

УДК 621.372

Модели и методы воздействия электростатического разряда, применяемые при моделировании, проектировании и испытаниях радиоэлектронных средств

Дроздова А. А., Комнатнов М. Е.

Постановка задачи: с ростом степени интеграции электронных компонентов, возрастает восприимчивость современных радиоэлектронных средств (РЭС) к воздействию электромагнитных помех (ЭМП). Электростатический разряд (ЭСР) является одним из источников ЭМП, оказывающим негативное влияние на работу РЭС. Высокая чувствительность электронных компонентов к воздействию ЭСР приводит к возникновению обратимых и необратимых отказов, которые должны быть учтены на этапе проектирования критичных РЭС. Учёт различных импульсов воздействия ЭСР с индивидуальной формой тока позволит оценить степень восприимчивости проектируемой РЭС. **Целью работы** является систематизация существующих аналитических и схемотехнических моделей и методов воздействия ЭСР на РЭС. **Используемые методы:** для анализа моделей использовалось математическое и схемотехническое задание форм тока ЭСР. **Новизна:** впервые систематизированы аналитические и схемотехнические модели, определяющие форму тока ЭСР, по степени восприимчивости РЭС. **Результат:** представлены формы тока воздействия ЭСР на РЭС по моделям человеческого тела, механической, а также заряженных устройств, печатной платы и кабеля. Описан имитатор ЭСР по различным моделям человеческого тела и вычислены их формы тока. Сравнены вычисленные формы тока с формой, представленной в стандарте, а также с измеренными формами. Представлены нетрадиционные методы исследования воздействия ЭСР на испытуемый объект. **Практическая значимость:** представленные модели и методы воздействия ЭСР позволят провести анализ восприимчивости различных РЭС к воздействию ЭСР на этапе проектирования.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, радиоэлектронное средство, электростатический разряд, форма тока, восприимчивость, аналитическая модель, схемотехническая модель.

Введение

Одной из задач обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) является защита радиоэлектронных средств (РЭС) от электростатических разрядов (ЭСР). Особо сильно воздействию ЭСР подвержены полупроводниковые приборы [1–4]. Контактное воздействие ЭСР на полупроводник 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 [5]. При этом, надёжность РЭС, содержащих полупроводниковые приборы, в целом зависит от устойчивости компонентов к воздействию ЭСР, а увеличение степени интеграции элек-

Библиографическая ссылка на статью:

Дроздова А. А., Комнатнов М. Е. Модели и методы воздействия электростатического разряда, применяемые при моделировании, проектировании и испытаниях радиоэлектронных средств // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 3. С. 44-70. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-44-70

Reference for citation:

Drozдова A. A., Komnatnov M. E. Models and methods of electrostatic discharge exposure used in simulating, designing and testing of radio electronic equipment. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 3, pp. 44-70 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-44-70

тронных компонентов РЭС приводит к повышению чувствительности к ЭСР [6]. Из статистических данных [6] по отказам 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%). При этом электризация космических аппаратов (КА) является одной из проблем обеспечения надёжности космической техники [7]. Статистика выхода из строя или нарушения работы КА показывает, что 64% связано с воздействием ЭСР [8].

Экспериментальные и теоретические исследования воздействия ЭСР на микроконтроллер (МК) показали, что более 10 видов его отказов связаны с воздействием ЭСР [9]. Так, последовательное воздействие импульсов ЭСР на МК с амплитудой 6,4 кВ, приводит к возникновению повреждений в 33,4%, а 6,5 кВ – 100% МК [10]. Наиболее существенное влияние ЭСР оказывает на МОП- и КМОП-ИС [11]. Анализ воздействия ЭСР на ТТЛ ИС показал, что у 90% ИС повреждены внутренние $p-n$ переходы транзисторов, а у 10% разрушена металлизация, тогда как пробой диэлектрика происходил у 27% ИС [12]. Моделирование воздействия ЭСР на мощные МОП-транзисторы со встроенной защитой, показало, что транзисторы с меньшей ёмкостью затвор-исток более чувствительны к воздействию ЭСР [13].

Основными источниками накопления и переноса ЭСР выделяют человека, заряженные диэлектрики, изолированные металлические детали и пр. В настоящее время стандартизированы три основные формы тока для исследования устойчивости к воздействию ЭСР: модель человеческого тела (МЧТ) [14], механическая модель (ММ) [15] и модель заряженного устройства (МЗУ) [16]. Кроме того, разрабатываются другие модели, описывающие формы тока ЭСР, например, модель заряженной печатной платы (МЗПП) [17] и модель заряженного кабеля (МЗК) [18–20]. Существует множество схемотехнических моделей, реализующие формы импульсов тока ЭСР, которые позволяют выполнить вычисление амплитуд токов и напряжений при схемотехническом анализе РЭС [21–28]. Анализ значений параметров форм тока ЭСР позволит выбрать модели и метод испытаний для исследования устойчивости электронных компонентов к воздействию ЭСР. Таким образом, целесообразно сравнение существующих моделей и методов воздействия ЭСР на РЭС и их систематизация.

Цель данной работы – систематизация существующих аналитических и схемотехнических моделей и методов воздействия ЭСР на РЭС.

Модели воздействия ЭСР

Широкое распространение при описании формы тока ЭСР получила МЧТ [14], имитирующая разряд от кончика пальца человека на испытуемый объект (ИО). Упрощённая модель ЭСР [29], реализующая МЧТ, представлена на рис. 1. Схема содержит источник высоковольтного напряжения (E), зарядный и разрядный ключи, резисторы $R_c = 50\text{--}100\text{ МОм}$ и $R_d = 330\text{ Ом}\pm 10\%$, конденсатор $C_s = 150\text{ пФ}\pm 10\%$ и ИО. Значения C_s и R_d имитируют ёмкость человеческого тела и сопротивление электрического контакта между ним и металли-

ческим объектом соответственно. Значение R_c ограничивает ток заряда C_s . Номиналы элементов схемы могут отличаться, так как C_s может варьироваться от 100 до 500 пФ, а R_d от нескольких десятков Ом до сотен кОм. Форма тока ЭСР при напряжении 4 кВ представлена на рис. 2, из которого видно, что импульс разделён на две части: первый пик, называемый «начальным пиком», вызван разрядом руки, а второй пик вызван разрядом тела [14]. Время нарастания начального пика составляет от 0,7 до 1 нс, а амплитуда зависит от $E1$ имитатора ЭСР, энергия варьируется от 0,7 до 11 мкДж в зависимости от $E1$.

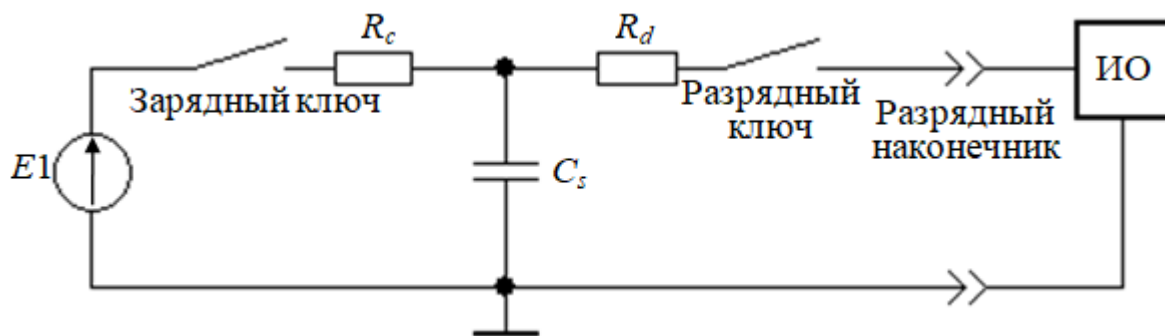


Рис. 1. Упрощённая схема имитатора ЭСР по МЧТ

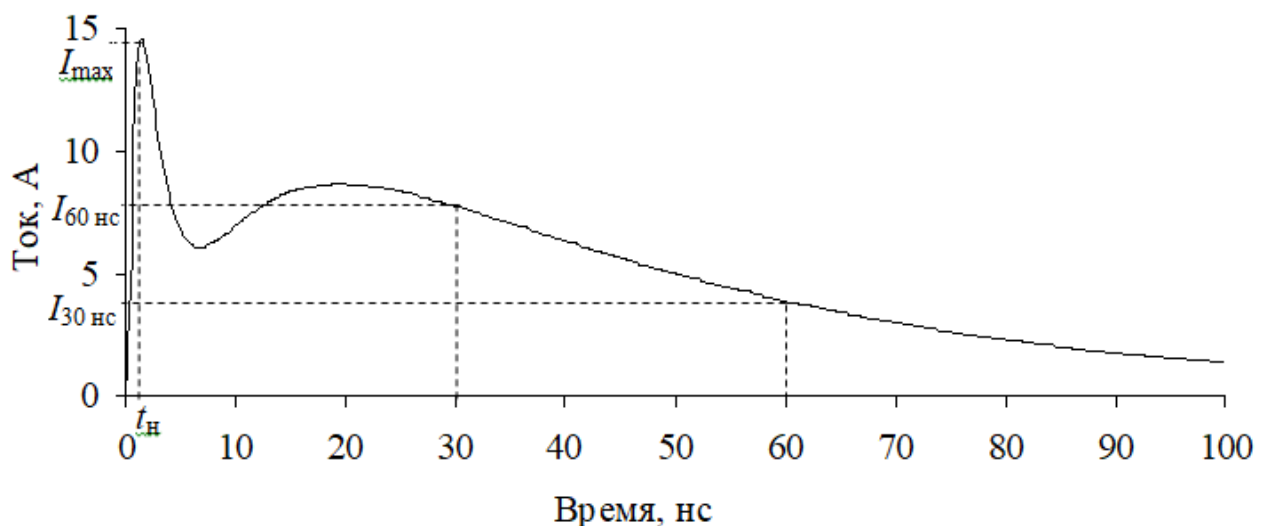


Рис. 2. Форма тока ЭСР по МЧТ

Другая модель, используемая в полупроводниковой промышленности, известна как ММ [15]. Она имитирует форму тока ЭСР, генерируемого физическим перемещением механических частей из пластика, внутри металлических корпусов, которые в результате трения могут накапливать на поверхности заряд. Данная модель схожа с МЧТ и для её реализации резистор R_d заменяют индуктивностью $L1=500$ нГн (рис. 3а). Поскольку индуктивность запасает энергию магнитного поля, то энергия воздействия ЭСР по ММ выше, чем по МЧТ. Поэтому напряжения источника $E2$ снижают до ± 200 В, чтобы не допустить повреждения ИО. Форма тока ЭСР по ММ представлена на рис. 3д, из которого видно, что форма тока имеет вид затухающей синусоиды, время нарастания составляет 10–10,2 нс, а энергия составляет 300 нДж при $E2 = 200$ В. В основном

МЧТ и ММ описывают воздействия, генерируемые с заряженного предмета на чувствительный компонент.

Использование автоматизированных средств при сборке компонентов РЭС привело к появлению другого потенциально опасного механизма воздействия ЭСР – МЗУ [16]. Основой для разработки данной модели (рис. 3б) послужил продолжительный заряд электронного компонента при его перемещении на сборочной линии. Вследствие его передвижения и трения об изоляционные материалы или конвейерную линию компонент на поверхности корпуса накапливает заряд, а во время захвата механизмом установки или его касания о заземлённый проводник происходит разряд с протеканием высоких амплитуд токов ЭСР, который может быть более опасным, поскольку протекает без задержки [16]. Как видно из формы тока (рис. 3е), разряд происходит очень быстро в течении 1–2 нс, время нарастания составляет 0,1 нс, а энергия 4 нДж при $EЗ = 200 В$. Так что, моделирование и испытания затруднены. Кроме того, сложно определить момент наступления разряда компонента.

Поскольку формы сигналов данных моделей ЭСР сильно различаются, то и восприимчивость компонентов к данным ЭСР разная [30, 31]. Каждая модель имеет собственную классификацию по устойчивости РЭС в соответствии с их восприимчивостью к ЭСР (таблица 1).

Таблица 1 – Классификация классов (N) восприимчивости компонентов РЭС к ЭСР при разных диапазонах напряжений (U) для трёх моделей

МЧТ		МЗУ		ММ	
N	$U, кВ$	N	$U, кВ$	N	$U, кВ$
0	<0,25	C1	<0,125	M1	<0,1
1A	0,25<0,5	C2	0,125<0,25	M2	0,1<0,2
1B	0,5<1	C3	0,25<0,5	M3	0,2<0,4
1C	1<2	C4	0,5<1	M4	>0,4
2	2<4	C5	1<1,5		
3A	4<8	C6	1,5<2		
3B	>8	C7	>2		

Известно, что порог отказа электронных компонентов зависит от характеристик монтажа и всегда меньше, чем порог отказа при воздействии ЭСР по МЗУ [32]. В [17] рассмотрен новый источник ЭСР по МЗПП. Данная модель является разновидностью МЗУ и отличается тем, что заряд накапливается электронным компонентом вместе с ПП, на которой он смонтирован. Поэтому компоненты, устойчивые к ЭСР по МЗУ могут быть более чувствительны к ЭСР по МЗПП [13]. На рис. 3в представлена эквивалентная схема ЭСР по МЗПП [33], а на рис. 3ж – форма её тока. Из рис. 3ж видно, что заряд происходит в течении 40–50 нс, время нарастания составляет 2–3 нс, а энергия – около 160 нДж при напряжении 200 В на обкладках электролитического конденсатора С3 ёмкостью 235 пФ. ЭСР по МЗУ и МЗПП имеют очень малое время нарастания, а большинство устройств помехозащиты слишком медленные. В этой связи, данные модели ЭСР рассматриваются как самые опасные для электронных компонентов [34–36].

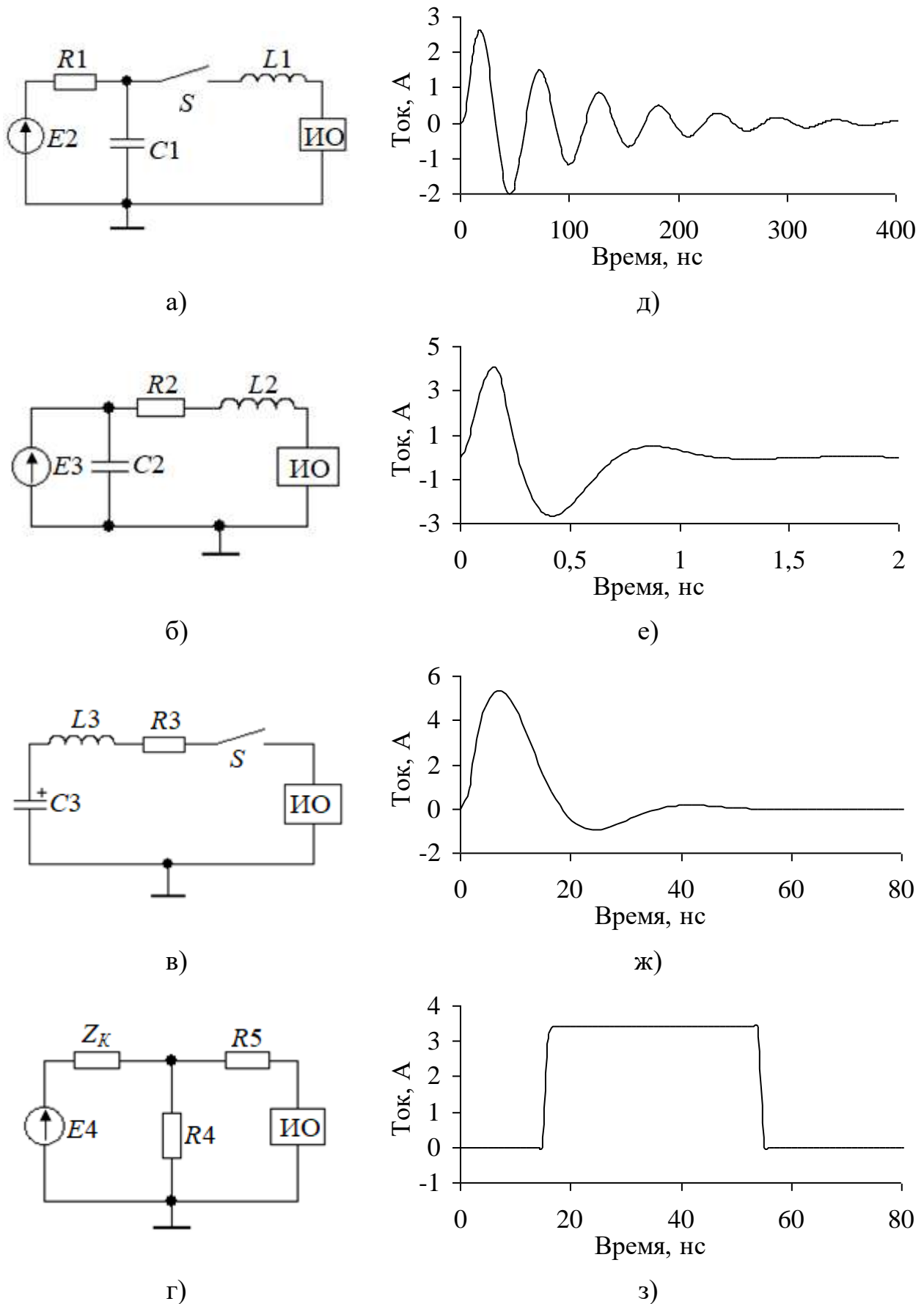


Рис. 3. Принципиальные схемы (а–г) и формы токов ЭСР (д–з) по ММ (а, д), МЗУ (б, е), МЗПП (в, ж) МЗК (г, з)

Другой не менее важной задачей является возникновение ЭСР в заряженном кабеле. Возникновение ЭСР по модели заряженного кабеля (МЗК) – это критическая проблема надёжности сетевого оборудования [18–20]. ЭСР обычно происходит, когда заряженный кабель подключается к электронному оборудованию. Так, в [37] представлены результаты исследования кабеля длиной 10 м с ёмкостью порядка 100 пФ, который вызывает ЭСР амплитудой до 1 кВ. МЗК отличается от других моделей малым временем нарастания и большей длительностью импульса ЭСР. На форму и амплитуду импульса ЭСР влияют различные факторы, такие как геометрические и электрофизические параметры кабеля, механизмы заряд/разряда, а также условия электрической нагрузки. На рис. 3г представлена эквивалентная схема ЭСР по МЗК, а на рис. 3з – форма тока ЭСР. Из рис. 3з видно, что форма тока представлена в виде прямоугольного импульса ЭСР с временем нарастания и спада около 1 нс, длительностью импульса 38–40 нс, а также энергией 490 нДж при $E_4 = 200$ В.

На этапе проектирования критичного РЭС должны быть учтены все модели воздействия ЭСР, поскольку каждая из них имеет индивидуальную форму импульса тока, что может оказать влияние на работоспособность РЭС на разных этапах проектирования, а также при эксплуатации.

Аналитические модели, определяющие форму тока ЭСР по МЧТ

Наиболее распространённой из рассмотренных является форма тока ЭСР по МЧТ (рис. 4а), которая изначально описывалась через пиковое значение тока разряда (I_0) с временем нарастания (t_1) и спада (t_2) импульса по (1), полученная из аналитической записи импульса тока молнии [38]

$$I(t) = I_0 \left(e^{-t/t_1} - e^{-t/t_2} \right). \quad (1)$$

Приближенное выражение с использованием двойной экспоненциальной функции для описания амплитуд разрядного тока (I_1 и I_2) с постоянными времени (t_1 и t_2) ЭСР (рис. 4б) впервые представлено в [39]:

$$I(t) = I_1 e^{-t/t_1} - I_2 e^{-t/t_2}. \quad (2)$$

Усовершенствованная форма тока [40], описываемая выражением (3), которая приближена к форме из стандарта [29] представлена на рис. 4в. При этом для моделирования разряда в 4 кВ, используются значения $A=13$ А, $B=0,4$ ГА/с, $t_1=5$ нс, $t_2=10$ нс, $\sigma_1=1,414$ нс, $\sigma_2=35,35$ нс:

$$I(t) = Ae^{-\left(\frac{t-t_1}{\sigma_1}\right)^2} + Bte^{-\left(\frac{t-t_2}{\sigma_2}\right)^2}. \quad (3)$$

Многочисленные исследования форм тока ЭСР [41–44] показали, что уравнение Хайдлера [45] наиболее подходит для описания импульса тока и подобно экспериментально измеренному. Изначально данное выражение содержало только одну экспоненциальную функцию, однако в результате анализа многочисленных осциллограмм форм тока ЭСР получена аналитическая запись (4) формы тока (рис. 4г), которая включена в стандарт [29] и в основном, используется при моделировании и испытаниях на восприимчивость к ЭСР:

$$I(t) = \frac{I_1 e^{-t/\tau_2} (t/\tau_1)^n}{k_1 \left(1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n\right)} + \frac{I_2 e^{-t/\tau_4} (t/\tau_3)^n}{k_2 \left(1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n\right)}, \quad (4)$$

где

$$k_1 = e^{\frac{-\tau_1}{\tau_2} \left(\frac{n \cdot \tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}},$$

$$k_2 = e^{\frac{-\tau_3}{\tau_4} \left(\frac{n \cdot \tau_4}{\tau_3}\right)^{\frac{1}{n}}},$$

I_1 и I_2 – амплитуды первого и второго максимумов тока, соответственно. Временные характеристики соответствуют [29] и составляют: $\tau_1 = 1,1$ нс, $\tau_2 = 2$ нс, $\tau_3 = 12$ нс, $\tau_4 = 37$ нс, $n = 1,8$. В данной аналитической записи n – это показатель степени, определяющий изгибы в форме тока.

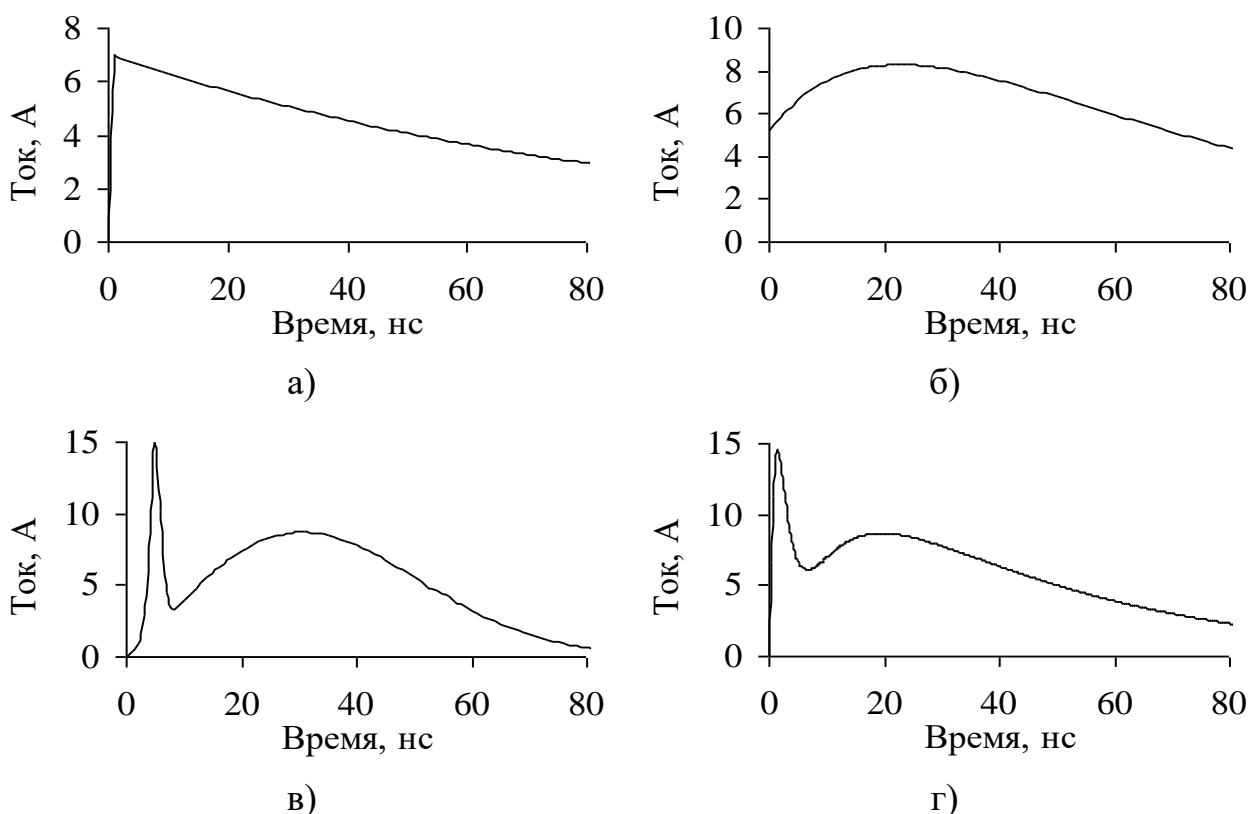


Рис. 4. Формы тока ЭСР: по (1) (а), (2) (б), (3) (в), (4) (г)

Биномиальная функция для построения формы тока ЭСР (рис. 5а) представлена в [46]. Данная модель (5) импульсной функции является интегрируемой по времени:

$$I(t) = I_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right)^n e^{-\frac{t}{\tau_2}} + I_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}}\right)^n e^{-\frac{t}{\tau_4}}. \quad (5)$$

Четырехэкспоненциальная аналитическая модель (6) для подгонки к параметрам сигнала ЭСР впервые представлена в работе [47]. В данной модели первая группа из двух экспонент соответствует первому пику, а вторая – второму. Форма тока ЭСР (рис. 5б) представляет собой сумму обеих экспоненциальных групп. При этом форму тока можно масштабировать для любого уровня разрядного напряжения:

$$I(t) = I_1 \left(e^{\frac{-t}{\tau_1}} - e^{\frac{-t}{\tau_2}} \right) + I_2 \left(e^{\frac{-t}{\tau_3}} + e^{\frac{-t}{\tau_4}} \right). \quad (6)$$

В представленных аналитических моделях значение производной при $t = 0$ не является непрерывным, что нефизично для МЧТ. В работе [48] автор предлагает новую аналитическую модель, основанную на полиноме импульсной функции, предложенной в [46]. Данная модель удовлетворяет требованиям непрерывности тока и его первой производной, а форма тока (рис. 5в) точно соответствует форме тока из [29]. При этом $p = 5$ и $r = 3$ формируют максимальные значения первого и второго пика соответственно, а $q = 5$ определяет изгиб между первым и вторым пиком:

$$I(t) = I_0 k_1^p e^{\frac{-t}{\tau_2}} + I_1 k_2^q e^{\frac{-t}{\tau_4}} + I_2 k_3^r e^{\frac{-t}{\tau_6}}, \quad (7)$$

где

$$k_1 = 1 - e^{\frac{-t}{\tau_1}}; \quad k_2 = 1 - e^{\frac{-t}{\tau_3}}; \quad k_3 = 1 - e^{\frac{-t}{\tau_5}}.$$

По мере изучения формы тока ЭСР выявлено, что она может отличаться от предложенной в [29]. В работе [49] представлена аналитическая модель, основанная на экспериментальных данных. Проведена серия измерений и записаны реальные формы токов ЭСР, возникающие при касании человеком металла. В качестве эталона использовано среднее значение измеренных форм тока, а к уравнению из [29] был применён генетический алгоритм, чтобы добиться наилучшего соответствия набору данных. Таким путём получена удовлетворительная модификация стандартного уравнения, которая ближе соответствует форме тока ЭСР (рис. 5г):

$$I(t) = I_1 \frac{\left(\frac{t}{\tau_1} \right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1} \right)^n} e^{\frac{-t}{\tau_2}} + I_2 \frac{\left(\frac{t}{\tau_3} \right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3} \right)^n} e^{\frac{-t}{\tau_4}}. \quad (8)$$

В таблице 2 представлены значения параметров аналитических моделей (5–8) для обеспечения максимального тока 15 А.

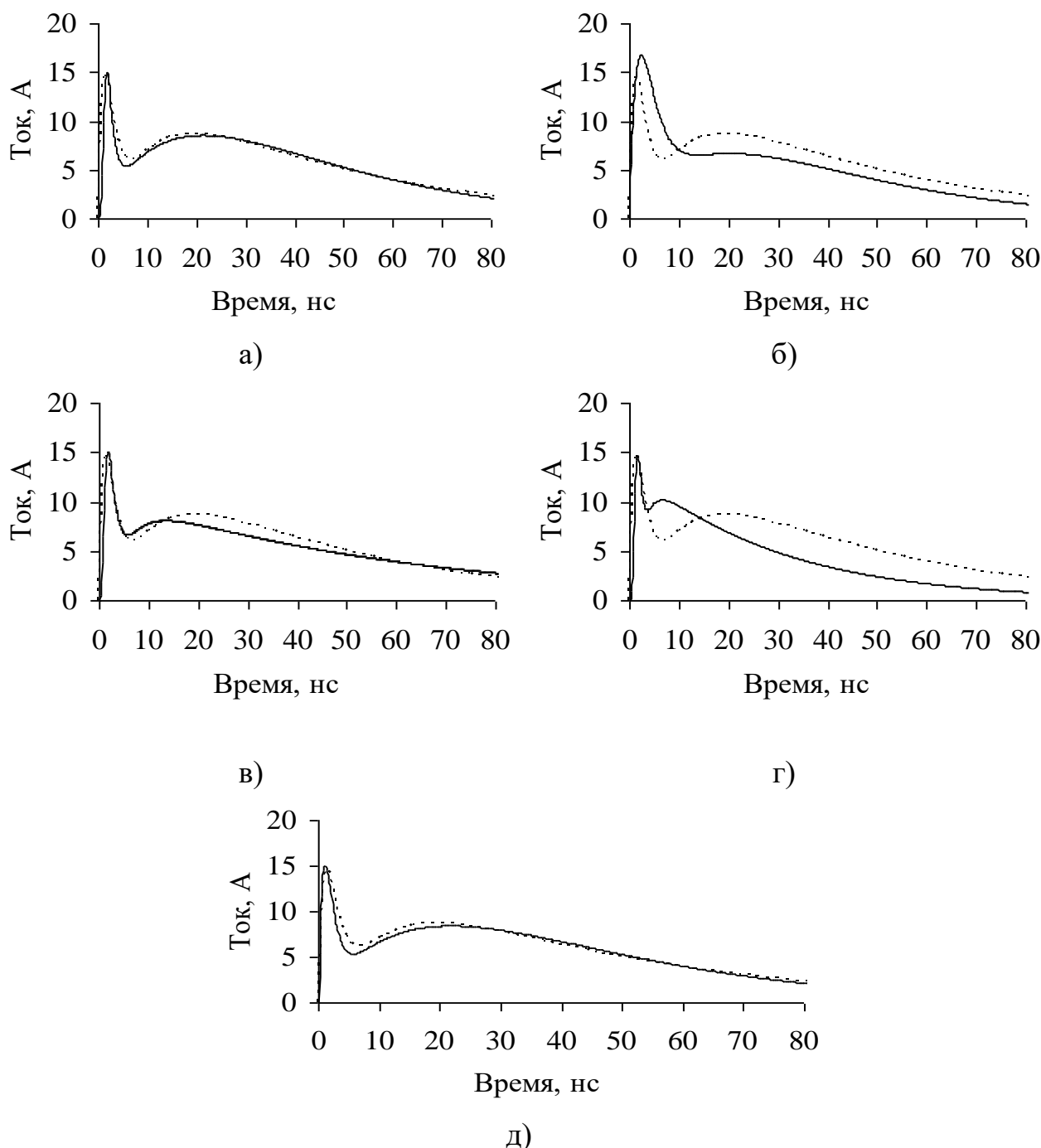


Рис. 5. Сравнение форм тока ЭСР согласно стандарту [29] (- -) и аналитическим моделям (—) из [46] (а), [47] (б), [48] (в), [49] (г), [50] (д)

Таблица 2 – Значения параметров аналитических моделей (5–8) для разрядного тока 15 А

	(5)	(6)	(7)	(8)
$I_0, А$	—	—	53,52	—
$I_1, А$	106,5	431,8	27,89	31,365
$I_2, А$	60,5	190,4	19,19	6,854
$\tau_1, нс$	0,62	2,2	0,606	1,226
	(5)	(6)	(7)	(8)
$\tau_2, нс$	1,1	2	1,759	1,359
$\tau_3, нс$	55	22	5	3,982

τ_4 , нс	26	20	14,55	28,817
τ_5 , нс	–	–	18,17	–
τ_6 , нс	–	–	38,26	–
n	8	–	–	4,036

Экспоненциальная модель четвертого порядка для моделирования тока ЭСР (рис. 5д) предложена в [50]. Значения параметров модели следующие: $A = 38,1679$ А/нс; $B = 1,0526$ А/нс; $C = 1$ нс⁻¹; $D = 0,0459$ нс⁻¹. Данная модель является простым выражением и может быть использована при математическом анализе:

$$i(t) = Ate^{-Ct} + Bte^{-Dt}. \quad (9)$$

В таблице 3 представлены значения максимального (I_{\max}), на 30 нс ($I_{30 \text{ нс}}$) и 60 нс ($I_{60 \text{ нс}}$) токов, а также время нарастания t_n для всех аналитических моделей форм токов ЭСР.

Таблица 3 – Характеристики форм тока ЭСР аналитических моделей для уровня разряда 4 кВ

	I_{\max} , А	$I_{30 \text{ нс}}$, А	$I_{60 \text{ нс}}$, А	t_n , нс
ГОСТ	15±1,2	8±2,4	4±1,2	0,8±0,2
(4)	14,9	8,0	4,0	0,8
(5)	15,1	8,0	4,0	0,83
(6)	16,9	6,2	3,0	1,3
(7)	14,9	8,0	4,0	0,83
(8)	14,7	4,9	1,7	0,72
(9)	15,1	8,0	4,0	0,6

Из таблицы 3 видно, что значения всех аналитических моделей соответствуют форме тока из стандарта. Согласно [29] значение тока первого максимума должно находиться в пределах $\pm 15\%$, а время его нарастания – $\pm 25\%$, значения $I_{30 \text{ нс}}$ и $I_{60 \text{ нс}}$ – $\pm 30\%$. Однако, в модели описанной выражением (6), имеются отличия в t_n , а у модели по выражению (8) – для $I_{30 \text{ нс}}$ и $I_{60 \text{ нс}}$. Кроме того, из таблицы 3 видно, что значения всех параметров аналитических моделей варьируются. Подбирая их, можно добиться схождения с формой тока, представленной в стандарте [29].

Схемотехнические модели имитатора ЭСР по МЧТ

Существует множество схем имитатора ЭСР, реализующих импульс ЭСР по МЧТ, используя которые моделируют воздействия ЭСР на РЭС в схематехническом симуляторе [21–28]. Так, в работе [25] предложена схема имитатора, состоящая из трёх частей (рис. 6а), для формирования каждой составляющей формы тока ЭСР. Компонентами $C1$, $C3$, $C5$, $R3$, $R4$ и $L1$ задаётся t_n импульса; $C4$, $R2$ – амплитуда первого пика (I_{\max}), а $C1$, $R1$, $L2$ – второго ($I_{30 \text{ нс}}$) (рис. 7а). Модель, аналогично состоящая из трёх частей (рис. 6б), представлена в [26]. Она содержит компоненты разряда имитатора ($C1$, $C2$, $R1$) и заземления ($C2$, $R2$, $L2$), а также сопротивление нагрузки ($R3$) вместе с индуктивностью нако-

нечника электрода ($L2$). Модель из [27] (рис. 6в) также содержит компоненты $C5$, $R3$, $R4$ и $L2$, которые задают требуемую форму тока ЭСР, а $C3$, $C4$ и $R3$ – амплитуду и длительность первого пика (рис. 7в). В модели, представленной в [28] (рис. 6г), компоненты $C1$, $R1$ имитируют ёмкость и сопротивление человеческого тела, $C2$, $R2$ – формируют первый пик формы тока, а $L1$ и $L2$ – индуктивности наконечника имитатора и кабеля заземления соответственно. В таблицу 4 сведены номинальные значения компонентов, используемых в рассмотренных схемах.

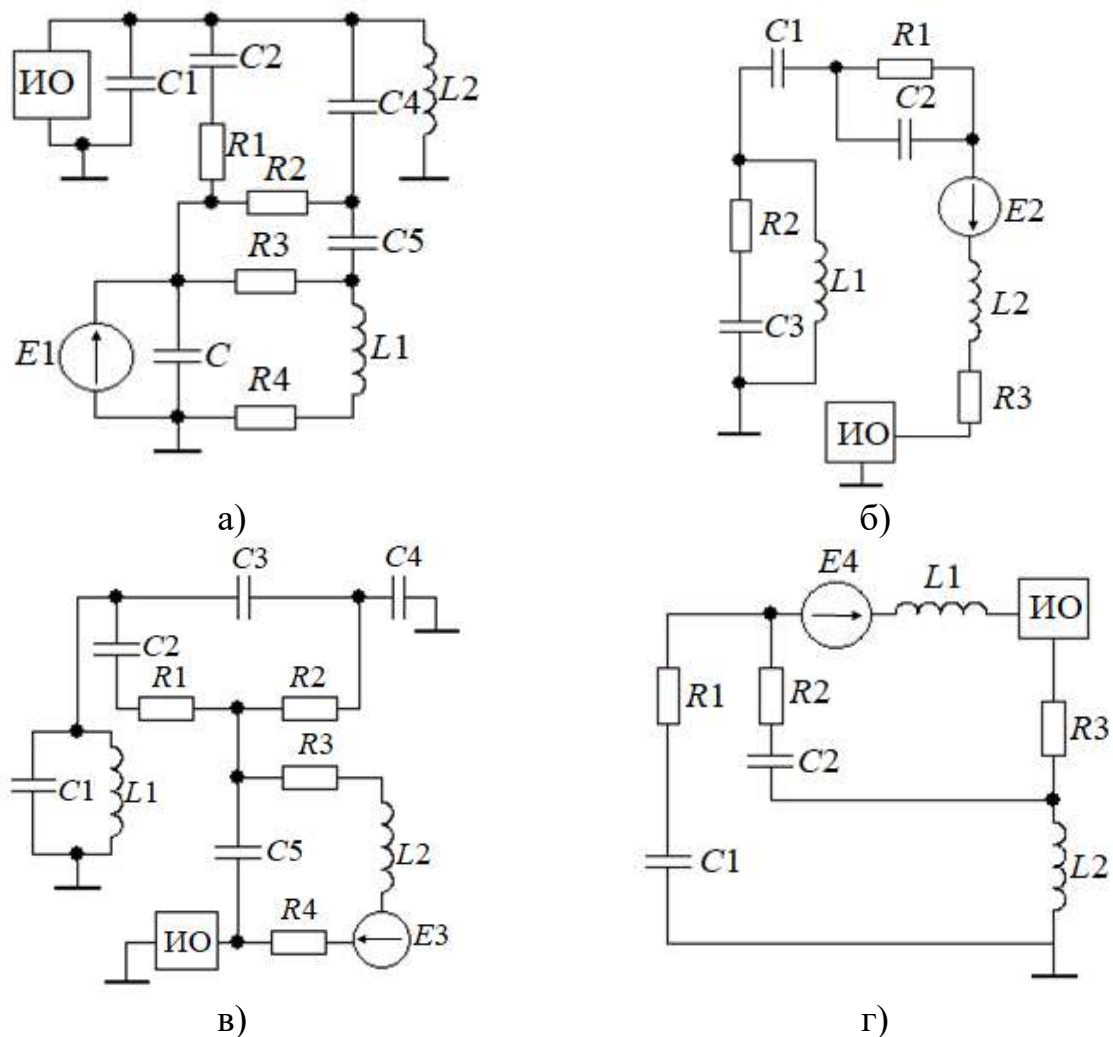


Рис. 6. Принципиальные электрические схемы из [25] (а), [26] (б), [27] (в) и [28] (г)

Выполнены вычисления форм токов ЭСР (рис. 7), используя схемотехнические модели [25–28] со значениями компонентов из таблицы 4. Эти формы сравнены с измеренной формой тока ЭСР, генерируемой имитатором ONYX 30. На рис. 8 представлена схема измерения, содержащая имитатор ЭСР, аттенюаторы 1 с суммарным ослаблением 40 дБ, коаксиальный кабель 2 и осциллограф 3. Для согласования использовался сужающийся коаксиальный переход с воздушным заполнением, в качестве которого выступала конструкция, состоящая из половины коаксиальной камеры 4 [51]. Выполнено измерение формы

тока ЭСР (рис. 7), в таблицу 5 сведены амплитудные и временные характеристики форм тока ЭСР схемотехнических моделей, по ГОСТ и измеренная ОНУХ 30 для разрядного напряжения 4 кВ.

Таблица 4 – Значения номиналов компонентов схемотехнических моделей имитаторов ЭСР

Тип	[25]	[26]	[27]	[28]
$R1$, Ом	330	330	330	330
$R2$, Ом	120	95,6	120	200
$R3$, Ом	36	2	36	50
$R4$, Ом	36	–	36	–
$L1$, мкГн	2	1,7	0,006	0,14
$L2$, мкГн	0,006	0,113	3,5	3
$C1$, пФ	12	3,45	20	150
$C2$, пФ	135	150	110	12
$C3$, пФ	5	14	20	
$C4$, пФ	15	–	5	
$C5$, пФ	20	–	15	

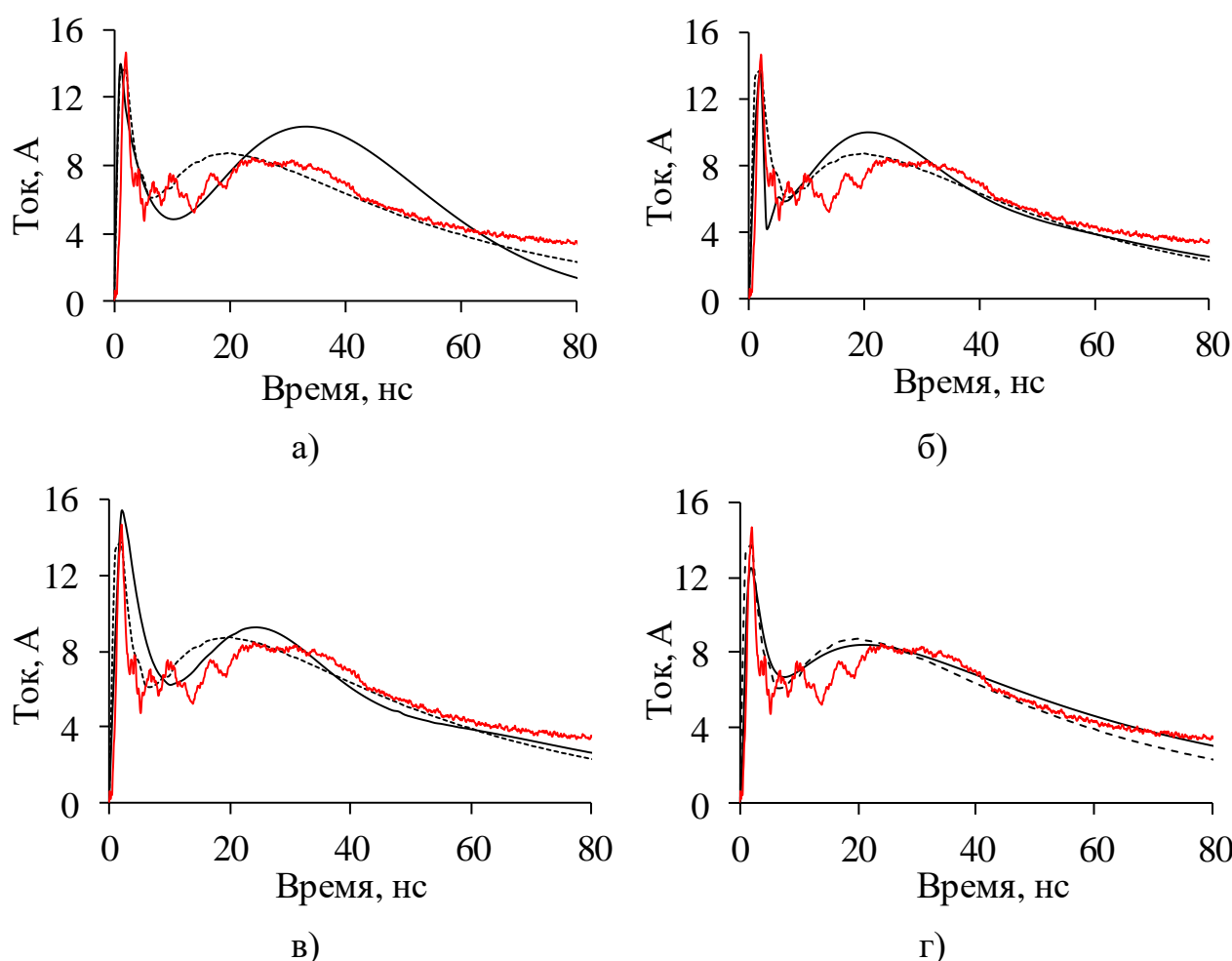


Рис. 7. Сравнение форм токов ЭСР из стандарта (- -) и измеренной (—) с формой по схемотехническим моделям (—) из [25] (а), [26] (б), [27] (в) и [28] (г)

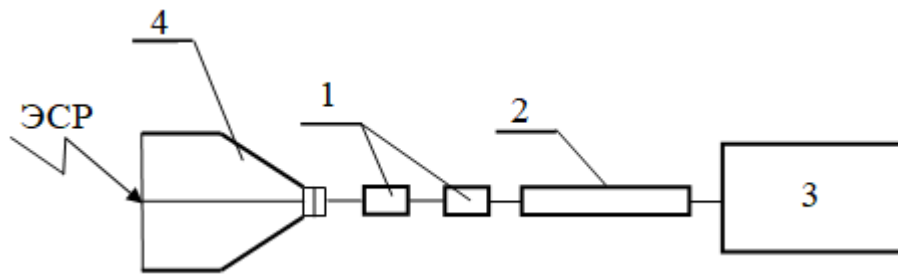


Рис. 8. Схема для измерения формы тока ЭСР

Из рис. 8а–г видно, что формы токов схожи между собой, а также с формой тока представленной в [29] (таблица 5). Минимальное отклонение наблюдается для модели из [26].

Таблица 4 – Характеристики форм тока ЭСР схемотехнических моделей, по ГОСТ и измеренной (ONYX 30) для разрядного напряжения 4 кВ

	I_{\max}, A	$I_{30 \text{ нс}}, A$	$I_{60 \text{ нс}}, A$	$t_n, \text{нс}$
ГОСТ	$15 \pm 1,2$	$8 \pm 2,4$	$4 \pm 1,2$	$0,8 \pm 0,2$
ONYX 30	14,7	8,2	4,4	1,2
[25]	13,7	10,1	4,8	0,9
[26]	13,5	8,6	3,9	0,9
[27]	15,3	8,7	3,8	1
[28]	12,5	7,9	4,6	0,9

Сравнение измеренной формы тока с формами токов по схемотехническим моделям выявило, что минимальная разница I_{\max} и t_n у схемотехнической модели из [27], а $I_{30 \text{ нс}}$ и $I_{60 \text{ нс}}$ – из [28]. При этом все значения находятся в заданных стандартом пределах. Таким образом, сравнены принципиальные электрические схемы имитатора ЭСР. Все эквивалентные схемы, предложенные разными авторами, могут моделироваться в любой программе для схемотехнического моделирования. Однако, набор компонентов для данных схем разный (таблица 4). Следовательно, при моделировании и/или создании макета необходимо это учитывать.

Методы экспериментального воздействия ЭСР

Испытания по воздействию ЭСР проводят согласно [29] в лаборатории при нормальных климатических условиях окружающей среды. ИО располагается на металлической пластине толщиной не менее 0,25 мм и размером не менее 1×1 м. Пластина в зависимости от размеров должна выступать за пределы ИО на 0,5 м с каждой стороны и должна быть соединена с защитным заземлением. ИО должен быть размещён на пластине заземления и изолирован от неё изоляционной подставкой толщиной 0,1 м. Между ИО, стенами помещения, где проводят испытания и любыми другими металлическими предметами должно обеспечиваться расстояние не менее 1 м. Кабели, соединяющие различные части ИО, должны быть проложены на расстоянии не менее 0,1 м от пластины заземления. Разрядный резистор имитатора ЭСР должен быть заземлён путём

подключения разрядного заземляющего кабеля к пластине заземления в точке, как можно более близкой к ИО. Полная длина кабеля заземления составляет 2 м. При необходимости применения вспомогательного оборудования, оно должно быть защищено от электромагнитных помех.

Экспериментальная установка с хорошей повторяемостью для анализа воздействия ЭСР на высокоскоростные печатные платы (ПП) (рис. 9) представлена в работе [52]. Используя данную установку, можно анализировать влияние импеданса ИО и коаксиальных кабелей на изменение напряжения, вызванного ЭСР.

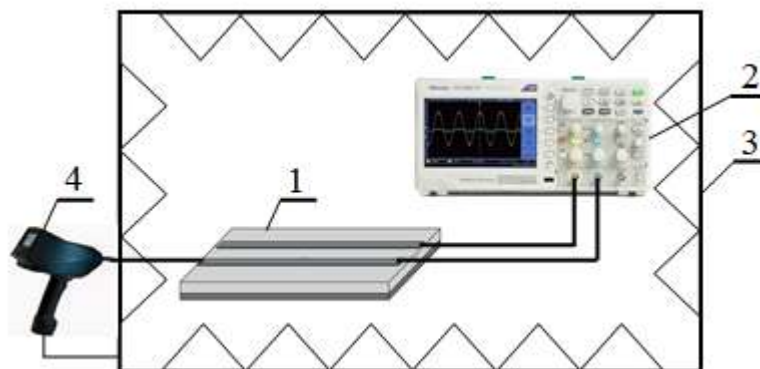


Рис. 9. Экспериментальная установка

В качестве ИО используется связанная микрополосковая линия 1 с волновым сопротивлением $Z=50$ Ом. Для корректного измерения, ИО и осциллограф 2 устанавливаются внутри безэховой камеры (БЭК) 3, а имитатор ЭСР 4 за пределами БЭК. Воздействие ЭСР на ПП проводят через высокочастотный коаксиальный кабель. Аналогичным образом ПП соединяется с осциллографом.

Экспериментальное исследование эффективности экранирования (ЭЭ) гибких экранирующих материалов, с целью определения возможности их применения для защиты электронных компонентов и устройств авиакосмических систем от воздействия ЭСР выполнено в [53]. Экспериментальная установка (рис. 10) содержит: регулируемый источник электропитания 1 с заданным напряжением разряда между шаровыми электродами 2 диаметром 20 мм, рецептор 3, металлическую горизонтальную пластину 4, исследуемый гибкий экранирующий материал 5, металлическую пластину заземления 6 и осциллограф 7. Источником ЭСР выбран высоковольтный преобразователь, который подключён к регулируемому источнику электропитания с заданным напряжением разряда между шаровыми электродами. Он имеет форму куба с длиной ребра $a=50$ мм, который изготовлен из медной фольги. Рецептор должен быть изолирован от горизонтальной пластины диэлектрической прокладкой, а пластина должна быть соединена с плоскостью заземления через резисторы $R1=R2=470$ кОм. Рецептор подключается к цифровому осциллографу коаксиальным кабелем, центральный проводник которого соединяется с корпусом рецептора, а исследуемый гибкий экранирующий материал соединяется с гори-

горизонтальной пластиной. Осциллографом регистрируется форма тока, а ЭЭ определяется по измеренным амплитудным значениям на рецепторе.

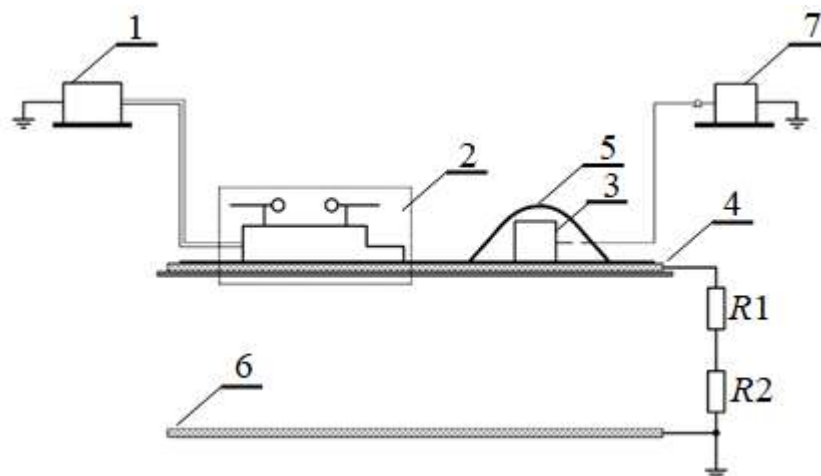


Рис. 10. Схема стенда для исследования гибких экранирующих материалов

Экспериментальная установка (рис. 11) для измерения электромагнитного излучения, генерируемого имитатором ЭСР, представлена в [54]. Установка состоит из сдвоенной ТЕМ-камеры, имитатора ЭСР и осциллографа. Нижняя ТЕМ-камера используется для возбуждения ЭМИ от ЭСР, а верхняя, подключенная к осциллографу – для приёма. Воздействие имитатором ЭСР выполняется на центральный проводник нижней ТЕМ-камеры.



Рис. 11. Установка для измерения ЭМИ, генерируемого имитатором ЭСР

Экспериментальная установка (рис. 12б) для измерения наведённых напряжений на ИО, расположенный внутри ТЕМ-камеры, при воздействии ЭСР на её вход, представлена в [55]. Предложено для согласования использовать сужающийся коаксиальный переход с воздушным заполнением, в качестве которого представлена конструкция, состоящая из половины коаксиальной камеры. Схема измерения (рис. 12а) состоит из источника ЭСР, адаптера в виде

сужающегося коаксиального перехода 1, коаксиальных соединителей 2, ТЕМ-камеры 3, к которой подключена согласованная нагрузка 4 сопротивлением 50 Ом, а также монополя 5, расположенного на ПП 6, помещённой во внутреннее пространство ТЕМ-камеры. Напряжение на монополе регистрировалось программно реализованной маской в осциллографе 7. В качестве источника ЭСР использовался имитатор ЭСР ОNYX 30, соответствующий требованиям стандарта [29].

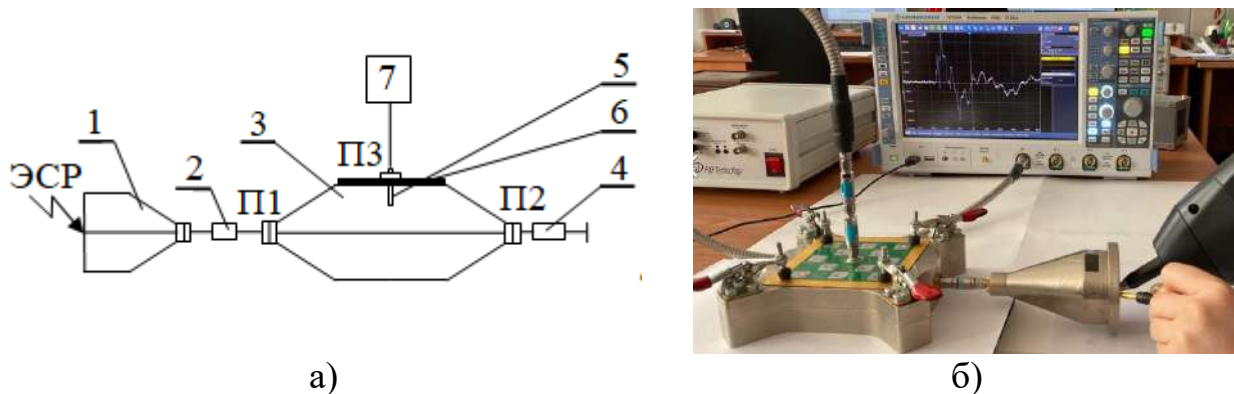


Рис. 12. Схема (а) и экспериментальная установка (б) для измерения формы наведённого напряжения на монополь внутри ТЕМ-камеры при воздействии на её вход импульса от имитатора ЭСР

Для экспериментального исследования распространения ЭСР по кабелю использовалась установка, представленная в [56]. Она (рис. 13) содержит испытуемый кабель 1, металлическую трубку 2, для имитации крепёжной скобы или металлического хомута, датчики напряжения 3 и датчики электрического 4 и магнитного 5 полей, а также пластину заземления 6 и осциллограф 7. Воздействие ЭСР проводится в две точки: первая – непосредственно на кабель, вторая – на металлическую трубку. Изменяя положение датчиков напряжения, можно измерить напряжение по всей длине кабеля.

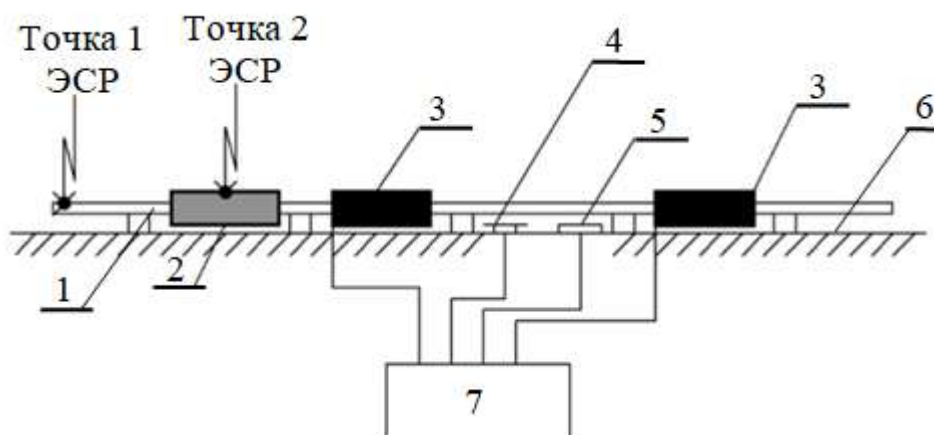


Рис. 13. Экспериментальная установка для исследования воздействия ЭСР на кабель

Заключение

Представлены существующие модели и методы воздействия ЭСР на РЭС. Приведены модели воздействия ЭСР по МЧТ, ММ, МЗУ, МЗПП и МЗК, а также их формы токов. Представлены аналитические модели, определяющие форму тока ЭСР по МЧТ. При этом значения всех параметров аналитических моделей варьируются и подбираются, чтобы добиться сходства с формой тока, представленной в стандарте. Представлены эквивалентные схемы для имитатора ЭСР и формы его тока. Выполнено сравнение полученных форм тока с формой, представленной в стандарте, и с измеренной. Все эквивалентные схемы, предложенные разными авторами, могут моделироваться в любой программе для схемотехнического моделирования. Однако, набор компонентов для данных схем разный. Следовательно, при моделировании и/или создании макета необходимо это учитывать. Описаны нетрадиционные методы исследования воздействия ЭСР на ИО. Таким образом, результаты данной работы могут быть полезны техническим специалистам при анализе устойчивости РЭС при воздействии ЭСР. В перспективе предполагается выполнять моделирование элементов реальных РЭС и реализовать модели в базе данных отечественной САПР.

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

Литература

1. Горлов М.И., Андреев А.В., Воронцов И.В. Воздействие электростатических зарядов на изделие полупроводниковой электроники и радиоэлектронной аппаратуры. – Воронеж: Изд. Воронежского государственного университета, 1997. – 160 с.
2. Tan Z.L., Xiang Z.Y., Xu B., Xie P.H. Investigation on ESD EMP damage effects of electronic components // 5th Asia-Pacific conf. on environmental electromagnetics. – Xi'an, China, 2009. – P. 89–92.
3. Liu Y., Chen R., Li B., En Y., Chen Y. Analysis of indium–zinc–oxide thin-film transistors under electrostatic discharge stress // IEEE Transactions on Electron Devices. 2018. Vol. 65. № 1. P. 356–360.
4. Дроздова А.А., Николаев И.И., Комнатнов М.Е. Воздействие электростатического разряда на транзистор с учётом ёмкости посадочного места // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2022. № 2. С. 47–52.
5. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. – М.: Издательский дом «Технологии», 2005. – 352 с.
6. Lin N., Liang Y., Wang Dr. P. Evolution of ESD process capability in future electronic industry // 15th International Conference on Electronic Packaging Technology. – Chengdu, China, 2014. – P. 1556–1560.

7. Иванов В.А., Кириллов В.Ю., Морозов Е.П. Модельные и стендовые исследования электризации космических аппаратов / Под ред. В.Ю. Кириллова. – М.: Издательство МАИ, 2012. – 168 с.

8. Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. О совместных климатических и электромагнитных испытаниях радиоэлектронной аппаратуры // Доклады ТУСУР. 2014. № 4(34). С. 39–45.

9. Xijun Z. Study on effect experiment of ESD EMP to single chip microcontroller // IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. – Beijing, 2005. – P. 631–634.

10. Алексеев В.Ф., Силков Н.И., Пискун Г.А., Пикулик А.Н. Методика испытания микроконтроллеров на чувствительность к электростатическим разрядам // Электроника, радиофизика, радиотехника, информатика. 2011. № 5(59). С. 5–11.

11. Строгонов А., Горлов М. Воздействие электростатических разрядов на интегральные схемы // Компоненты и технологии. 2008. № 3. С. 188–192.

12. Горлов М.И. Статическое электричество и полупроводниковая электроника // Природа. 2006. № 12. С. 27–36.

13. Konstantinov U.A., Pozhidaev E.D., Tumkovskiy S.R. Investigation of electrostatic discharge effect on high-power MOSFET-transistors considering the influence of PCB // International seminar on electron devices design and production (SED). – Prague, Czech Republic, 2019.

14. ГОСТ Р 53734.3.1-2013. Электростатика. Методы моделирования электростатических явлений. Электростатический разряд. Модель человеческого тела. – М.: Стандартинформ, 2014. – 11 с.

15. ГОСТ Р 53734.3.2-2013 (МЭК 61340-3-2:2006). Электростатика. Методы моделирования электростатических явлений. Электростатический разряд. Модель механического устройства. – М.: Стандартинформ, 2013. – 11 с.

16. ГОСТ Р 53734.3.3-2016. Методы моделирования электростатический явлений. Электростатический разряд. Модель заряженного устройства. – М.: Стандартинформ, 2016. – 23 с.

17. Industry Council on ESD Target Levels. White paper 2: A case for lowering component level CDM ESD specifications and requirements, industry council on ESD target levels. Revision 2.0, 2010. – 173 p.

18. Stadler W., Brodbeck T., Gaertner R., Gossner H. Cable discharges into communication interfaces // Proceedings of the EOS/ESD Symposium. – Tucson, AZ, USA, 2006. – P. 144–151.

19. Chatty K. Model-based guidelines to suppress cable discharge event (CDE) induced latch up in CMOSICs // IEEE International Reliability Physics Symposium. Proceedings. – Phoenix, AZ, USA, 2004. – P. 130–134.

20. Brennan C.J., Chatty K., Sloan J., Dunn P., Muhammad M., Gauthier R. Design automation to suppress cable discharge event (CDE) induced latch up in 90-nm CMOSASICs // in Proc. EOS/ESD symp. – Anaheim, CA, USA, 2005. – P. 126–130.

21. Caniggia S., Maradei F. Circuit and numerical modeling of electrostatic discharge generators // Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium. – Anaheim, 2006. Vol. 42. № 6. P. 1350–1357.

22. Takada T., Sekine T., Asai H. Circuit/electromagnetic hybrid simulation of electrostatic discharge in contact discharge mode // International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Rome, Italy, 2012. – P. 1–6.

23. Yoshida T., Masui N. A study on system level ESD stress simulation using circuit simulator // Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Melbourne, VIC, Australia, 2013. – P. 1–4.

24. Zhou Y., Hajjar J.J. A circuit model of electrostatic discharge generators for ESD and EMC spice simulation // IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits. – Chengdu, China, 2014. – P. 1–2.

25. Wang K., Pommerenke D., Chundru R., Doren T.V., Drewniak J.L., Shashindranath A. Numerical modeling of electrostatic discharge generators // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2003. Vol. 45. № 2. P. 258–271.

26. Yousaf J., Park M., Lee H., Youn J., Lee D., Hwang C. Efficient circuit and an EM model of an electrostatic discharge generator // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2018. Vol. 60. № 4. P. 1078–1086.

27. Lin H-N., Ko B-N., Lin J., Ho T-H. Establishment of ESD generator model for transient susceptibility analysis from chip to system level // Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Sapporo, Japan, 2019. – P. 209–212.

28. Xiu Y., Thomson N., Mertens R., Rosenbaum E. S-parameter based modeling of system-level ESD test bed // 37th Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium (EOS/ESD). – Reno, 2015. – P. 1–10.

29. ГОСТ Р 51317.4.2-2010 (МЭК 61000-4-2:2008) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2010. – 26 с.

30. Wang A.Z., Feng H.G., Gong K., Zhan R.Y., Stine J. On-chip ESD protection for integrated circuits: an overview for IC designers // Microelectronics Journal. 2001. № 32. P. 733–747.

31. Amerasekera A., Duvvury C. ESD in silicon integrated circuits 2nd Ed // Physics and operation of ESD protection circuit elements. 2002. P. 68–104.

32. Кузнецов В.В., Кечиев Л.Н., Абрамешин А.Е. Экспериментальное исследование формы тока ЭСР при разряде с печатной платой // Технологии ЭМС. 2014. № 1(48). С. 46–52.

33. Kuznetsov V., Kechiev L. Charged board model ESD simulation for PCB mounted MOS transistors // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2015. Vol. 57. № 5. P. 947–954.

34. Olney A., Gifford B., Guravage J., Righter A. Real-world charged board model (CBM) failures // Proceedings of the EOS/ESD symposium. – Las Vegas, NV, USA, 2003. – P. 34–43.

35. Гизатуллин Р.М., Гизатуллин З.М. Помехоустойчивость и информационная безопасность вычислительной техники при электромагнитных

воздействиях по сети электропитания. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. – 142 с.

36. Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference // *Journal of communications technology and electronics*. 2016. № 5. P. 546–550.

37. Волков С., Ефишин А., Морозов С., Соколов С. Проблема электростатического разряда и современные методы защиты интегральных схем от него. Часть 1 // *Рынок микроэлектроники*. – 2007.

38. Neacsu O., Beniuga O., Ursache S., Paulet M. Modelling and analysis the current pulse associated with electrostatic discharges // *International conference and exposition on electrical and power engineering*. – Iasi, 2012. – P. 585–590.

39. Cerri G., Leo R. ESD indirect coupling modeling // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 1996. № 3(38). P. 274–281.

40. Berghe S.V., Zutter D. Study of ESD signal entry through coaxial cable shields // *Journal of electrostatics*. 1998. P. 135–148.

41. Asimakopoulou F., Fotis G.P., Gonos I.F., Stathopoulos I.A. Parameter determination of Heidler's equation for the ESD current // *Proceedings of the 15th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2007)*. – Slovenia, 2007. – 208 p.

42. Murota N. Determination of characteristics of the discharge current by the human charge model ESD simulator // *Electronics and Communications in Japan Part I-communications*. 1997. №. 80(4). P. 49–57.

43. Ramachandran C., Pommerenke D., Wang K., Doren T.V., Centola F.P., Junag J.S. Characterization of human metal ESD reference event and correlation of generator parameters to failure levels // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2004. № 46(4). P. 498–504.

44. Fujiwara O. Equivalent circuit modeling of discharge current injected in contact with an ESD-gun // *Electrical Engineering in Japan*. 2004. P. 8–14.

45. Heidler H. Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP Berechnung // *18th International conf. on lightning protection (ICLP – 1985)*. – Munich, 1985. – P. 63–66.

46. Songlin S., Zengjun B., Minghong T. A new analytical expression of current waveform in standard IEC61000-4-2 // *High power laser and particle beams*. 2003. Vol. 15. № 5. P. 464–466.

47. Keenan R.K., Rosi L.A. Some fundamental aspects of ESD testing // *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. – Cherry Hill, 1991. – P. 236–241.

48. Yuan Z., Li T., He J., Chen S., Zeng R. New mathematical descriptions of ESD current waveform based on the polynomial of pulse function // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2006. Vol. 48. № 3. P. 589–591.

49. Katsivelis P., Gonos I., Stathopoulos I. Estimation of parameters for the electrostatic discharge current equation with real human discharge events reference using genetic algorithms // *Measurement science and technology*. 2010. Vol. 21. № 10. P. 105703.

50. Wang K., Wang J., Wang X. Four order electrostatic discharge circuit model and its simulation // Indonesian journal of electrical engineering and computer science. 2012. Vol. 10. № 8. P. 2006–2012.

51. Демаков А.В., Комнатнов М.Е., Иванов А.А., Николаев И.И., Газизов Т.Р. Коаксиальная камера для измерения эффективности электромагнитного экранирования радиопоглощающих материалов // Патент на изобретение RU 2759079 С1, опубл. 09.11.2021, бюл. №31. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47259771> (дата обращения 10.05.2023).

52. Huang Y., Wu T. Numerical and experimental investigation of noise coupling perturbed by ESD currents on printed circuit boards // IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record. – Boston, 2003. – P. 43–47.

53. Кириллов В.Ю., Томилин М.М. Исследование эффективности экранирования гибких материалов при воздействии импульсных излучаемых помех, создаваемых электростатическими разрядами // Технологии электромагнитной совместимости. 2010. № 2(33). С. 65–66.

54. Soohoo K., Rybak A., Wielgos M. Erratic nature of product ESD immunity testing investigated using a dual TEM cell // 17th International Zurich symposium on electromagnetic compatibility. – Zurich, 2006. – P. 453–456.

55. Drozdova A.A., Komnatnov M.E. Evaluating the level of electromagnetic interference generated by the ESD source in the TEM-cell // 2022 International Siberian conference on control and communications (SIBCON). – Tomsk, 2022. – P. 1–8.

56. Воршевский А.А., Гришаков С.Е. Обеспечение электромагнитной совместимости морской техники при возникновении электростатических разрядов // Вестник астраханского государственного технического университета. серия: морская техника и технология. 2020. № 1. С. 106–114.

References

1. Gorlov M.I., Andreyev A.V., Vorontsov I.V. *Vozdeystviye elektrostaticheskikh zaryadov na izdeliye poluprovodnikovoy elektroniki i radioelektronnoy apparatury* [The impact of electrostatic charges on the product of semiconductor electronics and radio electronic equipment]. Voronezh, Voronezh State University Publ., 1997. 160 p (in Russian).

2. Tan Z.L., Xiang Z.Y., Xu B., Xie P.H. Investigation on ESD EMP damage effects of electronic components. *5th Asia-Pacific conf. on environmental electromagnetics*, Xi'an, China, 2009, pp. 89–92.

3. Liu Y., Chen R., Li B., En Y., Chen Y. Analysis of indium–zinc–oxide thin-film transistors under electrostatic discharge stress. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, vol. 65, no. 1, pp. 356–360.

4. Drozdova A.A., Nikolaev I.I., Komnatnov M.E. Electrostatic discharge effect exposure on the transistor in consideration of seat capacitance. *All-Russia science&technology conference: problems of advanced micro- and nanoelectronic systems development (MES)*, 2022, no. 2, pp. 47–52 (in Russian).

5. Kechiev L.N., Pozhidaev E.D. *Zashchita elektronnykh sredstv ot vozdeystviya staticheskogo elektrichestva* [Protection of electronic means from the effects of static electricity]. Moscow, Technologies Publ., 2005. 352 p.

6. Lin N., Liang Y., Wang Dr. P. Evolution of ESD process capability in future electronic industry. *15th International Conference on Electronic Packaging Technology*, Chengdu, China, 2014, pp. 1556–1560.

7. Ivanov V.A., Kirillov V.Yu., Morozov E.P. *Model'nyye i stendovyye issledovaniya elektrizatsii kosmicheskikh apparatov* [Model and bench studies of the electrization of spacecraft]. Ed. V.Yu. Kirillov. Moscow, Moscow Aviation Institute publ., 2012. 168 p. (in Russian).

8. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. On joint climatic and electromagnetic testing of radioelectronic equipment. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki* [Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2014, vol. 34, no. 4, pp. 39–45 (In Russian).

9. Xijun Z. Study on effect experiment of ESD EMP to single chip microcontroller. *IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, Beijing, 2005, pp. 631–634.

10. Alekseev V.F., Silkov N.I., Piskun G.A., Pikulik A.N. *Metodika ispytaniya mikrokontrollerov na chuvstvitel'nost' k elektrostaticheskim razryadam* [Methodology for testing microcontrollers for sensitivity to electrostatic discharges]. *Elektronika, radiofizika, radiotekhnika, informatika* [Electronics, radiophysics, radio engineering, informatics], 2011, no. 5 (59), pp. 5–11 (In Russian).

11. Strogonov A., Gorlov M. *Vozdeystviye elektrostaticheskikh razryadov na integral'nyye skhemy* [Influence of electrostatic discharges on integrated circuits]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2008, no. 3, pp. 188–192 (In Russian).

12. Gorlov M.I. *Sticheskoye elektrichestvo i poluprovodnikovaya elektronika* [Static electricity and semiconductor electronics]. *Priroda* [Nature], 2006, no. 12, pp. 27–36 (In Russian).

13. Konstantinov U.A., Pozhidaev E.D., Tumkovskiy S.R. Investigation of electrostatic discharge effect on high-power MOSFET-transistors considering the influence of PCB. *International seminar on electron devices design and production (SED)*, Prague, Czech Republic, 2019.

14. State Standard 53734.3.1-2013. Electrostatics. Methods for modeling electrostatic phenomena. electrostatic discharge. human body model. Moscow, Standartov Publ., 2014. 11 p.

15. State Standard 53734.3.2-2013 (IEC 61340-3-2:2006). Electrostatics. Methods for modeling electrostatic phenomena. electrostatic discharge. Mechanical device model. Moscow, Standartov Publ., 2013. 11 p.

16. State Standard 53734.3.3-2016. Methods for modeling electrostatic phenomena. electrostatic discharge. Charged device model. Moscow, Standartov Publ., 2016. 23 p.

17. Industry Council on ESD Target Levels. White paper 2: A case for lowering component level CDM ESD specifications and requirements, industry council on ESD target levels. Revision 2.0, 2010. 173 p.

18. Stadler W., Brodbeck T., Gaertner R., Gossner H. Cable discharges into communication interfaces. *Proceedings of the EOS/ESD Symposium*, Tucson, AZ, USA, 2006, pp. 144–151.

19. Chatty K. Model-based guidelines to suppress cable discharge event (CDE) induced latch up in CMOSICs. *IEEE International Reliability Physics Symposium. Proceedings*, Phoenix, AZ, USA, 2004, pp. 130–134.

20. Brennan C.J., Chatty K., Sloan J., Dunn P., Muhammad M., Gauthier R. Design automation to suppress cable discharge event (CDE) induced latch up in 90-nm CMOSASICs. *Proc. EOS/ESD symp.*, Anaheim, CA, USA, 2005, pp. 126–130.

21. Caniggia S., Maradei F. Circuit and numerical modeling of electrostatic discharge generators. *Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium*, 2006, vol. 42, no. 6, pp. 1350–1357.

22. Takada T., Sekine T., Asai H. Circuit/electromagnetic hybrid simulation of electrostatic discharge in contact discharge mode. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Rome, Italy, 2012, pp. 1–6.

23. Yoshida T., Masui N. A study on system level ESD stress simulation using circuit simulator. *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Melbourne, VIC, Australia, 2013, pp. 1–4.

24. Zhou Y., Hajjar J.J. A circuit model of electrostatic discharge generators for ESD and EMC spice simulation. *IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits*, Chengdu, China, 2014, pp. 1–2.

25. Wang K., Pommerenke D., Chundru R., Doren T.V., Drewniak J.L., Shashindranath A. Numerical modeling of electrostatic discharge generators. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2003, vol. 45, no. 2, pp. 258–271.

26. Yousaf J., Park M., Lee H., Youn J., Lee D., Hwang C. Efficient circuit and an EM model of an electrostatic discharge generator. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, vol. 60, no. 4, pp. 1078–1086.

27. Lin H-N., Ko B-N., Lin J., Ho T-H. Establishment of ESD generator model for transient susceptibility analysis from chip to system level. *Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Sapporo, Japan, 2019, pp. 209–212.

28. Xiu Y., Thomson N., Mertens R., Rosenbaum E. S-parameter based modeling of system-level ESD test bed. *37th Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium (EOS/ESD)*, Reno, 2015, pp. 1–10.

29. State Standartd 51317.4.2-2010 (IEC 61000-4-2:2008) Compatibility of technical means is electromagnetic. Resistance to electrostatic discharges. Requirements and test methods. Moscow, Standartov Publ., 2010. 26 p.

30. Wang A.Z., Feng H.G., Gong K., Zhan R.Y., Stine J. On-chip ESD protection for integrated circuits: an overview for IC designers. *Microelectronics Journal*, 2001, no. 32, pp. 733–747.

31. Amerasekera A., Duvvury C. ESD in silicon integrated circuits 2nd Ed. *Physics and operation of ESD protection circuit elements*, 2002, pp. 68–104.

32. Kuznetsov V.V., Kechiev L.N., Abrameshin A.E. *Ekspериментal'noye issledovaniye formy toka ESR pri razryade s pechatnoy platoy* [Experimental study of the ESR current shape during a discharge with a printed circuit board]. *Tekhnologii EMS* [Technologies of electromagnetic compatibility], 2014, no. 1(48), pp. 46–52 (in Russian).

33. Kuznetsov V., Kechiev L. Charged board model ESD simulation for PCB mounted MOS transistors. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, vol. 57, no. 5, pp. 947–954.

34. Olney A., Gifford B., Guravage J., Richter A. Real-world charged board model (CBM) failures. *Proceedings of the EOS/ESD symposium*, Las Vegas, NV, USA, 2003, pp. 34–43.

35. Gizatullin R.M., Gizatullin Z.M. *Pomekhoustoychivost' i informatsionnaya bezopasnost' vychislitel'noy tekhniki pri elektromagnitnykh vozdeystviyakh po seti elektropitaniya* [Noise immunity and information security of computer technology under electromagnetic influences through the power supply network]. Kazan, Kazan State University Publ., 2014. 142 p (in Russian).

36. Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference. *Journal of communications technology and electronics*, 2016, no. 5, pp. 546–550.

37. Volkov S., Efishin A., Morozov S., Sokolov S. *Problema elektrosticheskogo razryada i sovremennyye metody zashchity integral'nykh skhem ot nego. Chast' 1* [The problem of electrostatic discharge and modern methods of protecting integrated circuits from it. Part 1]. *Rynok mikroelektroniki* [Market of microelectronics], 2007 (in Russian).

38. Neacsu O., Beniuga O., Ursache S., Paulet M. Modelling and analysis the current pulse associated with electrostatic discharges. *International conference and exposition on electrical and power engineering*, Iasi, Romania, 2012, pp. 585–590.

39. Cerri G., Leo R. ESD indirect coupling modeling. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1996, no. 3 (38), pp. 274–281.

40. Berghe S.V., Zutter D. Study of ESD signal entry through coaxial cable shields. *Journal of electrostatics*, 1998, pp. 135–148.

41. Asimakopoulou F., Fotis G.P., Gonos I.F., Stathopoulos I.A. Parameter determination of Heidler's equation for the ESD current. *Proceedings of the 15th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2007)*, Slovenia, 2007, pp. 208.

42. Murota N. Determination of characteristics of the discharge current by the human charge model ESD simulator. *Electronics and Communications in Japan Part I-communications*, 1997, no. 80 (4), pp. 49–57.

43. Ramachandran C., Pommerenke D., Wang K., Doren T.V., Centola F.P., Junag J.S. Characterization of human metal ESD reference event and correlation of generator parameters to failure levels. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, no. 46 (4), pp. 498–504.

44. Fujiwara O. Equivalent circuit modeling of discharge current injected in contact with an ESD-gun. *Electrical Engineering in Japan*, 2004, pp. 8–14.
45. Heidler H. Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP Berechnung. *18th International conf. on lightning protection (ICLP – 1985)*, Munich, Germany, 1985, pp. 63–66.
46. Songlin S., Zengjun B., Minghong T. A new analytical expression of current waveform in standard IEC61000-4-2. *High power laser and particle beams*, 2003, vol. 15, no. 5, P. 464–466.
47. Keenan R.K., Rosi L.A. Some fundamental aspects of ESD testing. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Cherry Hill, 1991, pp. 236–241.
48. Yuan Z., Li T., He J., Chen S., Zeng R. New mathematical descriptions of ESD current waveform based on the polynomial of pulse function. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2006, vol. 48, no. 3. pp. 589–591.
49. Katsivelis P., Gonos I., Stathopoulos I. Estimation of parameters for the electrostatic discharge current equation with real human discharge events reference using genetic algorithms. *Measurement science and technolog*, 2010, vol. 21, no. 10, pp. 105703.
50. Wang K., Wang J., Wang X. Four order electrostatic discharge circuit model and its simulation. *Indonesian journal of electrical engineering and computer science*, 2012, vol. 10, no. 8, pp. 2006–2012.
51. Demakov A.V., Komnatnov M.E., Ivanov A.A., Nikolaev I.I., Gazizov T.R. *Koaksial'naya kamera dlya izmereniya effektivnosti elektromagnitnogo ekranirovaniya radiopogloshchayushchikh materialov* [Coaxial camera for measuring the efficiency of electromagnetic shielding of radio-absorbing materials]. Patent Russia no. 2020131978, 2021.
52. Huang Y., Wu T. Numerical and experimental investigation of noise coupling perturbed by ESD currents on printed circuit boards. *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Boston, 2003, pp. 43–47.
53. Kirillov V.Yu., Tomilin M.M. *Issledovaniye effektivnosti ekranirovaniya gibkikh materialov pri vozdeystvii impul'snykh izluchayemykh pomekh, sozdavayemykh elektrosticheskimi razryadami* [Investigation of the shielding efficiency of flexible materials under the influence of pulsed radiated interference created by electrostatic discharges]. *Tekhnologii EMS* [Technologies of electromagnetic compatibility], 2010, no. 2(33), pp. 65–66 (in Russian).
54. Soohoo K., Rybak A., Wielgos M. Erratic nature of product ESD immunity testing investigated using a dual TEM cell. *17th International Zurich symposium on electromagnetic compatibility*, Zurich, 2006, pp. 453–456.
55. Drozdova A.A., Komnatnov M.E. Evaluating the level of electromagnetic interference generated by the ESD source in the TEM-cell. *2022 International Siberian conference on control and communications (SIBCON)*, Tomsk, 2022, pp. 1–8.

56. Vorshevsky A.A., Grishakov S.E. *Obespecheniye elektromagnitnoy sovmestimosti morskoy tekhniki pri vozniknovenii elektrosticheskikh razryadov* [Ensuring the electromagnetic compatibility of marine equipment in the event of electrostatic discharges]. *Vestnik astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. seriya: morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. series: marine engineering and technology], 2020, no. 1, pp. 106–114 (in Russian).

Статья поступила 26 июня 2023 г.

Информация об авторах

Дроздова Анастасия Александровна – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости, аспирант кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, измерения и испытания на воздействие электростатического разряда. E-mail: anastasiya.drozdova.00@list.ru

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

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

Models and Methods of Electrostatic Discharge Exposure Used in Simulating, Designing and Testing of Radio Electronic Equipment

A. A. Drozdova, M. E. Komnatnov

Purpose. As the degree of integration of electronic components increases, the susceptibility of modern radio-electronic equipment (REE) to the effects of electromagnetic interference (EMI) increases. Electrostatic discharge (ESD) is one of the sources of EMI, which has a negative impact on the operation of REE. High sensitivity of electronic components to the impact of ESD leads to reversible and irreversible failures, which should be taken into account at the design stage of critical REE. Consideration of different pulses of impact of ESD with individual current waveform will allow to estimate the degree of susceptibility of designed REE. The aim of the work is to systematize existing analytical and circuit models and methods of ESD influence on REE. **Methods.** Mathematical and schematic specification of ESD current waveforms was used to analyze the models. **Novelty.** For the first time we systematized analytical and circuit models determining the ESD current waveform by the degree of susceptibility of REE. **Results.** The current waveform impact of ESD on REE by models of human body, mechanical, as well as charged devices, printed circuit board and cable are presented. An ESD simulator by different human body models is described and their current waveforms are calculated. The calculated current waveforms are compared with the waveforms presented in the standard as well as with measured waveforms. Non-traditional methods of studying the effect of ESD on

the test object are presented. **Practical relevance.** The presented models and methods of ESD influence will allow to analyze the susceptibility of various REE to the influence of ESD at the design stage.

Key words: *electromagnetic compatibility, radio-electronic equipment, electrostatic discharge, current waveform, susceptibility, analytical model, circuit model.*

Information about Authors

Anastasia Alexandrovna Drozdova – Junior Researcher of the Research Laboratory of Fundamental Research on Electromagnetic Compatibility, Postgraduate Student of the Department of Television and Control. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Area of expertise: electromagnetic compatibility, measurements and tests on the effects of electrostatic discharge. E-mail: anastasiya.drozdova.00@list.ru

Maksim Evgen'evich Komnatnov – Ph.D. of engineering sciences, senior research fellow of the Research Laboratory of Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities. Associate Professor at the Department of Television and Control. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; electromagnetic shielding; facilities for EMC testing. E-mail: maxmek@mail.ru

Address: Russia, 634045, Tomsk, Lenina prospect, 40.