

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

XIV Международная научно-практическая конференция

# ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

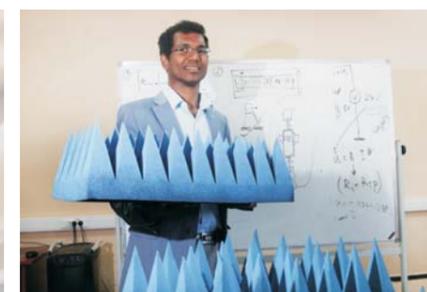
Материалы докладов

г. Томск

28–30 ноября 2018 г.

В двух частях

ЧАСТЬ 1



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

# **ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

**XIV Международная научно-практическая конференция**

**28–30 ноября 2018 г.**

**Материалы докладов**

**В двух частях**

**Часть 1**

В-Спектр  
Томск – 2018

**УДК 621.37/39 + 681.3**  
**ББК (Ж/О) 32.84.85.965**  
**Э 45**

Э 45 **Электронные средства и системы управления:** материалы докладов XIV Международной научно-практической конференции (28–30 ноября 2018 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2018. – 348 с.  
ISBN 978-5-91191-401-1  
ISBN 978-5-91191-402-8 (Ч. 1)  
ISBN 978-5-91191-403-5 (Ч. 2)

Сборник содержит материалы докладов, представленных на XIV Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 28–30 ноября 2018 г.), по следующим направлениям: радиотехнические и телекоммуникационные системы; наноэлектроника СВЧ; нанотехнологии в электронике; антенны и микроволновые устройства СВЧ; нелинейная оптика; интеллектуальная силовая электроника и преобразовательная техника; плазменная электроника; биомедицинская электроника; автоматизация и оптимизация систем управления и обработка информации; интеллектуальные системы проектирования, автоматизация проектирования электронных устройств и систем; информационная безопасность; информационные технологии в управлении и принятии решений; информационные технологии в обучении; инновации в сфере электроники и управления; оптоэлектроника и фотоника; видеоинформационные технологии и цифровое телевидение.

Для студентов, преподавателей и специалистов, интересующихся проблемами систем управления.

УДК 621.37/39 + 681.3  
ББК (Ж/О) 32.84.85.965

*Конференция проводится при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).  
Проект № 18-07-20094*

*Часть статей секций 2–22 направлена для публикации  
в журнале «Доклады ТУСУРа»*

**ISBN 978-5-91191-401-1**  
**ISBN 978-5-91191-402-8 (Ч. 1)**

© ТУСУР, 2018  
© Коллектив авторов, 2018

## СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО «КЕЙСАЙТ ТЕКНОЛОДЖИЗ»



ООО «Кейсайт Текнолоджиз»  
Россия, 115054, г. Москва,  
Космодамианская наб., 52, стр. 3.

Тел.: 495 797 39 00  
Факс: 495 797 39 02  
[www.keysight.ru](http://www.keysight.ru)

Keysight Technologies – мировой технологический лидер на рынке контрольно-измерительных решений для электронной, оборонной, аэрокосмической и телекоммуникационной промышленности.

Как самостоятельная компания Keysight Technologies была образована в 2014 г. в результате стратегического разделения компании Agilent Technologies, которая, в свою очередь, до 1999 г. входила в корпорацию Hewlett-Packard. Первый измерительный прибор под маркой Hewlett-Packard был выпущен более 75 лет назад.

В настоящий момент компания Keysight Technologies предоставляет самый широкий на рынке спектр лабораторных, модульных и портативных контрольно-измерительных приборов, в том числе оборудование для радиоизмерений (генераторы сигналов, анализаторы сигналов, анализаторы цепей), осциллографы и приборы общего назначения (мультиметры, источники питания, генераторы импульсов, системы сбора данных, логические анализаторы, ручные приборы), решения для тестирования телекоммуникаций, а также системы автоматизированного проектирования и моделирования электронных устройств.

В России приборы Keysight Technologies, ранее производимые под маркой Hewlett-Packard / Agilent, используются уже более 45 лет и по праву считаются наиболее точным и надежным контрольно-измерительным оборудованием на рынке.

Российский офис компании Keysight Technologies предлагает своим клиентам локальную техническую и сервисную поддержку, техническую документацию на русском языке. Для серий малогабаритных осциллографов, генераторов сигналов и анализаторов спектра разработаны русскоязычные интерфейсы пользователя. На большинство приборов есть сертификаты об утверждении типа средств измерений. На постоянной основе ведется работа по включению в Госреестр новых приборов Keysight Technologies.

Среди крупнейших заказчиков Keysight Technologies в России ведущие научно-исследовательские институты, конструкторские бюро, вузы, крупнейшие операторы связи.

В 2012 г. компания Keysight Technologies открыла два дополнительных региональных офиса в России – в Приволжском и Сибирском федеральных округах. В 2013 г. дополнительный офис открыт в Ростове-на-Дону, в 2014 г. – в Санкт-Петербурге.

Информация о компании Keysight Technologies доступна в сети Интернет по адресу: [www.keysight.ru](http://www.keysight.ru)

*Генеральный директор ООО «Кейсайт Текнолоджиз»  
Смирнова Галина Владимировна*

## СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО «ЛЕКРОЙ РУС»



ООО «ЛеКрой РУС»  
119071, г. Москва, 2-й Донской  
проезд, д. 10, стр. 4, 2-й этаж

Тел.: 495 777-5591  
Факс: 495 640-3023  
<https://prist.ru/>

Компания «ПриСТ» основана в 1994 г. Сегодня АО «ПриСТ» один из крупнейших российских поставщиков приборов для электроизмерений, радиоизмерений и измерений параметров окружающей среды (<https://prist.ru/>).

В компании работает более 80 высококвалифицированных сотрудников, открыты представительства в Санкт-Петербурге и Екатеринбурге, имеется дилерская сеть по всей территории России, дилеры в Белоруссии и Казахстане.

Основные виды деятельности:

- Поставки измерительного оборудования.
- Технические консультации по подбору средств измерения и вариантам замен приборов, снятых с производства или морально устаревших.
- Услуги по поверке и калибровке СИ.
- Услуги по техническому обслуживанию СИ, включая закрытую калибровку.
- Услуги автоматизации процессов поверки и калибровки.
- Испытания для целей утверждения типа СИ.
- Сервисная поддержка, гарантийное и послегарантийное обслуживание.
- Предоставление СИ в арендное пользование.

Компания «ПриСТ» является эксклюзивным поставщиком на территории России и СНГ продукции таких компаний, как APPA, Center, Good Will Instrument, SEW, Tabor Electronics, Teledyne LeCroy и Wayne Kerr Electronics. Дистрибьюторские и партнерские соглашения связывают компанию со всемирно известными производителями: Anritsu, Fluke, Keysight, National Instruments, Rohde&Schwarz, Pendulum, Spectracom, TDK-Lambda, Pico Technology.

С 2004 г. АО «ПриСТ» представляет на российском рынке компанию LeCroy (с 2012 г. Teledyne LeCroy) – одного из мировых лидеров в разработке и производстве цифровых осциллографов. Осциллографы высочайшего класса помогают инженерам-конструкторам и учёным осуществлять наблюдение, измерение и анализ сигналов в электронных цепях и трактах различных устройств. Компания «Teledyne LeCroy» является одним из технологических лидеров на рынке цифровых осциллографов. Это подтверждают ее достижения, например, в 2013 г. компания представила многоканальную систему с полосой пропускания 100 ГГц в режиме реального времени. В том же 2013 г. были представлены осциллографы высокого разрешения (HDO) с 12-битным АЦП и полосой пропускания 1 ГГц. Семейство осциллографов HDO существенно изменило представление о точности измерений, доступной цифровым осциллографам. 2018 год ознаменовался выходом новой серии осциллографов высокого разрешения WavePro HDR, которая обеспечивает теперь высокоточные измерения в полосе до 8 ГГц. Кроме цифровых осциллографов, компания «Teledyne LeCroy» выпускает анализаторы протоколов. Это широкий класс приборов для тестирования устройств передачи данных как на физическом, так и на логическом уровне. В этой области «Teledyne LeCroy» также занимает лидирующие позиции и предоставляет решения для всех современных протоколов передачи последовательных данных (<http://lecroy-rus.ru/>).



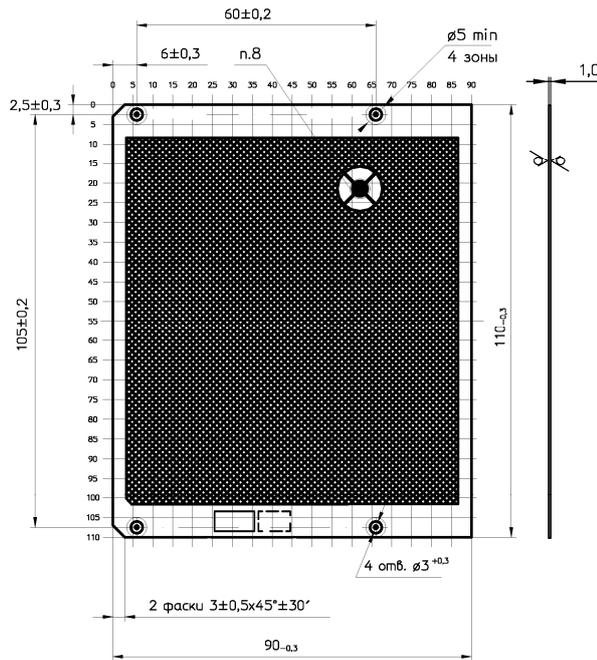


Рис. 5. Печатная плата-экран

Таким образом, при проектировании печатной платы цифрового модуля управления для обеспечения ЭМС применялись следующие меры:

- модульное размещение элементов на печатной плате с привязкой компонентов по функциональному признаку;
- уменьшение длины проводников и количества их ветвлений;
- введение печатной платы-экрана, соединенной с «землей» электрической схемы цифрового модуля управления у фильтрующих конденсаторов источника питания.

### Заключение

Рассмотрены три разработки перспективных радиоэлектронных устройств и получены следующие результаты:

- разработан жгутовой монтаж имитатора блока коррекции с учетом ЭМС элементов конструкции (изготовлена опытная партия устройств);
- схема модуля контроля напряжения и тока успешно размещена на печатной плате с учетом ЭМС всех элементов конструкции (изготовлена опытная партия устройств);
- разработаны печатная плата устройства, печатная плата-экран, устройство цифрового модуля управления, конструкторская документация, схема устройства цифрового модуля успешно размещена на печатной плате с учетом ЭМС всех элементов конструкции;
- составлены комплекты конструкторской документации.

### Литература

1. Князев А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. – М.: Радио и связь, 1989.
2. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. – М.: Группа ИДТ, 2007.

**Шарафутдинов Виталий Расимович**  
Инж.-конструктор АО «НПЦ "Полус"»,  
аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: dovod@bk.ru

УДК 621.396.677.83

**А.А. Иванов**

## Анализ и сравнение аналитических методов оценки эффективности экранирования корпусов с перфорированной стенкой

Реализованы аналитические модели для вычисления эффективности экранирования прямоугольных корпусов со стенкой, перфорированной апертурными квадратными и круглыми форм. Выполнено сравнение методов для электрически больших корпусов  $300 \times 300 \times 300$  и  $300 \times 120 \times 300$  мм<sup>3</sup>. Приведены результаты вычисления эффективности экранирования корпусов с перфорацией с разной формой и размерами. Приведены погрешности методов, полученные при их сравнении.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, эффективность экранирования, корпус с апертурными.

Для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС) в настоящее время широко применяется электромагнитное экранирование, в частности, экранирование

металлическим корпусом. На ранних этапах проектирования РЭС необходимо приближенно оценить эффективность экранирования (ЭЭ) предполагаемым корпусом. На основе этого могут быть опреде-

лены потенциально уязвимые частоты будущего устройства, а также оценены массогабаритные характеристики. Оценка ЭЭ может быть получена численными методами, что требует больших вычислительных затрат, поэтому на стадии проектирования целесообразно применение аналитических методов [1–3].

На практике ЭЭ корпусом во многом зависит от апертур в его стенках, поэтому размеры, положение и количество апертур являются одними из первоочередных факторов при проектировании эффективных с точки зрения ЭМС электромагнитных экранов. Таким образом, экранирующий корпус становится наиболее уязвимым к излучаемым помехам в случае, когда в его стенках содержится множество апертур, которые могут использоваться для вентиляции и охлаждения внутренних компонентов РЭС. Между тем выбор подходящего метода вычисления ЭЭ не прост.

Цель работы – выполнить анализ и сравнение известных аналитических методов вычисления ЭЭ корпусов с перфорацией.

**Методы оценки ЭЭ корпусом с перфорацией**

Известен аналитический метод [4], позволяющий вычислять ЭЭ прямоугольного корпуса с апертурой во фронтальной стенке при падении на нее плоской электромагнитной волны (ЭМВ). Корпус представлен в виде короткозамкнутого прямоугольного волновода, а стенка с апертурой – в виде замкнутой на концах линии передачи. Подключение данных элементов к источнику ЭДС образует эквивалентную схему корпуса (рис. 1), а ЭЭ может быть вычислена из напряжений и токов в точке *P* данной эквивалентной схемы.

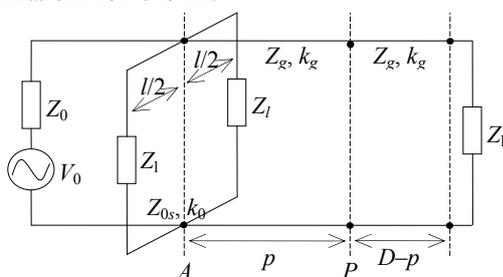


Рис. 1. Эквивалентная схема корпуса

Для вычисления ЭЭ корпусом с массивом апертур модель фронтальной стенки должна быть изменена и представлена в виде пластины, перфорированной круглыми отверстиями (рис. 2). При этом для описания волнового процесса в апертурах используются функции Бесселя первого рода. Импеданс фронтальной стенки (в точке *A* эквивалентной схемы на рис. 1) может быть найден из нормированной проводимости перфорированной пластины [5]:

$$\frac{Y_{ah}}{Y_0} = -j \frac{3d_h d_v \lambda_0}{\pi d^3} + j \frac{288}{\pi \lambda_0 d^2} \times \left[ \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{h=0}^{\infty} (\epsilon_m h^2 / d_v^2 + \epsilon_n v^2 / d_h^2) \cdot J_1^2(\Omega) \right], \quad (1)$$

где  $d_v$  и  $d_h$  – расстояние между центрами апертур массива по вертикали и горизонтали,  $d$  – диаметр апертуры,  $\lambda_0$  и  $Y_0$  – длина волны и проводимость в свободном пространстве,  $h$  и  $v$  – число апертур по горизонтали и вертикали. Для мод высших порядков  $TE_{mn}$  переменные принимают значение  $\epsilon_{m,n}=1$  в случае, когда  $m,n=0$ , и  $\epsilon_{m,n}=2$ , если  $m,n \neq 0$ ,  $J_1$  – функция Бесселя первого рода первого порядка, а ее аргумент  $\Omega$  может быть вычислен следующим образом:

$$\Omega = \frac{\left[ \pi d (v^2 / d_h^2 + h^2 / d_v^2) / 2 \right]^{1/2}}{(v^2 / d_h^2 + h^2 / d_v^2)^{5/2}}. \quad (2)$$

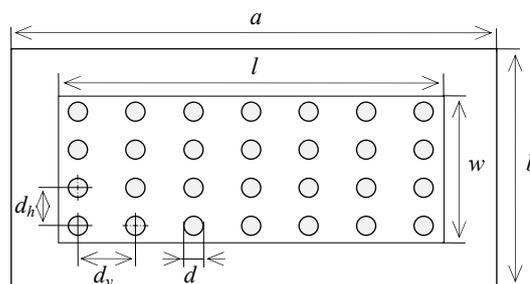


Рис. 2. Модель перфорированной стенки корпуса

Когда геометрические размеры массива ( $d$ ,  $d_v$  и  $d_h$ ) малы при сравнении с длиной волны источника, можно пренебречь вторым слагаемым выражения (1). При этом исключается необходимость разложения функции Бесселя в ряд.

Импеданс фронтальной стенки в точке *A* эквивалентной схемы (см. рис. 1) может быть вычислен как

$$Z_{ah} = \frac{1}{Y_{ah}} \frac{l \times w}{a \times b} = \frac{1}{Y_{ah}} C_f, \quad (3)$$

где произведение  $l$  и  $w$  – общая площадь покрытия апертурами перфорированной стенки. На основании данных о размере и положении апертур эта площадь может быть вычислена как

$$l = h \cdot d_h, \quad (4)$$

$$w = v \cdot d_v. \quad (5)$$

Метод не учитывает влияние толщины фронтальной стенки корпуса  $t$  на ЭЭ. Однако в работе [6] предложен способ оценки ЭЭ корпусом с перфорированной стенкой, позволяющий учитывать перпендикулярную и параллельную поляризации, произвольный угол падения  $\theta$  плоской ЭМВ, а также толщину стенки корпуса  $t$ . Сопротивление перфорированной пластины в зависимости от поляризации может быть найдено как

$$Z'_{ah\perp} = \frac{jZ_0}{2} \left[ 1 + \left( \frac{3d_h d_v \lambda_0}{2\pi d^3 \cos\theta} \right)^2 \right]^{-1/2} \cdot 10 \frac{8t}{5d}, \quad (6)$$

$$Z'_{ah\parallel} = \frac{jZ_0}{2} \left[ 1 + \left( \frac{3d_h d_v \lambda_0 \cos\theta}{2\pi d^3} \right)^2 \right]^{-1/2} \cdot 10 \frac{8t}{5d}. \quad (7)$$

При этом, эффективное значение импеданса фронтальной стенки может быть вычислено путем перемножения (6), (7) на корректирующий коэффициент  $C_f$  из (3).

Апертуры в массиве, при вычислении ЭЭ согласно [5, 6] могут иметь только круглую форму. Это является существенным недостатком методов при решении реальных конструкторских задач.

#### Массив апертур произвольной формы

Для оценки методами [5, 6] ЭЭ корпуса, перфорированного квадратными отверстиями, необходимо использовать подход, предложенный в [7], при этом способ вычисления импеданса фронтальной стенки остается неизменным. Тем самым предварительно должен быть вычислен диаметр круглых апертур, эквивалентных предполагаемым квадратным апертурам:

$$d = 2d_{sq} / \sqrt{\pi}, \quad (8)$$

где  $d_{sq}$  – размер стороны квадратной апертуры.

Также существует полуаналитический метод [8], где эквивалентная модель массива апертур получена из численной модели. Предложены соотношения, позволяющие преобразовать массив в одну апертуру, имеющую такие геометрические размеры, при которых достигается согласование результатов ЭЭ с исходной задачей. Таким образом, вычисления ЭЭ корпусом с массивом апертур могут быть сведены к оценке в соответствии с [4]. Допускается выполнять расчеты для стенок, перфорированных апертурами круглых, квадратных и прямоугольных форм, в том числе неравномерно распределенными по стенке.

Для преобразования массива апертур в соответствии с [8] необходимо введение коэффициента масштабирования, который может быть вычислен как

$$k = 1,283 \cdot n^{-0,1407} - 0,2829, \quad (9)$$

где  $n$  – количество апертур в массиве. Тогда размеры одной апертуры, эквивалентной массиву:

$$w = k \sqrt{S/\eta}, \quad (10)$$

$$l = k \cdot \eta \cdot \sqrt{S/\eta}, \quad (11)$$

где  $S$  – сумма площадей апертур, входящих в массив, а  $\eta$  – соотношения сторон одной апертуры:

$$S = x \cdot y \cdot n, \quad (12)$$

$$\eta = x/y, \quad (13)$$

где  $x$  и  $y$  – геометрические размеры апертуры по горизонтали и вертикали соответственно.

#### Резонансы высших порядков

При вычислениях частотной зависимости ЭЭ в соответствии с методами [5–6, 8] не учитываются резонансы, соответствующие модам порядка выше  $TE_{10}$ . Таким образом, оценку ЭЭ на высоких частотах и для электрически малых корпусов можно считать недостаточно корректной. Данное ограничение связано со способом вычисления постоянной распространения  $k_g$  и характеристического импеданса  $Z_g$  эквивалентного волновода, поэтому для учета мод

высших порядков  $TE_{mn}$ , в соответствии с [9] они должны быть представлены как

$$k_g = k_0 \sqrt{1 - (m\pi/2a)^2 - (n\pi/2b)^2}, \quad (14)$$

$$Z_g = Z_0 / \sqrt{1 - (m\pi/2a)^2 - (n\pi/2b)^2}, \quad (15)$$

где  $k_0 = 2\pi/\lambda$  и  $Z_0 = \sqrt{\mu/\epsilon}$ .

Последующие преобразования эквивалентной цепи в соответствии с теоремой Тевенина должны выполняться  $m \times n$  раз (в соответствии с указанным при расчетах режимом  $TE_{mn}$ ). Тогда результирующее напряжение в некоторой исследуемой точке  $P$  на эквивалентной схеме (точка наблюдения внутри корпуса), согласно [10], может быть вычислено как

$$V_{p\text{сумм}} = \sum_{m=0}^m \sum_{n=0}^n V_{pnm}, \quad (16)$$

где  $V_{pnm}$  – напряжение в исследуемой точке эквивалентной цепи для некоторых коэффициентов  $m, n$ . Полученное значение напряжения может быть использовано для последующих вычислений магнитной или электрической составляющих ЭЭ.

#### Сравнение методов оценки ЭЭ

Выполнено сравнение частотных зависимостей ЭЭ, полученных методами [5, 6, 8], для электрически большого корпуса (рис. 3). Корпус имеет геометрические размеры  $a=b=d=300$  мм, толщину стенок  $t=1$  мм и массив из 16 квадратных апертур размерами  $25 \times 25$  мм<sup>2</sup> (расстояние между центрами апертур по горизонтали и вертикали составляет 35 мм). Вычисления выполнялись в центре корпуса ( $p=150$  мм) при условии вычисления резонансов порядков до  $TE_{10}$  и  $TE_{21}$ . Напряжение эквивалентного источника  $V_0=1$  В. Диапазон частот источника ЭМВ от 1 МГц до 3 ГГц. Предварительно вычислены резонансные частоты корпуса (табл. 1) как

$$f_{m,n,p} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2}. \quad (17)$$

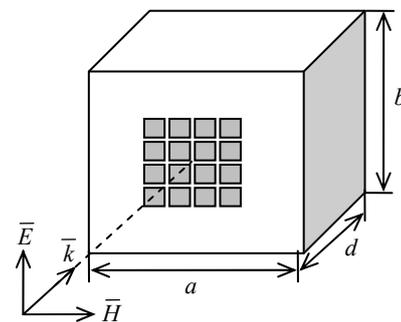


Рис. 3. Модель корпуса с перфорированной стенкой

Частотные зависимости ЭЭ при условии вычисления резонансов, соответствующих модам до  $TE_{10}$  и  $TE_{21}$ , представлены на рис. 4. Видно, что поведение частотных зависимостей согласуется.

Среднее значение абсолютной погрешности между результатами [5, 6] составляет 1,35 дБ. Отли-

чие результатов, полученных методом [8], составляет не более 30 дБ, а среднее значение абсолютной погрешности не более 14,09 дБ [5, 6].

Таблица 1  
Резонансные частоты корпуса 300×300×300 мм<sup>3</sup>

$m, n, p$	$f_{m,n,p}$ , ГГц	$m, n, p$	$f_{m,n,p}$ , ГГц
0,0,3	1,500	2,0,3	1,802
0,0,4	2,000	2,0,4	2,236
0,0,5	2,500	2,0,5	2,692
1,0,0	0,500	1,1,1	0,866
1,0,1	0,707	1,1,2	1,224
1,0,2	1,118	1,1,3	1,658
1,0,3	1,581	1,1,4	2,121
1,0,4	2,061	1,1,5	2,598
1,0,5	2,549	2,1,3	1,870
2,0,0	1,000	2,1,4	2,291
2,0,2	1,414	2,1,5	2,738

Положение резонансов на частотной зависимости соответствует значениям, рассчитанным анали-

тически. При увеличении коэффициентов  $m, n$ , соответствующих модам корпуса порядка  $TE_{21}$ , на частотной зависимости (рис. 4, а) наблюдается проявление большего числа резонансов, соответствующих модам  $TE_{11}, TE_{20}, TE_{21}$ , что соответствует табл. 1.

Далее выполнено вычисление частотных зависимостей ЭЭ для модели корпуса с внутренними размерами 300×120×300 мм<sup>3</sup>,  $t = 1$  мм и с фронтальной стенкой, перфорированной круглыми отверстиями (рис. 5). Геометрические размеры массивов приведены в табл. 2.

Вычисления выполнялись при условии режима возбуждения  $TE_{10}$ . Напряжение эквивалентного источника ЭДС  $V_0 = 1$  В, диапазон частот от 1 МГц до 3 ГГц. Точка наблюдения в центре корпуса ( $p = 150$  мм). Резонансные частоты корпуса в заданном диапазоне частот, вычисленные по (17), для выбранного режима возбуждения представлены в табл. 3.

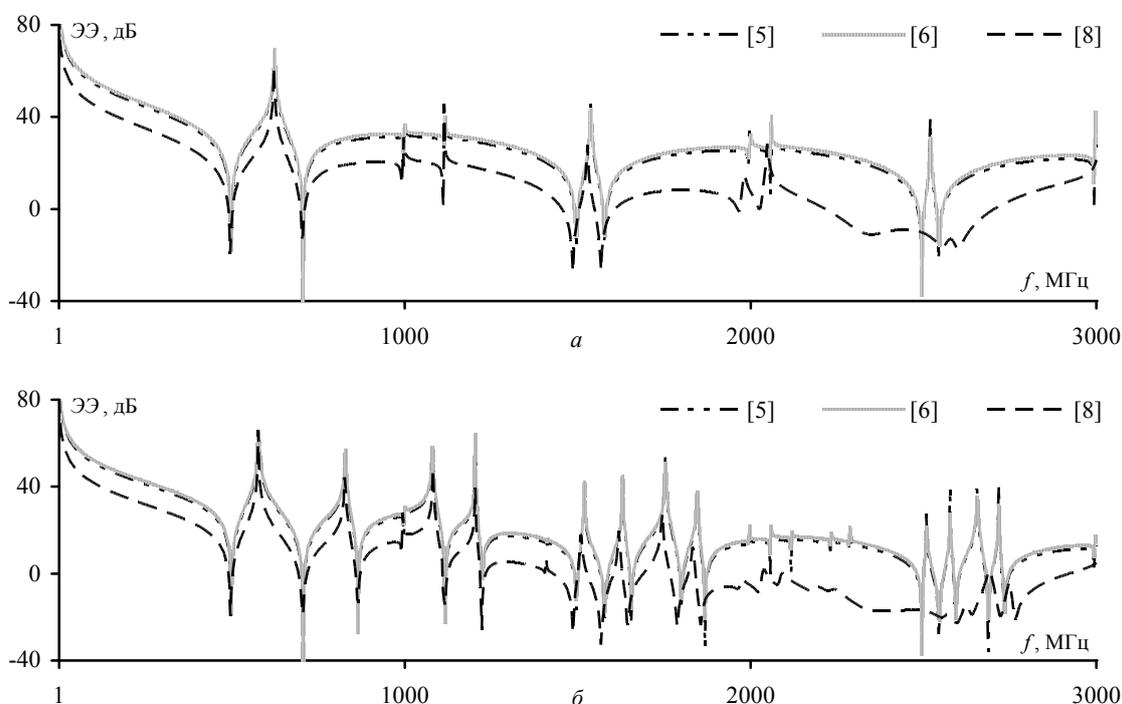


Рис. 4. Частотные зависимости ЭЭ в диапазоне частот от 1 до 3000 МГц при условии вычисления резонансов, соответствующих модам до  $TE_{10}$  (а) и  $TE_{21}$  (б)

Таблица 2  
Геометрические размеры массивов апертур

$d$ , мм	$d_v$ , мм	$d_h$ , мм	$v$	$h$	$S$ , мм <sup>2</sup>
45	46	46	2	2	6358,500
30	31	31	3	3	
22,5	23,5	23,5	4	4	
9	10	10	5	5	1589,625

Таблица 3  
Резонансные частоты корпуса 300×120×300 мм<sup>3</sup>

$m, n, p$	$f_{m,n,p}$ , ГГц	$m, n, p$	$f_{m,n,p}$ , ГГц
1,0,1	0,707	1,0,4	2,062
1,0,2	1,118	1,0,5	2,550
1,0,3	1,581	1,0,6	3,041

Частотные зависимости для корпуса 300×120×300 мм<sup>3</sup> со стенками, перфорированными круглыми отверстиями, приведены на рис. 6. Соответствие резонансов, полученных методами [5–6, 8] и рассчитанных аналитически (см. табл. 3) показано на рис. 6, а. Средние значения абсолютной погрешности результатов сведены в табл. 4. Видно, что для массива апертур с минимальной площадью (см. рис. 6, з) наблюдается наибольшее расхождение результатов абсолютной погрешности, при этом поведение частотных зависимостей сохраняется.

Для всех исследуемых корпусов частотные зависимости монотонно убывают вплоть до частоты, соответствующей первому резонансу корпуса

$f_{101} = 0,707$  ГГц. При изменении числа апертур в массиве с сохранением общей площади покрытия перфорацией (см. рис. 6, *a–в*) наблюдается увеличение значений ЭЭ, что показано в табл. 5 на примере частоты 0,5 ГГц. Помимо этого, уменьшение общей площади перфорации (см. рис. 6, *з*) также приводит к увеличению значений ЭЭ на 20 дБ.

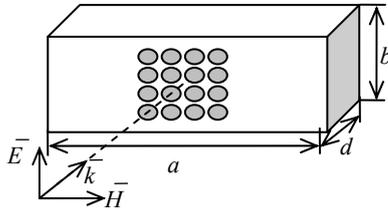


Рис. 5. Модель экранирующего корпуса  $300 \times 120 \times 300$  мм<sup>3</sup> со съемной передней стенкой

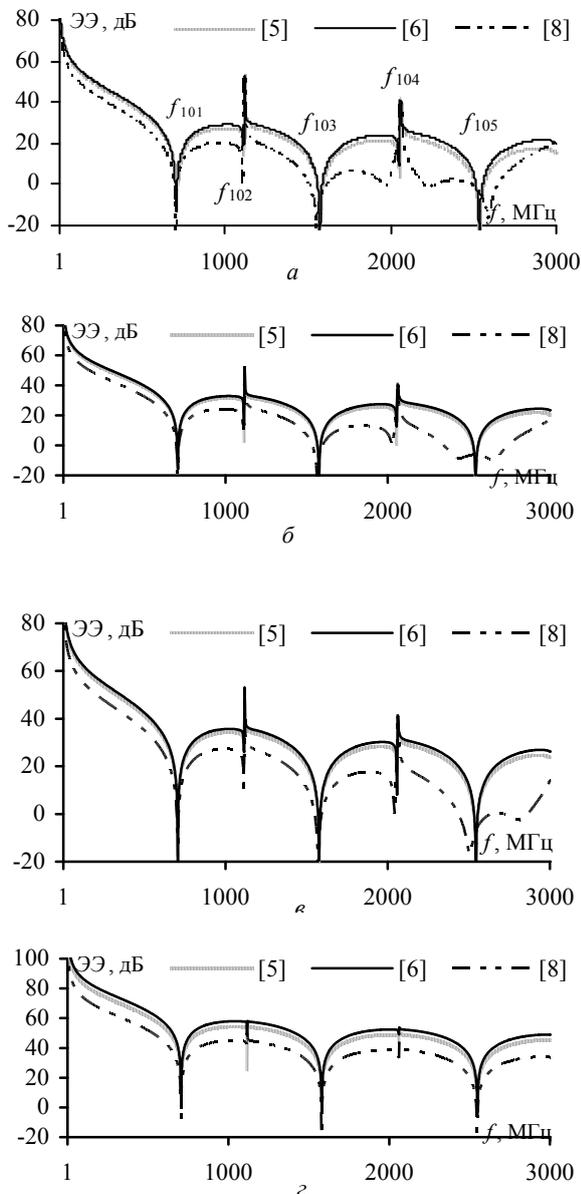


Рис. 6. Частотные зависимости ЭЭ корпусов с массивами: *a* –  $2 \times 2$ ; *б* –  $3 \times 3$ ; *в* –  $4 \times 4$  и *з* –  $5 \times 5$

Таблица 4

Средние значения абсолютной погрешности			
$h \times v$	$S, \text{мм}^2$	$\Delta_{[5]-[6]}, \text{дБ}$	$\Delta_{[6]-[8]}, \text{дБ}$
$2 \times 2$	6358,5	1,676	10,904
$3 \times 3$		1,541	11,769
$4 \times 4$		1,676	11,755
$5 \times 5$	1589,625	3,615	13,371

Таблица 5

Значения ЭЭ на частоте 0,5 ГГц			
Метод	[5]	[6]	[8]
$h \times v$	ЭЭ, дБ		
$2 \times 2$	35,144	35,947	28,845
$3 \times 3$	38,649	39,753	32,535
$4 \times 4$	41,139	42,581	35,181
$5 \times 5$	61,117	64,675	51,916

На частоте первого резонанса  $f_{101} = 0,707$  ГГц для массивов апертур площадью  $6358,5 \text{мм}^2$  наблюдается уменьшение значений ЭЭ, полученных методами [5, 6, 8], в область отрицательных значений (табл. 6). Однако для корпуса с массивом апертур  $5 \times 5$  и общей площадью  $1589,625 \text{мм}^2$  значения ЭЭ на резонансных частотах, полученные методами [5, 6], оказываются положительными при условии соблюдения одинакового числа точек.

Таблица 6

Значения ЭЭ на частоте первого резонанса 0,707 ГГц			
Метод	[5]	[6]	[8]
$h \times v$	ЭЭ, дБ		
$2 \times 2$	-12,279	-12,721	-10,375
$3 \times 3$	-14,506	-15,656	-11,222
$4 \times 4$	-17,507	-20,652	-12,192
$5 \times 5$	5,329	9,432	-7,847

### Заключение

Выполнено сравнение аналитических методов вычисления ЭЭ корпусов с массивом круглых и квадратных апертур. Показано, что частотные зависимости, полученные методами [5, 6], демонстрируют наилучшее согласование между собой, а также с результатами аналитического вычисления резонансов корпусов. При этом возможность вычисления ЭЭ корпусов с массивами апертур произвольных форм делает метод [8] более удобным для решения реальных конструкторских задач.

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

### Литература

1. Комнатнов М.Е. Моделирование эффективности экранирования металлической пластиной для бортовой аппаратуры космического аппарата / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, А.С. Дементьев // Доклады ТУСУР. – 2011. – №2(24), ч. 1. – С. 133–136.
2. Комнатнов М.Е. Оценка эффективности экранирования корпуса соединителя бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Авиакосмическое приборостроение. – 2013. – №4. – С. 37–42.

3. Комнатнов М.Е. Эффективность экранирования унифицированных электронных модулей / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, А.С. Дементьев // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, №7/2. – С. 89–92.

4. Shielding effectiveness of a rectangular enclosure with a rectangular aperture / M.P. Robinson, J.D. Turner, D.W.P. Thomas et al. // Electron Lett. – 1996. – Vol. 32, № 17. – P. 1559–1560.

5. Dehkhoda P. An efficient and reliable shielding effectiveness evaluation of a rectangular enclosure with numerous apertures / P. Dehkhoda, A. Tavakoli, R. Moini // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2008. – Vol. 50, № 1. – P. 208–212.

6. Nie B.L. An improved circuit method for the prediction of shielding effectiveness of an enclosure with apertures excited by a plane wave / B.L. Nie, P.A. Du, P. Xiao // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2017. – Early Access – P. 1–8.

7. Robinson M.P. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures / M.P. Robinson,

T.M. Benson, C. Christopoulos // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 1998. – Vol. 40, № 3. – P. 240–248.

8. A fast calculation approach for the shielding effectiveness of an enclosure with numerous small apertures / Dan Ren, Ping-An Du, Yin He, Ke Chen et al // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2016. – Vol. 58, № 4. – P. 1033–1041.

9. Shi D. Shielding analysis of enclosure with aperture irradiated by plane wave with arbitrary incident angle and polarization direction / D. Shi, Y. Shen, Y. Gao // IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat. – 2007. – P. 361–364.

10. Shi D. 3 high-order mode transmission line model of enclosure with off-center aperture / D. Shi, Y. Shen, Y. Gao // IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat. – 2007. – P. 361–364.

**Иванов Антон Андреевич**

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: anton.ivvv@gmail.com

УДК 678.643.425

**Р.А. Кремзер, А.В. Бадьин**

## Поглотители КВЧ-излучения, полученные по аддитивной технологии

Рассмотрена возможность применения аддитивной технологии для создания поглотителей электромагнитного излучения в крайне высокочастотной области. Представлены результаты измерения электромагнитного отклика от композитного материала на основе акрилонитрилбутадиенстирола и углеродосодержащих включений.

**Ключевые слова:** КВЧ-излучение, поглотители электромагнитного излучения, радиопоглощающие материалы, аддитивные технологии.

С развитием технологий в области крайне высоких частот (КВЧ) становится актуальным внедрение быстро развивающихся аддитивных технологий с целью создания современных композитов с необходимыми параметрами.

В настоящее время послойное изготовление сложных трёхмерных элементов методом горячего экструдирования диэлектрических материалов широко используется. С каждым годом растёт многообразие материалов с различными электрофизическими свойствами. За счёт применения примесей на основе углерода удаётся создавать филаменты для 3D-печати со значимой удельной проводимостью [1–5]. Представляет интерес применить аддитивную технологию по методу горячего экструдирования для создания поглотителей КВЧ-излучения.

Поглотители КВЧ-излучения необходимы для снижения уровня отражения электромагнитного излучения. Для формирования поглотителей электромагнитного излучения наиболее широко применяются углеродосодержащие, ферритовые и металлосоодержащие порошки.

Углеродные композиционные материалы содержат углеродный армирующий элемент, преимуществом которого являются низкая плотность, большая теплоемкость, высокая прочность и жесткость,

сопротивление тепловому удару, невысокий коэффициент трения, высокая коррозионная стойкость, широкий диапазон электрических свойств (от проводников до полупроводников).

При изготовлении поглотителей методом горячего экструдирования должны сохраняться необходимые требования как по радиотехническим, так и по конструктивно-технологическим и эксплуатационным свойствам. Также должны соблюдаться требования к механической прочности, минимальной массе, надежности, упрощению крепления узлов к рабочим поверхностям, высокой степени огнестойкости и минимально допустимому уровню выделения токсичных и вредных веществ.

В XXI в. значительно увеличилось количество всевозможных источников электромагнитного излучения (ЭМИ) и расширился применяемый частотный спектр. Влияние ЭМИ на биологические и технические объекты считается существенным моментом, влияющим на их жизнедеятельность и функционирование.

В последние годы обнаружены материалы, обладающие избирательным поглощением ЭМИ в области КВЧ- и гипервысоких частот [6]. КВЧ-поглотители используются на производствах для защиты персонала от влияния мощных источников ЭМИ.