

Модели и методы вычисления и измерения эффективности экранирования материалов с использованием сдвоенных и коаксиальных ТЕМ-камер

М. Е. Комнатнов[✉]

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

[✉] maxmek@mail.ru

Аннотация

Введение. Электромагнитное экранирование применяют как дополнительное конструкторское средство обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств (РЭС). Материал экрана выбирают на основе его известных электрофизических параметров на стадии проектирования РЭС, учитывая электрические и эксплуатационные характеристики. Эффективность экранирования (ЭЭ) композитных, слоистых или тканых материалов с высокой электрической проводимостью и относительной магнитной проницаемостью в широком диапазоне частот (от 10 Гц до 10 ГГц) оценить сложно, а в некоторых случаях невозможно. Между тем довольно мало исследований по этой теме проводится в настоящее время.

Цель работы. Систематизировать модели и методы вычисления и измерения вносимых потерь (ВП) и ЭЭ материалов с использованием сдвоенных и коаксиальных ТЕМ-камер в широком диапазоне частот.

Материалы и методы. Описана методика вычисления ВП для электрической (E -) и магнитной (H -) компонент поля на основе измеренных S -параметров в сдвоенной ТЕМ-камере. Предложены выражения для вычисления ненагруженной сдвоенной ТЕМ-камеры, отличающиеся учетом толщины материала и оснастки, предотвращающей провисание тонкого материала в ней, и позволяющие уменьшить разницу между измеренными и вычисленными значениями S -параметров до 3.2 дБ. Описаны методы измерения и вычисления ЭЭ композитных материалов, результаты которых сравнены с полученными стандартизированной методикой вычисления ЭЭ.

Результаты. Представлены частотные зависимости ВП для E - и H -полей, вычисленные на основе измеренных S -параметров сдвоенной ТЕМ-камеры с размещенными внутри хлопчатобумажной и трикотажной экранирующими тканями. Сравнены вычисленные результаты классической модели и электродинамического моделирования с экспериментальными для композитного материала в новой запатентованной коаксиальной ТЕМ-камере.

Заключение. Модели и методы вычисления и измерения ВП и ЭЭ могут быть эффективно использованы при относительно быстром контроле и тестировании новых и известных экранирующих материалов с учетом приведенных допущений и ограничений.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, ТЕМ-камера, коаксиальная камера, эффективность экранирования, композитные материалы, экранирующая ткань

Для цитирования: Комнатнов М. Е. Модели и методы вычисления и измерения эффективности экранирования материалов с использованием сдвоенных и коаксиальных ТЕМ-камер // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 19–37. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-19-37

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование поддержано Российским научным фондом (проект 19-79-10162, <https://rscf.ru/project/19-79-10162/>).

Статья поступила в редакцию 04.04.2024; принята к публикации после рецензирования 26.06.2024; опубликована онлайн 27.09.2024



Models and Methods for Calculating and Measuring the Shielding Effectiveness of Materials Using Dual and Coaxial TEM Cell

Maxim E. Komnatnov✉

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

✉ maxmek@mail.ru

Abstract

Introduction. Electromagnetic shielding is used as an additional design tool to ensure electromagnetic compatibility of electronic devices. The shielding material is selected based on its electrophysical parameters at the design stage of electronic devices, taking its electrical and operational characteristics into account. The shielding effectiveness (SE) of composite, layered, or fabric materials with a high electrical conductivity and relative magnetic permeability in a wide frequency range (10 Hz...10 GHz) is difficult and, in some cases, impossible to assess a priori. At the same time, the number of studies in this direction is currently limited.

Aim. To generalize models and methods for calculating and measuring the insertion losses (IL) and SE of materials using dual and coaxial TEM cells in a wide frequency range.

Materials and methods. A method for calculating IL for the electric (E) and magnetic (H) components of the field based on the measured S parameters in a dual TEM cell is described. Expressions for calculating an unloaded dual TEM cell are proposed. These expressions differ in terms of considering the thickness of the material and the tooling that prevents sagging of thin materials, thus allowing the difference between the measured and calculated values of S parameters to be reduced to 3.2 dB. Methods for measuring and calculating the SE of composite materials are described. The results obtained using these methods are compared with those obtained by a standardized method for SE calculation.

Results. The frequency dependencies of the IL for the E and H fields calculated on the basis of the measured S parameters of a dual TEM cell with a cotton and knitted shielding fabric placed inside are presented. The results obtained by the classic and electrodynamic modeling are compared with experimental results for a composite material in a new patented coaxial TEM cell.

Conclusion. Models and methods for calculating and measuring IL and SE can be effectively used for a relatively rapid control and testing of new and available shielding materials, taking the above assumptions and limitations into account.

Keywords: electromagnetic compatibility, TEM cell, coaxial cell, shielding effectiveness, composite materials, shielding fabric

For citation: Komnatnov M. E. Models and Methods for Calculating and Measuring the Shielding Effectiveness of Materials Using Dual and Coaxial TEM Cell. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 19–37. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-19-37

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Source of financing. The research was supported by the Russian Science Foundation (project 19-79-10162, <https://rscf.ru/project/19-79-10162/>) at Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Submitted 04.04.2024; accepted 26.06.2024; published online 27.09.2024

Введение. Одним из видов дестабилизирующих воздействий, оказывающих влияние на нормальную работу радиоэлектронного средства (РЭС), являются излучаемые электромагнитные помехи (ЭМП). Помехоустойчивость РЭС к воздействию ЭМП оценивают на стадии проектирования при обеспечении электромагнитной совместимости (ЭМС) создаваемого

РЭС. Как правило, при проектировании РЭС применяют различные методы и способы вычисления и средства измерения помехоустойчивости и помехозащищенности РЭС к воздействию ЭМП [1]. Широко известным конструкторским средством обеспечения ЭМС узлов, блоков и систем РЭС является электромагнитное экранирование [2, 3]. Оно локализует элек-

тромагнитное излучение (ЭМИ) в заданной области пространства, ослабляя электромагнитным экраном воздействие источника на рецептор ЭМП [4]. Ослабление электромагнитным экраном воздействующей ЭМП определяется отражением электромагнитной волны (ЭМВ) от границ раздела экрана и среды, в которой он находится, а также поглощением и потерей энергии ЭМВ при ее прохождении через экран и многократных переотражениях внутри экрана [2–5]. Кроме того, на ослабление ЭМВ экраном влияют отверстия (апертуры) в его стенках [6]. Основным показателем качества экрана, характеризующим его способность ослаблять амплитуду ЭМП, является эффективность экранирования (ЭЭ), анализ которой может быть выполнен исходя из теории линий передачи (ЛП) или теории поля. В общем случае ЭЭ определяется через отношение напряженностей электрического (E) или магнитного (H) поля в заданной области пространства в присутствии (E_1 и H_1) и отсутствии (E_0 и H_0) электромагнитного экрана [4]:

$$\text{ЭЭ}_{\text{дБ}} = 20 \lg |E_0/E_1|; \text{ЭЭ}_{\text{дБ}} = 20 \lg |H_0/H_1|. \quad (1)$$

Размеры, форма и материал электромагнитного экрана, а также его расположение влияют на ослабление ЭМП в требуемом диапазоне частот [2]. Использование легких материалов, обладающих высокой удельной электрической проводимостью (σ) и/или относительной магнитной проницаемостью (μ_r), является преимуществом при проектировании экранов современных РЭС [7, 8]. При проектировании электромагнитного экрана в основном используют моделирование, позволяющее учесть электрофизические параметры материала [9], которые не всегда могут быть доступны разработчику, что затрудняет создание оптимального и высокоэффективного экрана. Создание на стадии проектирования оптимального электромагнитного экрана, обладающего приемлемой ЭЭ в заданном диапазоне частот, является сложной задачей, поскольку ЭЭ существенно зависит от его формы и размеров, электрофизических параметров материалов, расположения источника и приемника ЭМП, в целом конструкции РЭС и пр. Кроме того, из-за сложности вычисления ЭЭ реальной конструкции раз-

работчиками не всегда своевременно принимаются меры для обеспечения ЭМС РЭС, что в значительной мере увеличивает стоимость его разработки на конечном этапе проектирования. Для корректного учета электрофизических параметров экранирующих материалов на стадии проектирования необходимо вычислять и измерять их ЭЭ, что позволит улучшить массогабаритные показатели и электромагнитные свойства изготавливаемой экранирующей конструкции и РЭС в целом.

Цель работы – систематизировать существующие модели и методы вычисления и измерения ЭЭ материалов с использованием сдвоенных и коаксиальных ТЕМ-камер.

Известные методы вычисления и измерения экранирующих материалов. При проектировании экранирующей конструкции изначально выбирают материалы, в качестве которых могут использоваться металлы и их сплавы, композитные материалы (КМ), радиоткани и пр. Кроме того, уделяют внимание расположению экрана. Если он вблизи (в ближней зоне) источника ЭМП, применяют металлы с высокой μ_r (ферромагнетики), такие как железо, электротехническая сталь и пр., которые эффективны для ослабления низкочастотных магнитных полей. При экранировании высокочастотных электрических и магнитных полей (в дальней зоне) используют материалы с высокой σ , например медь, алюминий и пр. Экранирование широкополосных источников ЭМП может также осуществляться многослойными КМ или материалами из нескольких слоев металла и их сплава, имеющих различные электрофизические параметры [10].

В общем случае, согласно [4], источник ЭМП характеризуется длиной волны излучения (λ) и расстоянием от источника до экрана ($l/2$). Точка наблюдения p находится за экраном на том же удалении $l/2$. Электромагнитный экран характеризуется толщиной материала (t_m) и его электрофизическими параметрами σ , ϵ , μ . На рис. 1 представлено ортогональное падение на экран ЭМВ, распространяющейся вдоль оси z . В ближней зоне, где $l < \lambda/\pi$, поле еще не сформировалось в плоскую ЭМВ и представляет собой либо электрическое (высокоомное), либо магнитное (низкоомное) поле, в зависимости от

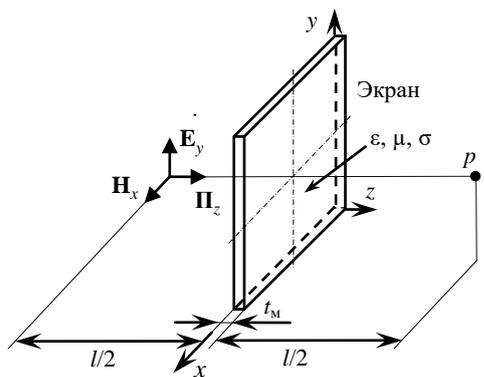


Рис. 1. Анализируемая модель плоского бесконечно протяженного однородного электромагнитного экрана

Fig. 1. Model of a flat infinitely extended homogeneous electromagnetic shield

электрических характеристик источника ЭМП, а в дальней зоне, где $l > 2\lambda/\pi$, поле формируется в плоскую ЭМВ. Основным принципом действия экрана является то, что при воздействии поля источника на поверхности экрана индуцируются заряды, а в его толще – токи и магнитная поляризация. Они создают вторичное поле. При сложении вторичного и первичного полей образуется результирующее поле, которое в защищаемой области пространства оказывается слабее первичного [11].

Модель, рассмотренная в руководстве [12] к выполнению требований европейского авиакосмического стандарта ECSS-E-ST-20-07C [13], описывает вычисление ЭЭ материалов, применяемых в космических аппаратах (КА). Модель, основанная на теории ЛП и изменении волнового сопротивления на границах сред, описывает физические процессы отражения, поглощения и передачи плоской ЭМВ для однородных изотропных сред [4]. Модель подтверждена сравнением результатов моделирования в [14] и измерений. Согласно решению уравнений Максвелла в дифференциальной форме, модель плоского однородного металлического экрана (считающегося линейной системой с протяженностью, достаточной для исключения влияния краевого эффекта) аналогична описанным моделям из [2, 3]. Упрощение и блок-схема вычисления ЭЭ материала экрана с использованием данной модели приведены в [15]. В общем случае ЭЭ может быть вычислена аналитически, независимо от точки расположения источника и/или приемника ЭМП. Со-

гласно классической теории [4], ЭЭ плоского однородного экрана определяется [2, 3, 12, 15] суммой коэффициентов $A_{дБ} + R_{дБ} + M_{дБ}$ ослаблений ЭМВ, вызванных: тепловыми потерями от возбуждаемых вихревых токов в металле $A_{дБ}$; отражением от границ раздела диэлектрик–экран и экран–диэлектрик при воздействии поля источника в дальней $R_{дБ}^T$ или ближней $R_{дБ}^{E,H}$ зоне; многократным внутренним переотражением $M_{дБ}^{T,E,H}$ внутри экранирующего материала. Эти коэффициенты ослабления [4] для электропроводящих материалов связаны с S-параметрами [16].

Частотные зависимости ЭЭ материалов измеряют для корректного учета значений их электрофизических параметров на стадии проектирования экранирующей конструкции. Измерения проводят, используя пять наиболее известных [17, 18] методов. Так, применяя методы измерения на основе стандартов IEEE 299–2006 [19] (заменяет широко известный MIL-STD-285 [20]) и IEEE 299.1–2013 [21], можно определить ЭЭ корпуса с апертурой при ее перекрытии материалом, для размеров корпусов свыше 2 м [19] и до 2 м [21] соответственно. Измерения проводят в достаточно широком диапазоне частот – от 9 кГц до 18 ГГц, с возможным расширением нижнего предела до 50 Гц, а верхнего – до 100 ГГц. Данный метод измерения требует высокой подготовки специалиста, а также разнообразного и дорогостоящего оборудования (безэховая или реверберационная камера, генератор, усилитель, измерительный приемник, разные виды антенн и пр.), которое не всегда может быть доступно разработчику. Альтернативный метод измерения ЭЭ материала приведен в стандарте ASTM D4935 [22], заменившем в настоящее время стандарт ASTM E57 [23]. Данный метод позволяет измерять ЭЭ различных материалов [24] с использованием коаксиальной камеры [25, 26] в диапазоне частот от 30 МГц до 1.5 ГГц. Метод имеет достаточно хорошую точность и сходимость результатов измерения с результатами вычисления [27], используя широко известную модель [4], описанную в [12].

Также проводят измерения ЭЭ материалов с использованием прямоугольных и круглых волноводов [28, 29], состоящих из двух коаксиально-волноводных переходов и двух регулярных прямоугольных частей, между которыми размещается исследуемый материал. Другой метод измерения ЭЭ материала основан на подходе, предложенном в [30] и использующем две одинаковые ТЕМ-камеры [31], симметрично расположенные относительно их апертур, образуя сдвоенную ТЕМ-камеру. Каждый из этих методов измерений имеет ряд ограничений [17] на диапазон рабочих частот, геометрические размеры, форму и структуру образца материала, а также его электрофизические свойства и ориентацию векторов напряженностей E - и H -полей, воздействующих на материал. Кроме того, прямое измерение ЭЭ возможно провести, используя IEEE 299–2006 [19], который также хорошо согласуется с моделью [4]. Остальные методы предполагают пересчет измеренных значений, например S -параметров, в значения ЭЭ.

Альтернативные [4] аналитические модели и метод измерения на их основе предложены группой из национального бюро стандартизации США и основаны на измерении отношения мощностей в сдвоенной и коаксиальной ТЕМ-камерах без учета материала в апертуре и с ним [25, 30]. Используя вычисленные или измеренные значения мощностей на портах камер, а также их известные геометрические и электрические параметры, можно вычислить вносимые потери (ВП) и ЭЭ материала для поля ближней [32] и дальней [26] зон соответственно. Используя выражения из [33], можно пересчитать ВП для поля ближней зоны и хорошо проводящего экранирующего материала в ЭЭ. Данный метод позволяет на основе измеренных S -параметров вычислить ЭЭ в диапазоне низких частот для металлических и неметаллических экранирующих материалов [34], а также экранирующих сеток [35], пленок [36] и тканей [37].

Методы вычисления и измерения ЭЭ поля ближней зоны для материалов в сдвоенной ТЕМ-камере. Метод вычисления ЭЭ на основе измеренных S -параметров сдвоенной ТЕМ-камеры [30] предполагает измерения ответвленной мощности ЭМВ от передающей в приемную ТЕМ-камеру [38] (рис. 2).

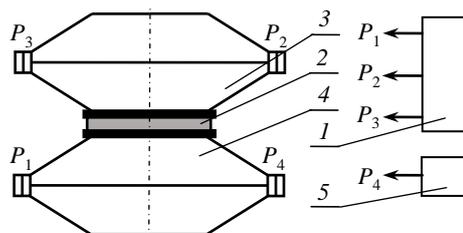


Рис. 2. Схема подключения ВАЦ к сдвоенной ТЕМ-камере
 Fig. 2. Connection diagram of the VNA to a dual TEM cell

Отношение мощностей без учета и с учетом материала, расположенного в апертуре сдвоенной ТЕМ-камеры, позволяет вычислить ВП материалом [30, 38], которые с использованием коэффициентов из [32] пересчитываются в ЭЭ. Вычисление коэффициентов передачи $|S_{21}|$ и $|S_{31}|$ для сдвоенной ТЕМ-камеры основано на теории малых апертур [39] и электромагнитной связи, через апертуру двух симметрично расположенных ТЕМ-камер [30, 32, 38], а также на подходе [40], использующем векторный анализатор цепей (ВАЦ). Подход (рис. 2) заключается в измерении посредством ВАЦ 1 отношения мощностей наведенных токов и напряжений через нагруженную и ненагруженную апертуру 2, на портах P_2 и P_3 приемной ТЕМ-камеры 3 по отношению к мощности P_1 передающей ТЕМ-камеры 4, на противоположном конце которой к порту P_4 подключена согласованная нагрузка 5 с заданным волновым сопротивлением Z_B .

Амплитуду и фазу S -параметров измеряют на прямом S_{21} и обратном S_{31} портах приемной ТЕМ-камеры относительно передающей для ненагруженной (без материала) и нагруженной (с материалом) апертуры, в диапазоне частот до 1 ГГц [30]. На основе отношения измеренных S -параметров ненагруженной к нагруженной апертуре вычисляют значения ВП и ЭЭ для E - и H -компонент поля для металлических, композитных, тканых и слоеных экранирующих материалов, размещенных в апертуре сдвоенной ТЕМ-камеры. Особенностью данного метода являются отличия ориентации векторов E - и H -полей относительно материала. Так, вектор E направлен по нормали к измеряемому материалу, а H – тангенциально, что наиболее близко имитирует реальную печатную плату (ПП) с компонентами, покрытыми

экранирующим материалом, поскольку он может быть расположен в непосредственной близости к компонентам.

Модель для вычисления S -параметров сдвоенной ТЕМ-камеры без материала в апертуре содержит основные уравнения, описывающие электромагнитную связь, выражающуюся комплексными коэффициентами возбуждения a_0 и b_0 через электрически малую ненагруженную апертуру входящих в ее состав камер [30]. Вычисление коэффициентов передачи $|S_{21}|$ и $|S_{31}|$ с использованием a_0 и b_0 сводится к определению ответвленной мощности ЭМВ от передающей ТЕМ-камеры 4 в приемную ТЕМ-камеру 3, через ненагруженную материалом апертуру 2 (рис. 2). Для ненагруженной апертуры мощность ЭМВ, прошедшей в приемную ТЕМ-камеру 3 в прямом $P_2 = |a_0|^2/2$ и обратном $P_3 = |b_0|^2/2$ направлениях, нормированная по отношению к входной мощности P_1 , может быть выражена через S -параметры как [38, 40]

$$|S_{21}| = 10 \lg \left(\frac{1}{2} |a_0|^2 \right); |S_{31}| = 10 \lg \left(\frac{1}{2} |b_0|^2 \right). \quad (2)$$

При условии симметричного расположения апертуры ($x = z = 0$) и распространения в ней T -волны уравнения для комплексных коэффициентов возбуждения a_0 и b_0 записываются как [38]

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{jk_0}{2\eta_0} (a_{ey} + a_{mx}) E_{iy}^2; \\ b_0 &= \frac{jk_0}{2\eta_0} (a_{ey} - a_{mx}) E_{iy}^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где $k_0 = \omega(\epsilon_0\mu_0)^{1/2}$ и $\eta_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}$ – коэффициент распространения и характеристическое сопротивление ЭМВ в свободном пространстве соответственно (ω – круговая частота; $\epsilon_0 = (1/36\pi)10^{-9}$ Ф/м и $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная и диэлектрическая постоянные соответственно); a_{ey} и a_{mx} – электрическая и магнитная компоненты поляризуемости апертуры при распространении в ней T -волны; E_{iy} – y -компонента электрического поля в передающей ТЕМ-камере.

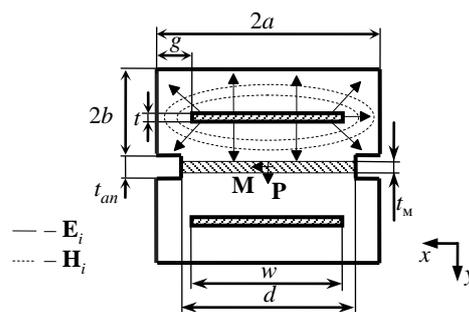


Рис. 3. Поперечное сечение сдвоенной ТЕМ-камеры
 Fig. 3. Cross section of a dual TEM cell

Компонента E_{iy} электрического поля для T -волны в передающей ТЕМ-камере может быть найдена из геометрических параметров a , b , g , w и характеристического сопротивления $Z_{\text{ТЕМ}}$ ТЕМ-камеры (рис. 3) как [38, 40]

$$E_{iy} = \frac{2}{a} \sqrt{Z_{\text{ТЕМ}}} \sum_{m_0=1}^{\infty} \frac{\sin(Ma)}{\text{sh}(Mb)} J_0(Mg), \quad (4)$$

где a и b – половина ширины и высоты симметричной ТЕМ-камеры; $g = (2a - w)/2$ – зазор между центральным проводником шириной w ТЕМ-камеры и ее внешним проводником; m_0 – относится к суммированию только по нечетным m ($m = 1, 3, 5, \dots$) числам; $M = m\pi/(2a)$; J_0 – модифицированная функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка.

Характеристическое сопротивление ТЕМ-камеры согласно [38] находится как

$$Z_{\text{ТЕМ}} = \frac{\eta_0\pi}{8 \left[\ln \left(\frac{8a}{\pi g} \right) - \sum_{m_0=1}^{\infty} \frac{2}{m} (1 - \text{cth}(Mb)) \right]}. \quad (5)$$

Уравнения (3)–(5) являются основными [30, 38] для описания электромагнитной связи через электрически малую апертуру двух ТЕМ-камер. Противоположные знаки для a_0 и b_0 в (3) подразумевают, что мощность ЭМВ асимметрично проникает через апертуру от передающей ТЕМ-камеры в приемную. При этом компоненты a_{ey} и a_{mx} будут иметь противоположные знаки, значение b_0 будет больше по модулю, чем a_0 ($|a_0| < |b_0|$), что аналогично работе обратного ответвителя для сдвоенной ТЕМ-камеры.

Электромагнитная связь между двумя ТЕМ-камерами с общей апертурой описывается компонентами электрического a_{ey} и магнитного a_{mx} полей, направленными нормально (y) и тангенциально (x) по отношению к апертуре и материалу в ней. Так, для ненагруженной круглой апертуры с заданным радиусом r или квадратной с заданной длиной стороны d компоненты поля могут быть найдены как [38]

$$a_{ey} = -\frac{2}{3}r^3 = -\frac{0.455d^3}{4};$$

$$a_{mx} = \frac{4}{3}r^3 = \frac{1.032d^3}{4}. \quad (6)$$

При этом в (6) не учитывается толщина стенок ТЕМ-камеры и расстояние между ними t_{an} , которое может образоваться при размещении материала с заданной t_m в некоторой вспомогательной конструкции, удерживающей его (см. рис. 3) и устраняющей провисание, например радиоткани.

Коррекцию толщины можно провести, используя уравнения из [39], описывающие связь электрических и магнитных компонент поля, через электрически малую апертуру любой толщины. Поскольку в квадратной апертуре электрический дипольный момент (\mathbf{p}) перпендикулярен апертуре и, следовательно, продолен для волновода, которым является апертура, то \mathbf{p} будет возбуждать TM -моды. При этом TM_{11} является первой модой для квадратного поперечного сечения. Для магнитного дипольного момента (\mathbf{m}) аналогично будут возбуждаться режимы как TE , так и TM . Таким образом, в апертуре будут возбуждаться моды низшего порядка, возбуждаемые индивидуально \mathbf{p} и \mathbf{m} в режиме TE_{10} , который аналогичен режиму возбуждения в ТЕМ-камере. Тогда, используя в соответствии с [38] уравнения из [39], можно получить значения безразмерных коэффициентов (R_E и R_H) для квадратной апертуры с длиной стороны d , а, учитывая для режимов TM_{11} и TE_{10} постоянные распространения β_{11}^{TM} и β_{10}^{TE} для волны в волноводе, которым представляется апертура сдвоенной ТЕМ-

камеры высотой t_{an} , выражения для компонент поля можно записать как

$$a_{ey} = -R_E d^3 e^{-t_{an}\beta_{11}^{TM}} = -0.11d^3 e^{-\frac{t_{an}}{d}\pi};$$

$$a_{mx} = R_H d^3 e^{-t_{an}\beta_{10}^{TE}} = \frac{1}{4}d^3 e^{-\frac{t_{an}}{d}\pi\sqrt{2}}. \quad (7)$$

Подстановка (6) и (7) в (3) позволяет получить комплексные коэффициенты возбуждения без учета толщины стенок ТЕМ-камеры и конструкции для крепления исследуемого материала:

$$a_0 = 0.577 \frac{jk_0 d^3 E_{iy}^2}{8\eta_0};$$

$$b_0 = -1.487 \frac{jk_0 d^3 E_{iy}^2}{8\eta_0}, \quad (8)$$

и с их учетом

$$a_0 = \frac{jk_0 d^3 E_{iy}^2}{8\eta_0} \left(e^{-\frac{t_{an}}{d}\pi} - \frac{11}{25} e^{-\frac{t_{an}}{d}\pi\sqrt{2}} \right);$$

$$b_0 = -\frac{jk_0 d^3 E_{iy}^2}{8\eta_0} \left(e^{-\frac{t_{an}}{d}\pi} + \frac{11}{25} e^{-\frac{t_{an}}{d}\pi\sqrt{2}} \right). \quad (9)$$

В результате, подставив (9) в (2), можно вычислить частотные зависимости коэффициентов передачи в прямом $|S_{21}|$ и обратном $|S_{31}|$ направлениях для ЭМВ, проходящей через квадратную апертуру от передающей ТЕМ-камеры в приемную, с учетом толщин конструкции камеры и оснастки для материала.

Далее описана модель для вычисления S -параметров сдвоенной ТЕМ-камеры с материалом в апертуре. Решение интегрального уравнения Фредгольма для идеально проводящей пластины с круглой апертурой радиусом r , нагруженной проволочной сеткой, позволило получить численную и аналитическую модели, учитывающие поляризуемости в отверстиях и электромагнитные потоки, прошедшие через них, а также контактное сопротивление (R_K) между сеткой и пластиной [36]. На основе данного решения получена упрощенная модель для нагруженной листовым материалом апертуры и вычисления его ВП в сдвоенной ТЕМ-камере [30]. Согласно модели, ВП листовым материалом для компонент E - и H -полей могут быть вычислены

через комплексные коэффициенты для ненагруженной (a_0, b_0) и нагруженной (a'_0, b'_0) апертуры сдвоенной ТЕМ-камеры как

$$\begin{aligned} \text{ВП}_E &= 20 \lg \left| \frac{a_0 + b_0}{a'_0 + b'_0} \right|; \\ \text{ВП}_H &= 20 \lg \left| \frac{a_0 - b_0}{a'_0 - b'_0} \right|. \end{aligned} \quad (10)$$

В [35] решение из [36] применено при сравнении результатов теоретических и экспериментальных данных ВП, которые в [32] уточнены для тонких экранирующих пленок и представлены как

$$\begin{aligned} \text{ВП}_E &= 20 \lg \left| \frac{j8\eta_0}{3\pi k_0 r_e Z_M} \left(1 + 8\pi \frac{Z_K}{Z_M} \right)^{-1} \right|; \\ \text{ВП}_H &= 20 \lg \left| 1 + \frac{j4k_0 r_h \eta_0}{3\pi Z_M} \left(1 + 2\pi \frac{Z_K}{Z_M} \right)^{-1} \right|, \end{aligned} \quad (11)$$

где $Z_M = \eta / \text{sh}(-jkt_M)$ – эквивалентное сопротивление материала тонкой пленки; Z_K – контактное сопротивление материала с апертурой [35, 36]; $r_e = 0.555d$ и $r_h = 0.579d$ – радиусы апертуры ТЕМ-камеры или соответствующие значения для прямоугольной апертуры с длиной стороны d , полученные в соответствии с (6) [38]; $k = \omega [\mu(\varepsilon - j\sigma/\omega)]^{1/2}$ и $\eta = [j\omega\mu/(\sigma + j\omega\varepsilon)]^{1/2}$ – коэффициент распространения и характеристическое сопротивление ЭМВ материала [41] соответственно; $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$ и $\mu = \mu_0\mu_r$ – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды соответственно.

Как видно из (11), значения вычисленных ВП существенно зависят от двух параметров Z_M и Z_K , которые могут быть неизвестны для исследуемого материала. Кроме того, значение Z_K зависит от плотного прилегания исследуемого материала к кромке апертуры сдвоенной ТЕМ-камеры и детально исследуется в [26], но обычно считается реальным (активным) значением сопротивления r_K [30, 32, 38, 40]. В [36] оно нормировано и соответствует $Z_K = 2\pi r_K / Z_M$, а в [40] к Z_K последовательно включалось емкостное сопротивление, что имитировало неодно-

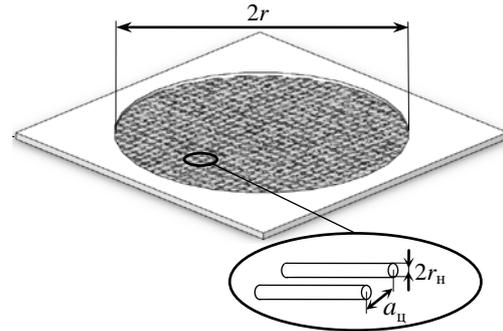


Рис. 4. Модель сетчатого электромагнитного экрана из металлических нитей

Fig. 4. Model of a mesh electromagnetic shield

родность в местах соприкосновения материала и ТЕМ-камер. При этом истинное значение Z_K определить сложно, а в некоторых случаях невозможно, что ограничивает применение данного метода вычисления и измерения ЭЭ.

Для сетчатого электромагнитного экрана [35, 36] из металлических нитей (рис. 4) Z_M зависит от диаметра нити (d_n), воздушного квадратного окна [42], определяемого расстоянием a_n между центрами нитей ($a_n \ll \lambda$), и электропроводности материала нити (σ_n). Значение Z_M металлической сетки [35] вычисляется при известных поверхностном сопротивлении (R_c) и индуктивности (L_c) сетчатого экрана из металлических нитей. При этом Z_M сетки из металлических нитей может быть найдено как $Z_M = R_c + j\omega L_c$, а необходимые R_c и L_c определяются как

$$\begin{aligned} R_c &= \frac{4a_n}{\pi d_n^2 \sigma_n} \frac{\Delta J_0(\Delta)}{2J_1(\Delta)}; \\ L_c &= \frac{\mu_0 a_n}{2\pi} \ln \left[\frac{1}{1 - e^{-\pi d_n / a_n}} \right], \end{aligned} \quad (12)$$

где J_1 – модифицированная функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка; $\Delta^2 = j\omega\tau_d$ ($\tau_d = \mu_{гн}\sigma_n r_n^2$ – постоянная времени диффузии; $\mu_{гн}$ – относительная магнитная проницаемость материала металлической нити).

Упрощение R_c в (12) может быть выполнено согласно [35], где последний член выражения

$\Delta J_0(\Delta)/[2J_1(\Delta)]$ может быть приравнен к 1 при условии, что $\omega\tau_d < 1$. Тогда R_c будет учитывать только сопротивление нити по постоянному току на единицу длины металлической сетки. При этом полное нормированное контактное сопротивление апертуры ТЕМ-камеры с экраном из металлических нитей может быть определено как $Z_k = 2\pi r_k (a_{ц} R_c)^{-1}$. Выражения (12) применимы только для сетчатого металлического экрана [35] и не применимы для экранирующей ткани, поскольку не учитывают ее плетение или плотное прилегание нитей между собой.

Измеренные ВАЦ или вычисленные при помощи электродинамического моделирования S -параметры сдвоенной ТЕМ-камеры, с размещенным в ее электрически малой апертуре материалом, согласно [40] можно пересчитать в ВП, подставив (2) в (10):

$$\begin{aligned} \text{ВП}_E &= 20 \lg \left[\frac{S_{21\text{ненагр}} + S_{31\text{ненагр}}}{S_{21\text{нагр}} + S_{31\text{нагр}}} \right]; \\ \text{ВП}_H &= 20 \lg \left[\frac{S_{21\text{ненагр}} - S_{31\text{ненагр}}}{S_{21\text{нагр}} - S_{31\text{нагр}}} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Связь между измеренными ВП и ЭЭ в ближней зоне описана в [33]. При этом измерение и вычисление по (1) ЭЭ материала в ближней зоне предполагает его размещение между двумя близко расположенными электрическими или магнитными диполями (см. рис. 1). Применяя коэффициент $K_{E,H}$ из [33] для хорошо проводящих электромагнитных экранов, учитывая расстояние ($k_0 l \ll 1$) от источника до приемника ЭМИ при расположении между ними (посередине) электромагнитного экрана, а также радиус апертуры (r_e, r_h), ЭЭ можно вычислить на основе измеренных S -параметров как

$$\begin{aligned} \text{ЭЭ}_E &= K_E \text{ВП}_E = \\ &= 20 \lg \left[\frac{8 l}{3\pi r_e} \frac{S_{21\text{ненагр}} + S_{31\text{ненагр}}}{S_{21\text{нагр}} + S_{31\text{нагр}}} \right]; \\ \text{ЭЭ}_H &= K_H \text{ВП}_H = \\ &= 20 \lg \left[\frac{8}{3\pi l} \frac{3r_h (S_{21\text{ненагр}} - S_{31\text{ненагр}})}{S_{21\text{нагр}} - S_{31\text{нагр}}} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Полученные результаты могут быть сравнены с широко известной моделью, описанной на основе аналогии с ЛП из [2, 12], предполагающей вычисление коэффициентов A, R, M .

Методы вычисления и измерения ЭЭ поля дальней зоны для материалов в коаксиальной ТЕМ-камере. ЭЭ композитных, слоистых материалов в коаксиальной камере рассчитывают на основе измеренных или вычисленных S -параметров, а также определяют их аналитически на основе известных электрофизических параметров (σ, ϵ, μ) материала с заданной t_m . S -параметры измеряют при помощи ВАЦ I (рис. 5) для ненагруженной и нагруженной материалом коаксиальной ТЕМ-камеры.

Измерение ЭЭ образца материала в коаксиальной камере основано на определении потерь при распространении ЭМВ вдоль нагруженной образцом материала камеры (рис. 6) [26].

Из-за разницы волновых сопротивлений среды распространения η_0 и образца материала η падающая волна P_i отражается от поверхности образца. Отраженная ЭМВ имеет мощность P_r . Мощность P_a частично поглощается

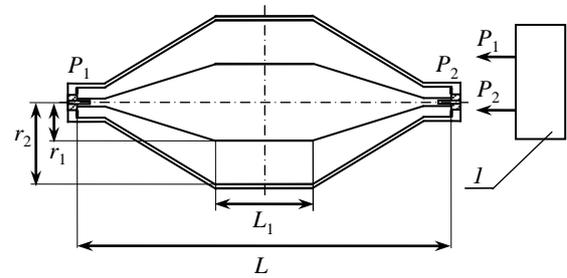


Рис. 5. Схема подключения ВАЦ к коаксиальной камере и ее геометрические параметры

Fig. 5. Connection diagram of the VNA to the coaxial cell and its geometric parameters

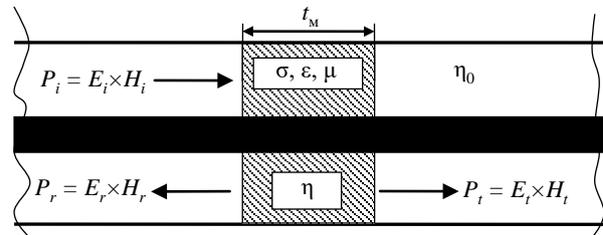


Рис. 6. Модель распространения ЭМВ в нагруженной образцом материала коаксиальной камере

Fig. 6. Model of electromagnetic wave propagation in a coaxial cell loaded with a material sample

образцом, а мощность P_t частично проникает через экран, что выражается в равенство мощностей $P_i = P_r + P_a + P_t$. Мощности отраженной (по порту 1) P_r и прошедшей P_t от порта 1 в порт 2 ЭМВ определяются через S -параметры как

$$|S_{11}|^2 = \frac{P_r}{P_i}; |S_{21}|^2 = \frac{P_t}{P_i}. \quad (15)$$

В результате выражение (15) для вычисления ЭЭ образца материала принимает вид [22]

$$\text{ЭЭ}_{\text{дБ}} = 20 \lg \left| \frac{S_{21u}}{S_{21l}} \right|, \quad (16)$$

где S_{21u} , S_{21l} – коэффициенты передачи коаксиальной камеры без образца и с образцом соответственно.

Модель для вычисления ЭЭ плоских многослойных экранирующих КМ, выполненных из n слоев с толщиной t_n , представлена в [2, 43]. В данной модели многослойный КМ (рис. 7, а) заменяется согласно [44] эквивалентной схемой из n последовательно соединенных отрезков ЛПД длиной t_n (рис. 7, б). Предполагается, что каждый n -й отрезок ЛПД (рис. 7, б) является однородным и изотропным слоем КМ со своими значениями σ_n , ϵ_{rn} и μ_{rn} , на основе которых вычисляются η_n и k_n .

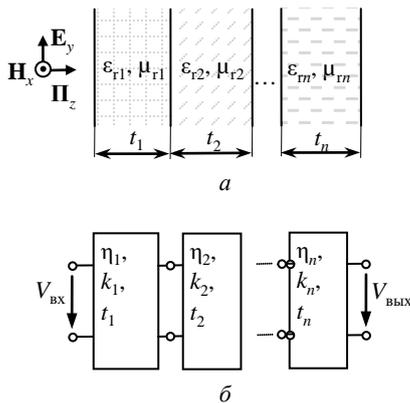


Рис. 7. Многослойный экранирующий КМ (а) и его эквивалентная схема из n отрезков ЛПД (б)

Fig. 7. Multilayer shielding composite material (а) and its equivalent circuit of n TL segments (б)

ЭЭ многослойного КМ вычисляется из отношения напряжений на входе ($V_{\text{вх}}$) и выходе ($V_{\text{вых}}$) эквивалентной схемы. Для их вычисления

используется $ABCD$ -матрица для несимметричного четырехполосника, которая для последовательно соединенных отрезков ЛПД с использованием телеграфных уравнений по аналогии с [2, 43, 45] записывается как

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \prod_{n=1}^N \begin{bmatrix} \text{ch}(-jk_n t_n) & \eta_n \text{sh}(-jk_n t_n) \\ \frac{\text{sh}(-jk_n t_n)}{\eta_n} & \text{ch}(-jk_n t_n) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

С учетом отражений на границах между слоями КМ результирующая ЭЭ многослойного экрана (рис. 7) вычисляется как [43]

$$\begin{aligned} \text{ЭЭ}_{\text{дБ}} &= 20 \lg \left[\frac{V_{\text{вх}}}{V_{\text{вых}}} \right] = \\ &= 20 \lg \left[\frac{A\eta_0 + B\eta_0^2 + C + D\eta_0}{2\eta_0} \right]. \quad (18) \end{aligned}$$

Объединив (17) и (18) и приняв КМ однослойным, ЭЭ можно вычислить как

$$\text{ЭЭ}_{\text{дБ}} = 20 \lg \left| \cos(kt_M) - j \left(\frac{\eta^2 + \eta_0^2}{2\eta\eta_0} \right) \sin(kt_M) \right|. \quad (19)$$

Анализ и сравнение результатов вычисления S -параметров и ЭЭ материалов. Изначально вычислены и измерены S -параметры ненагруженных сдвоенной и коаксиальной ТЕМ-камер. Для этого создана модель сдвоенной ТЕМ-камеры из двух ТЕМ-камер (рис. 8, а) с аналогичными ($a = 60.1$ мм, $b = 69.1$ мм, $g = 16$ мм) геометрическими параметрами (см. рис. 3) из [46, 47] и $|S_{11}| \leq -22$ дБ в диапазоне частот до 2 ГГц. Выполнено ее электродинамическое моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ), в диапазоне частот до 1 ГГц. С использованием указанных геометрических параметров ТЕМ-камеры вычислены $Z_{\text{ТЕМ}} = 55.3$ Ом по (5) и частотные зависимости $|S_{21}|$ и $|S_{31}|$ (рис. 9, а) сдвоенной ТЕМ-камеры по (2) с (8) и (9). Собрана экспериментальная установка (рис. 8, б) по схеме, представленной на рис. 2, и измерены частотные зависимости $|S_{11}|$ для каждой ТЕМ-камеры, а также $|S_{21}|$ и $|S_{31}|$ для сдвоенной ТЕМ-камеры с учетом толщин ТЕМ-камер

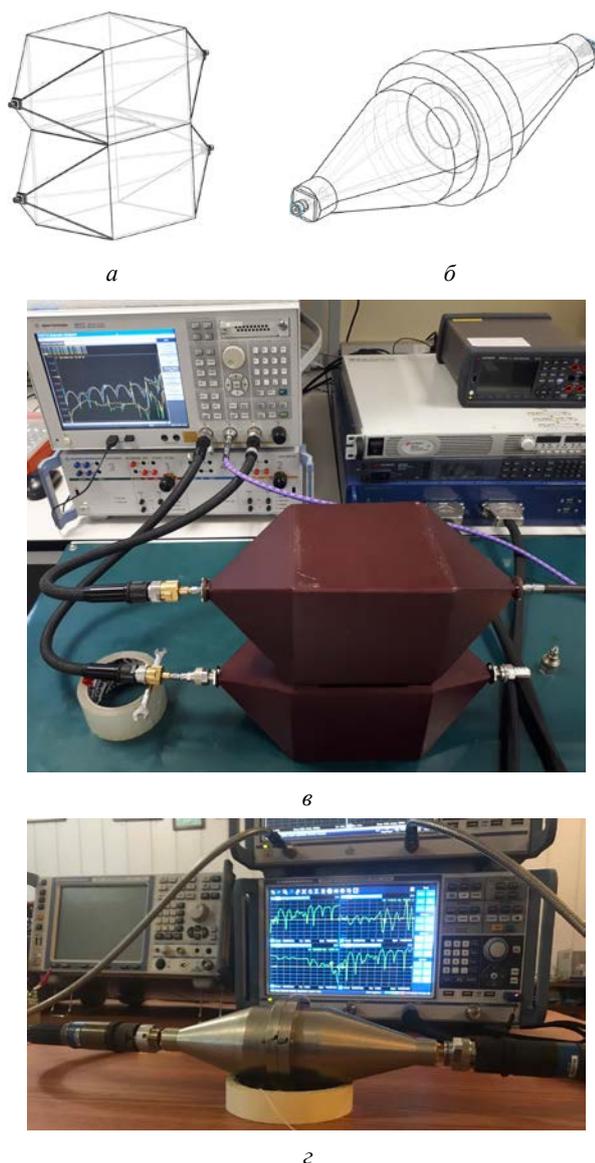


Рис. 8. Электродинамические модели (а, б) для вычисления и экспериментальные установки (в, з) для измерения S -параметров сдвоенной (а, в) и коаксиальной (б, з) ТЕМ-камер

Fig. 8. Electrodynamic models (a, b) for calculating and experimental setups (v, z) for measuring of S -parameters for dual (a, v) and coaxial (b, z) TEM cells

(2 мм) и оснастки (5.5 мм), суммарно $t_{an} = 9.5$ мм (рис. 9, а).

Аналогично создана электродинамическая модель ненагруженной коаксиальной камеры (рис. 8, б) с геометрическими параметрами из [48] и собрана экспериментальная установка по схеме, приведенной на рис. 5. Вычислены S -параметры коаксиальной камеры с использованием МКЭ, а также измерены (рис. 8, з) в диапазоне частот до 12 ГГц.

Анализ вычисленных и измеренных значений $|S_{31}|$ и $|S_{21}|$ из рис. 9, а показал, что на частоте 1 ГГц измеренные значения составили -34.2 дБ для $|S_{31}|$ и -37 дБ для $|S_{21}|$, что ниже вычисленных аналитически по (8) значений 6.6 и 1.2 дБ соответственно. Использование модели с предложенными выражениями (9) ($t_{an} = 9.5$ мм) уменьшает эту разницу до 3.2 и 1 дБ. Вычисленные электродинамическим моделированием значения составили -30.2 дБ и -32.7 дБ для $|S_{31}|$ и $|S_{21}|$ соответственно. Для измеренных значений в диапазоне частот 880...920 МГц проявляется резонансная область из-за оснастки из алюминия в апертуре сдвоенной ТЕМ-камеры. В резонансной области $|S_{21}|$ и $|S_{31}|$ достигают отклонения 14.3 дБ. При этом на вычисленных (аналитическим и электродинамическим методами) частотных зависимостях S -параметров данные резонансы отсутствуют. В связи с этим оснастка должна быть изготовлена из более высокопроводящего материала (меди) и иметь минимальную толщину, что позволит сместить резонанс в область более высоких частот (за 1 ГГц).

Из вычисленных МКЭ и измеренных частотных зависимостей S -параметров коаксиальной камеры (рис. 9, б) видно, что $|S_{11}| \leq -18.8$ дБ, а $|S_{21}| \geq -0.2$ дБ для вычисленных значений, тогда как для измеренных $|S_{11}| \leq -16.9$ дБ и $|S_{21}| \geq -0.36$ дБ.

Далее вычислены частотные зависимости ВП и ЭЭ на основе измеренных S -параметров нагруженных сдвоенной и коаксиальной ТЕМ-камер. Изначально вычислены для E - и H -полей частотные зависимости ВП по (11) и ЭЭ на основе коэффициентов A , R , M из [12]. Вычисления проведены на расстоянии 1 м в диапазоне частот 10 Гц...100 МГц (диапазон частот уменьшен с 1 ГГц до 100 МГц для наглядности вычисленных и измеренных результатов). В качестве материала использовалась медь ($\sigma = 5.8 \cdot 10^7$ См) толщиной $t_m = 254$ мкм, частотные зависимости ЭЭ $_{E,H}$ которой приведены в [12], а также аналогично вычислены и приведены на рис. 10. Сопротивление Z_k в (11) вычислялось для двух случаев.

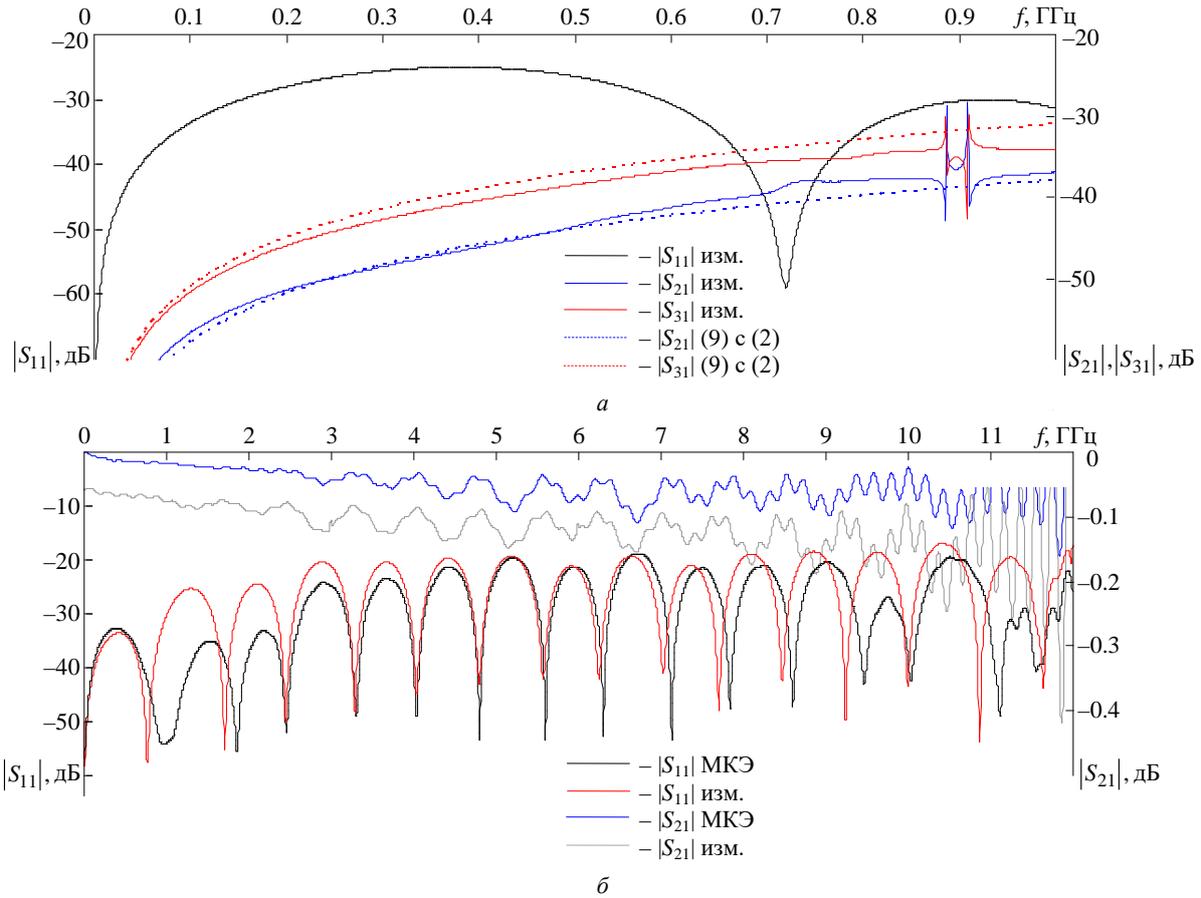


Рис. 9. Вычисленные и измеренные частотные зависимости S -параметров для ненагруженных материалом сдвоенной (а) и коаксиальной (б) ТЕМ-камер

Fig. 9. Calculated and measured frequency dependencies of S -parameters for dual (a) and coaxial (b) TEM cells not loaded with a material

В случае 1 Z_K выбрано как удельное поверхностное сопротивление $Z_K = 1/(\sigma t_M)$ аналогично [38]. В случае 2 Z_K получено из $ABCD$ -параметров для несимметричного Т-образного

четырёхполюсника ($B = Z_1 + Z_2 + (Z_1 Z_2)/Z_3$) в предположении, что соприкосновение исследуемого материала (Z_1, Z_2) с материалом одинаково для двух ТЕМ-камер (Z_3), при отсутствии

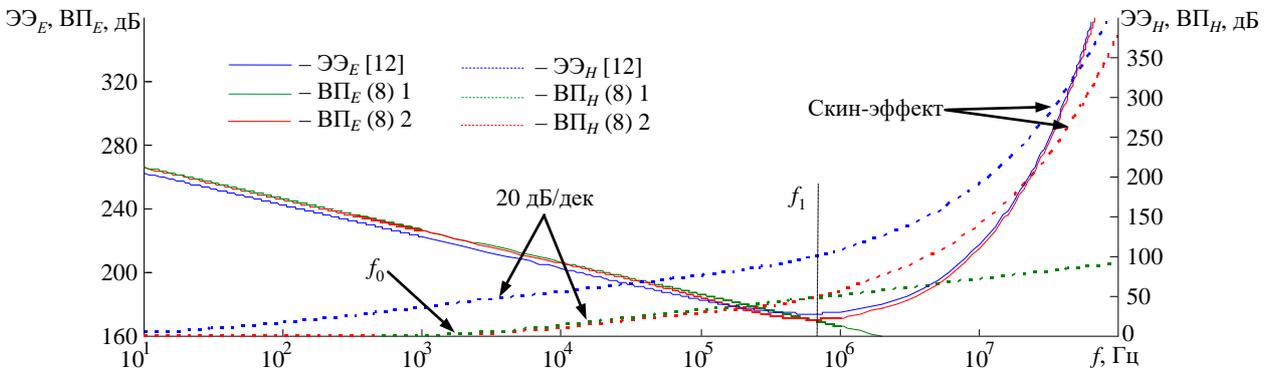


Рис. 10. Вычисленные частотные зависимости ЭЭ и ВП для E - и H -полей, полученные для двух случаев по (8) и с использованием выражений из [12]

Fig. 10. Calculated frequency dependencies of SE and IL for E - and H -fields, obtained for two cases according to (8) and using expressions from [12]

воздушного зазора как $Z_k = 2Z_M + Z_M^2/Z_k$.

Из рис. 10 видно, что для E -поля $ВП_E$ и $ЭЭ_E$ совпадают, а максимальная разница значений до частоты 1 МГц не превышает 5 дБ. При этом для случая 1 $ВП_E$ продолжают убывать и достигают 126 дБ на частоте 100 МГц (на графике не показано), тогда как для случая 2 максимальная разница значений сохраняется.

Для H -поля максимальная разница значений $ВП_H$ и $ЭЭ_H$ достигает 50 дБ в диапазоне частот $f_0 - f_1$, но при этом возрастание частотных зависимостей сохраняется одинаковым с крутизной 20 дБ/дек. Свыше f_1 разница между $ВП_H$ и $ЭЭ_H$ уменьшается только для случая 2, тогда как для случая 1 – увеличивается. В результате применения Z_k аналогично случаю 2, полученного на основе $ABCD$ -параметров, возможно получить $ВП$, схожие по поведению с частотными зависимостями $ЭЭ$ из [12].

Расхождения результатов $ВП_H$ и $ЭЭ_H$ (см. рис. 10) на частотах до f_0 могут объясняться низким сопротивлением контакта между материалом и корпусом ТЕМ-камеры, которое оказывает существенное влияние на распространение H -поля в ней даже при небольшом размере апертуры. Так, учитывая, что плотность тока $\mathbf{J} = \mathbf{n} \times \mathbf{H}$ прямоугольного резонатора на частоте f_0 связана с его периметром $\Pi = 2(a + b)$ и площадью $S = ab$ поперечного сечения [12], это аналогично может быть применено для ТЕМ-камеры с заданными размерами поперечного сечения a , b и апертуры r_h (б), а также при известных σ и r_k как

$$f_0 = \frac{d}{2\pi\mu_0 S} \left[\frac{\Pi}{\sigma t d} + r_k \right]. \quad (20)$$

Также, используя (20), можно вычислить r_k сдвоенной ТЕМ-камеры с материалом. Из рис. 10 установлено, что при $f_0 = 1990$ Гц значения частотной зависимости $ВП_H$ изменяются в 3 раза (для случаев 1 и 2). Вычисленное по (20) r_k на этой частоте составило 2.83 мОм. Уменьшение r_k в 2 раза (до 1.4 мОм) приводит к уменьшению f_0 до 1121 Гц, а увеличение r_k

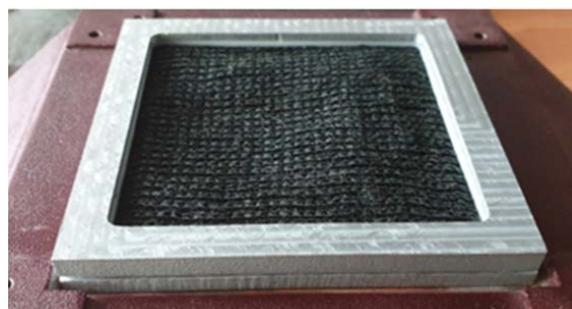
в 2 раза (до 6 мОм) к увеличению до 3927 Гц. Аналогичное смещение будет происходить для материалов тонких пленок с низкой σ . На основе вычисленных $ВП$ можно вычислить $ЭЭ$, применив коэффициенты $K_{E,H}$ из (14). При этом, в зависимости от l , значения $ЭЭ$ будут смещаться по амплитуде.

Если в (11) в Z_k взять $r_k \rightarrow 0$, то $ВП_{E,H}$ повторяют поведение $ЭЭ_{E,H}$ (при 3 фОм), а разница в значениях со случаем 2 минимальна. В реальной измерительной установке r_k между материалом и сдвоенной ТЕМ-камерой существенно выше и зависит от исследуемого материала, оснастки, ТЕМ-камер, площади соприкосновения и шероховатости соприкасающихся поверхностей. Это существенно влияет на различия между вычисленными и измеренными значениями.

Измерены S -параметры по схеме из рис. 2 с использованием измерительной установки, приведенной на рис. 8, в. Исследовались экранирующие хлопчатобумажная (рис. 11, а) с $t_M = 300$ мкм и трикотажная (рис. 11, б) с $t_M = 900$ мкм ткани [49], размещенные внутри



а



б

Рис. 11. Хлопчатобумажная (а) и трикотажная (б) экранирующие ткани, размещенные в оснастке в апертуре сдвоенной ТЕМ-камеры

Fig. 11. Cotton (a) and knitted (b) shielding fabrics placed in the snap in the aperture of a dual TEM cell

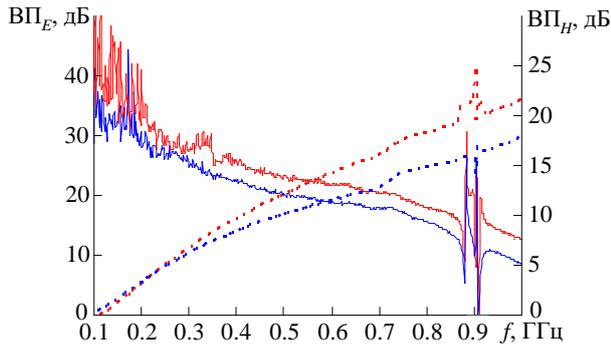


Рис. 12. Частотные зависимости ВП для E - (—) и H - (---) полей, вычисленные на основе измеренных S -параметров двоянной ТЕМ-камеры, для хлопчатобумажной (—) и трикотажной (—) радиотканей

Fig. 12. Frequency dependencies of IL for E - (—) and H - (---) fields, calculated on the basis of measured S -parameters of a dual TEM cell, for cotton (—) and knitted (—) radio fabrics

изготовленной оснастки в виде рамки, предотвращающей провисание ткани.

Измерения проводились при повороте оснастки вокруг собственной оси на каждые 90° . На основе измеренных S -параметров вычислены по (13) и усреднены значения частотных зависимостей $ВП_{E,H}$ экранирующих тканей (рис. 12).

Из рис. 12 видно, что $ВП_{E,H}$ для экранирующих тканей схожи по поведению с $ВП_{E,H}$ полученными для медной металлической пластины. При этом электрофизические параметры тканей неизвестны, а на рис. 12, аналогично рис. 10, наблюдается частота f_0 вблизи 100 МГц.

Выбран КМ с толщиной $t_M = 0.8$ мм. Частотные зависимости электрофизических параметров с учетом потерь ($\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$; $\mu = \mu' + j\mu''$)

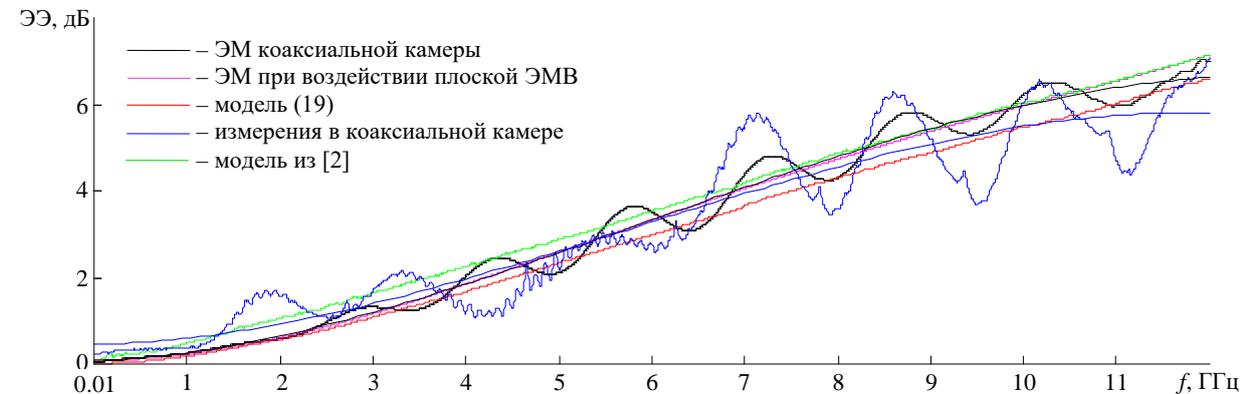


Рис. 13. Вычисленные аналитическим и электродинамическим (ЭМ) методами, а также измеренные частотные зависимости ЭЭ для РПМ [50]

Fig. 13. Calculated by analytical and electrodynamic (EM) methods, as well as measured frequency dependencies of SE for radio absorbing materials [50]

предоставлены производителем [50]. КМ имеет радиопоглощающие свойства и может быть эффективно применен в диапазоне высоких частот. Вычислена ЭЭ (рис. 13) КМ с использованием (19). Проведены электродинамическое моделирование с использованием МКЭ и измерения S -параметров нагруженной КМ коаксиальной камеры. Вычислены по (16) и аппроксимированы полиномом 2-й степени частотные зависимости ЭЭ. Для сравнения проведено электродинамическое моделирование КМ с использованием метода матрицы линии передачи (ММЛП) при воздействии на него плоской ЭМВ. При этом модель материала имела бесконечную протяженность, что задавалось за счет размещенных по краям периодических граничных условий. Также аналитически вычислены коэффициенты A , R и M [4] с использованием модели из [2], просуммированы и получена частотная зависимость ЭЭ материала при воздействии плоской ЭМВ.

Из рис. 13 видно, что разница вычисленных и измеренных частотных зависимостей ЭЭ не превышает 1 дБ. При этом измеренные и вычисленные S -параметры коаксиальной камеры при их пересчете в ЭЭ могут быть аппроксимированы для сглаживания и устранения волнообразного характера частотных зависимостей ЭЭ, что не окажет существенного влияния на результаты.

В результате приведенные модели и методы вычисления и измерения могут быть применены при оценке и тестировании новых и известных экранирующих материалов [49, 50] с учетом приведенных допущений и ограничений.

Преимуществом является отсутствие необходимости безэховой или реверберационной камеры, а также антенных измерений. Измерения можно выполнить на рабочем месте инженера, используя ВАЦ и два типа камер в виде сдвоенной и коаксиальной ТЕМ-камер. Автоматизация процесса измерения программными средствами аналогично [51] позволит ускорить процесс оценки ВП и ЭЭ материалов, что важно при производстве и создании новых экранирующих материалов и РЭС в целом.

Заключение. Систематизированы модели и методы вычисления и измерения ВП и ЭЭ материалов с использованием сдвоенных и коаксиальных ТЕМ-камер в широком диапазоне частот. Описана методика вычисления ВП для E - и H -полей на основе измеренных S -параметров в сдвоенной ТЕМ-камере.

Предложены выражения для вычисления комплексных коэффициентов возбуждения (a_0 и b_0) в модели ненагруженной сдвоенной ТЕМ-камеры, отличающиеся учетом толщины материала ТЕМ-камеры и оснастки, предотвращающей провисание тонкого материала в ней, и позволяющие уменьшить разницу между измеренными и вычисленными значениями $|S_{31}|$ и $|S_{21}|$ до 3.2 и 1 дБ соответственно.

Сравнены результаты вычисления ВП и ЭЭ с полученными стандартизированной классической моделью. Представлены частотные зависимости ВП для E - и H -полей, вычисленные на основе измеренных S -параметров сдвоенной ТЕМ-камеры с размещенными внутри хлопчатобумажной и трикотажной экранирующими тканями. Предложено на основе несимметричного Т-образного четырехполюсника, вычисление сопротивления контакта Z_k между исследуемым материалом и сдвоенной ТЕМ-камерой. Используя полученные коэффициенты (a_0 и b_0) и известные выражения для ВП, а также выражение для сопротивления контакта Z_k , можно создать модель для вычисления S -параметров нагруженной сдвоенной ТЕМ-камеры с оснасткой, что позволит вычислять ВП материалов с заданными электрофизическими параметрами и сопоставлять результаты вычисления и измерения в сдвоенной ТЕМ-камере с результатами других методов. Сравнены результаты, вычисленные классической моделью и электродинамическим моделированием с экспериментальными результатами для КМ в новой запатентованной коаксиальной ТЕМ-камере. В перспективе результаты предполагается использовать при реализации виртуальных испытаний.

Список литературы

1. Paul C. R. Introduction to Electromagnetic Compatibility. 2nd ed. N. J.: John Wiley & Sons, Inc., 2005. 989 p.
2. Electromagnetic Shielding: Theory and Applications / S. Celozzi, R. Araneo, P. Burghignoli, G. Lovat. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2023. 563 p.
3. Князев А. Д., Кечиев Л. Н., Петров Б. В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 1989. 229 с.
4. Schelkunoff S. A. Electromagnetic Waves. New York: D. Van Nostrand Company, Inc., 1943. 543 p.
5. Teshe F. M., Ianoz M. V., Karlsson T. EMC Analysis Methods and Computational Models. New Jersey: John Wiley & Sons, 1997. 623 p.
6. Mendez H. A. Shielding Theory of Enclosures with Apertures // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 1978. Vol. EMC-20, № 2. P. 296–305. doi: 10.1109/TEMC.1978.303722
7. EM Performance of Conductive Composite Laminate Made of Nanostructured Materials for Aerospace Application / V. P. Bui, W. Thitsartarn, E.-X. Liu, J. Y. C. Chuan, E.-K. Chua // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2015. Vol. 57, № 5. P. 1139–1148. doi: 10.1109/temc.2015.2432831
8. Balan I., Morari C., Patroi E. Composite Materials for Electromagnetic Shielding // U.P.B. Sci. Bull., Series B. 2016. Vol. 78, № 2. P. 233–238.
9. Sevgi L. Electromagnetic Screening and Shielding-Effectiveness (SE) Modeling // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2009. Vol. 51, № 1. P. 211–216. doi: 10.1109/map.2009.4939074
10. Shielding Effectiveness of Shields and Their Combined Double-Layer Shields for Low Frequency Pulsed Magnetic Field / Zheng Pan, Yue-bo Li, Jian Zhao, Sheng Jia, Zheng-yu Huang // Proc. of IEEE Intern. Conf. on Computational Electromagnetics (ICCEM). Shanghai, China, 20–22 March 2019. IEEE, 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/compem.2019.8779048
11. Шапиро Д. Н. Основы теории электромагнитного экранирования. Л.: Энергия, 1975. 109 с.
12. ECSS-E-HB-20-07A. Space Engineering – Space Systems Electromagnetic Compatibility Handbook. URL: <https://ecss.nl/hbstms/ecss-e-hb-20-07a-electromagnetic-compatibility-handbook-5-september-2012/> (дата обращения: 19.08.2024).
13. ECSS-E-ST-20-07C. Space Engineering – Electromagnetic Compatibility. URL: <https://ecss.nl/standard/>

ecss-e-st-20-07c-rev-2-electromagnetic-compatibility-3-january-2022/ (дата обращения: 19.08.2024).

14. Ansys HFSS. URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-hfss> (дата обращения: 19.08.2024).

15. Ott H. W. Noise Reduction Techniques in Electronic Systems. N. J.: John Wiley & Sons, Inc., 1988. 448 p.

16. McDowell A., Hubing T. Analysis and Comparison of Plane Wave Shielding Effectiveness Decompositions // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2014. Vol. 56, № 6. P. 1711–1714. doi: 10.1109/temc.2014.2332133

17. Ondrejka A. R., Adams J. W. Shielding Effectiveness (SE) Measurement Techniques // Nat. Symp. on Electromagn. Compat., San Antonio, TX, USA, 24–26 Apr. 1984. IEEE, 1984. P. 249–256. doi: 10.1109/ISEMC.1984.7571012

18. Stanescu C., Chita M. A. Some Aspects Regarding the Experimental Methods for Determining the Shielding Effectiveness of Materials in the Microwave Range // Intern. Conf. on Technical and Physical Problems of Electrical Engineering (ICTPE-2014), Baku, Azerbaijan, 7–8 Sept. 2014. P. 275–278. doi: 10.13140/rg.2.1.4371.5601

19. IEEE Std 299–2006. Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4117954> (дата обращения: 19.08.2024).

20. MIL-STD-285. Method of Attenuation Measurements for Enclosures, Electromagnetic Shielding, for Electronic Test Purposes. URL: <https://www.hftechnology.nl/wp-content/uploads/MIL-STD-285.pdf> (дата обращения: 19.08.2024).

21. IEEE Std 299.1–2013. Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having All Dimensions Between 0.1 m and 2 m. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6712029> (дата обращения: 19.08.2024).

22. ASTM D4935-18. Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. URL: <https://www.astm.org/d4935-18.html> (дата обращения: 19.08.2024).

23. Badic M., Marinescu M.-J. The Failure of Coaxial TEM Cells ASTM Standards Methods in H. F. Range // Proc. of IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. Minneapolis, USA, 19–23 Aug. 2002. IEEE, 2002. P. 29–34. doi: 10.1109/ISEMC.2002.1032442

24. A Test Method for Shielding Effectiveness of Materials against Electromagnetic Pulse Based on Coaxial Flange / Y. Liu, W. Wei, C. Xiang, N. Xin, Z. Mo, J. Rui, L. Jinxi // Energies. 2023. Vol. 16, № 18. P. 6701. doi: 10.3390/en16186701

25. Wilson P. F., Ma M. T. A Study of Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials. Natl. Bur. Stand. Tech. Note 1095, USA, 1986. 72 p.

26. Wilson P. F., Ma M. T., Adams J. W. Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials. Pt. I: Far-Field Source Simulation // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1988. Vol. 30, № 3. P. 239–250. doi: 10.1109/15.3302

27. Setup for EMI Shielding Effectiveness Tests of Electrically Conductive Polymer Composites at Frequencies up to 3.0 GHz / R. Valente, C. De Ruijter, D. Vlasveld, S. Van Der Zwaag, P. Groen // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 16665–16675. doi: 10.1109/access.2017.2741527

28. Influence of Planar Material Size and Position on Shielding Effectiveness Measurements Using the Dual Waveguide Method / E. Tourounoglou, V. Gkatsi, A. Roc'h, R. Vogt-Ardatjew, H. Schipper, F. Leferink // Proc. of IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. Barcelona, Spain, 2–6 Sept. 2019. IEEE, 2019. P. 707–711. doi: 10.1109/emceurope.2019.8871968

29. Rudd M., Baum T.C., Ghorbani K. Determining High-Frequency Conductivity Based on Shielding Effectiveness Measurement Using Rectangular Waveguides // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. 2019. Vol. 69, № 1. P. 155–162. doi: 10.1109/tim.2019.2895930

30. Wilson P. F., Ma M. T. Small Aperture Analysis of the Dual TEM Cell and an Investigation of Test Object Scattering in a Single TEM Cell. National Bureau of Standards, Tech. Note 1076, USA, 1984. 57 p.

31. Crawford M. L. Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cell // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1974. Vol. 16, № 4. P. 189–195. doi: 10.1109/temc.1974.303364

32. Wilson P. F., Ma M. T. Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials. Pt. II: Near-Field Source Simulation // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1988. Vol. 30, № 3. P. 251–259. doi: 10.1109/15.3303

33. Wilson P. F. A Comparison between Near-Field Shielding-Effectiveness Measurements Based on Coaxial Dipoles and Electrically Small Apertures // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1988. Vol. 30, № 1. P. 23–28. doi: 10.1109/15.19884

34. Analyzing the Attenuation of Electromagnetic Shielding Materials for Frequencies Under 1 GHz / V. Voicu, I. Pătru, P. M. Nicolae, L. A. Dina // Proc. of Int. Symp. on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). Bucharest, Romania, 23–25 March 2017. IEEE, 2017. P. 336–340. doi: 10.1109/atee.2017.7905057

35. Higgins D. F., Wheeler R., Wenaas E. A Comparison of Theoretical Expressions and Experimental Data for EM Penetration through Small Apertures // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1985. Vol. 32, № 6. P. 4340–4345. doi: 10.1109/tns.1985.4334120

36. Casey K. F. Low-Frequency Electromagnetic Penetration of Loaded Apertures // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1981. Vol. EMC-23, iss. 4. P. 367–377. doi: 10.1109/aps.1992.221738

37. Shielding Effectiveness Evaluation of Metalized and Polypyrrole-Coated Fabrics / J. Avloni, M. Ouyang, L. Florio, A. R. Henn, A. Sparavigna // J. of Thermoplastic Composite Materials. 2007. Vol. 20, iss. 3. P. 241–254. doi: 10.1177/0892705707076718

38. Wilson P. F., Ma M. T. Shielding-Effectiveness Measurements with a Dual TEM Cell // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1985. Vol. EMC-27, iss. 3. P. 137–142. doi: 10.1109/temc.1985.304277

39. McDonald N. A. Electric and Magnetic Coupling through Small Apertures in Shield Walls of Any Thickness // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1972. Vol. 20, iss. 10. P. 689–695. doi: 10.1109/tmtt.1972.1127844

40. Manara A. Measurement of Material Shielding Effectiveness Using a Dual TEM Cell and Vector Network Analyzer // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1996. Vol. 38, № 3. P. 327–333. doi: 10.1109/15.536062

41. Collin R. E. Field Theory of Guided Waves. 2nd ed. N. J.: Wiley-IEEE Press, 1990. 864 p.

42. Bethe H. A. Theory of Diffraction by Small Holes // Physical Review. 1944. Vol. 66, № 7. P. 163–182. doi: 10.1103/physrev.66.163

43. Shi D., Gao Y., Shen Y. Determination of Shielding Effectiveness of Multilayer Shield by Making Use of Transmission Line Theory // Proc. of Int. Symp. on Electromagn. Compat. and Electromagnetic Ecology. Russia, Saint Petersburg, 26–29 June 2007. IEEE, 2007. P. 1–3. doi: 10.1109/emceco.2007.4371656

44. Schulz R. B., Plantz V. C., Brush D. R. Shielding Theory and Practice // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1988. Vol. 30, № 3. P. 187–201. doi: 10.1109/15.3297

45. Analytical Model and Software for Evaluating the Shielding Materials Properties / A. A. Ivanov, A. A. Kvasnikov, I. A. Onishchenko, A. V. Demakov, S. P. Kuksenko

// IEEE 22nd Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Souzga, Russia, 30 June–4 July 2021. IEEE, 2021. P. 1–5. doi: 10.1109/edm52169.2021.9507593

46. ТЕМ-камера для оценки уровней помехоэмиссии и помехоустойчивости радиоэлектронных средств с возможностью исследования биологических объектов в диапазоне частот до 2 ГГц / М. Е. Комнатнов, Т. Р. Газизов, О. А. Матвеев // Технологии электромагнитной совместимости. 2018. № 4 (67). С. 46–56.

47. Пат. RU 2606173. ТЕМ-камера / М. Е. Комнатнов, Т. Р. Газизов. Опубл. 10.01.2017.

48. Пат. RU 2759079. Коаксиальная камера для измерения эффективности электромагнитного экранирования радиопоглощающих материалов / А. В. Демаков, М. Е. Комнатнов, А. А. Иванов, И. И. Николаев, Т. Р. Газизов. Опубл. 09.11.2021.

49. Полимерные композитные материалы ООО «ТехЭкра». URL: <http://nwttc.ru/proekty/ekraniruyuwie-materialy/> (дата обращения: 18.01.2024).

50. РТ-технологии. URL: <https://www.rttex.ru/> (дата обращения: 18.01.2024).

51. ФИПС. Программы для ЭВМ. Базы данных. ТИМС URL: <https://www.fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=PrEVM&id=120548AC-8096-4D04-B18D-9175649C2440> (дата обращения: 19.08.2024).

Информация об авторе

Комнатнов Максим Евгеньевич – кандидат технических наук (2016), доцент кафедры телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор более 160 научных работ. Сфера научных интересов – электромагнитная совместимость; экранирование; измерительные системы; численные методы.

Адрес: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия

E-mail: maxmek@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6463-2889>

References

1. Paul C. R. Introduction to Electromagnetic Compatibility. 2nd ed. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2005, 989 p.

2. Celozzi S., Araneo R., Burghignoli P., Lovat G. Electromagnetic Shielding: Theory and Applications. New Jersey, Wiley-IEEE Press, 2023, 563 p.

3. Knyazev A. D., Kechiev L. N., Petrov B. V. *Konstruyivanie radioelektronii i elektronno-vichislitelnoi apparatury s ychetom electro-magnitnoi sovместимости* [Design of Radio-Electronic and Electronic-Computing Equipment with Consideration of Electromagnetic Compatibility]. Moscow, Radio i svyaz, 1989, 229 p. (In Russ.)

4. Schelkunoff S. A. Electromagnetic Waves. New York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1943, 543 p.

5. Teshe F. M., Ianoz M. V., Karlsson T. EMC Analysis Methods and Computational Models. New Jersey, John Wiley & Sons, 1997, 623 p.

6. Mendez H. A. Shielding Theory of Enclosures with Apertures. IEEE Trans. on Electromagnetic Com-

patibility. 1978, vol. EMC-20, no. 2, pp. 296–305. doi: 10.1109/TEMC.1978.303722

7. Bui V. P., Thitsartarn W., Liu E.-X., Chuan J. Y. C., Chua E.-K. EM Performance of Conductive Composite Laminate Made of Nanostructured Materials for Aerospace Application. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2015, vol. 57, no. 5, pp. 1139–1148. doi: 10.1109/temc.2015.2432831

8. Balan I., Morari C., Patroi E. Composite Materials for Electromagnetic Shielding. U.P.B. Sci. Bull., Series B. 2016, vol. 78, no. 2, pp. 233–238.

9. Sevgi L. Electromagnetic Screening and Shielding-Effectiveness (SE) Modeling. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2009, vol. 51, no. 1, pp. 211–216. doi: 10.1109/map.2009.4939074

10. Zheng Pan, Yue-bo Li, Jian Zhao, Sheng Jia, Zheng-yu Huang. Shielding Effectiveness of Shields and Their Combined Double-Layer Shields for Low Frequency Pulsed Magnetic Field. Proc. of IEEE Intern.

- Conf. on Computational Electromagnetics (ICCEM). Shanghai, China, 20–22 March 2019. IEEE, 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/compem.2019.8779048
11. Shapiro D. N. *Osnovi teorii elektromagnitnogo ekranirovaniya* [Fundamentals of Elec-Tromagnetic Shielding Theory]. Leningrad, *Energiya*, 1975, p. 109. (In Russ.)
12. ECSS-E-HB-20-07A. Space Engineering – Space Systems Electromagnetic Compatibility Handbook. Available at: <https://ecss.nl/hbstms/ecss-e-hb-20-07a-electromagnetic-compatibility-handbook-5-september-2012/> (accessed: 19.08.2024).
13. ECSS-E-ST-20-07C. Space Engineering – Electromagnetic Compatibility. Available at: <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-20-07c-rev-2-electromagnetic-compatibility-3-january-2022/> (accessed: 19.08.2024).
14. Ansys HFSS. Available at: <https://cae-expert.ru/product/ansys-hfss> (accessed: 19.08.2024).
15. Ott H. W. *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 1988, 448 p.
16. McDowell A., Hubing T. Analysis and Comparison of Plane Wave Shielding Effectiveness Decompositions. *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*. 2014, vol. 56, no. 6, pp. 1711–1714. doi: 10.1109/temc.2014.2332133
17. Ondrejka A. R., Adams J. W. Shielding Effectiveness (SE) Measurement Techniques. *Nat. Symp. on Electromagn. Compat.*, San Antonio, TX, USA, 24–26 Apr. 1984. IEEE, 1984, pp. 249–256. doi: 10.1109/ISEMC.1984.7571012
18. Stanescu C., Chita M. A. Some Aspects Regarding the Experimental Methods for Determining the Shielding Effectiveness of Materials in the Microwave Range. *Intern. Conf. on Technical and Physical Problems of Electrical Engineering (ICTPE-2014)*, Baku, Azerbaijan, 7–8 Sept. 2014, pp. 275–278. doi: 10.13140/rg.2.1.4371.5601
19. IEEE Std 299–2006. Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4117954> (accessed: 19.08.2024).
20. MIL-STD-285. Method of Attenuation Measurements for Enclosures, Electromagnetic Shielding, for Electronic Test Purposes. Available at: <https://www.hftechnology.nl/wp-content/uploads/MIL-STD-285.pdf> (accessed: 19.08.2024).
21. IEEE Std 299.1–2013. Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having All Dimensions Between 0.1 m and 2 m. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6712029> (accessed: 19.08.2024).
22. ASTM D4935-18. Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. Available at: <https://www.astm.org/d4935-18.html> (accessed: 19.08.2024).
23. Badic M., Marinescu M.-J. The Failure of Coaxial TEM Cells ASTM Standards Methods in H. F. Range. *Proc. of IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat.* Minneapolis, MN, USA, 19–23 Aug. 2002. IEEE, 2002, pp. 29–34. doi: 10.1109/ISEMC.2002.1032442
24. Liu Y., Wei W., Xiang C., Xin N., Mo Z., Rui J., Jinxi L. A Test Method for Shielding Effectiveness of Materials against Electromagnetic Pulse Based on Coaxial Flange. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 18, pp. 6701. doi: 10.3390/en16186701
25. Wilson P. F., Ma M. T. A Study of Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials. *Natl. Bur. Stand. Tech. Note 1095*, USA, 1986, 72 p.
26. Wilson P. F., Ma M. T., Adams J. W. Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials: Part I: Far-Field Source Simulation. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 1988, vol. 30, no. 3, pp. 239–250. doi: 10.1109/15.3302
27. Valente R., De Ruijter C., Vlasveld D., Van Der Zwaag S., Groen P. Setup for EMI Shielding Effectiveness Tests of Electrically Conductive Polymer Composites at Frequencies up to 3.0 GHz. *IEEE Access*. 2017, vol. 5, pp. 16665–16675. doi: 10.1109/access.2017.2741527
28. Tourounoglou E., Gkatsi V., Roc'h A., Vogt-Ardatjew R., Schipper H., Leferink F. Influence of Planar Material Size and Position on Shielding Effectiveness Measurements Using the Dual Waveguide Method. *Proc. of IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat.* Barcelona, Spain, 2–6 Sept. 2019. IEEE, 2019, pp. 707–711. doi: 10.1109/emceurope.2019.8871968
29. Rudd M., Baum T.C., Ghorbani K. Determining High-Frequency Conductivity Based on Shielding Effectiveness Measurement Using Rectangular Waveguides. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*. 2019, vol. 69, no. 1, pp. 155–162. doi: 10.1109/tim.2019.2895930
30. Wilson P. F., Ma M. T. Small Aperture Analysis of the Dual TEM Cell and an Investigation of Test Object Scattering in a Single TEM Cell. *National Bureau of Standards, Tech. Note 1076*, USA, 1984. 57 p.
31. Crawford M. L. Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cell. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 1974, vol. 16, no. 4, pp. 189–195. doi: 10.1109/temc.1974.303364
32. Wilson P. F., Ma M. T. Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials: Part II: Near-Field Source Simulation. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 1988, vol. 30, no. 3, pp. 251–259. doi: 10.1109/15.3303
33. Wilson P. F. A Comparison between Near-Field Shielding-Effectiveness Measurements Based on Coaxial Dipoles and Electrically Small Apertures. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 1988, vol. 30, no. 1, pp. 23–28. doi: 10.1109/15.19884
34. Voicu V., Pătru I., Nicolae P. M., Dina L. A. Analyzing the Attenuation of Electromagnetic Shielding Materials for Frequencies Under 1 GHz. *Proc. of Int. Symp. on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. Bucharest, Romania, 23–25 March 2017. IEEE, 2017, pp. 336–340. doi: 10.1109/atee.2017.7905057

35. Higgins D. F., Wheeler R., Wenaas E. A Comparison of Theoretical Expressions and Experimental Data for EM Penetration Through Small Apertures. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1985, vol. 32, no. 6, pp. 4340–4345. doi: 10.1109/tns.1985.4334120
36. Casey K. F. Low-Frequency Electromagnetic Penetration of Loaded Apertures. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 1981, vol. 23, iss. 4, pp. 367–377. doi: 10.1109/aps.1992.221738
37. Avloni J., Ouyang M., Florio L., Henn A. R., Sparavigna A. Shielding Effectiveness Evaluation of Metalized and Polypyrrole-Coated Fabrics. *J. of Thermoplastic Composite Materials*. 2007, vol. 20, iss. 3, pp. 241–254. doi: 10.1177/0892705707076718
38. Wilson P. F., Ma M. T. Shielding-Effectiveness Measurements with a Dual TEM Cell. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 1985, vol. 27, iss. 3, pp. 137–142. doi: 10.1109/temc.1985.304277
39. McDonald N. A. Electric and Magnetic Coupling through Small Apertures in Shield Walls of Any Thickness. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1972, vol. 20, iss. 10, pp. 689–695. doi: 10.1109/tmtt.1972.1127844
40. Manara A. Measurement of Material Shielding Effectiveness Using a Dual TEM Cell and Vector Network Analyzer. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 1996, vol. 38, no. 3, pp. 327–333. doi: 10.1109/15.536062
41. Collin R. E. *Field Theory of Guided Waves*. 2nd ed. New Jersey, Wiley-IEEE Press, 1990, 864 p.
42. Bethe H. A. Theory of Diffraction by Small Holes. *Physical Review*. 1944, vol. 66, no. 7, pp. 163–182. doi: 10.1103/physrev.66.163
43. Shi D., Gao Y., Shen Y. Determination of Shielding Effectiveness of Multilayer Shield by Making Use of Transmission Line Theory. *Proc. of Int. Symp. on Electromagn. Compat. and Electromagnetic Ecology*. Russia, Saint Petersburg, 26–29 June 2007. IEEE, 2007, pp. 1–3. doi: 10.1109/emceco.2007.4371656
44. Schulz R. B., Plantz V. C., Brush D. R. Shielding Theory and Practice. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 1988, vol. 30, no. 3, pp. 187–201. doi: 10.1109/15.3297
45. Ivanov A. A., Kvasnikov A. A., Onishchenko I. A., Demakov A. V., Kuksenko S. P. Analytical Model and Software for Evaluating the Shielding Materials Properties. *IEEE 22nd Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Souzga, Russia, 30 June–4 July 2021. IEEE, 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/edm52169.2021.9507593
46. Komnatnov M. E., Gazizov T. R., Matveyenko O. A. The TEM Cell for Assessment of Radioelectronic Equipment of Emission and Immunity with the Possibility of Studying Biologic Objects in the Frequency Range up to 2 GHz. *Technologii elektromagnitnoii sovmestivosti* [Electromagnetic Compatibility Technologies]. 2018, no. 4 (67), pp. 46–56. (In Russ.)
47. Komnatnov M. E., Gazizov T. R. TEM Cell. *Pat.RU 2606173*. Publ. 10.01.2017 (In Russ.)
48. Demakov A. V., Komnatnov M. E., Ivanov A. A., Nikolaev I. I., Gazizov T. R. Coaxial Chamber for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Radio Absorbing Materials. *Pat RU 2759079*. Publ. 09.11.2021 (In Russ.)
49. NWTTC is a part nanotechnology industry network. Available at: <http://nwttc.ru/proekty/ekraniruyuwie-materialy/> (accessed: 18.01.2024).
50. RT-Technology. Available at: <https://www.rttex.ru/> (accessed: 18.01.2024).
51. FIPS. Computer Programs, Databases, TIC. Available at: <https://www.fips.ru/publication-web/publications/document?lang=en&type=doc&tab=PrEVM&id=120548AC-8096-4D04-B18D-9175649C2440> (accessed: 19.08.2024).

Information about the author

Maxim E. Komnatnov, Cand. Sci. (Eng.) (2016), Associate Professor of the Department of Television and Management of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic compatibility; shielding; measuring systems; numerical methods. Address: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenina Ave., Tomsk 634050, Russia E-mail: maxmek@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-6463-2889>