

УДК 621.396.41

А.А. Дроздова, М.Е. Комнатнов

Оценка уровня наведённого тока на испытуемый объект в ТЕМ-камере при воздействии на её вход электростатического разряда

Выполнена оценка наведённых токов и напряжений на монополь и микрополосковую линию в малогабаритной ТЕМ (transverse electromagnetic)-камере при воздействии на её вход электростатического разряда. Представлены аналитическая, квазистатическая и электродинамическая модели для расчёта форм и амплитуд токов и напряжений, наведённых на монополь и микрополосковую линию, расположенные внутри малогабаритной ТЕМ-камеры, при воздействии электростатического разряда на её вход. Представлены формы наведённых токов и напряжений на монополь и микрополосковую линию при аналитическом, квазистатическом и электродинамическом расчётах и измерениях. Максимальные отклонения результатов аналитического и электродинамического вычислений для монополя и микрополосковой линии составляют 25 и 9%. Представлен подход по использованию половины коаксиальной камеры в качестве устройства согласования между источником электростатического разряда и ТЕМ-камерой. Результаты расчётов согласуются с результатами измерений, что делает возможным применение малогабаритной ТЕМ-камеры и половины коаксиальной камеры для исследования влияния наведённых токов и напряжений, возбуждаемых электростатическим разрядом, на интегральные схемы, электронную компонентную базу и небольшие устройства в целом.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, восприимчивость, ТЕМ-камера, электростатический разряд.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-28-36

Одной из задач обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) является защита радиоэлектронных средств (РЭС) от электромагнитных помех. Создаваемое электростатическим разрядом (ЭСР) электромагнитное излучение характеризуется высокой амплитудой напряжённости электрического поля с широким спектром. Восприимчивость современных РЭС к подобным видам воздействия с каждым годом возрастает [1], что требует поиска новых средств и методов защиты РЭС. Непосредственное воздействие ЭСР на электронный компонент может привести к различным изменениям в его внутренней структуре (выгорание проводника, плавление металлизации, пробой диэлектрика и пр.), которые могут вызвать различные виды обратимых и необратимых отказов [2]. Так, исходя из статистических данных [1] отказов электронных компонентов, примерно половина (47%) из них вызвана воздействием ЭСР. Другая половина связана с качеством компонентов (30%), особенностями их применения (13%), влажностью и температурой воздуха при их эксплуатации (10%).

Существуют различные устройства и методы защиты от ЭСР на уровне компонента, устройства или системы в целом. Например, известен метод расчёта паразитной ёмкости цепей входа/выхода, который может быть успешно использован при защите от ЭСР [3]. Предложен встроенный в интегральную схему (ИС) фиксатор напряжения, ослабляющий амплитуду напряжения ЭСР [4]. Кроме того, для повышения помехоустойчивости ИС предложена встроенная схема защиты от ЭСР положительной или отрицательной полярности, содержащая цепь из транзисторов и паразитных резисторов [5], а для снижения напряжения и равномерного распределения тока ЭСР предложен метод, использующий

связанные ёмкости [6]. Отказы ИС при воздействии ЭСР могут возникать независимо от наличия устройств помехозащиты [7–9]. Например, экспериментально доказано, что при воздействии ЭСР на ИС происходит искажение выходного сигнала [7], а также пробой диэлектрика [8]. Путём проведения экспериментальных и теоретических исследований [9] показано, что ЭСР может приводить к сбоям в работе микроконтроллеров (МК) и ИС в целом, основной причиной которых являются наведённые импульсные сигналы на проводники печатной платы (ПП).

Известны методы для измерения помехоэмиссии [10] и восприимчивости [11] ИС. Используя ТЕМ (transverse electromagnetic)-камеру [12], возможно выполнить оценку уровня излучаемой помехоэмиссии [13] и восприимчивости [14] для ИС различного назначения. Кроме того, при помощи ТЕМ-камеры возможно определить локальные места сбоев в ИС [15].

Малогабаритная ТЕМ-камера [16, 17] с более высокой граничной частотой (5,2 ГГц) позволяет провести оценки излучаемых помехоэмиссий и восприимчивости, удовлетворяющие большинству требований, предъявляемых к современным мобильным, навигационным и связным устройствам. Кроме того, при помощи малогабаритной ТЕМ-камеры возможно оценить амплитуду и форму наведённого тока и напряжения на испытуемый объект (ИО), расположенный в её внутреннем пространстве, при воздействии на её вход импульса от имитатора ЭСР. Анализ амплитуды и формы наведённых тока и напряжения на ИО позволит симитировать подобное воздействие и использовать его при создании новых средств и методов защиты от ЭСР. Для первоначального приближения к ИО необходимы простые геометрические объекты, в качестве которых

выбраны монополю и микрополосковая линия (МПЛ) передачи.

Цель работы – оценить амплитуды и формы токов и напряжений на монополю и МПЛ, расположенных в малогабаритной ТЕМ-камере, при воздействии ЭСР на её вход.

Аналитическая модель формы тока ЭСР

Модель, описывающая форму тока ЭСР, известна как модель человеческого тела, позволяет имитировать разряд от кончика пальца человека на ИО. Упрощённая схема имитатора ЭСР [18], реализующая модель человеческого тела, представлена на рис. 1. Схема содержит источник высоковольтного напряжения (U), зарядные ключ и резистор R_c (50–100 МОм), разрядные ключ и резистор R_d (330 Ом±10%), конденсатор C_s (150 пФ±10%) и ИО. Значение C_s имитирует ёмкость человеческого тела, а сопротивление R_d имитирует электрический контакт между человеческим телом и металлическим объектом. Номиналы элементов схемы могут отличаться, так как ёмкость (C_s) человеческого тела может варьироваться от 100 до 500 пФ, а сопротивление (R_d) – от нескольких десятков Ом до сотен килоом.

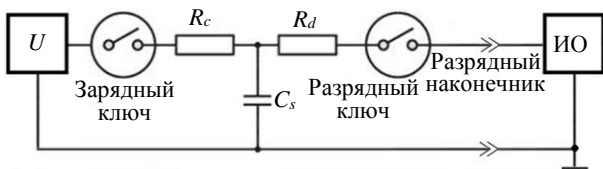


Рис. 1. Упрощённая схема имитатора ЭСР [18]

Для моделирования выбрана минимально возможная амплитуда воздействия имитатором ЭСР, составляющая 1 кВ. Расчёт значений токов первого (I_1) и второго (I_2) максимумов для ЭСР с напряжением 1 кВ выполнен, используя аналитическую запись, предложенную Хайдлером [19]:

$$I_{ЭСР}(t) = \frac{I_1 e^{-t/\tau_2} (t/\tau_1)^n}{\left(1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n\right) e^{-\frac{\tau_1}{\tau_2} \left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}}} + \frac{I_2 e^{-t/\tau_4} (t/\tau_3)^n}{\left(1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n\right) e^{-\frac{\tau_3}{\tau_4} \left(\frac{n\tau_4}{\tau_3}\right)^{\frac{1}{n}}}} \quad (1)$$

Результаты расчёта составили 4,2 и 1,9 А для I_1 и I_2 соответственно, а временные характеристики соответствуют [18] и составляют: $\tau_1 = 1,1$ нс, $\tau_2 = 2$ нс, $\tau_3 = 12$ нс, $\tau_4 = 37$ нс, $n = 1,8$. По вычисленным значениям построена форма напряжения ЭСР на входе ТЕМ-камеры с входным волновым сопротивлением 50 Ом (рис. 2).

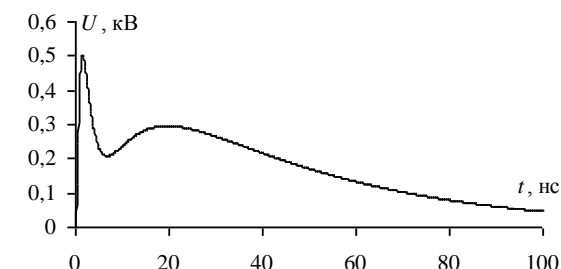


Рис. 2. Форма напряжения ЭСР на входе ТЕМ-камеры

Аналитическая модель форм тока и напряжения ЭСР, наводимых внутри ТЕМ-камеры

Ток (I_K), протекающий в центральном проводнике ТЕМ-камеры, зависит от её КСВН и тока $I_{ЭСР}(t)$, подводимого к её входу, а также от последовательно включённого R_d , сопротивления (Z_K) ТЕМ-камеры и согласованной нагрузки ($Z_C = 50$ Ом). Ток I_K может быть получен при известном значении коэффициента отражения S_{11} ТЕМ-камеры как

$$I_K(t) = \frac{I(t)R_d Z_K}{Z_C^2} = \frac{I_{ЭСР}(t)R_d(1-|S_{11}|)}{Z_C(1+|S_{11}|)} \quad (2)$$

Из (2) видно, что сопротивления R_d , Z_C (5), Z_K окажут существенное влияние на амплитуду тока, протекающего по центральному проводнику ТЕМ-камеры. Предполагая, что ИО располагается на ПП (1), на которой имеются печатные проводники в виде МПЛ 2 (рис. 3), связь между центральным проводником 3 ТЕМ-камеры 4 и МПЛ, при их продольном расположении, может быть представлена на основе теоремы Гаусса для магнитной индукции.

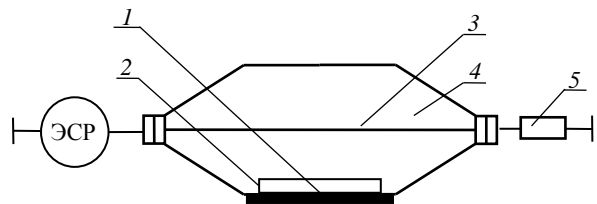


Рис. 3. МПЛ, расположенная внутри ТЕМ-камеры

Поток вектора магнитной индукции (Φ_B), создаваемый током (I_K), протекающим по центральному проводнику ТЕМ-камеры на расстоянии длины $2(a+b)$ контура [20] в поперечном сечении внешнего проводника ТЕМ-камеры, связан с линией передачи длиной l , расположенной под центральным проводником ($\cos(0^\circ) = 1$) на расстоянии h от внешнего проводника ТЕМ-камеры, как

$$\Phi_{31} = \Phi_B = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} \approx \omega B S \cos(\theta) \approx \omega B l h = \frac{\omega \mu_0 I_K l h}{2(a+b)} \quad (3)$$

где ω – круговая частота; B – проекция вектора \mathbf{B} на нормаль к поверхности; S – площадь поверхности; θ – угол между вектором \mathbf{B} и единичным вектором нормали к участку поверхности; μ_0 – магнитная постоянная.

Принимая отсутствие рассеяния ЭМВ на малом объекте, расположенном внутри ТЕМ-камеры [21], и связь частотной зависимости $|S_{31}|$ [20] ТЕМ-камеры с максимальным значением магнитного потока, проходящего через ИО, получим

$$|S_{31}| = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{\Phi_{31}}{U_{\text{вх}}} = \frac{\omega \mu_0 I_K l h}{2(a+b) I_{ЭСР}(t) R_d} \quad (4)$$

После вычисления $|S_{31}|$, можно найти наведённый ток на ИО как

$$I_{\text{ИО}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(1-|S_{11}|)}{|S_{31}| Z_C (1+|S_{11}|)} \quad (5)$$

Геометрические математические модели монополя и микрополосковой линии в ТЕМ-камере

Созданы геометрические математические модели для квазистатического и электродинамического анализа монополя в ТЕМ-камере. Для этого изначально создана группа моделей поперечных сечений малогабаритной ТЕМ-камеры и монополя (рис. 4). Поперечное сечение ТЕМ-камеры с геометрическими параметрами для внешнего ($a = 104$; $b = 31$ мм) и внутреннего ($w = 40$; $t = 1$ мм) проводников с длиной регулярной части $l = 104$ мм представлено на рис. 4, а. Показаны модель поперечного сечения ТЕМ-камеры с расположенным внутри неё монополем (см. рис. 4, б) с заданными значениями геометрических параметров ($d_1 = 1,28$; $d_2 = 4,1$; $t_1 = 5$; $t_2 = 2$ мм) (см. рис. 4, в), а также модель поперечного сечения с диэлектрической подложкой с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 2,1$, соответствующей тефлону (рис. 4, з).

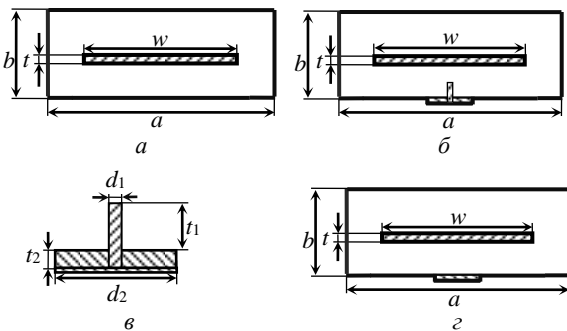


Рис. 4. Поперечные сечения ТЕМ-камеры (а) с расположенным в центре монополем (б) с геометрическими параметрами (в) и диэлектрической подложкой (з)

Используя созданные модели поперечных сечений (см. рис. 4), собрана принципиальная схема (рис. 5), позволяющая вычислить S-параметры, а также токи и напряжения, наводимые на монополь внутри ТЕМ-камеры. Принципиальная схема состоит из пяти ($Trl_1 - Trl_5$) отрезков линий передачи с сопротивлениями $R_1 = R_2 = 50$ Ом для согласования камеры на концах. Так, Trl_1 и Trl_5 – поперечные сечения ТЕМ-камеры без монополя (см. рис. 4, а) имеют длину $l = 49,95$ мм; Trl_2 и Trl_4 – поперечные сечения ТЕМ-камеры с диэлектрической подложкой длиной $l = 1,41$ мм (см. рис. 4, з). Trl_3 – поперечное сечение ТЕМ-камеры с монополем длиной $l = 1,28$ мм (см. рис. 4, б).

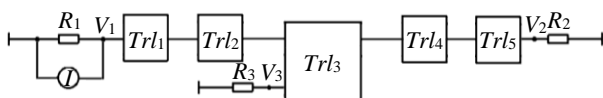


Рис. 5. Схема воздействия ЭСР на вход ТЕМ-камеры с монополем

Аналогично по указанным геометрическим размерам создана электродинамическая модель (рис. 6, а) ТЕМ-камеры 1 с установленной ПП 2 и с размещённым в центре монополем 3 (см. рис. 6, б).

Создана группа моделей поперечных сечений малогабаритной ТЕМ-камеры и МПЛ (рис. 7). В качестве диэлектрика ПП использован фольгированный ($t_1 = 105$ мкм) стеклотекстолит с $\epsilon_r = 4,3$, толщиной $h = 0,4$ мм (см. рис. 7, б), ширина активного проводника МПЛ составляла $w_1 = 0,5$ мм, длина $l = 70$ мм, а ширина ПП $a_1 = 100$ мм (см. рис. 7, в).

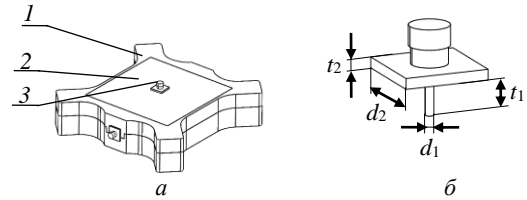


Рис. 6. Электродинамическая модель ТЕМ-камеры (а) с размещённой в её апертуре ПП с монополем (б)

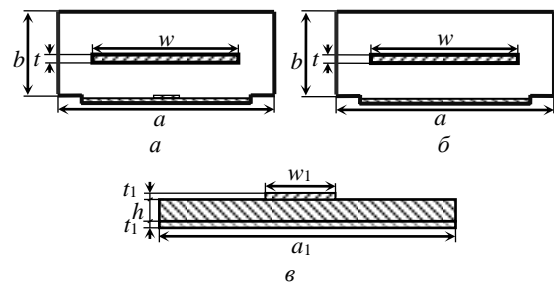


Рис. 7. Поперечное сечение ТЕМ-камеры с МПЛ (а), диэлектрической подложкой (б), с заданными для МПЛ геометрическими параметрами (в)

Используя созданные модели поперечных сечений (см. рис. 7, а, б), собрана схема для квазистатического моделирования амплитуды наведённого напряжения на МПЛ в ТЕМ-камере (рис. 8).

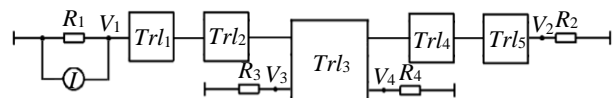


Рис. 8. Схема воздействия ЭСР на вход ТЕМ-камеры с МПЛ для квазистатического моделирования

Создана электродинамическая модель (рис. 9, а) ТЕМ-камеры 1 с установленной в апертуру ПП с МПЛ 2 (см. рис. 9, б) и размещёнными на её концах СВЧ-соединителями (SMA типа) 3.

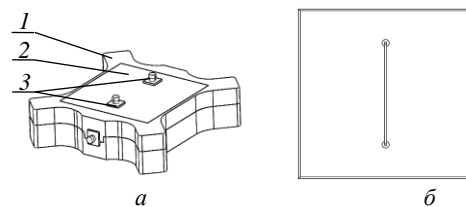


Рис. 9. Электродинамическая модель ТЕМ-камеры (а) с размещённой в её апертуре ПП с МПЛ (б)

Экспериментальная установка

Для подтверждения полученных результатов моделирования собрана экспериментальная установка для измерения напряжения, наведённого на монополь и МПЛ. Так как при моделировании воздействие ЭСР выполнялось на центральный провод-

ник ТЕМ-камеры, то при натурном эксперименте возникла необходимость в устройстве, согласующем генератор ЭСР и центральный проводник ТЕМ-камеры, обеспечивающем прохождение сигнала от наконечника имитатора ЭСР внутрь ТЕМ-камеры. В ГОСТ Р 51317.4.2–2010 [18] представлен адаптер, соединяющий коаксиальный кабель с датчиком тока (рис. 10, а). Геометрическая форма адаптера соответствует плавному переходу от диаметра коаксиального кабеля к заданному диаметру датчика. Адаптер должен поддерживать волновое сопротивление 50 ± 1 Ом в полосе частот до 4 ГГц. При этом если для конкретного датчика тока сопротивление, вычисляемое из отношения внешнего диаметра электрода d и внутреннего диаметра заземления D (см. рис. 10, б) не соответствует 50 Ом, тогда конструкция адаптера должна быть такой, чтобы d был равен диаметру внутреннего электрода датчика тока.



Рис. 10. Конусообразный адаптер для соединения имитатора ЭСР с датчиком тока (а); его поперечное сечение (б)

Коаксиальная ТЕМ-камера [22] с волновым сопротивлением 50 Ом в диапазоне частот до 12 ГГц соответствует параметрам адаптера, представленного в [18]. Таким образом, использована половина коаксиальной ТЕМ-камеры в качестве адаптера между ТЕМ-камерой и имитатором ЭСР.

Собрана экспериментальная установка (рис. 11, а) для измерения наведённых напряжений на монополю, расположенный внутри ТЕМ-камеры, при воздействии ЭСР на её вход.

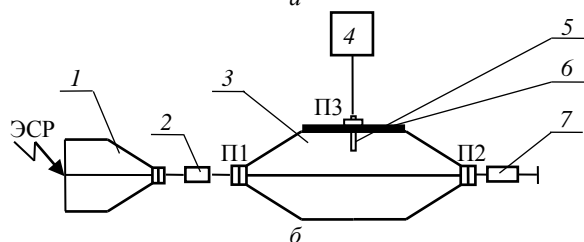
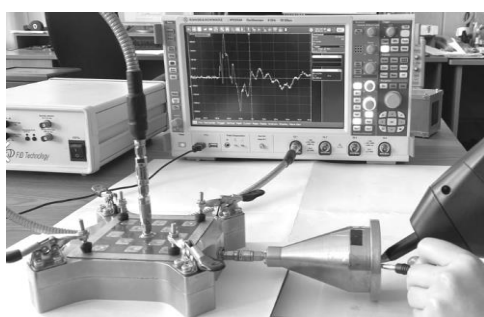


Рис. 11. Экспериментальная установка (а); схема (б) для измерения формы наведённого напряжения на монополю при воздействии имитатором ЭСР

Схема измерения (см. рис. 11, б) состоит из источника ЭСР, адаптера в виде половины коаксиальной камеры 1, коаксиального перехода РК2-20-03Р-13 2, ТЕМ-камеры 3, к которой подключена согласованная нагрузка сопротивлением 50 Ом 7, а также монополю 5, расположенного на ПП 6, помещённой во внутреннее пространство ТЕМ-камеры.

Напряжение на монополе фиксировалось при помощи программно реализованной маски в осциллографе 4 Rohde&Schwarz RTO2044. В качестве источника ЭСР использовался имитатор ЭСР ONYX 30, который соответствует требованиям стандарта [18].

Схема измерения напряжения на ближнем и дальнем концах МПЛ представлена на рис. 12. Схема состоит из источника ЭСР, адаптера в виде половины коаксиальной ТЕМ-камеры 3, ТЕМ-камеры 5, коаксиального перехода РК2-20-03Р-13 4, резисторов 1 с сопротивлением 50 Ом, ИО в виде МПЛ 7, расположенного на ПП 6, помещённой во внутреннее пространство ТЕМ-камеры. Ключами К1 и К2 условно показана коммутация для измерения напряжения на ближнем и дальнем концах МПЛ. Напряжение на МПЛ фиксировалось при помощи осциллографа 2 Rohde&Schwarz RTO2044.

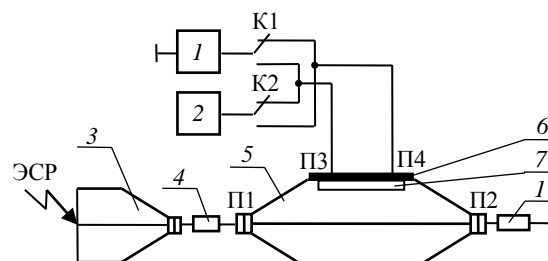


Рис. 12. Схема измерения напряжения на ближнем и дальнем концах МПЛ при воздействии ЭСР

Результаты вычислений и измерений токов и напряжений, наведённых на монополю

Вычисленные аналитическим и квазистатическим методами формы тока в центральном проводнике ТЕМ-камеры представлены на рис. 13.

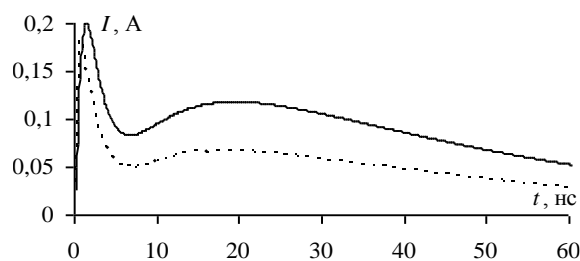


Рис. 13. Вычисленные аналитическим (---) и квазистатическим (—) методами формы тока ЭСР в центральном проводнике ТЕМ-камеры

Из рис. 13 видно, что максимальный ток в центральном проводнике ТЕМ-камеры при аналитическом и квазистатическом расчётах не превышает 0,18 и 0,2 А соответственно. При этом форма тока, вычисленная аналитическим методом, существенно отличается от исходной формы тока ЭСР. Максимальная разница доходит до 50%. Такое различие

связано с тем, что при расчёте волнового сопротивления ТЕМ-камеры использованы измеренные значения коэффициентов отражения $|S_{11}|$ ТЕМ-камеры.

Собрана (рис. 14) экспериментальная установка для измерения коэффициента передачи $|S_{31}|$.

Измеренные и вычисленные частотные зависимости коэффициента передачи $|S_{31}|$, используя аналитическую (4), квазистатическую (см. рис. 4, б) и электродинамическую (см. рис. 6, а) модели, представлены на рис. 15.

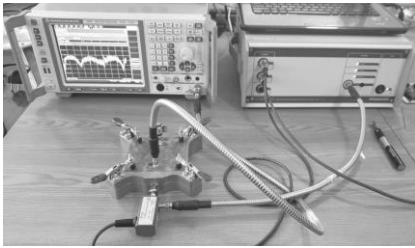


Рис. 14. Экспериментальная установка для измерения частотной зависимости $|S_{31}|$

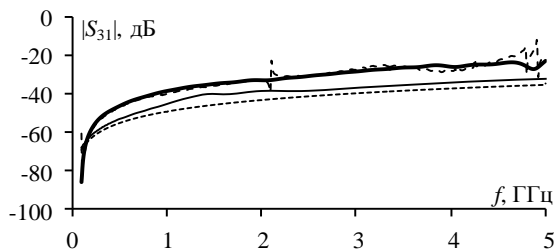


Рис. 15. Измеренные (---) и вычисленные аналитическим (—), квазистатическим (---) и электродинамическим (—) методами зависимости $|S_{31}|$

Из рис. 15 видно, что с увеличением частоты электромагнитная связь между монополем и центральным проводником ТЕМ-камеры увеличивается. Аналитически вычисленные значения коэффициентов передачи $|S_{31}|$ составляют $-45,2$ дБ на 1 ГГц и -32 дБ на 5 ГГц. Квазистатическое моделирование на тех же частотах приближалось к $-49,1$ и $-34,5$ дБ соответственно. При электродинамическом моделировании получено $-38,4$ и $-22,7$ дБ, а при измерениях — $-38,9$ и $-20,5$ дБ. Максимальные отклонения результатов аналитического от результатов квазистатического, электродинамического моделирования и измерения составляют $2,5$, $9,7$ и $11,5$ дБ соответственно. Таким образом, аналитическая модель (4) может быть использована при дальнейших вычислениях наведённого тока I_{oi} на ИО.

Используя созданные аналитическую (5), квазистатическую (см. рис. 5) и электродинамическую (см. рис. 6) модели, выполнен расчёт наведённого тока на монополь, размещённый внутри ТЕМ-камеры, при воздействии на её вход ЭСР. Вычисленные формы наведённого тока на монополь (рис. 16).

Из рис. 16 видно, что максимальные токи, наведённые на монополь при аналитическом расчёте (20 мА) и электродинамическом моделировании (25 мА), отличаются на 5 мА. При квазистатическом моделировании максимальный ток не превышает

10 мА. Это объясняется тем, что расчёт был выполнен при длине отрезка с монополем, равной диаметру самого монополя. Максимальные отклонения результатов аналитического расчёта от результатов электродинамического и квазистатического моделирования составляют 25 и 50% соответственно. При этом длительность (t_d) наведённого сигнала при аналитическом, квазистатическом и электродинамическом расчётах составила $0,75$; $1,08$ и $1,25$ нс, время нарастания t_n — $0,33$; $0,21$ и $0,27$ нс и время спада t_c — $0,31$; $0,59$ и $0,78$ нс соответственно.

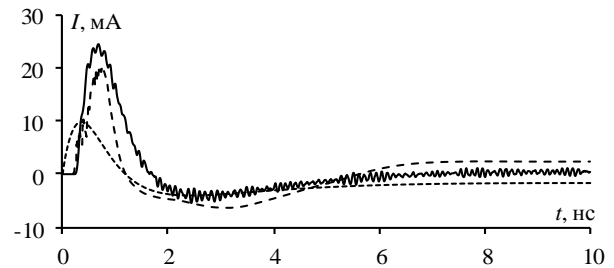


Рис. 16. Вычисленные аналитическим (---), квазистатическим (---) и электродинамическим (—) методами формы тока, наведённого на монополь

Измерены и вычислены с использованием аналитической, квазистатической и электродинамической моделей формы напряжения, наведённого на монополь (рис. 17).

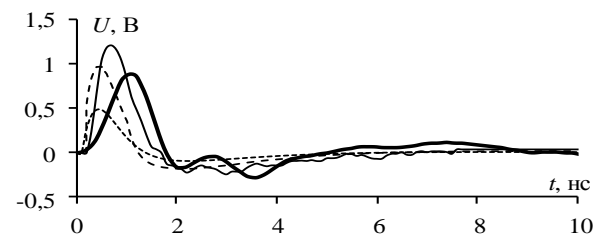


Рис. 17. Измеренные (—) и вычисленные аналитическим (---), квазистатическим (---) и электродинамическим (—) методами формы напряжения, наведённого на монополь

Из рис. 17 видно, что формы сигналов из результатов вычисления и измерения схожи, но имеются отличия по амплитуде и времени. Так, t_d при аналитическом расчёте составляет $1,05$ нс, при квазистатическом — $1,2$ нс, при электродинамическом — $1,4$ нс, а при измерении — $1,3$ нс. При квазистатическом и электродинамическом моделировании время нарастания (t_n) и время спада (t_c) сигнала соответственно $t_n = 0,2$ нс и $t_c = 0,6$ нс, при измерении $t_n = 0,6$ нс и $t_c = 0,5$ нс, а при аналитическом расчёте $t_n = 0,22$ нс и $t_c = 0,53$ нс соответственно. Однако при квазистатическом вычислении максимальная амплитуда наводки составляет $0,5$ В, при аналитическом — $0,97$ В, при электродинамическом — $1,2$ В, а при измерении — $0,9$ В. Такое различие результатов с квазистатическим моделированием объясняется тем, что при электродинамическом анализе используется полноценная трёхмерная модель, а также полномасштабное моделирование, которое является более кор-

ректным для данной модели по сравнению с квазистатическим моделированием. Кроме того, квазистатическое вычисление выполнено при длине отрезка ТЕМ-камеры, соизмеримой с диаметром монополя. Стоит отметить, что максимальные значения, вычисленные, используя аналитическую модель (0,97 В), близки к измеренным (0,9 В) и вычисленным с помощью электродинамического моделирования (1,2 В). Максимальные отклонения результатов аналитического расчёта от результатов электродинамического моделирования и измерения составляют 23,7 и 7% соответственно. Таким образом, используя размеры ТЕМ-камеры, ИО и входное напряжение ЭСР, возможно вычислить наведённые токи и напряжения на ИО при воздействии ЭСР.

Результаты вычислений и измерений токов и напряжений, наведённых на МПЛ

Вычислены, используя аналитическую, квазистатическую и электродинамическую модели, формы тока, наведённого на МПЛ (рис. 18).

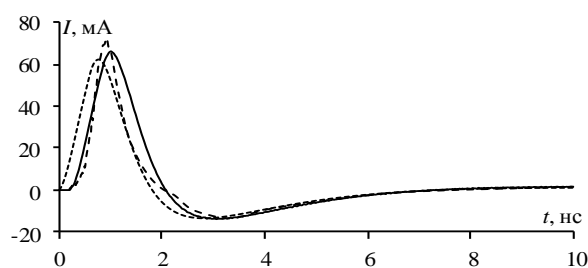


Рис. 18. Вычисленные аналитическим (---), квазистатическим (---) и электродинамическим (—) методами формы тока, наведённого на МПЛ

Из рис. 18 видно, что значения наведённых токов на МПЛ при аналитическом, квазистатическом и электродинамическом расчётах согласуются. Однако имеются различия по амплитуде и времени. Так, t_d при аналитическом расчёте составляет 1,28 нс, при квазистатическом — 1,53 нс, при электродинамическом — 1,58 нс. Времена нарастания и спада сигнала при аналитическом расчёте соответствуют $t_n = 0,4$ нс, $t_c = 0,6$ нс, квазистатическом — $t_n = 0,48$ нс, $t_c = 0,7$ нс, а электродинамическом — $t_n = 0,52$ нс, $t_c = 0,73$ нс. При этом максимальный ток, наведённый на МПЛ, не превышает 72 мА при аналитическом, 62,2 мА при квазистатическом и 66 мА при электродинамическом расчётах. Максимальные отклонения результатов аналитического расчёта от результатов электродинамического и квазистатического моделирования составляют 8,6 и 13,8% соответственно.

Формы напряжений на ближнем и дальнем концах МПЛ, полученные с использованием квазистатического и электродинамического моделирования, а также из результатов измерения, представлены на рис. 19. Также приведены результаты вычисления формы напряжения на ближнем конце, используя аналитическую модель.

Из рис. 19 видно, что значения напряжений на ближнем и дальнем концах МПЛ при моделировании и измерении близки между собой. Значения t_d , t_n и t_c на ближнем конце при квазистатическом и элек-

тродинамическом моделировании совпадают и составляют $t_d = 1,7$ нс, $t_n = 0,5$ нс, $t_c = 0,7$ нс, при измерениях — $t_d = 1,9$ нс, $t_n = 0,7$ нс, $t_c = 0,6$ нс, а при аналитическом расчёте — $t_d = 1,4$ нс, $t_n = 0,5$ нс, $t_c = 0,65$ нс. При этом амплитуда при аналитическом расчёте составляет 3,3 В, при квазистатическом — 2,8 В, при электродинамическом — 3 В, а при измерении — 2,35 В. Максимальные отклонения результатов аналитического расчёта от результатов квазистатического и электродинамического моделирования, а также измерения составляют 15,2; 9 и 28,7% соответственно.

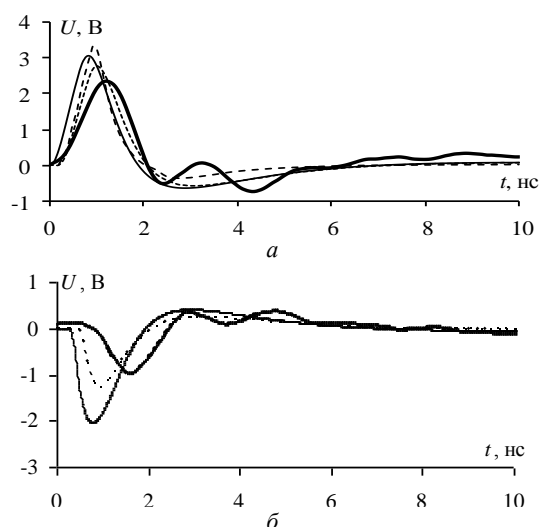


Рис. 19. Измеренные (—) и вычисленные аналитическим (---), квазистатическим (---) и электродинамическим (—) методами формы напряжения на ближнем (а) и дальнем (б) концах МПЛ

На дальнем конце МПЛ при квазистатическом и электродинамическом моделировании t_d , t_n и t_c совпадают и составляют $t_d = 1,5$ нс, $t_n = 0,3$ нс, $t_c = 0,8$ нс. Результаты измерений также незначительно отличаются: $t_d = 1,5$ нс, $t_n = 0,5$ нс, $t_c = 0,6$ нс. При этом амплитуда при квазистатическом моделировании составляет $-1,3$ В, электродинамическом — -2 В, а измерении — -1 В. Различия амплитуд связаны с потерями в проводнике и диэлектрике МПЛ, а также неучётом припоя на СВЧ-соединителях, расположенных с внутренней стороны ПП.

Заключение

Выполнена оценка наведённых токов и напряжений, создаваемых имитатором ЭСР, в малогабаритной ТЕМ-камере на монополь и МПЛ. Представлена аналитическая модель, позволяющая вычислить формы тока и напряжения, наводимых на ИО в виде монополя и МПЛ при воздействии ЭСР на вход ТЕМ-камеры. Созданы модели и выполнено квазистатическое и электродинамическое моделирование, а также натурный эксперимент. При воздействии ЭСР на ТЕМ-камеру с расположенным внутри монополем максимальная амплитуда напряжения на монополе не превышает 0,97 В при аналитическом расчёте, 1,2 В при электродинамическом моделировании и 0,9 В при измерении. Максимальные отклонения результатов аналитического расчёта от ре-

зультатов электродинамического моделирования и измерения составляют 23,7 и 7% соответственно. При воздействии ЭСР на ТЕМ-камеру с расположенной внутри МПЛ максимальная амплитуда напряжения не превышает 3,3 В при аналитическом расчёте, 3 В при электродинамическом моделировании и 2,35 В при измерении. Максимальные отклонения результатов аналитического расчёта от результатов электродинамического моделирования и измерения составляют 9 и 28,7% соответственно. Результаты моделирования схожи с результатами измерений, что делает возможным использование ТЕМ-камеры и половины коаксиальной камеры для исследования влияния подобных воздействий на ИС-электронную компонентную базу и небольшие устройства в целом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №19-79-10162, <https://rscf.ru/project/19-79-10162/>.

Литература

- Lin N. Evolution of ESD process capability in future electronic industry / N. Lin, Y. Liang, Dr. P. Wang // 15th International conference on electronic packaging technology. – 2014. – P. 1556–1560 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6922951>, свободный (дата обращения: 2.02.2022).
- Кечиев Л.Н. Защита электронных средств от воздействия статического электричества / Л.Н. Кечиев, Е.Д. Пожидаев. – М.: ИД «Технологии», 2005. – 352 с.
- Amerasekera A. The impact of technology scaling on ESD robustness and protection circuit design / A. Amerasekera, C. Duvvury // IEEE Transactions on components, packaging, and manufacturing technology: Part A. – 1995. – Vol. 18, No. 2. – P. 314–320.
- Narita K. Low clamping voltage protection for improvements of powered ESD robustness / K. Narita, M. Okushima // 40th Electrical overstress/electrostatic discharge symposium (EOS/ESD). – 2018. – P. 1–8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8509793>, свободный (дата обращения: 5.02.2022).
- Wang A. On a dual-polarity on-chip electrostatic discharge protection structure / A. Wang, C. Tsay // IEEE Transactions on electron devices. – 2001. – Vol. 48, No. 5. – P. 978–984.
- Capacitor-couple ESD protection circuit for deep-submicron low-voltage CMOS ASIC / M. Ker, C. Wu, T. Cheng, H.H. Chang // IEEE Transactions on very large scale integration (VLSI) systems. – 1996. – Vol. 4, No. 3. – P. 307–321.
- Ostermann T. Soft Failures in Integrated Circuits as a Matter of ESD Events // International conference on IC design and technology (ICICDT). – 2018. – P. 169–172 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8399783>, свободный (дата обращения: 7.02.2022).
- Investigation on ESD failures of RF IC / D. Yang, N. Mei, T. Sun, L. Yuan, S. Chao // International conference on electronic packaging technology (ICEPT). – 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9202494>, свободный (дата обращения: 25.02.2022).
- Xijun Z. Study on effect experiment of ESD EMP to – single chip microcontroller // IEEE International symposium on microwave, antenna, propagation and EMC technologies. – 2005. – P. 631–634 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1617990>, свободный (дата обращения: 25.02.2022).
- IEC 61967-3. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions. – Part 3: Measurement of radiated emissions. – Surface scan method, 2014-08 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/publication/6186>, свободный (дата обращения: 27.02.2022).
- IEC 61000-4-21, Electromagnetic compatibility (EMC). – Part 4-21: Testing and measurement techniques – reverberation chamber test methods, 2003-08 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/publication/4191>, свободный (дата обращения: 01.03.2022).
- Crawford M.L. Generation of standard EM fields using TEM transmission cell // IEEE Transaction on electromagnetic compatibility. – 1974. – Vol. EMC-16, No. 4. – P. 40–46.
- Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Emissions. – Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 61967-2, First Edit, 2005 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/publication/6185>, свободный (дата обращения: 05.03.2022).
- Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Immunity. Part 2: Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 62132-2, First Edit., 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/publication/6508>, свободный (дата обращения: 10.03.2022).
- Measurement of microcontroller radiated emissions at different operation modes / A.V. Demakov, A.V. Osintsev, V.A. Semenjuk, M.E. Komnatnov // 2021 IEEE 22nd International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM). – Russia: Souzga, the Altai Republic, 2021. – P. 193–197 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9507688>, свободный (дата обращения: 6.02.2022).
- Демаков А.В. Разработка ТЕМ-камеры для испытаний интегральных схем на электромагнитную совместимость / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 52–56.
- Demakov A.V. TEM cell for testing lowprofile integrated circuits for EMC / A.V. Demakov, M.E. Komnatnov. – International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM) // Russia: Chermal, 2020. – P. 154–158 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9153508>, свободный (дата обращения: 6.02.2022).
- IEC 61000-4-2. Electromagnetic compatibility (EMC). – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test. – 2008. – 26 p.
- Numerical modeling of electrostatic discharge generators / D. Pommerenke, R. Chundry, T.V. Doren, J.L. Drewniak, A. Shashindranarh, K. Wang // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2003. – No. 42 (2). – P. 258–270.
- Quantifying electric and magnetic field coupling from integrated circuits with TEM cell measurements / V. Kasturi, S. Deng, T. Hubing, D. Beetner // IEEE Int. symp. on electromagn. compat. – 2006. – P. 422–425 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1706339>, свободный (дата обращения: 8.02.2022).
- Wilson P.F. Small aperture analysis of the dual TEM cell and an investigation of test object scattering in a single TEM cell / P.F. Wilson, M.T. Ma. – National bureau of standards. – 1984. – 57 p.
- Пат. 2 759 079 РФ. Коаксиальная камера для измерения эффективности электромагнитного экранирования радиопоглощающих материалов / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов, А.А. Иванов И.И. Николаев, Т.Р. Газизов. – № 2020131978; заявл. 29.09.2020; опубл.: 09.11.2021, Бюл. №31. – 10 с.

Дроздова Анастасия Александровна

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-999-619-37-70
Эл. почта: anastasiya.drozdova.00@list.ru

Комнатнов Максим Евгеньевич

Канд. техн. наук, доцент, доцент каф. ТУ ТУСУРА
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-952-888-38-96
Эл. почта: maxmek@mail.ru

Drozdova A.A., Komnatnov M.E.

Evaluating the level of electromagnetic interference generated by the ESD source in the TEM-cell

We evaluated the induced electromagnetic interference on a monopole and a microstrip line generated by an electrostatic discharge source in a small-sized TEM-cell. Analytical, quasi-static, and electrodynamic models are presented for calculating the waveforms and amplitudes of currents and voltages induced on the monopole and the microstrip line. These waveforms are presented for analytical, quasi-static, electrodynamic calculations, and measurements. The maximum deviations of analytical and electrodynamic calculations results for the monopole and the microstrip line are 25 and 9%. An approach is presented for using half of the coaxial cell as a matching device between the electrostatic discharge source and the TEM-cell. The results of calculations and measurements agree well, which indicates the possibility of using a small-sized TEM-cell and half of the coaxial cell. These devices could be helpful to study the effect of electrostatic discharge -generated electromagnetic interference on integrated circuits, electronic component base, and small devices in general.

Keywords: electromagnetic compatibility, susceptibility, small-sized TEM-cell, electrostatic discharge
DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-28-36

References

1. Lin N., Liang Y., Wang Dr. P. Evolution of ESD process capability in future electronic industry. *15th International Conference on Electronic Packaging Technology*, 2014, pp. 1556–1560. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6922951>, free (Accessed: February 02, 2022).
2. Kechiev L.N., Pozhidaev E.D. *Zashchita elektronnykh sredstv ot vozdeystviya staticheskogo elektrichestva* [Protection of electronic means from the effects of static electricity]. Moscow, Publ. house "Technologies". 2005. 352 p. (in Russ.).
3. Amerasekera A., Duvvury C. The impact of technology scaling on ESD robustness and protection circuit design / A. Amerasekera. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: part A*, 1995, vol. 18, no. 2, pp. 314–320.
4. Narita K., Okushima M. Low clamping voltage protection for improvements of powered ESD robustness. *40th Electrical overstress/electrostatic discharge symposium (EOS/ESD)*, 2018, pp. 1–8. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8509793>, free (Accessed: February 05, 2022).
5. Wang A., Tsay C. On a dual-polarity on-chip electrostatic discharge protection structure. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, vol. 48, no. 5, pp. 978–984.
6. Ker M., Wu C., Cheng T., Chang H.H. Capacitor-coupled ESD protection circuit for deep-submicron low-voltage

CMOS ASIC. *IEEE Transactions on Very Large-scale Integration (VLSI) Systems*, 1996, vol. 4, no. 3, pp. 307–321.

7. Ostermann T. Soft Failures in Integrated Circuits as a Matter of ESD Events. *International Conference on IC Design and Technology (ICIDT)*, 2018, pp. 169–172. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8399783>, free (Accessed: February 07, 2022).

8. Yang D., Mei N., Sun T., Yuan L., Chao S. Investigation on ESD failures of RF IC. *International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, 2020. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9202494>, free (Accessed: February 25, 2022).

9. Xijun Z. Study on effect experiment of ESD EMP to -single chip microcontroller. *IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies*, 2005, pp. 631–634. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1617990>, free (Accessed: February 25, 2022).

10. IEC 61967-3. *Integrated circuits – Measurement of Electromagnetic Emissions. – Part 3: Measurement of Radiated Emissions – Surface Scan Method, 2014-08*. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/6186>, free (Accessed: February 27, 2022).

11. IEC 61000-4-21, *Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 4-21: Testing and Measurement Techniques – Reverberation Chamber Test Methods, 2003-08*. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/4191>, free (Accessed: March 01, 2022).

12. Crawford M.L. Generation of standard EM fields using TEM transmission cell. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 1974, vol. EMC-16, no. 4, pp. 40–46.

13. *Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Emissions. Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 61967-2*. First Edit, 2005. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/6185>, free (Accessed: March 05, 2022).

14. *Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Immunity. Part 2: Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 62132-2*, First Edit., 2010. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/6508>, free (Accessed: March 10, 2022).

15. Demakov A.V., Osintsev A.V., Semenjuk V.A., Komnatnov M.E. Measurement of microcontroller radiated emissions at different operation modes. *2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Russia: Souzga, the Altai Republic, 2021, pp. 193–197. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9507688>, free (Accessed: February 06, 2022).

16. Demakov A.V., Komnatnov M.E. Development of a TEM-cell for electromagnetic compatibility testing of integrated circuits. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 52–56 (in Russ.).

17. Demakov A.V., Komnatnov M.E. TEM cell for testing lowprofile integrated circuits for EMC. *International Conference of Young Specialists on Micro/nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Russia: Chemal, 2020, pp. 154–158. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9153508>, free (Accessed: February 06, 2022).

18. IEC 61000-4-2. *Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 4-2: Testing and Measurement Techniques – Electrostatic Discharge Immunity Test*, 2008, 26 p.

19. Pommerenke D., Chundry R., Doren T.V., Drewniak J.L., Shashindranarh A., Wang K. Numerical modeling of electrostatic discharge generators. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2003, no. 42 (2), pp. 258–270.

20. Kasturi V., Deng S., Hubing T., Beetner D. Quantifying electric and magnetic field coupling from integrated circuits with TEM cell measurements. *IEEE International Sym-*

posium on Electromagnetic Compatibility, 2006, pp. 422–425. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1706339>, free (Accessed: February 8, 2022).

21. 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*, 1984, 57 p.

22. Demakov A.V., Komnatnov M.E., Ivanov A.A., Nikolaev I.I., Gazizov T.R. *Koaksialnaya kamera dlya izmereniya effektivnosti elektromagnitnogo ekranirovaniya radiopogloshchayushchikh materialov* [Coaxial chamber for measuring the effectiveness of electromagnetic shielding of radio absorbing materials]. Patent RF, no. 2020131978, 2021 (in Russ.).

Anastasiya A. Drozdova

Postgraduate student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-999-619-37-70
Email: anastasiya.drozdova.00@list.ru

Maxim E. Komnatnov

Candidate of Science in Engineering, Assistant Professor, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-952-888-38-96
Email: maxmek@mail.ru