281-290. doi: 10.1109/ТЕМС.2005.847370.
19. Дмитриева Н. Ю., Крохалев Д. И. Теоретическое исследование особенностей применения метода испытаний технических средств на помехоустойчивость с использованием реверберационных камер // Технологии ЭМС. 2016. Т. 58. № 3. С. 38-50.
20. IEC 1000-4-3. Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3: Testing and measurement techniques, Section 3: Radiated radio-frequency electromagnetic field immunity test (revision of IEC 801-3). 1995.
21. IEC 61000-4-21. Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4-21: Testing and measurement techniques – Reverberation chamber test methods. 2011.
22. Clegg J., Marvin A. C., Dawson J. F., Porter S. J. Optimization of stirrer designs in a reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2005. Vol. 47. № 4. P. 824-832. doi: 10.1109/ТЕМС.2005.860561.

23. Arnaut L. R. Compound exponential distributions for undermoded reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2002. Vol. 44. № 3. P. 452-457. doi: 10.1109/TEMPC.2002.801757.

24. Fedeli D., Iuale M., Primiani V. M., Moglie F. Experimental and numerical analysis of a carousel stirrer for reverberation chambers // Proc. of 2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (6-10 August). – Edinburgh, 2012. P. 228-233. doi: 10.1109/ISEMC.2012.6351779.

25. Jensen P. T., Munster A. P., Behnke R. B. Practical industrial EUT testing in reverb chamber experiences, findings and practical observations on high amplitude immunity testing of industrial equipment in reverberation chamber // Proc. of 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (1-4 September). – Gothenburg, 2014. P. 274-279. doi: 10.1109/EMCEurope.2014.6930916.

26. Selemeni K., Richalot E., Legrand O., Picon O., Mortessagne F. Energy localization effects within a reverberation chamber and their reduction in chaotic geometries // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2017. Vol. 59. № 2. P. 325-333. doi: 10.1109/TEMPC.2016.2617322.

27. Arnaut L., Moglie F., Bastianelli L., Primiani V. M. Helical stirring for enhanced low-frequency performance of reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2017. Vol. 59. № 4. P. 1016-1026. doi: 10.1109/TEMPC.2016.2641386.

28. Karandikar Y. B., Nyberg D., Jamaly N., Kildal P. S. Mode counting in rectangular, cylindrical, and spherical cavities with application to wireless measurements in reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2009. Vol. 51. № 4. P. 1044-1046. doi: 10.1109/TEMPC.2009.2033119.

29. Arnaut L. R., West P. D. Electromagnetic reverberation near a perfectly conducting boundary // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2006. Vol. 48. № 2. P. 359-371. doi: 10.1109/TEMPC.2006.874087.

30. Arnaut L. R., Serra R., West P. D. Statistical anisotropy in imperfect electromagnetic reverberation // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2017. Vol. 59. № 1. P. 3-13. doi: 10.1109/TEMPC.2016.2606540.

31. Kouveliotis N. K., Trakadas P. T., Capsalis C. N. Theoretical investigation of the field conditions in a vibrating reverberation chamber with an unstirred component // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2003. Vol. 45. № 1. P. 77-81. doi: 10.1109/TEMPC.2002.808072.

32. Serra R., Leferink F., Canavero F. “Good-but-imperfect” electromagnetic reverberation in a VIRC // Proc. of 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (14-19 August). – Long Beach, 2011. P. 954-959. doi: 10.1109/ISEMC.2011.6038446.

33. Vallon H., Cozza A., Monsef F., Chauchat A. S. Time-reversed excitation of reverberation chambers: improving efficiency and reliability in the generation of radiated stress // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 2. P. 364-370. doi: 10.1109/TEMPC.2015.2478420.

34. Arnaut L. R. Maximum rate of frequency scanning for distortionless signal generation in electromagnetic reverberation chambers // IEEE Transactions on

Electromagnetic Compatibility. 2008. Vol. 50. № 4. P. 787-793. doi: 10.1109/TEMC.2008.2006579.

35. Hatfield M. O. Shielding effectiveness measurements using mode-stirred chambers: a comparison of two approaches // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1988. Vol. 30. № 3. P. 229-238. doi: 10.1109/15.3301.

36. Arnaut L. R. Pulse jitter, delay spread, and Doppler shift in mode-stirred reverberation // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 6. P. 1717-1727. doi: 10.1109/TEMC.2016.2585546.

37. Hill D. A. Electronic mode stirring for reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1994. Vol. 36. № 4. P. 294-299. doi: 10.1109/15.328858.

38. Cozza A., Koh W. J., Ng Y. S., Tan Y. Y. Controlling the state of a reverberation chamber by means of a random multiple-antenna stirring // Proc. of 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (21-24 May). – Singapore, 2012. P. 765-768. doi: 10.1109/APEMC.2012.6237826.

39. Leo A. D., Primiani V. M., Russo P., Cerri G. Low-frequency theoretical analysis of a source-stirred reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2017. Vol. 59. № 2. P. 315-324. doi: 10.1109/TEMC.2016.2613402.

40. Voges E., Eisenburger T. Electrical mode stirring in reverberating chambers by reactively loaded antennas // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2007. Vol. 49. № 4. P. 756-761. doi: 10.1109/TEMC.2007.908281.

41. Huang Y., Edwards D. J. A novel reverberating chamber: the source-stirred chamber // Proc. of 2011 Eighth International Conference on Electromagnetic Compatibility (21-24 September). – Edinburgh, 1992. P. 120-124.

42. Cerri G., Primiani V. M., Pennesi S., Russo P. Source stirring mode for reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2005. Vol. 47. № 4. P. 815-823. doi: 10.1109/TEMC.2005.858757.

43. Cerri G., Primiani V. M., Monteverde C., Russo P. A theoretical feasibility study of a source stirring reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2009. Vol. 51. № 1. P. 3-11. doi: 10.1109/TEMC.2008.2009530.

44. Monteverde C., Koepke G. H., Holloway C. L., Ladbury J. M., Hill D. A., Primiani V. M., Russo P. Source stirring technique for reverberation chambers; experimental investigation // Proc. of 2008 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (8-12 September). – Hamburg, 2008. P. 1-6. doi: 10.1109/EMCEUROPE.2008.4786833.

45. Amador E., Besnier P. Source stirring analysis in a reverberation chamber based on modal expansion of the electric field // Proc. of 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (16-22 August). – Dresden, 2015. P. 434-439. doi: 10.1109/ISEMC.2015.7256201.

46. Kunthong J., Bunting C. F. Source-stirring and mechanical-stirring reverberation chamber measurement comparison for 900 MHz and 1800 MHz // Proc. of 2009 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (17-21 August). – Austin, 2009. P. 193-196. doi: 10.1109/ISEMC.2009.5284555.

47. Serra R. Reverberation chambers through the magnifying glass: an overview and classification of performance indicators // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. 2017. Vol. 6. № 2. P. 76-88. doi: 10.1109/MEMC.0.7990003.

48. Arnaut L. R., Serra R., West P. Validating reverberation chamber performance based on assessment of field anisotropy // Proc. of 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (5-9 September). – Wroclaw, 2016. P. 205-210. doi: 10.1109/EMCEurope.2016.7739171.

49. Space engineering. Electromagnetic compatibility handbook. – ESA Requirements and Standards Division, ESTEC, 2012. – 228 p.

50. Kostas J. G., Boverie B. Statistical model for a mode-stirred chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1991. Vol. 33. № 4. P. 366-370. doi: 10.1109/15.99120.

51. Arnaut L. R. Statistics of the quality factor of a rectangular reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2003. Vol. 45. № 1. P. 61-76. doi: 10.1109/TEMC.2002.808021.

52. Serra R., Nijenhuis J. Wave impedance in reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2014. Vol. 56. № 1. P. 231-234. doi: 10.1109/TEMC.2013.2268318.

53. Lemoine C., Besnier P., Drissi M. Estimating the effective sample size to select independent measurements in a reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2008. Vol. 50. № 2. P. 227-236. doi: 10.1109/TEMC.2008.919037.

54. Ferrara G., Migliaccio M., Sorrentino A. Characterization of GSM non-line-of-sight propagation channels generated in a reverberating chamber by using bit error rates // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2007. Vol. 49. № 3. P. 467-473. doi: 10.1109/TEMC.2007.903040.

55. Remley K. A., Floris S. J., Shah H. A. Static and dynamic propagation-channel impairments in reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2011. Vol. 53. № 3. P. 589-599. doi: 10.1109/TEMC.2010.2100823.

56. Tait G. B., Hager C. E., Baseler T. T., Slocum M. B. Ambient power density and electric field from broadband wireless emissions in a reverberant space // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 1. P. 307-313. doi: 10.1109/TEMC.2015.2503925.

57. West J. C., Bunting C. F., Rajamani V. Accurate and efficient numerical simulation of the random environment within an ideal reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2012. Vol. 54. № 1. P. 167-173. doi: 10.1109/TEMC.2011.2170692.

58. Hill D. A., Ladbury J. M. Spatial-correlation functions of fields and energy density in a reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2002. Vol. 44. № 1. P. 95-101. doi: 10.1109/15.990715.

59. Magdowski M., Tkachenko S. V., Vick R. Coupling of stochastic electromagnetic fields to a transmission line in a reverberation chamber // IEEE

Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2011. Vol. 53. № 1. P. 308-317. doi: 10.1109/TEMC.2010.2097267.

60. Coates A., Sasse H. G., Coleby D. E., Duffy A. P., Orlandi A. Validation of a three-dimensional transmission line matrix (TLM) model implementation of a mode-stirred reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2007. Vol. 49. № 4. P. 734-744. doi: 10.1109/TEMC.2007.903697.

61. Orjubin G., Richalot E., Mengue S., Wong M.-F., Picon O. On the FEM modal approach for a reverberation chamber analysis // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2007. Vol. 49. № 1. P. 76-85. doi: 10.1109/TEMC.2006.888187.

62. Amador E., Lemoine C., Besnier P., Laisne A. Reverberation chamber modeling based on image theory: investigation in the pulse regime // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2010. Vol. 52. № 4. P. 778-789. doi: 10.1109/TEMC.2010.2049576.

63. Cozza A. The role of losses in the definition of the overmoded condition for reverberation chambers and their statistics // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2011. Vol. 53. № 1. P. 296-307. doi: 10.1109/TEMC.2010.2081993.

64. Mengue S., Richalot E., Picon O. Comparison between different criteria for evaluating reverberation chamber functioning using a 3-D FDTD algorithm // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2008. Vol. 50. № 2. P. 237-245. doi: 10.1109/TEMC.2008.921049.

65. Pirkl R. J., Remley K. A., Patane C. S. L. Reverberation chamber measurement correlation // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2012. Vol. 54. № 3. P. 533-545. doi: 10.1109/TEMC.2011.2166964.

66. Hill D. A. Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1998. Vol. 40. № 3. P. 209-217. doi: 10.1109/15.709418.

67. Gifuni A. Deterministic approach to estimate the upper bound of the electric field in a reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2011. Vol. 53. № 3. P. 570-578. doi: 10.1109/TEMC.2010.2102359.

68. Huikan L. Spatial correlation functions of fields in a reverberation chamber based on expansion of spherical Bessel functions // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2006. Vol. 48. № 2. P. 427-428. doi: 10.1109/TEMC.2006.874086.

69. Hill D. A. Uniqueness of plane wave integral representation for idealized fields in reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2015. Vol. 57. № 3. P. 584-586. doi: 10.1109/TEMC.2015.2406253.

70. Arnaut L. R. On the maximum rate of fluctuation in mode-stirred reverberation // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2005. Vol. 47. № 4. P. 781-804. doi: 10.1109/TEMC.2005.859061.

71. Arnaut L. R. Time-domain measurement and analysis of mechanical step transitions in mode-tuned reverberation: characterization of instantaneous field // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2007. Vol. 49. № 4. P. 772-784. doi: 10.1109/TEMC.2007.908955.

72. Orjubin G., Richalot E., Mengue S., Picon O. Statistical model of an undermoded reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2006. Vol. 48. № 1. P. 248-251. doi: 10.1109/TEMC.2006.870705.

73. Lemoine C., Besnier P., Drissi M. Investigation of reverberation chamber measurements through high-power goodness-of-fit tests // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2007. Vol. 49. № 4. P. 745-755. doi: 10.1109/TEMC.2007.908290.

74. Chen X. Using Akaike information criterion for selecting the field distribution in a reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2013. Vol. 55. № 4. P. 664-670. doi: 10.1109/TEMC.2012.2225107.

75. Pfennig S. A general method for determining the independent stirrer positions in reverberation chambers: adjusting the correlation threshold // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 4. P. 1252-1258. doi: 10.1109/TEMC.2016.2567541.

76. Chen X. Experimental investigation of the number of independent samples and the measurement uncertainty in a reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2013. Vol. 55. № 5. P. 816-824. doi: 10.1109/TEMC.2013.2242473.

77. Orjubin G. Maximum field inside a reverberation chamber modeled by the generalized extreme value distribution // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2007. Vol. 49. № 1. P. 104-113. doi: 10.1109/TEMC.2006.888172.

78. Choi S., Park S. A bivariate normalization approach for characterizing reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2013. Vol. 55. № 6. P. 1350-1353. doi: 10.1109/TEMC.2013.2265039.

79. Arnaut L. R. Limit distributions for imperfect electromagnetic reverberation // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2003. Vol. 45. №2. P. 357-377. doi: 10.1109/TEMC.2003.811301.

80. Vogt-Ardatjew R., Lundgren U., Romero S. F., Leferink F. On-site radiated emissions measurements in semireverberant environments // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2017. Vol. 59. № 3. P. 770-778. doi: 10.1109/TEMC.2016.2623380.

81. Primiani V. M., Moglie F. Numerical simulation of reverberation chamber parameters affecting the received power statistics // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2012. Vol. 54. № 3. P. 522-532. doi: 10.1109/TEMC.2011.2167337.

82. Hoijer M. Maximum power available to stress onto the critical component in the equipment under test when performing a radiated susceptibility test in the reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2006. Vol. 48. № 2. P. 372-384. doi: 10.1109/TEMC.2006.874665.

83. Junqua I., Degauque P., Liénard M., Issac F. On the power dissipated by an antenna in transmit mode or in receive mode in a reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2012. Vol. 54. № 1. P. 174-180. doi: 10.1109/TEMC.2011.2166271.

84. Hu D., Wei G., Pan X., Ji K. Investigation of the radiation immunity testing method in reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic

Compatibility. 2017. Vol. 59. № 6. P. 1791-1797. doi: 10.1109/TEMC.2017.2698141.

85. Hill D. A. Reciprocity in reverberation chamber measurements // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2003. Vol. 45. № 1. P. 117-119. doi: 10.1109/TEMC.2002.808047.

86. Hill D. A., Camell D. G., Cavcey K. H., Koepke G. H. Radiated emissions and immunity of microstrip transmission lines: theory and reverberation chamber measurements // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1996. Vol. 38. № 2. P. 165-172. doi: 10.1109/15.494619.

87. Krauthauser H. G. On the measurement of total radiated power in uncalibrated reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2007. Vol. 49. № 2. P. 270-279. doi: 10.1109/TEMC.2007.897122.

88. Holloway C. L., Hill D. A., Ladbury J., Koepke G., Garzia R. Shielding effectiveness measurements of materials using nested reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2003. Vol. 45. № 2. P. 350-356. doi: 10.1109/TEMC.2003.809117.

89. Tian Z., Huang Y., Xu Q. Efficient methods of measuring shielding effectiveness of electrically large enclosures using nested reverberation chambers with only two antennas // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2017. Vol. 59. № 6. P. 1872-1879. doi: 10.1109/TEMC.2017.2696743.

90. Fedeli D., Gradoni G., Primiani V. M., Moglie F. Accurate analysis of reverberation field penetration into an equipment-level enclosure // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2009. Vol. 51. № 2. P. 170-180. doi: 10.1109/TEMC.2009.2013456.

91. Wang Q., Cheng E., Qu Z. On the shielding effectiveness of small-dimension enclosures using a reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2011. Vol. 53. № 3. P. 562-569. doi: 10.1109/TEMC.2011.2157164.

92. Holloway C. L., Hill D. A., Sandroni M., Ladbury J. M., Coder J., Koepke G., Marvin A. C., He Y. Use of reverberation chambers to determine the shielding effectiveness of physically small, electrically large enclosures and cavities // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2008. Vol. 50. № 4. P. 770-782. doi: 10.1109/TEMC.2008.2004580.

93. Tait G. B., Hager C., Slocum M. B., Hatfield M. O. On measuring shielding effectiveness of sparsely moded enclosures in a reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2013. Vol. 55. № 2. P. 231-240. doi: 10.1109/TEMC.2012.2220779.

94. Höijer M., Kroon L. Field statistics in nested reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2013. Vol. 55. № 6. P. 1328-1330. doi: 10.1109/TEMC.2013.2249510.

95. Loughry T. A., Gurbaxani S. H. The effects of intrinsic test fixture isolation on material shielding effectiveness measurements using nested mode-stirred chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1995. Vol. 37. № 3. P. 449-452. doi: 10.1109/15.406535.

96. Primiani V. M., Moglie F., Pastore A. P. Modeling of the reverberation chamber method for determining the shielding properties of a coaxial cable // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2008. Vol. 50. № 2. P. 246-251. doi: 10.1109/TEMC.2008.922793.

97. Xu Q., Huang Y., Xing L., Tian Z., Zhou J., Chen A., Zhuang Y. Average absorption coefficient measurement of arbitrarily shaped electrically large objects in a reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 6. P. 1776-1779. doi: 10.1109/TEMC.2016.2587679.

98. Carlberg U., Kildal P.-S., Wolfgang A., Sotoudeh O., Orlenius C. Calculated and measured absorption cross sections of lossy objects in reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2004. Vol. 46. № 2. P. 146-154. doi: 10.1109/TEMC.2004.826878.

99. Capstick M. H., Kuehn S., Berdinas-Torres V., Gong Y., Wilson P. F., Ladbury J. M., Koepke G., et al. A radio frequency radiation exposure system for rodents based on reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2017. Vol. 59. № 4. P. 1041-1052. doi: 10.1109/TEMC.2017.2649885.

100. Senic D., Sarolic A., Holloway C. L., Ladbury J. M. Whole-body specific absorption rate assessment of lossy objects exposed to a diffuse field inside a reverberant environment // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2017. Vol. 59. № 3. P. 813-822. doi: 10.1109/TEMC.2016.2626968.

101. Tsigros C., Piette M., Vandenbosch G. A. E., Troyen D. V. Radiated immunity in reverberation and semianechoic rooms: conditions for equivalence // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2013. Vol. 55. № 2. P. 222-230. doi: 10.1109/TEMC.2012.2219869.

102. Fall A. K., Besnier P., Lemoine C., Zhadobov M., Sauleau R. Experimental dosimetry in a mode-stirred reverberation chamber in the 60-GHz band // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 4. P. 981-992. doi: 10.1109/TEMC.2016.2550803.

103. Chakarothai J., Wang J., Fujiwara O., Wake K., Watanabe S. A hybrid MoM/FDTD method for dosimetry of small animal in reverberation chamber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2014. Vol. 56. № 3. P. 549-558. doi: 10.1109/TEMC.2014.2304958.

104. Chakarothai J., Shi J., Wang J., Fujiwara O., Wake L., Watanabe S. Numerical techniques for SAR assessment of small animals in reverberation chamber // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. 2015. Vol. 4. № 1. P. 57-66. doi: 10.1109/MEMC.2015.7098514.

105. Fiumara V., Fusco A., Iadarola G., Matta V., Pinto I. M. Free-space antenna pattern retrieval in nonideal reverberation chambers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 3. P. 673-677. doi: 10.1109/TEMC.2016.2539351.

106. Grudén M., Hallbjörner P., Rydberg A. Large ad hoc shielded room with removable mode stirrer for mobile phone antenna tests // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2013. Vol. 55. № 1. P. 21-27. doi: 10.1109/TEMC.2012.2204758.

References

1. Belichenko V. P., Bujanov V. I., Koshelev V. I. *Sverhshirokopolosnye impul'snye radiosistemy* [Ultra-wideband pulse radiosystems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2015. 473 p. (in Russian).
2. Gazizov T. R. *Jelektromagnitnyj terrorizm na rubezhe tysjacheletij* [Electromagnetic terrorism at the turn of the millennium]. Tomsk, Tomsk State University, 2002. 206 p. (in Russian).
3. Komnatnov M.E, Gazizov T.R. On joint climatic and electro-magnetic testing of radioelectronic equipment. *Doklady TUSUR*, 2014, vol. 34, no. 4, pp. 39-45 (in Russian).
4. DO-160. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. 2010.
5. State Standart RB 6601-001-2008. Aviation equipment. General requirements for susceptibility to electromagnetic interference and measurement techniques. Moscow, Standartinform, 2008. 49 p. (in Russian).
6. SAE J 1113/27. Immunity to radiated electromagnetic fields - mode stir reverberation method. 2005.
7. Saharov K. Ju. *Izluchateli sverhkorotkih jelektromagnitnyh impul'sov i metody izmerenij ih parametrov* [Transmitters of ultrashort electromagnetic pulses and methods for measuring their parameters]. Moscow, Moscow State Institute of Electronics and Mathematics Publ., 2006. 159 p. (in Russian).
8. Podosenov S. A., Potapov A. A., Sokolov A. A. *Impul'snaja jelektrodinamika shirokopolosnyh radiosistem i polja svjazannyh struktur* [Pulsed electro-dynamics of broadband radio systems and fields of coupled structures]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 720 p. (in Russian).
9. Usychenko V. G., Sorokin L. N. *Stojkost' sverhvysochastotnyh radiopriemnyh ustrojstv k jelektromagnitnym vozdeystvijam* [The immunity of ultrahigh-frequency radio receivers for electromagnetic effects]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2017. 288 p. (in Russian).
10. Klyuchnik A. V., Pirogov Yu. A., Solodov A. V., Tyul'pakov V. N. Effect of high power RF impulses on the mixer operation. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2011, vol. 56, no. 3, pp. 347-350. doi: 10.1134/S106422691103003X
11. Pirogov Ju. A., Solodov A. V. Failure of integrated circuits in the fields of radio emission. *Journal of Radio Electronics*, 2013, no. 6, pp. 1-38. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jun13/15/text.pdf> (accessed 11 May 2018) (in Russian).
12. Lepin V. N., Antipov V. N., Vikent'ev A. Ju., Koltyshev E. E., Muhin V. V., Trushhinskij A. Ju., Frolov A. Ju., Jankovskij V. T. *Pomehozashhita radiojelektronnyh sistem upravlenija letatel'nymi apparatami i oruzhiem* [Immunity of radio-electronic control systems for aircraft and weapons]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2017. 416 p. (in Russian).
13. Kravchenko V. I., Bolotov E. A., Letunova N. I. *Radiojelektronnye sredstva i moshhnye jelektromagnitnye pomehi* [Radioelectronic facilities and

powerful electromagnetic interference]. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1987. 256 p. (in Russian).

14. Knjazev A. D., Kechiev L. N., Petrov B. V. *Konstruirovanie radiojelektronnoj i jelektronno-vychislitel'noj apparatury s uchjotom jelektromagnitnoj sovmestivosti* [Design of radioelectronic and electronic-computer facilities with account for electromagnetic compatibility]. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1989. 224 p. (in Russian).

15. MIL-STD-1377. Department of defense test method standard: effectiveness of cable, connector, and weapon enclosure shielding and filters in precluding hazards of electromagnetic radiation to ordnance (HERO), measurement of (20 Aug 1971). 1971.

16. Serra R., Marvin A. C., Moglie F., Primiani V. M., Cozza A., Arnaut L. R., Huang Y., Hatfield M. O., Klingler M., Leferink F. Reverberation chambers a la carte: an overview of the different mode-stirring techniques. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 63-78. doi: 10.1109/MEMC.2017.7931986.

17. Liu B. H., Chang D. C., Ma M. T. Eigenmodes and the composite quality factor of a reverberating chamber, NBS Technical Note 1066. Boulder, National Bureau of Standards, 1983. 62 p.

18. Hill D. A. Boundary fields in reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, vol. 47, no 2, pp. 281-290. doi: 10.1109/TEMC.2005.847370.

19. Dmitrieva N. Yu., Krokhaliev D. I. Some aspects of application of approach to testing equipment for immunity to electromagnetic fields using reverberation chambers. Theoretical study. *Technologii EMC*, 2016, vol. 58, no. 3, pp. 38-50 (in Russian).

20. IEC 1000-4-3. Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3: Testing and measurement techniques, Section 3: Radiated radio-frequency electromagnetic field immunity test (revision of IEC 801-3). 1995. Available at: <https://www.document-center.com/standards/show/IEC-1000-4-3/history/1ST%20EDITION> (accessed 10 January 2018).

21. IEC 61000-4-21. Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4-21: Testing and measurement techniques – Reverberation chamber test methods. 2011. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/4191> (accessed 10 January 2018).

22. Clegg J., Marvin A. C., Dawson J. F., Porter S. J. Optimization of stirrer designs in a reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, vol. 47, no 4, pp. 824-832. doi: 10.1109/TEMC.2005.860561.

23. Arnaut L. R. Compound exponential distributions for undermoded reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2002, vol. 44, no. 3, pp. 452-457. doi: 10.1109/TEMC.2002.801757.

24. Fedeli D., Iuale M., Primiani V. M., Moglie F. Experimental and numerical analysis of a carousel stirrer for reverberation chambers. *Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Edinburgh, 2012, pp. 228-233. doi: 10.1109/ISEMC.2012.6351779.

25. Jensen P. T., Munster A. P., Behnke R. B. Practical industrial EUT testing in reverberation chamber experiences, findings and practical observations on high amplitude immunity testing of industrial equipment in reverberation chamber. *Proceedings of 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Gothenburg, 2014, pp. 274-279. doi: 10.1109/EMCEurope.2014.6930916.

26. Selemeni K., Richalot E., Legrand O., Picon O., Mortessagne F. Energy localization effects within a reverberation chamber and their reduction in chaotic geometries. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, vol. 59, no. 2, pp. 325-333. doi: 10.1109/TEMC.2016.2617322.

27. Arnaut L., Moglie F., Bastianelli L., Primiani V. M. Helical stirring for enhanced low-frequency performance of reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, vol. 59, no. 4, pp. 1016-1026. doi: 10.1109/TEMC.2016.2641386.

28. Karandikar Y. B., Nyberg D., Jamaly N., Kildal P. S. Mode counting in rectangular, cylindrical, and spherical cavities with application to wireless measurements in reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2009, vol. 51, no. 4, pp. 1044-1046. doi: 10.1109/TEMC.2009.2033119.

29. Arnaut L. R., West P. D. Electromagnetic reverberation near a perfectly conducting boundary. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 359-371. doi: 10.1109/TEMC.2006.874087.

30. Arnaut L. R., Serra R., West P. D. Statistical anisotropy in imperfect electromagnetic reverberation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, vol. 59, no. 1, pp. 3-13. doi: 10.1109/TEMC.2016.2606540.

31. Kouveliotis N. K., Trakadas P. T., Capsalis C. N. Theoretical investigation of the field conditions in a vibrating reverberation chamber with an unstirred component. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2003, vol. 45, no. 1, pp. 77-81. doi: 10.1109/TEMC.2002.808072.

32. Serra R., Leferink F., Canavero F. "Good-but-imperfect" electromagnetic reverberation in a VIRC. *Proceedings of 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Long Beach, 2011, pp. 954-959. doi: 10.1109/ISEMC.2011.6038446.

33. Vallon H., Cozza A., Monsef F., Chauchat A. S. Time-reversed excitation of reverberation chambers: improving efficiency and reliability in the generation of radiated stress. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 2, pp. 364-370. doi: 10.1109/TEMC.2015.2478420.

34. Arnaut L. R. Maximum rate of frequency scanning for distortionless signal generation in electromagnetic reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008, vol. 50, no. 4, pp. 787-793. doi: 10.1109/TEMC.2008.2006579.

35. Hatfield M. O. Shielding effectiveness measurements using mode-stirred chambers: a comparison of two approaches. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1988, vol. 30, no. 3, pp. 229-238. doi: 10.1109/15.3301.

36. Arnaut L. R. Pulse jitter, delay spread, and Doppler shift in mode-stirred Reverberation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 6, pp. 1717-1727. doi: 10.1109/TEMPC.2016.2585546.

37. Hill D. A. Electronic mode stirring for reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1994, vol. 36, no. 4, pp. 294-299. doi: 10.1109/15.328858.

38. Cozza A., Koh W. J., Ng Y. S., Tan Y. Y. Controlling the state of a reverberation chamber by means of a random multiple-antenna stirring. *Proceedings of 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Singapore, 2012, pp. 765-768. doi: 10.1109/APEMC.2012.6237826.

39. Leo A. D., Primiani V. M., Russo P., Cerri G. Low-frequency theoretical analysis of a source-stirred reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, vol. 59, no. 2, pp. 315-324. doi: 10.1109/TEMPC.2016.2613402.

40. Voges E., Eisenburger T. Electrical mode stirring in reverberating chambers by reactively loaded antennas. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, vol. 49, no. 4, pp. 756-761. doi: 10.1109/TEMPC.2007.908281.

41. Huang Y., Edwards D. J. A novel reverberating chamber: the source-stirred chamber. *Proceedings of 2011 Eighth International Conference on Electromagnetic Compatibility*. Edinburgh, 1992, pp. 120-124.

42. Cerri G., Primiani V. M., Pennesi S., Russo P. Source stirring mode for reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, vol. 47, no. 4, pp. 815-823. doi: 10.1109/TEMPC.2005.858757.

43. Cerri G., Primiani V. M., Monteverde C., Russo P. A theoretical feasibility study of a source stirring reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2009, vol. 51, no. 1, pp. 3-11. doi: 10.1109/TEMPC.2008.2009530.

44. Monteverde C., Koepke G. H., Holloway C. L., Ladbury J. M., Hill D. A., Primiani V. M., Russo P. Source stirring technique for reverberation chambers; experimental investigation. *Proceedings of 2008 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Hamburg, 2008, pp. 1-6. doi: 10.1109/EMCEUROPE.2008.4786833.

45. Amador E., Besnier P. Source stirring analysis in a reverberation chamber based on modal expansion of the electric field. *Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Dresden, 2015, pp. 434-439. doi: 10.1109/ISEMC.2015.7256201.

46. Kunthong J., Bunting C. F. Source-stirring and mechanical-stirring reverberation chamber measurement comparison for 900 MHz and 1800 MHz. *Proceedings of 2009 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Austin, 2009, pp. 193-196. doi: 10.1109/ISEMC.2009.5284555.

47. Serra R. Reverberation chambers through the magnifying glass: an overview and classification of performance indicators. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2017, vol. 6, no. 2, pp. 76-88. doi: 10.1109/MEMC.0.7990003.

48. Arnaut L. R., Serra R., West P. Validating reverberation chamber performance based on assessment of field anisotropy. *Proceedings of 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Wroclaw, 2016, pp. 205-210. doi: 10.1109/EMCEurope.2016.7739171.

49. Space engineering. Electromagnetic compatibility handbook. ESA Requirements and Standards Division, ESTEC, 2012. 228 p.

50. Kostas J. G., Boverie B. Statistical model for a mode-stirred chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1991, vol. 33, no. 4, pp. 366-370. doi: 10.1109/15.99120.

51. Arnaut L. R. Statistics of the quality factor of a rectangular reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2003, vol. 45, no. 1, pp. 61-76. doi: 10.1109/TEMC.2002.808021.

52. Serra R., Nijenhuis J. Wave impedance in reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, vol. 56, no. 1, pp. 231-234. doi: 10.1109/TEMC.2013.2268318.

53. Lemoine C., Besnier P., Drissi M. Estimating the effective sample size to select independent measurements in a reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008, vol. 50, no. 2, pp. 227-236. doi: 10.1109/TEMC.2008.919037.

54. Ferrara G., Migliaccio M., Sorrentino A. Characterization of GSM non-line-of-sight propagation channels generated in a reverberating chamber by using bit error rates. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, vol. 49, no. 3, pp. 467-473. doi: 10.1109/TEMC.2007.903040.

55. Remley K. A., Floris S. J., Shah H. A. Static and dynamic propagation-channel impairments in reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, vol. 53, no. 3, pp. 589-599. doi: 10.1109/TEMC.2010.2100823.

56. Tait G. B., Hager C. E., Baseler T. T., Slocum M. B. Ambient power density and electric field from broadband wireless emissions in a reverberant space. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 1, pp. 307-313. doi: 10.1109/TEMC.2015.2503925.

57. West J. C., Bunting C. F., Rajamani V. Accurate and efficient numerical simulation of the random environment within an ideal reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2012, vol. 54, no. 1, pp. 167-173. doi: 10.1109/TEMC.2011.2170692.

58. Hill D. A., Ladbury J. M. Spatial-correlation functions of fields and energy density in a reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2002, vol. 44, no. 1, pp. 95-101. doi: 10.1109/15.990715.

59. Magdowski M., Tkachenko S. V., Vick R. Coupling of stochastic electromagnetic fields to a transmission line in a reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 308-317. doi: 10.1109/TEMC.2010.2097267.

60. Coates A., Sasse H. G., Coleby D. E., Duffy A. P., Orlandi A. Validation of a three-dimensional transmission line matrix (TLM) model implementation of a

mode-stirred reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, vol. 49, no. 4, pp. 734-744. doi: 10.1109/TEMC.2007.903697.

61. Orjubin G., Richalot E., Mengue S., Wong M.-F., Picon O. On the FEM modal approach for a reverberation chamber analysis. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, vol. 49, no. 1, pp. 76-85. doi: 10.1109/TEMC.2006.888187.

62. Amador E., Lemoine C., Besnier P., Laisne A. Reverberation chamber modeling based on image theory: investigation in the pulse regime. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, vol. 52, no. 4, pp. 778-789. doi: 10.1109/TEMC.2010.2049576.

63. Cozza A. The role of losses in the definition of the overmoded condition for reverberation chambers and their statistics. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 296-307. doi: 10.1109/TEMC.2010.2081993.

64. Mengue S., Richalot E., Picon O. Comparison between different criteria for evaluating reverberation chamber functioning using a 3-D FDTD algorithm. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008, vol. 50, no. 2, pp. 237-245. doi: 10.1109/TEMC.2008.921049.

65. Pirkl R. J., Remley K. A., Patane C. S. L. Reverberation chamber measurement correlation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2012, vol. 54, no. 3, pp. 533-545. doi: 10.1109/TEMC.2011.2166964.

66. Hill D. A. Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1998, vol. 40, no. 3, pp. 209-217. doi: 10.1109/15.709418.

67. Gifuni A. Deterministic approach to estimate the upper bound of the electric field in a reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, vol. 53, no. 3, pp. 570-578. doi: 10.1109/TEMC.2010.2102359.

68. Huikan L. Spatial correlation functions of fields in a reverberation chamber based on expansion of spherical Bessel functions. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 427-428. doi: 10.1109/TEMC.2006.874086.

69. Hill D. A. Uniqueness of plane wave integral representation for idealized fields in reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, vol. 57, no. 3, pp. 584-586. doi: 10.1109/TEMC.2015.2406253.

70. Arnaut L. R. On the maximum rate of fluctuation in mode-stirred reverberation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, vol. 47, no. 4, pp. 781-804. doi: 10.1109/TEMC.2005.859061.

71. Arnaut L. R. Time-domain measurement and analysis of mechanical step transitions in mode-tuned reverberation: characterization of instantaneous field. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, vol. 49, no. 4, pp. 772-784. doi: 10.1109/TEMC.2007.908955.

72. Orjubin G., Richalot E., Mengue S., Picon O. Statistical model of an undermoded reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2006, vol. 48, no. 1, pp. 248-251. doi: 10.1109/TEMC.2006.870705.

73. Lemoine C., Besnier P., Drissi M. Investigation of reverberation chamber measurements through high-power goodness-of-fit tests. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, vol. 49, no. 4, pp. 745-755. doi: 10.1109/TEMC.2007.908290.

74. Chen X. Using Akaike information criterion for selecting the field distribution in a reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55, no. 4, pp. 664-670. doi: 10.1109/TEMC.2012.2225107.

75. Pfennig S. A general method for determining the independent stirrer positions in reverberation chambers: Adjusting the Correlation Threshold. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 4, pp. 1252-1258. doi: 10.1109/TEMC.2016.2567541.

76. Chen X. Experimental investigation of the number of independent samples and the measurement uncertainty in a reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55, no. 5, pp. 816-824. doi: 10.1109/TEMC.2013.2242473.

77. Orjubin G. Maximum field inside a reverberation chamber modeled by the generalized extreme value distribution. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, vol. 49, no. 1, pp. 104-113. doi: 10.1109/TEMC.2006.888172.

78. Choi S., Park S. A bivariate normalization approach for characterizing reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55, no. 6, pp. 1350-1353. doi: 10.1109/TEMC.2013.2265039.

79. Arnaut L. R. Limit distributions for imperfect electromagnetic reverberation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2003, vol. 45, no. 2, pp. 357-377. doi: 10.1109/TEMC.2003.811301.

80. Vogt-Ardatjew R., Lundgren U., Romero S. F., Leferink F. On-site radiated emissions measurements in semireverberant environments. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, vol. 59, no. 3, pp. 770-778. doi: 10.1109/TEMC.2016.2623380.

81. Primiani V. M., Moglie F. Numerical simulation of reverberation chamber parameters affecting the received power statistics. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2012, vol. 54, no. 3, pp. 522-532. doi: 10.1109/TEMC.2011.2167337.

82. Hoijer M. Maximum power available to stress onto the critical component in the equipment under test when performing a radiated susceptibility test in the reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 372-384. doi: 10.1109/TEMC.2006.874665.

83. Junqua I., Degauque P., Liénard M., Issac F. On the power dissipated by an antenna in transmit mode or in receive mode in a reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2012, vol. 54, no. 1, pp. 174-180. doi: 10.1109/TEMC.2011.2166271.

84. Hu D., Wei G., Pan X., Ji K. Investigation of the radiation immunity testing method in reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, vol. 59, no. 6, pp. 1791-1797. doi: 10.1109/TEMC.2017.2698141.

85. Hill D. A. Reciprocity in reverberation chamber measurements. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2003, vol. 45, no. 1, pp. 117-119. doi: 10.1109/TEMC.2002.808047.

86. Hill D. A., Camell D. G., Cavcey K. H., Koepke G. H. Radiated emissions and immunity of microstrip transmission lines: theory and reverberation chamber measurements. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1996, vol. 38, no. 2, pp. 165-172. doi: 10.1109/15.494619.

87. Krauthauser H. G. On the measurement of total radiated power in uncalibrated reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, vol. 49, no. 2, pp. 270-279. doi: 10.1109/TEMC.2007.897122.

88. Holloway C. L., Hill D. A., Ladbury J., Koepke G., Garzia R. Shielding effectiveness measurements of materials using nested reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2003, vol. 45, no. 2, pp. 350-356. doi: 10.1109/TEMC.2003.809117.

89. Tian Z., Huang Y., Xu Q. Efficient methods of measuring shielding effectiveness of electrically large enclosures using nested reverberation chambers with only two antennas. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, vol. 59, no. 6, pp. 1872-1879. doi: 10.1109/TEMC.2017.2696743.

90. Fedeli D., Gradoni G., Primiani V. M., Moglie F. Accurate analysis of reverberation field penetration into an equipment-level enclosure. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2009, vol. 51, no. 2, pp. 170-180. doi: 10.1109/TEMC.2009.2013456.

91. Wang Q., Cheng E., Qu Z. On the shielding effectiveness of small-dimension enclosures using a reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, vol. 53, no. 3, pp. 562-569. doi: 10.1109/TEMC.2011.2157164.

92. Holloway C. L., Hill D. A., Sandroni M., Ladbury J. M., Coder J., Koepke G., Marvin A. C., He Y. Use of reverberation chambers to determine the shielding effectiveness of physically small, electrically large enclosures and cavities. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008, vol. 50, no. 4, pp. 770-782. doi: 10.1109/TEMC.2008.2004580.

93. Tait G. B., Hager C., Slocum M. B., Hatfield M. O. On measuring shielding effectiveness of sparsely moded enclosures in a reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55, no. 2, pp. 231-240. doi: 10.1109/TEMC.2012.2220779.

94. Höijer M., Kroon L. Field statistics in nested reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55, no. 6, pp. 1328-1330. doi: 10.1109/TEMC.2013.2249510.

95. Loughry T. A., Gurbaxani S. H. The effects of intrinsic test fixture isolation on material shielding effectiveness measurements using nested mode-stirred chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1995, vol. 37, no. 3, pp. 449-452. doi: 10.1109/15.406535.

96. Primiani V. M., Moglie F., Pastore A. P. Modeling of the reverberation chamber method for determining the shielding properties of a coaxial cable. *IEEE*

Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, vol. 50, no. 2, pp. 246-251. doi: 10.1109/TEMC.2008.922793.

97. Xu Q., Huang Y., Xing L., Tian Z., Zhou J., Chen A., Zhuang Y. Average absorption coefficient measurement of arbitrarily shaped electrically large objects in a reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 6, pp. 1776-1779. doi: 10.1109/TEMC.2016.2587679.

98. Carlberg U., Kildal P.-S., Wolfgang A., Sotoudeh O., Orlenius C. Calculated and measured absorption cross sections of lossy objects in reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, vol. 46, no. 2, pp. 146-154. doi: 10.1109/TEMC.2004.826878.

99. Capstick M. H., Kuehn S., Berdinas-Torres V., Gong Y., Wilson P. F., Ladbury J. M., Koepke G., et al. A radio frequency radiation exposure system for rodents based on reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, vol. 59, no. 4, pp. 1041-1052. doi: 10.1109/TEMC.2017.2649885.

100. Senic D., Sarolic A., Holloway C. L., Ladbury J. M. Whole-body specific absorption rate assessment of lossy objects exposed to a diffuse field inside a reverberant environment. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, vol. 59, no. 3, pp. 813-822. doi: 10.1109/TEMC.2016.2626968.

101. Tsigros C., Piette M., Vandenbosch G. A. E., Troyen D. V. Radiated immunity in reverberation and semianechoic rooms: conditions for equivalence. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55, no. 2, pp. 222-230. doi: 10.1109/TEMC.2012.2219869.

102. Fall A. K., Besnier P., Lemoine C., Zhadobov M., Sauleau R. Experimental dosimetry in a mode-stirred reverberation chamber in the 60-GHz band. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 4, pp. 981-992. doi: 10.1109/TEMC.2016.2550803.

103. Chakarothai J., Wang J., Fujiwara O., Wake K., Watanabe S. A hybrid MoM/FDTD method for dosimetry of small animal in reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, vol. 56, no. 3, pp. 549-558. doi: 10.1109/TEMC.2014.2304958.

104. Chakarothai J., Shi J., Wang J., Fujiwara O., Wake L., Watanabe S. Numerical techniques for SAR assessment of small animals in reverberation chamber. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 57-66. doi: 10.1109/MEMC.2015.7098514.

105. Fiumara V., Fusco A., Iadarola G., Matta V., Pinto I. M. Free-space antenna pattern retrieval in nonideal reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 3, pp. 673-677. doi: 10.1109/TEMC.2016.2539351.

106. Grudén M., Hallbjörner P., Rydberg A. Large ad hoc shielded room with removable mode stirrer for mobile phone antenna tests. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55, no. 1, pp. 21-27. doi: 10.1109/TEMC.2012.2204758.

Статья поступила 3 мая 2018 г.

Информация об авторах

Демаков Александр Витальевич – инженер научно-исследовательской лаборатории «Безопасности и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств». Ассистент кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: устройства для испытаний на электромагнитную совместимость; электродинамическое моделирование. E-mail: vandervals@inbox.ru

Комнатнов Максим Евгеньевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасности и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств». Доцент кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость; экранирование; устройства для испытаний на электромагнитную совместимость. E-mail: maxmek@mail.ru

Газизов Тальгат Рашитович – доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость; численные методы. E-mail: talgat@tu.tusur.ru

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Review of research in the development and application of reverberation chambers for electromagnetic compatibility tests

A. V. Demakov, M. E. Komnatnov, T. R. Gazizov

Topicality. Ensuring electromagnetic compatibility is one of the main tasks arising in the development of critical radioelectronic equipment, taking into account their immunity against intentional power electromagnetic influences. An increase in the density of PCB mounting, miniaturization and integration of the electronic component base, as well as an increase in the frequency of the useful signal and a decrease in the voltage level of the power supply, lead to a decrease in the level of susceptibility of the radioelectronic equipment to the electromagnetic field. Tests of units and blocks of radioelectronic equipment to emission and immunity are costly, because they require complicated measuring equipment (antennas, power amplifiers, generators, spectrum analyzers, etc.), as well as the anechoic chambers. The need for cheap testing facilities, while maintaining the adequacy of the results obtained with their help, leads to the search for alternative means for testing, one of which is an electromagnetic reverberation chamber (RC). The last decades are characterized by rapid development of studies of various aspects of RC, reported in numerous publications. **The aim of the work** is to systematize the current state of research on the development of the RC and methods of testing with their help. **The results and their novelty:** the work contains a review of the existing designs of the RC, the methods of development, the evaluation of the effectiveness of the work and the features of the tests conducted with their help. Elements of novelty of work are identified common approaches to the design of the RC. In particular, the analysis showed the following. To ensure a uniform distribution of electromagnetic field in the working volume of the RC, a procedure of mode stirring is applied, which can be carried out both by locating mechanical stirrers in the case of RC and by changing the signal parameters (modulation of the input signal, displacement of antennas), exciting the electromagnetic field inside the working volume of the RC. It is shown that in the initial stages of the design, analytical models are used to obtain rough estimates of the electromagnetic field distribution, and numerical methods are used to obtain

accurate results, allowing the real design of antennas, mixers and other elements of the RC design to be taken into account in the field analysis. **Practical significance:** the results of the research will be useful to technical specialists for understanding the processes of excitation and evaluation of electromagnetic field inside the RC, as well as in the development of new technical solutions of the RC.

Key words: electromagnetic compatibility, radioelectronic equipment, reverberation chamber, emission, immunity.

Information about Authors

Aleksandr Vital'evich Demakov – engineer of the Research Laboratory of «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities» (SECRF). Assistant of the Department of Television and Control. Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: facilities for EMC testing; full-wave modelling. E-mail: vandervals@inbox.ru

Maksim Evgen'evich Komnatnov – Ph.D. of engineering sciences, senior research fellow of the Research Laboratory of «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities» (SECRF). Associate Professor at the Department of Television and Control. Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; electromagnetic shielding; facilities for EMC testing. E-mail: maxmek@mail.ru

Tal'gat Rashitovich Gazizov – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Head of the Department of Television and Control. Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; numerical methods. E-mail: talgat@tu.tusur.ru

Address: Russia, 634035, Tomsk, Lenina prospect, 40.