

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

А. А. Дроздова, М. Е. Комнатнов, Р. С. Суровцев

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ:
ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ
УСТРОЙСТВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

Учебное пособие

Томск
Издательство ТУСУРа
2026

УДК
ББК

Д

Рецензенты:

Гизатуллин З.М., д-р техн. наук,
Дмитренко А.Г., д-р физ.-мат. наук

Дроздова, Анастасия Александровна

Д

Электромагнитная совместимость: оценка устойчивости радио-
электронных устройств к воздействию электростатического разряда:
учеб. пособие / А. А. Дроздова, М. Е. Комнатнов, Р. С. Суровцев. –
Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники,
2026. – 142 с.

ISBN 978-5-

Учебное пособие составлено с учетом требований федерального государ-
ственного образовательного стандарта высшего образования. Рассмотрены ме-
ханизмы возникновения электростатического разряда (ЭСР), его модели и ха-
рактерные формы импульса тока, а также влияние ЭСР на радиоэлектронные
компоненты и устройства. Описаны и проанализированы методики испытаний
на восприимчивость к ЭСР, испытательное оборудование и применяемые стан-
дарты, а также схмотехнические и электродинамические модели имитаторов
разряда. Представлены методы оценки восприимчивости компонентов при кон-
тактном и воздушном воздействии ЭСР, способам ослабления полосковыми
устройствами, а также методика локализации импульсных помех в цепях элек-
тропитания.

Для студентов технических направлений подготовки и специальностей
высших учебных заведений.

УДК
ББК

ISBN 978-5-

© Дроздова А. А., Комнатнов М.Е.,
Суровцев Р. С., 2026
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2026

Оглавление

Введение.....	6
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА И ЕГО ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА	
1.1 Механизмы возникновения электростатического разряда	8
1.2 Модели электростатического разряда	12
1.2.1 Модель человеческого тела.....	12
1.2.2 Механическая модель	13
1.2.3 Модель заряженного устройства	14
1.2.4 Модель заряженной печатной платы	14
1.2.5 Модель заряженного кабеля.....	15
1.2.6 Описание форм импульса тока	17
1.2.7 Альтернативные модели формы тока.....	18
1.3 Влияние электростатического разряда на радиоэлектронные компоненты и устройства.....	23
1.3.1 Типичные повреждения компонентов.....	23
1.3.2 Влияние электростатического разряда на компоненты.....	24
1.3.3 Отказы устройств электропитания после воздействия электростатического разряда.....	25
1.4 Устройства защиты от электростатического разряда.....	26
1.4.1 Общие рекомендации по организации защиты от электростатического разряда на уровне печатных плат	26
1.4.2 Электронные компоненты для защиты от электростатического разряда	29
Вопросы к разделу 1	34
2 ИСПЫТАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ НА ВОСПРИИМЧИВОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА	
2.1 Методики проведения испытаний.....	36
2.1.1 Стандартизированная методика испытаний	36
2.1.2 Установка для измерения формы тока	38
2.1.3 Установка для исследования печатных плат	38
2.1.4 Установка для исследования эффективности экранирования материалов	39

2.1.5 Установка для исследования воздействия электростатического разряда на кабель.....	40
2.1.6 Измерения помехоэмиссии и помехоустойчивости радиоэлектронных устройств с помощью ТЕМ-камеры.....	41
2.2 Имитаторы электростатического разряда.....	43
2.2.1 Схемотехнические модели имитатора.....	43
2.2.2 Электродинамическая модель имитатора	48
2.3 Стандарты, применяемые при испытаниях на восприимчивость к воздействию электростатического разряда	51
2.3.1 Стандарты на методы испытаний и моделирования	51
2.3.2 Требования к устойчивости воздействия электростатического разряда, регламентируемые стандартами	53
2.3.3 Стандарты для космической техники	53
2.3.4 Стандарты на организацию системы защиты от электростатического разряда.....	54
Вопросы к разделу 2	56
3 ОЦЕНКА ВОСПРИИМЧИВОСТИ КОМПОНЕНТОВ К ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМУ РАЗРЯДУ	
3.1 Оценка восприимчивости к контактному воздействию электростатического разряда	57
3.1.1 Общая методика: от кристалла к печатной плате.....	57
3.1.2 Модели межсоединений.....	59
3.1.3 Схемотехническая модель воздействия электростатического разряда на компонент	71
3.1.4 Прогнозирование устойчивости транзистора к воздействию электростатического разряда	74
3.2 Оценка восприимчивости к воздушному воздействию электростатического разряда	80
3.2.1 Модели для оценки уровня тока и напряжения, наведенных на электронный компонент	80
3.2.2 Верификация и валидация моделей	85
3.3 Оценка ослабления электростатического разряда в полосковых устройствах.....	94
3.3.1 Модальное разложение импульсных воздействий на составляющие	94

3.3.2 Возможность ослабления электростатического разряда в витке меандровой линии	97
Вопросы к разделу 3	111
4 МЕТОДИКА ЛОКАЛИЗАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ	
4.1 Силовая шина электропитания.....	113
4.2 Методика анализа и локализации экстремумов воздействия электростатического разряда	115
4.3 Влияние геометрии и длины силовой шины на амплитуду электростатического разряда.....	117
4.4 Влияние проводных отводов на амплитуду электростатического разряда.....	122
4.5 Локализация максимума напряжения электростатического разряда.....	129
Вопросы и задачи к разделу 4	131
Список сокращений.....	133
Литература	135

Введение

Представьте ситуацию: вы идете по сухому ковру в синтетической одежде и, дотронувшись до металлической дверной ручки, чувствуете легкий щелчок. Для вас это мимолетный дискомфорт, а для микроскопического транзистора внутри вашего смартфона или ноутбука такой щелчок может быть эквивалентен попаданию молнии. Это и есть **электростатический разряд (ЭСР)** – невидимая, но одна из самых распространенных и разрушительных угроз для современной электроники.

ЭСР представляет собой быстрое перераспределение электрического заряда между двумя объектами, имеющими разность потенциалов. Энергия единичного разряда может показаться незначительной (микроджоули), однако она выделяется за очень короткое время (наносекунды), создавая высокие амплитуды импульса тока и электромагнитного поля. Такое воздействие способно вызвать **немедленный и необратимый отказ** компонента (пробой изоляции, выгорание проводников), стать причиной трудно диагностируемых **«мягких» ошибок** (сбои в работе, перезагрузки, искажение данных) или привести к **постепенной деградации** компонента, сокращающей срок его службы.

Статистика неутешительна: более 60% отказов космических аппаратов (КА) связывают с воздействием ЭСР. В наземной технике доля отказов, вызванных статикой, также крайне высока. Особую опасность ЭСР представляет для **систем электропитания (СЭП)**. Отказ системы электропитания – это не просто выход из строя отдельного компонента: возможна полная потеря работоспособности всего устройства, будь то космический аппарат на орбите или критически важный промышленный контроллер. Поэтому защита цепей электропитания от ЭСР является одной из ключевых задач при проектировании надежной бортовой аппаратуры.

Целью данного учебного пособия является предоставление студентам технических специальностей систематизированных знаний и практических навыков в области защиты радиоэлек-

тронных устройств (РЭУ) от ЭСР, в частности цепей электропитания.

Целевая аудитория: студенты бакалавриата и магистратуры технических специальностей, изучающие дисциплины, связанные с электромагнитной совместимостью (ЭМС) и надежностью РЭУ.

Структура пособия: учебное пособие состоит из четырех разделов. В первом разделе рассматриваются теоретические основы ЭСР и механизмы его воздействия на РЭУ. Второй раздел посвящен методикам испытаний РЭУ на восприимчивость к воздействию ЭСР, испытательному оборудованию и применяемым стандартам. В третьем разделе изложены методики оценки восприимчивости компонентов к ЭСР при контактном и воздушном воздействии, а также способы ослабления разряда в полосковых устройствах. Четвертый раздел посвящен методике локализации импульсных помех в цепях электропитания. В конце каждого раздела приводятся контрольные вопросы.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА И ЕГО ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

1.1 Механизмы возникновения электростатического разряда

Электростатический разряд – это мгновенный удар током, который часто ощущаем при дотрагивании до металлической дверной ручки после ходьбы по ковру. Такое явление знакомо каждому, его физическая природа лежит в основе одной из самых серьезных угроз для современной электроники, а для его понимания необходимо разобрать процесс возникновения ЭСР по этапам, чтобы защитить РЭУ.

Возникновение ЭСР можно представить как трехэтапный процесс: генерация, накопление и сброс заряда.

Генерация – как появляется заряд?

Вся материя состоит из атомов, которые содержат положительно заряженные протоны и отрицательно заряженные электроны. В обычном состоянии их количества недостаточно для протекания тока через изолятор и объект электрически нейтрален. Заряд появляется на поверхности изолятора в результате трения двух поверхностей. Это явление называется трибоэлектризацией, при котором два материала входят в тесный контакт и затем быстро разделяются (например, подошва обуви и ковер), между ними происходит «борьба» за электроны. Материал, который сильнее удерживает электроны, «отбирает» часть электронов у другого материала. Материал, забравший электроны, становится отрицательно заряженным, а потерявший электроны – положительно заряженным. *Пример:* когда вы идете по ковру, ваше тело отбирает электроны у ковра и заряжается отрицательно.

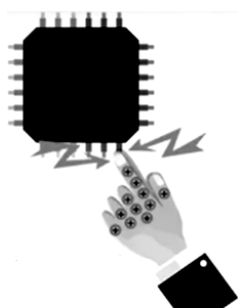
Накопление – как хранится заряд?

В случае если заряженный объект является изолятором (резина, пластик, сухой воздух), то заряд через него не может свободно

протекать. Он остается на поверхности, а чем больше поверхность, тем больший заряд может на его поверхности накапливаться. В случае если заряженный объект – проводник (человеческое тело, металлический инструмент), то заряд также остается на нем при условии, что объект изолирован от земли. *Пример:* человек в обуви на резиновой подошве является изолированным проводником, способным накапливать заряд в несколько тысяч вольт.

Сброс – как протекает разряд?

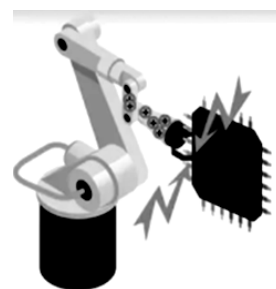
Накопившийся заряд создает вокруг себя электростатическое поле. Когда заряженный объект (например, ваша рука) приближается к другому объекту с иным потенциалом, особенно к заземленному проводнику (например, металлической дверной ручке), между ними возникает большая разность потенциалов (напряжение). Напряженность электрического поля в зазоре между ними резко возрастает, достигая критического значения (около 30 кВ/см) при электрическом пробое воздуха. Воздух, который является диэлектриком, на мгновение ионизируется и становится проводящей плазмой. Формируется узкий ионный канал, по которому с огромной скоростью устремляются заряды, стремясь выровнять разность потенциалов. Плазма наблюдается в виде искры и человек чувствует внезапный толчок. Длится этот процесс очень быстро (наносекунды), но ток в импульсе может достигать десятков ампер.



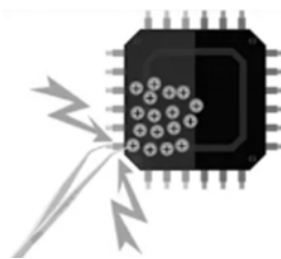
Выделяют три основных источника ЭСР в электронике.

Разряд от человека: человек дотрагивается до микросхемы. Заряд с тела через палец мгновенно проходит в чувствительную электронику, вызывая ее повреждение.

Разряд с устройства: микросхема или печатная плата (ПП) зарядилась при перемещении по конвейеру вследствие трения об его элементы. Когда ее вывод касается заземленного металлического стола, она на него разряжается, что может привести к мгновенному выходу из строя этого устройства.



Разряд через инструмент: заряженный металлический инструмент (например, отвертка) приближается к компоненту, вызывая искру и дальнейшее его повреждение.



Возникновение электростатического разряда в открытом пространстве на поверхности космического аппарата

Электростатический разряд между поверхностями космического аппарата – это внезапный и неконтролируемый электрический разряд, который возникает из-за накопления статического электричества на поверхности или внутри аппарата. Это опасное явление, которое может повредить электронику, нарушить работу систем и даже привести к полному выходу аппарата из строя. Накопление заряда происходит постепенно под воздействием нескольких факторов космической среды. В основу механизмов электризации космического аппарата входят:

1) *облучение заряженными частицами.* Космическая среда содержит множество заряженных частиц (электронов, протонов, ионов), которые постоянно бомбардируют КА. Эти частицы могут накапливаться на различных поверхностях аппарата, создавая избыточный заряд. Более энергичные частицы, например, в радиационных поясах Земли, особенно эффективны в этом процессе;

2) *трибоэлектрический эффект.* Трение элементов космического аппарата из различных материалов (например, солнечные батареи и корпус) может генерировать статический заряд. Это явление особенно актуально во время введения в рабочий режим аппарата в космосе;

3) *фотоэлектрический эффект.* Ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца может выбивать электроны из поверхности космического аппарата, оставляя поверхность положительно заряженной;

4) *взаимодействие с плазмой.* КА взаимодействует с плазмой в околоземном пространстве, что также может приводить к накоплению заряда на его поверхности.

В результате этих процессов, когда напряжение между двумя точками на различных поверхностях аппарата достигает критического значения, происходит внезапный разряд.

Большую часть поверхности современных космических аппаратов занимают диэлектрические материалы, такие как защитные стекла солнечных батарей, различные эмали и другие диэлектрические элементы космического аппарата, подверженные электризации путем накопления электронов в своем объеме. В результате этого они приобретают значительный (от 1 до 10 киловольт) отрицательный потенциал. Проводящие элементы при солнечном облучении приобретают нулевой или незначительный положительный потенциал. В итоге образуется разность потенциалов и возникает ЭСР, который создает комплекс поражающих факторов электризации: растекание импульсных токов по конструкции космического аппарата, импульсные электромагнитные помехи и световые импульсы от ЭСР. При протекании тока ЭСР по конструкции космического аппарата в бортовой кабельной сети возникают импульсные ЭДС величиной от единиц до десятков вольт. В результате наводятся импульсы высокой амплитуды, которые поступают на входы РЭУ космического аппарата, что приводит к обратимым и необратимым отказам в их работе.

Таким образом, ЭСР – это объяснимый физический процесс переноса заряда. Его опасность для техники заключается в колоссальной скорости и мощности этого переноса. Крайне короткий импульс тока с высокой амплитудой создает мощное электромагнитное поле и вызывает тепловой пробой внутри полупроводниковых компонентов, что приводит к их необратимому повреждению.

Вывод для будущего инженера: понимание процессов возникновения, накопления и передачи ЭСР – это первый шаг к защите от него, так как опасен не сам заряд, а скорость его перераспределения между поверхностями. Основные источники ЭСР при производстве и эксплуатации РЭУ – это персонал, незаземленное оборудование и различные заряженные устройства. Многообразие различных источников возникновения ЭСР (человек, инструмент, оборудование) приводит к

значительному разбросу параметров разрядного тока (формы, амплитуды, длительности).

1.2 Модели электростатического разряда

1.2.1 Модель человеческого тела

Модель человеческого тела является наиболее распространенной и исторически одной из первых стандартизированных моделей. Именно ее воспроизводят, дотрагиваясь до металлической дверной ручки после прогулки по синтетическому ковру [1]. Схема, которая имитирует ЭСР, довольно проста (рисунок 1.1) [2]. Она содержит источник высоковольтного напряжения ($E1$), зарядный ($K1$) и разрядный ($K2$) ключи, резисторы $R_3 = 50\text{--}100\text{ МОм}$ и $R_p = 330\text{ Ом} \pm 10\%$, конденсатор $C = 150\text{ пФ} \pm 10\%$ и испытуемый объект (ИО). При этом конденсатор, накапливающий заряд, имитирует емкость вашего тела, а резистор R_p – это сопротивление вашей кожи в точке контакта. Когда вы касаетесь ручки, происходит быстрый разряд, ток которого имеет характерную двугорбую форму (см. рисунок 1.1). Первый пик – это разряд с кончика пальца, а второй – разряд всего тела.

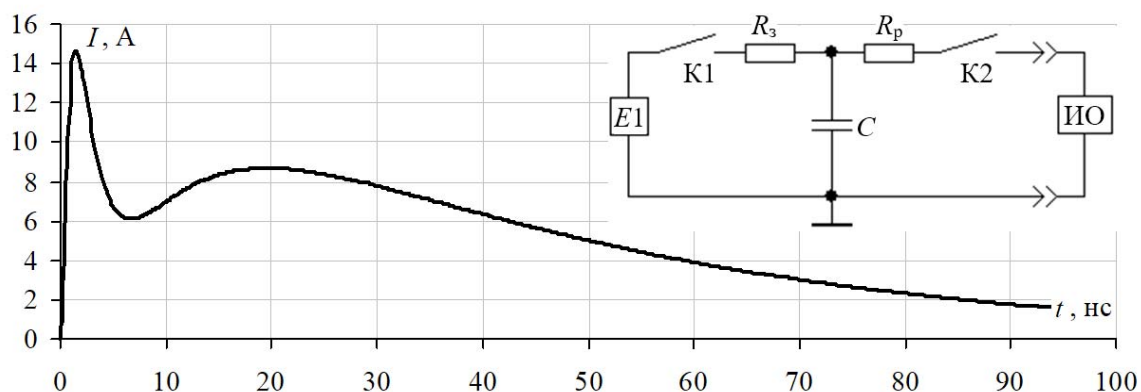


Рисунок 1.1 – Эквивалентная схема и форма тока ЭСР по модели человеческого тела

Опасность для РЭУ заключается в том, что очень крутой фронт (малое время нарастания) первого импульса (менее 1 нс) способен проходить через многие виды защиты и приводить к не-

исправности схемы. При этом энергия может достигать 11 мкДж в зависимости от напряжения $E1$.

1.2.2 Механическая модель

Механическая модель (ММ) имитирует разряд с небольшого изолированного металлического объекта, например инструмента или незаземленной металлической детали РЭУ [3]. Ключевое отличие от модели человеческого тела – минимальное последовательное сопротивление, так как металлический объект является хорошим проводником. Однако при быстром разряде сильно проявляется паразитная индуктивность проводников. Эквивалентная схема (рисунок 1.2) содержит конденсатор, сопротивление и индуктивность $L = 500$ нГн.

Опасность для РЭУ заключается в том, что форма тока (см. рисунок 1.2) представляет собой затухающую синусоиду с временем нарастания 10–10,2 нс и энергией 300 нДж при $E2 = 200$ В. Из-за низкого сопротивления и наличия индуктивности разряд носит ярко выраженный колебательный характер. Энергия, запасенная в колебательном контуре, приводит к многократному протеканию тока через компонент, что увеличивает вероятность теплового повреждения, даже если амплитуда каждого отдельного полупериода невелика.

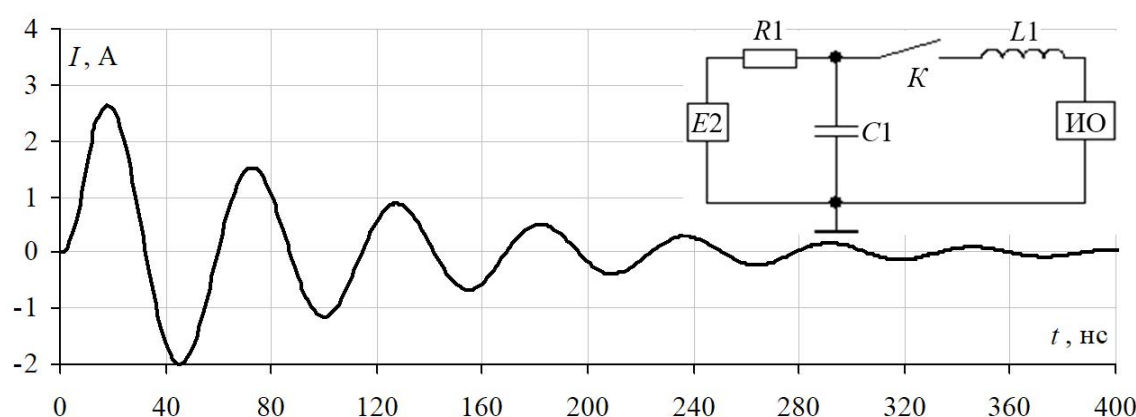


Рисунок 1.2 – Эквивалентная схема и форма тока ЭСР по механической модели

1.2.3 Модель заряженного устройства

Использование автоматизированных средств при сборке РЭУ привело к появлению другого потенциально опасного механизма возникновения ЭСР – модели заряженного устройства (МЗУ) [4]. Основой для разработки данной модели (рисунок 1.3) послужил продолжительный заряд электронного компонента при его передвижении и трении об изоляционные материалы сборочной или конвейерной линии. В результате трения на поверхности корпуса электронного компонента накапливается заряд, а во время захвата механизмом установки или его касания заземленного проводника происходит разряд с протеканием токов ЭСР высокой амплитуды, которые могут быть более опасными, поскольку протекают без задержки.

Особенностью модели заряженного устройства является очень быстрый (в течение 1–2 нс) разряд (см. рисунок 1.3) с временем нарастания 0,1 нс и энергией 4 нДж при $E3 = 200$ В. Протекающий ток настолько быстрый, что многие системы защиты не успевают на него отреагировать. Поэтому моделирование и испытание при данном виде воздействия затруднены, а также сложно определить момент наступления разряда электронного компонента.

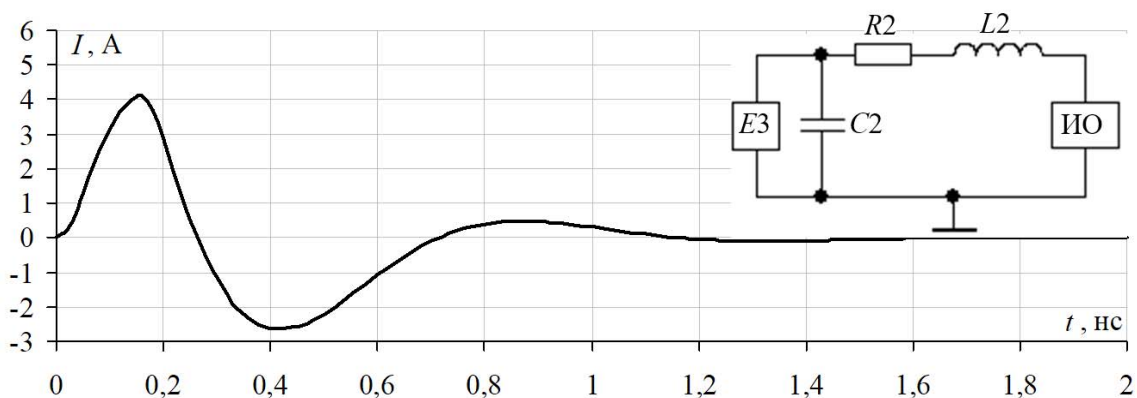


Рисунок 1.3 – Эквивалентная схема и форма тока ЭСР по модели заряженного устройства

1.2.4 Модель заряженной печатной платы

Модель заряженной печатной платы (МЗПП) – это усовершенствованная версия модели заряженного устройства [5]. Заря-

жается не только корпус электронного компонента, но и вся печатная плата, на которой он установлен. Поэтому компоненты, устойчивые к ЭСР по модели заряженного устройства, могут быть более чувствительны к ЭСР по модели заряженной печатной платы [6], так как импульс получается более длительным (рисунок 1.4,б). Воздействие происходит в течение 40–50 нс, время нарастания составляет 2–3 нс, а энергия – около 160 нДж при напряжении 200 В на обкладках конденсатора $C3$ емкостью 235 пФ [7].

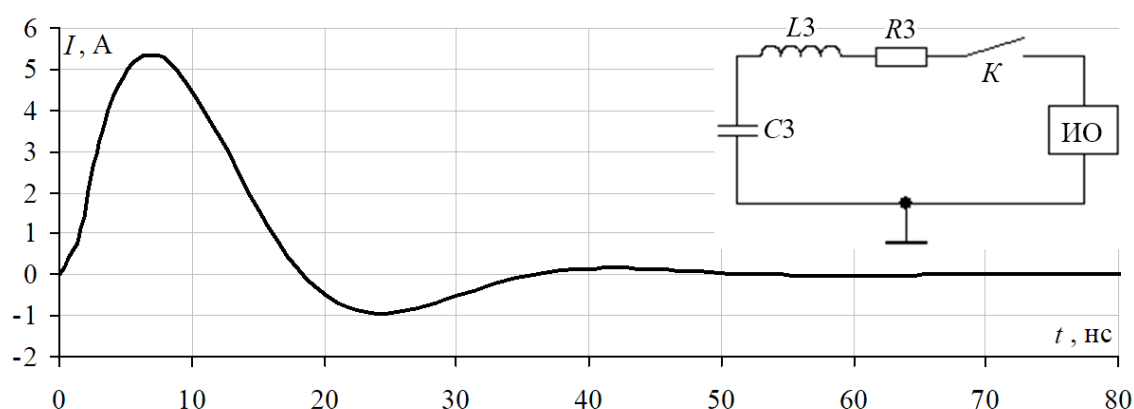


Рисунок 1.4 – Эквивалентная схема и форма тока ЭСР по модели заряженной печатной платы

1.2.5 Модель заряженного кабеля

Другой, не менее опасной угрозой для РЭУ является возникновение ЭСР в «заряженном» кабеле [8–10]. Длинный кабель, пролежавший на полу, может вызвать высокой амплитуды ЭСР в момент его подключения к разъему РЭУ. В одной из научных работ [11] представлены результаты исследования кабеля длиной 10 м с емкостью около 100 пФ, который генерирует ЭСР с амплитудой до 1 кВ.

Импульс по модели заряженного кабеля (МЗК) уникален – он похож на прямоугольный с очень крутыми фронтами и большой длительностью (до 40 нс). На форму и амплитуду импульса ЭСР влияют различные факторы, такие как геометрические и электрофизические параметры кабеля, а также электрическая нагрузка. На рисунке 1.5 представлена эквивалентная схема ЭСР по модели заряженного кабеля, а также форма тока ЭСР в виде прямоуголь-

ного импульса с временем нарастания и спада около 1 нс, длительностью 38–40 нс и энергией 490 нДж при $E_4 = 200$ В.

Чувствительность компонентов к данным видам ЭСР существенно различается, поскольку формы токов и напряжений ЭСР разные [12, 13]. Классификация устойчивости РЭУ к ЭСР по моделям человеческого тела (МЧТ), заряженного устройства и механической модели приведена в таблице 1.1.

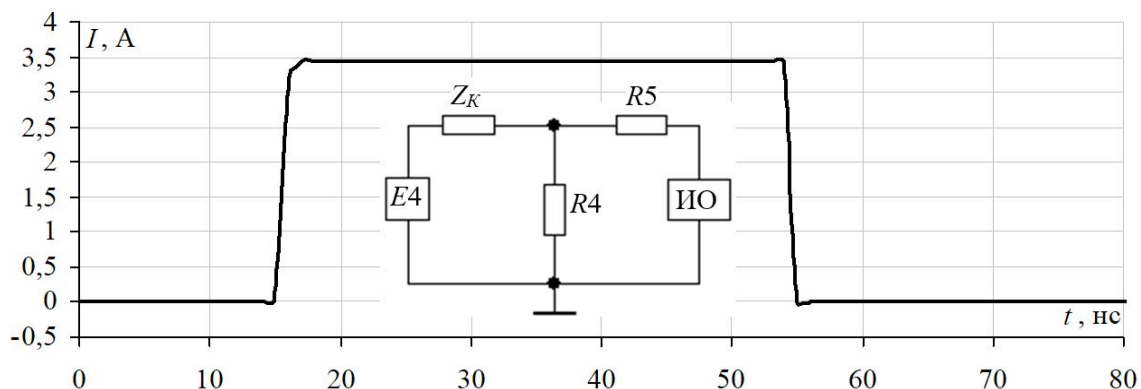


Рисунок 1.5 – Эквивалентная схема и форма тока ЭСР по модели заряженного кабеля

Таблица 1.1 – Классы устойчивости компонентов к различным моделям ЭСР

МЧТ		МЗУ		ММ	
Класс	U , кВ	Класс	U , кВ	Класс	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		

Вывод для будущего инженера: при проектировании надежных РЭУ нельзя ограничиваться испытаниями только на один вид разряда. ЭСР может воздействовать на устройство с разных сторон. Надежная защита – это комплекс мер, обеспечивающих устойчивость ко всем описанным моделям ЭСР. Проведение испытаний с помощью физических имитаторов является основным, но не всегда достаточным методом

анализа воздействия ЭСР на РЭУ. Для прогнозирования отказов и углубленного изучения физики процессов необходимы точные аналитические модели, описывающие форму разрядного тока во временной области.

1.2.6 Описание форм импульса тока

Эволюция моделей проходила от более простых к сложным, многоэкспоненциальным функциям, обеспечивающим высокую точность соответствия стандартизированным формам.

Первоначальная модель основана на аппроксимации импульса тока молнии и описывает форму импульса с помощью пикового значения тока I_0 , времени нарастания (t_1) и спада (t_2) (рисунок 1.6,а):

$$I(t) = I_0 \left(e^{-t/t_1} - e^{-t/t_2} \right). \quad (1.1)$$

Приближенная к реальной форма представлена на рисунке 1.6,б [14], в выражении которой используется двойная экспоненциальная функция для амплитуд разрядного тока I_1 и I_2 с постоянными времени t_1 и t_2 . Она описывается как

$$I(t) = I_1 e^{-t/t_1} - I_2 e^{-t/t_2}. \quad (1.2)$$

Усовершенствованная модель, форма тока которой приближена к форме из ГОСТ Р 51317.4.2-2010 [2] (рисунок 1.6,в), представлена в [15] и представлена в виде

$$I(t) = A e^{-\left(\frac{t-t_1}{\sigma_1}\right)^2} + B t e^{-\left(\frac{t-t_2}{\sigma_2}\right)^2}, \quad (1.3)$$

где A – амплитуда первого пика; B – амплитудный коэффициент второго пика; σ_1 и σ_2 – длительность гауссова импульса.

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.

Наиболее точное описание формы тока ЭСР (рисунок 1.6,г) дается уравнением Хайдлера [16], принятым в международном стандарте ГОСТ Р 51317.4.2-2010 [2]:

$$I(t) = \frac{I_1 e^{-t/\tau_2} \left(\frac{t}{\tau_1} \right)^n}{k_1 \left(1 + \left(\frac{t}{\tau_1} \right)^n \right)} + \frac{I_2 e^{-t/\tau_4} \left(\frac{t}{\tau_3} \right)^n}{k_2 \left(1 + \left(\frac{t}{\tau_3} \right)^n \right)}, \quad (1.4)$$

где

$$k_1 = e^{\frac{-\tau_1}{\tau_2} \left(\frac{n\tau_2}{\tau_1} \right)^{\frac{1}{n}}}; \quad k_2 = e^{\frac{-\tau_3}{\tau_4} \left(\frac{n\tau_4}{\tau_3} \right)^{\frac{1}{n}}};$$

I_1 и I_2 – амплитуды первого и второго максимумов тока соответственно; n – показатель степени, определяющий изгибы в форме тока. Временные характеристики составляют: $\tau_1 = 1,1$ нс, $\tau_2 = 2$ нс, $\tau_3 = 12$ нс, $\tau_4 = 37$ нс, $n = 1,8$.

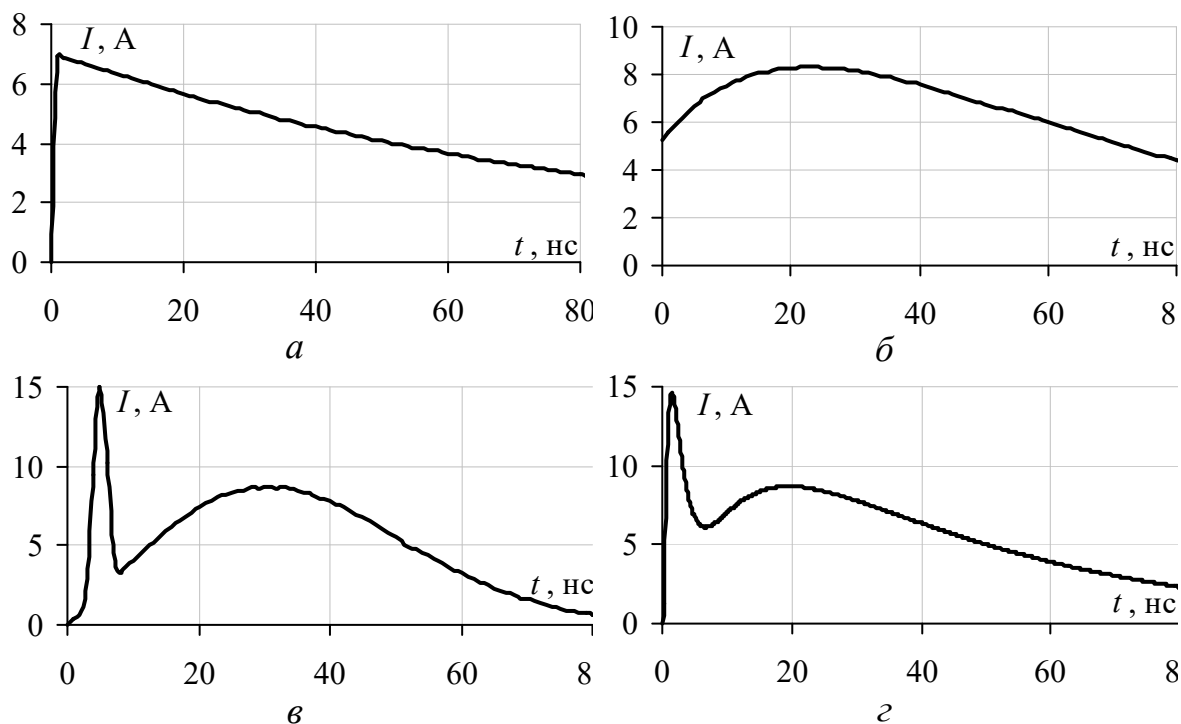


Рисунок 1.6 – Формы тока ЭСР: а – по формуле (1.1);
б – по формуле (1.2); в – по формуле (1.3); г – по формуле (1.4)

1.2.7 Альтернативные модели формы тока

Несмотря на точность модели Хайдлера, исследователи продолжают разрабатывать альтернативные модели, обладающие определенными преимуществами: более простым видом, лучшей сходимостью с экспериментальными данными.

Биномиальная функция формы тока ЭСР (рисунок 1.7,а), интегрируемая по времени [17], описывается как

$$I(t) = I_1 \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_1}} \right)^n e^{\frac{-t}{\tau_2}} + I_2 \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_3}} \right)^n e^{\frac{-t}{\tau_4}}. \quad (1.5)$$

Четырехэкспоненциальная модель из [18] необходима для подгонки к параметрам формы ЭСР и представлена в виде

$$I(t) = I_1 \left(e^{\frac{-t}{\tau_1}} - e^{\frac{-t}{\tau_2}} \right) + I_2 \left(e^{\frac{-t}{\tau_3}} - e^{\frac{-t}{\tau_4}} \right). \quad (1.6)$$

В данной модели первая группа из двух экспонент соответствует первому пику, а вторая – второму. Форма тока ЭСР (рисунок 1.7,б) представляет собой сумму обеих экспоненциальных групп. При этом форму тока можно масштабировать для любого уровня разрядного напряжения.

В представленных аналитических моделях производная при $t = 0$ не является непрерывной, что нефизично для модели человеческого тела. В [19] предложена новая аналитическая модель, основанная на полиноме импульсной функции:

$$I(t) = I_0 k_1^p e^{\frac{-t}{\tau_2}} + I_1 k_2^q e^{\frac{-t}{\tau_4}} + I_2 k_3^r e^{\frac{-t}{\tau_6}}, \quad (1.7)$$

где

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

Данная модель удовлетворяет требованиям непрерывности тока и его первой производной, а форма тока (рисунок 1.7,в) соответствует форме из [2]. При $p = 5$ и $r = 3$ формируются максимальные значения первого и второго пиков соответственно, а при $q = 5$ определяется изгиб между первым и вторым пиком.

Данная форма тока ЭСР может отличаться от представленной в [2].

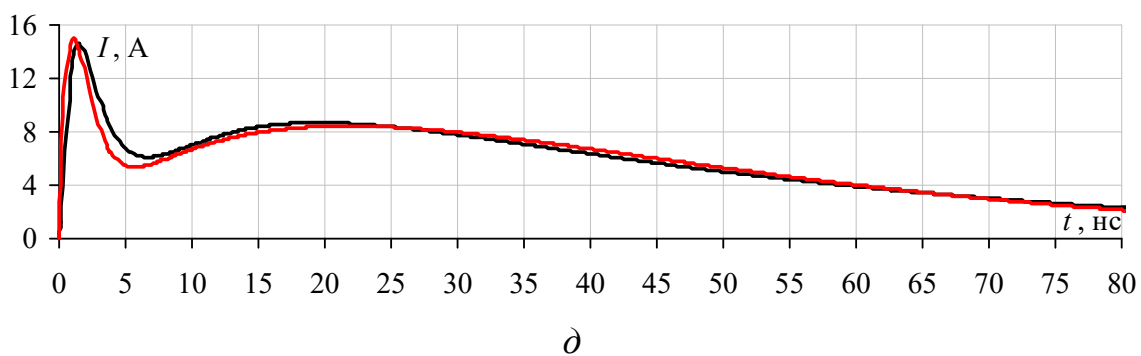
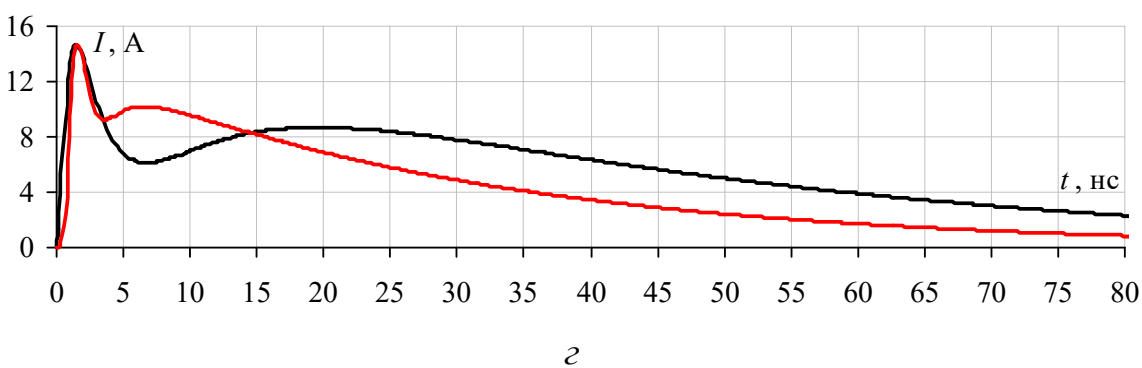
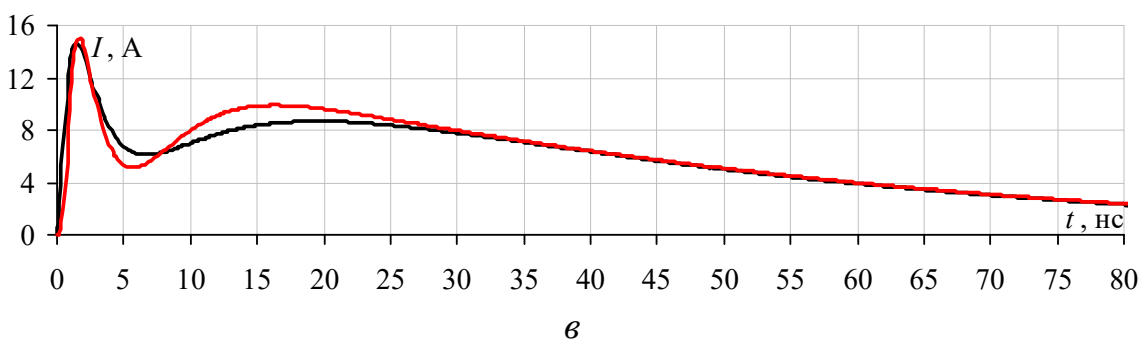
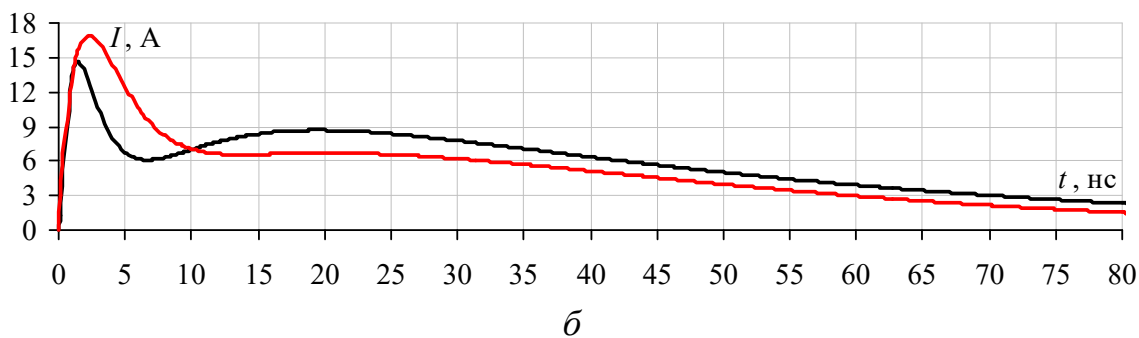
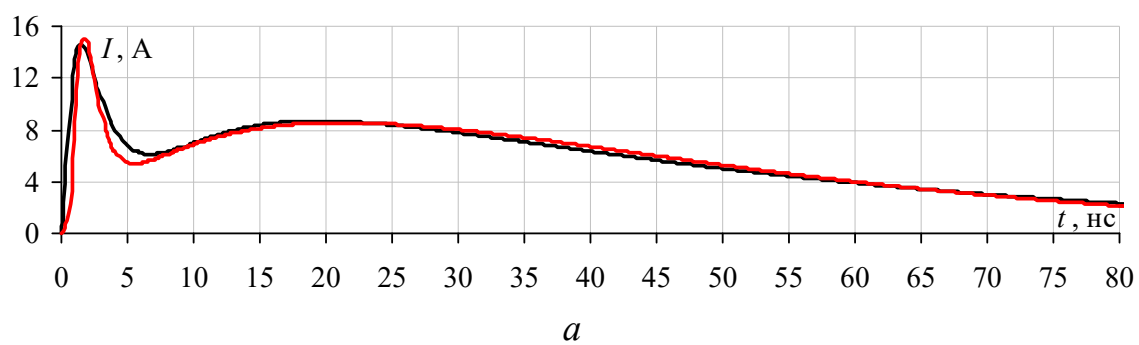


Рисунок 1.7 – Сравнение форм тока ЭСР из [2] (—) с аналитическими моделями (—) из [17] (а), [18] (б), [19] (в), [20] (г), [21] (д)

Модель из [20] основана на экспериментальных данных:

$$I(t) = I_1 \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} e^{\frac{-t}{\tau_2}} + I_2 \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} e^{\frac{-t}{\tau_4}}. \quad (1.8)$$

Модель (1.8) основана на измеренных формах тока ЭСР, возникающих при касании человеком металла. Эталонном являлось среднее значение измеренных форм тока, а для получения уравнения из [2] применен генетический алгоритм для наилучшего соответствия набору данных. Так, выражение (1.8) является удовлетворительной модификацией стандартного выражения (рисунок 1.7,з).

В таблице 1.2 представлены параметры аналитических моделей (1.5)–(1.8) для обеспечения максимального тока 15 А.

Таблица 1.2 – Параметры моделей (1.5)–(1.8) для разрядного тока 15 А

Параметр	(1.5)	(1.6)	(1.7)	(1.8)
I_0 , А	–	–	53,52	–
I_1 , А	106,5	431,8	27,89	62,5
I_2 , А	60,5	190,4	19,19	13,8
τ_1 , нс	0,62	2,2	0,606	1,226
τ_2 , нс	1,1	2	1,759	1,359
τ_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 4-го порядка [21] для формы тока ЭСР (рисунок 1.7,д) описывается как

$$I(t) = Ate^{-Ct} + Bte^{-Dt}, \quad (1.9)$$

где $A = 38,1679$ А/нс; $B = 1,0526$ А/нс; $C = 1$ нс⁻¹; $D = 0,0459$ нс⁻¹.

В таблице 1.3 представлено сравнение выражений (1.4)–(1.9) с формой тока ЭСР из [2]: максимального ($I_{\max}$), при 30 нс ($I_{30\text{нс}}$) и 60 нс ($I_{60\text{нс}}$), а также указано время его нарастания (t_n).

Таблица 1.3 – Характеристики форм тока ЭСР по аналитическим моделям при ЭСР 4 кВ

Модель	$I_{\max}$, А	$I_{30\text{ нс}}$, А	$I_{60\text{ нс}}$, А	t_n , нс
ГОСТ [2]	$15\pm1,2$	$8\pm2,4$	$4\pm1,2$	$0,8\pm0,2$
(1.4)	14,9	8,0	4,0	0,8
(1.5)	15,1	8,0	4,0	0,83
(1.6)	16,9	6,2	3,0	1,3
(1.7)	14,9	8,0	4,0	0,83
(1.8)	14,7	4,9	1,7	0,72
(1.9)	15,1	8,0	4,0	0,6

Из таблицы 1.3 видно, что не все значения, полученные по аналитическим моделям, соответствуют форме тока из [2]. При этом согласно [2] значение тока первого максимума должно находиться в пределах $\pm 15\%$ и время его нарастания $\pm 25\%$, а значения $I_{30\text{нс}}$ и $I_{60\text{нс}}$ составляют $\pm 30\%$. Так, в модели (1.6) имеются существенные отличия по времени t_n , а в модели (1.8) – для $I_{30\text{нс}}$ и $I_{60\text{нс}}$. Однако значения всех параметров аналитических моделей варьируются, что позволяет добиться сходства с формой тока, представленной в [2].

Вывод для будущего инженера: существует множество аналитических моделей для описания формы тока ЭСР, обладающих различной точностью и сложностью. Модель Хайдлера является стандартизированной и обеспечивает полное соответствие нормативным документам. Более простые модели могут быть полезны для оценочных расчетов и понимания общей динамики процесса. Специализированные и многоэкспоненциальные модели представляют ценность для научных исследований и задач, требующих высокой точности аппроксимации конкретных экспериментальных данных. Выбор модели зависит от решаемой задачи: для сертификационных испытаний необходима строгая привязка к стандарту, в то

время как для моделирования конкретного устройства может оказаться достаточной более простая и быстрая в реализации модель.

1.3 Влияние электростатического разряда на радиоэлектронные компоненты и устройства

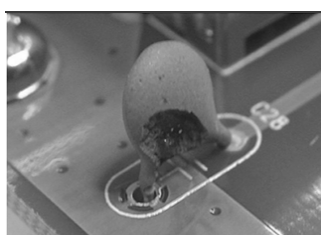
1.3.1 Типичные повреждения компонентов

ЭСР представляет собой одну из наиболее серьезных угроз для надежной работы РЭУ. Высокоскоростной импульс тока и сопутствующее электромагнитное поле способны вызывать широкий спектр повреждений – от мгновенных катастрофических отказов до трудно диагностируемых скрытых деградаций, снижающих работоспособность устройства. Понимание механизмов повреждения необходимо для обоснованного выбора методов защиты.

Воздействие ЭСР на электронные компоненты можно классифицировать по характеру и времени проявления последствий.

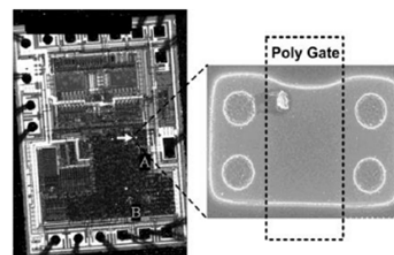
Катастрофические (необратимые) отказы

Данный тип повреждений приводит к немедленному и полному выходу компонента из строя [22–25]. Механизмы разрушения носят преимущественно тепловой характер, обусловленный мгновенным выделением значительной мощности в малом объеме полупроводниковой структуры.



Пробой p - n -перехода: локальный перегрев вызывает расплавление кремния и металлизации, что приводит к короткому замыканию перехода [26].

Пробой подзатворного диэлектрика: тонкий слой оксида не выдерживает высокого напряжения ЭСР, что приводит к образованию проводящего канала и необратимому повреждению транзистора [26].



Плавнение металлизации: токовая перегрузка вызывает плавление и испарение тонких проводящих дорожек (обычно алюминиевых или медных), разрывая электрические соединения [27].



Скрытые повреждения

Этот тип повреждений является наиболее коварным, так как компонент продолжает функционировать после воздействия, но его параметры деградируют.

Частичный пробой диэлектрика: образование в оксиде дефектов, которые не вызывают немедленного короткого замыкания, но приводят к повышенному току утечки, снижению напряжения пробоя и нестабильности параметров. Со временем под воздействием рабочих напряжений и температуры дефект может развиваться в катастрофический пробой.

Повреждение кристаллической решетки: высокоэнергетический импульс может создавать дислокации и другие дефекты в кремнии, что приводит к увеличению тока утечки, снижению коэффициента усиления транзисторов и изменению пороговых напряжений.

Скрытые повреждения существенно снижают запас надежности и могут проявиться в процессе эксплуатации, приводя к отказам системы.

1.3.2 Влияние электростатического разряда на компоненты

Интегральные схемы (ИС) представляют собой наиболее уязвимый класс компонентов при воздействии ЭСР. Микроконтроллеры (МК), являющиеся «мозгом» современных электронных систем, особенно чувствительны к ЭСР. Исследования показывают, что ЭСР может вызывать более 10 различных типов отказов МК – от временных сбоев в виде неправильного считывания данных до полного необратимого отказа [28].

Чувствительность МК к воздействию ЭСР носит пороговый характер. Например, исследования показывают, что при много-

кратном воздействии импульсов с амплитудой 6,4 кВ отказ происходит у 33,4% МК, в то время как при 6,5 кВ уровень отказа может достигать 100% [29]. Эти цифры особенно тревожны, если учесть, что в обычных условиях человек может генерировать потенциал до 15–20 кВ.

Особую проблему представляет влияние паразитных параметров печатной платы на распространение и воздействие ЭСР. Емкость монтажных площадок, индуктивность проводников, взаимные емкостные связи и прочее – все эти факторы могут значительно усиливать разрушительное действие ЭСР [30]. Например, увеличение емкости посадочного места ПАВ-фильтра всего на несколько пикофард может привести к появлению паразитных резонансов и существенно изменить характеристики устройства [31].

1.3.3 Отказы устройств электропитания после воздействия электростатического разряда

Для космического аппарата проблема ЭСР имеет особое значение. В условиях космического пространства аппарат подвергается одновременному воздействию множества факторов: глубокого вакуума, радиации, плазменной среды и пр. Все это создает идеальные условия для накопления статических зарядов и возникновения ЭСР. Особую опасность представляет так называемая внутренняя электризация, когда высокоэнергетические электроны проникают сквозь корпус аппарата и накапливаются на внутренних диэлектрических элементах, включая печатные платы. Такой разряд может возникать в непосредственной близости от чувствительных цепей, что окажет гораздо более разрушительные последствия, чем разряд на внешней поверхности.

Системы электропитания космического аппарата являются критически важными системами, отказ которых может привести к потере всего аппарата. ЭСР в цепях питания может вызывать различные виды отказов – от временных нарушений в работе стабилизаторов напряжения до катастрофических пробоев силовых транзисторов и последующего короткого замыкания.

Проектирование устойчивых к ЭСР систем для КА требует комплексного подхода, включающего правильный выбор компонентов, тщательное экранирование, применение специальных схем защиты и многоуровневое резервирование. Особое внимание уделяется учету паразитных параметров монтажа и моделированию возможных путей протекания разрядных токов на этапе проектирования.

Вывод для будущего инженера: ЭСР оказывает комплексное негативное воздействие на РЭУ, включающее как мгновенные тепловые разрушения, так и скрытую деградацию, снижающую долговременную надежность. Наибольшей уязвимостью обладают ИС. Паразитные параметры печатной платы могут существенно усиливать разрушительный эффект ЭСР, перенаправляя энергию в чувствительные цепи. В системах электропитания космического аппарата проблема ЭСР усугубляется действием специфических факторов космического пространства, что требует реализации комплексных и многоуровневых мер защиты на всех этапах проектирования и производства.

Гораздо опаснее скрытые повреждения, которые снижают запас надежности и приводят к отказам в процессе эксплуатации. Особое внимание следует уделять защите входов микроконтроллеров, так как они наиболее уязвимы. Паразитные параметры печатной платы могут свести на нет стойкость самого защитного компонента, что необходимо учитывать на этапе трассировки печатных плат.

1.4 Устройства защиты от электростатического разряда

1.4.1 Общие рекомендации по организации защиты от электростатического разряда на уровне печатных плат

Эффективная защита от ЭСР основана на ряде принципов [32, 33]. Один из них – это отведение тока ЭСР на землю. На уровне

печатной платы должен быть организован отвод энергии ЭСР в обход чувствительных цепей на землю. Второй принцип заключается в минимизации импеданса цепей на пути распространения ЭСР. Длина проводников между точкой потенциального проникновения ЭСР внутрь устройства и точкой заземления должна быть минимальна. Третий принцип заключается в применении защитных устройств, ограничивающих напряжение ниже определенного порога, который способны выдержать защищаемые элементы, в частности ИС. Эти принципы реализуются через хорошо спроектированную топологию печатной платы, организацию цепей заземления и выбор компонентов.

На печатной плате для защиты от ЭСР применяются несколько типов специальных компонентов. Самыми распространенными являются TVS-диоды, основанные на принципе лавинного пробоя и фиксирующие напряжение на безопасном уровне (обычно от 5 до 30 вольт). Они подходят для защиты входов и выходов, линий питания и высокоскоростных интерфейсов (например, USB или HDMI). Альтернативой являются многослойные варисторы, сопротивление которых падает до единиц Ом при превышении порогового напряжения [32]. Для защиты от особенно мощных ЭСР, например на входах антенн или линиях связи, применяют газоразрядники, но им присущ существенный недостаток – низкая скорость срабатывания. Для компактных портативных устройств часто предпочтительными являются TVS-сборки (объединяют несколько TVS-диодов в одном корпусе). При выборе защитного компонента важны три критерия: его рабочее напряжение (должно быть выше максимального напряжения ЭСР), малая входная емкость (менее 5 пФ для высокоскоростных и высокочастотных линий) и достаточная пиковая мощность (от 100 Вт для сигнальных цепей и до 1000 Вт для цепей питания) [34]. Компонент нужно располагать на минимальном расстоянии от точки проникновения ЭСР. Рекомендуемое расстояние – менее 5 мм. Например, если TVS-диод находится в цепи дальше 15 мм от точки проникновения ЭСР, его эффективность падает на 30–50% из-за влияния паразитной индуктивности проводников печатной платы или проводов.

Правильная организация пространства на печатной плате часто важнее выбора защитных компонентов. Согласно рекомендациям следует выделять специальную отдельную шину защитного заземления для организации защиты от ЭСР. К ней подключают корпуса разъемов, экраны кабелей и катоды TVS-диодов. Соединение защитной шины с сигнальной землей должно выполняться только в одной точке и желательно через ферритовый дроссель или перемычку. Такое решение предотвращает проникновение тока ЭСР в сигнальные цифровые цепи [34]. Использование сплошного опорного полигона без разделения на сигнальную и защитную землю может привести к тому, что ток ЭСР потечет через цифровую землю, что почти гарантированно вызовет повреждение. Дополнительной мерой является кольцевая шина по периметру платы шириной не менее 1 мм, соединенная с корпусом в нескольких точках. Из-за отсутствия гальванической связи платы с корпусом на плате способен скопиться собственный заряд, что может привести через некоторое время к его разряду на ближайший компонент.

При трассировке сигнальных цепей для защиты от ЭСР ключевым фактором является минимизация длины параллельных участков между сигнальной дорожкой и обратным проводником (наиболее безопасным является случай, когда сигнальная цепь проложена над сплошным опорным полигоном). Дополнительной мерой могут быть защитные проводники, соединенные с опорным полигоном через переходные отверстия и расположенные вблизи чувствительных цепей. Они обеспечивают стекание наведенных токов сразу на опорный полигон. Также внимания заслуживают цепи электропитания. Каждая ИС должна иметь развязывающие емкости (обычно параллельно 100 нФ и 10 нФ). При воздействии ЭСР они шунтируют высокочастотную помеху. На линии питания вместе с TVS-диодом необходимо устанавливать ферритовый дроссель с сопротивлением 100–600 Ом на частоте 100 МГц, что обеспечит дополнительное ослабление помехи. Одной из ошибок при проектировании является отсутствие защиты незадействованных контактов ИС. При попадании ЭСР на такой контакт он способен через паразитные емкости пробить кристалл ИС.

Кроме существующих рекомендаций при проектировании печатных плат, регламентированных нормативными документами, также известны и другие решения, которые могут применяться в качестве дополнительных мер для организации защиты от ЭСР. Одним из таких решений является разложение ЭСР на составляющие для уменьшения его амплитуды.

1.4.2 Электронные компоненты для защиты от электростатического разряда

Основными электронными компонентами для защиты от ЭСР являются TVS-диоды, варисторы, газоразрядные трубки и стабилитроны. Эти устройства основаны на различных физических принципах, но выполняют в схеме одну и ту же функцию – отвод тока ЭСР на землю.

TVS-диоды (Transient Voltage Suppressor)

TVS-диоды – это полупроводниковые приборы с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), предназначенные для защиты электронных цепей от импульсных скачков напряжения в схеме из-за удара молний или ЭСР. Основой работы TVS-диода является лавинный пробой его $p-n$ -перехода. TVS-диод включают параллельно защищаемой схеме, в обычных условиях (при напряжении ниже порогового) он работает как изолятор (его сопротивление единицы и десятки мегаом) и не влияет на работу схемы (рисунок 1.8).

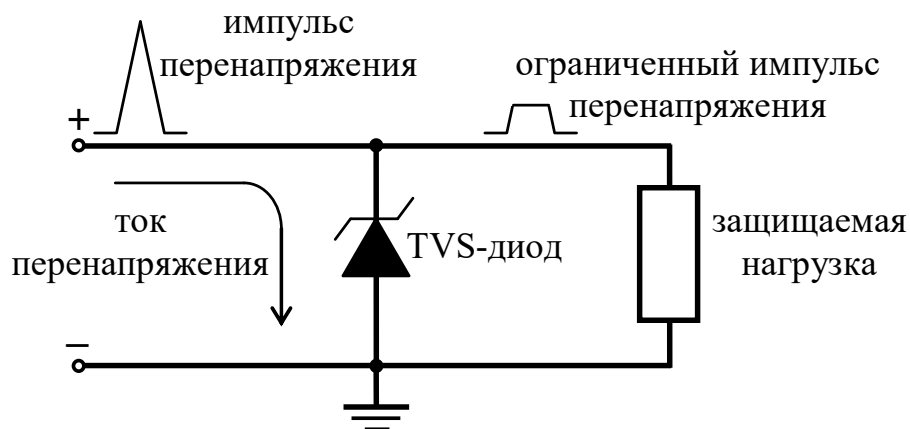


Рисунок 1.8 – Схема включения и принцип работы TVS-диода

При возникновении импульсной помехи с амплитудой выше порогового значения TVS-диод переходит в режим лавинного пробоя. Ток переходного процесса протекает через диод и отводится на землю, образуя шунтирующий путь с низким сопротивлением и минуя защищаемую цепь. Это позволяет ограничить входное напряжение на некотором безопасном уровне (зависит от защищаемого устройства). При снижении напряжения на входе TVS-диода до нормального уровня он возвращается в исходное состояние. Время срабатывания TVS-диода менее 1 нс. Основные виды TVS-диодов делят на однонаправленные (для защиты цепей постоянного тока) и двунаправленные (для защиты цепей переменного тока). По способу монтажа на печатную плату различают TVS-диоды выводного (THT) и поверхностного (SMD) монтажа (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – TVS-диоды выводного (а) и поверхностного (б) монтажа

TVS-диоды широко применяют при защите систем связи и телекоммуникаций, цифровых интерфейсов, различной силовой электроники, бытовых электроприборов и схем управления.

Варисторы

По принципу действия варисторы схожи с TVS-диодами. Варистор – это двухвыводной твердотельный полупроводниковый прибор с симметричной нелинейной ВАХ, который подключают параллельно защищаемой цепи. Варисторы также называют по-

лупроводниковыми резисторами. Их применяют для сквозного и поверхностного монтажа (рисунок 1.10).

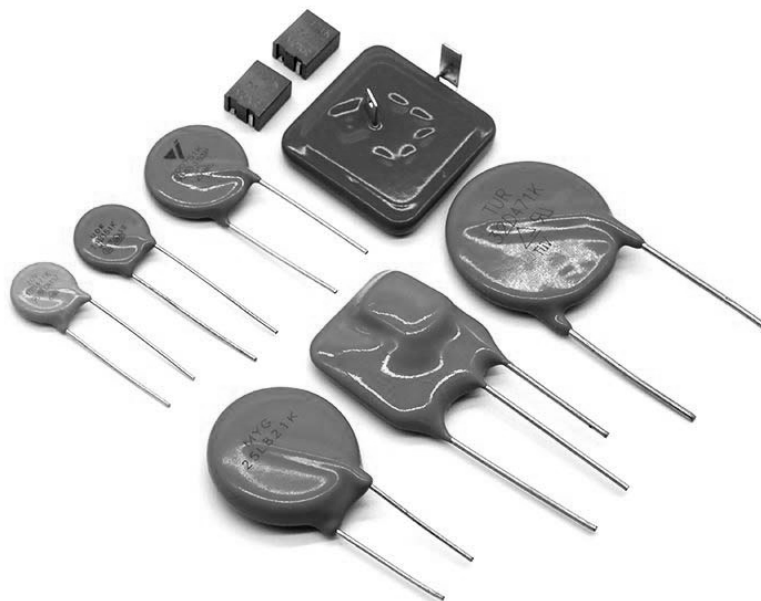


Рисунок 1.10 – Варисторы в различном исполнении

При нормальном рабочем напряжении варистор находится в состоянии высокого сопротивления (до сотен мегаом и даже нескольких гигаом). При скачкообразном росте напряжения выше установленного порога варистор переходит в активное состояние, а его сопротивление становится низким. Таким образом, он шунтирует ток помехи на опорный проводник, отводя его от защищаемой цепи. Различают два основных вида варисторов: низковольтные – рассчитаны на рабочее напряжение от 3 до 200 В (используются для защиты в низковольтных цепях) и высоковольтные – работают в цепях с напряжением до 20 кВ (применяются для защиты электрических сетей и установок). Один из основных недостатков варисторов заключается в том, что они деградируют от каждого срабатывания, а одно из основных достоинств – высокое быстродействие (время срабатывания несколько наносекунд).

Варисторы часто используют в сетевых фильтрах, блоках питания и устройствах защиты от импульсных перенапряжений, а также для защиты цифровых интерфейсов, микропроцессоров, транспортного оборудования и т. д.

Газоразрядные трубки

Газоразрядная трубка состоит из герметичной керамической или стеклянной трубки, заполненной инертным газом (аргоном или неоном), и электродов из специального сплава (рисунок 1.11). Газоразрядная трубка включается параллельно защищаемой схеме и при нормальной работе схемы выполняет роль изолятора. При появлении перенапряжения выше критического уровня газ внутри трубки ионизируется и превращается в плазму с низким сопротивлением. Между электродами возникает электрическая дуга и в результате разряда высокой амплитуды импульс протекает на землю. После того как напряжение падает ниже критического уровня, дуга гаснет, газ внутри нее остывает и элемент переходит в изначальное состояние. Газоразрядная трубка способна выдерживать токи до десятков килоампер, имеет почти нулевую собственную емкость (актуально для ВЧ-цепей) и долговечна при нормальных условиях работы. Между тем для газоразрядных трубок характерны низкое быстродействие (время срабатывания до микросекунд) и выход из строя после серии срабатываний.



а



б

Рисунок 1.11 – Внутренний состав (а) и варианты исполнения (б) газоразрядных трубок

Газоразрядные трубки применяются как первая линия «грубой» защиты от самых мощных воздействий: их устанавливают на вводах силовых кабелей в здания, в системах грозозащиты базовых станций связи и на входах антенных фидеров, где они способны выдерживать колоссальные импульсные токи от прямых ударов молнии (до десятков килоампер).

Стабилитроны

Принцип действия стабилитрона (диода Зенера) основан на обратимом пробое p - n -перехода при подаче обратного напряжения. В режиме пробоя ток, протекающий через стабилитрон, возрастает, а напряжение остается практически неизменным. В отличие от обычного диода, который сгорает от обратного перенапряжения, стабилитрон создан для долговременной работы в таком режиме. Его задача – не «срезать» единичный импульс (как TVS-диоды), а поддерживать стабильное напряжение. Он всегда включается в схему в обратном направлении и обязательно последовательно с ограничительным резистором. Стабилитроны в разных вариантах исполнения показаны на рисунке 1.12.



Рисунок 1.12 – Стабилитроны
в различных вариантах исполнения

При напряжении в схеме ниже порогового уровня стабилизации стабилитрон закрыт, а ток в нагрузку протекает мимо него. При росте напряжения выше порогового происходит контролируемый пробой p - n -перехода, стабилитрон открывается и через него начинает протекать ток на землю. Если напряжение на входе или ток нагрузки начинает колебаться, стабилитрон мгновенно меняет свое внутреннее сопротивление. Он «забирает» лишний ток на се-

бя, а избыток напряжения «гасится» на ограничительном резисторе. В результате на самом стабилитроне (и на параллельно подключенной к нему нагрузке) напряжение остается постоянным (стабильным). В зависимости от толщины p - n -перехода и напряжения стабилизации внутри элемента происходят разные физические процессы: туннельный пробой (происходит в низковольтных стабилитронах) или лавинный пробой (происходит в высоковольтных стабилитронах). Хотя физика лавинного пробоя у стабилитронов схожа с TVS-диодом, они применяются для решения разных задач. Стабилитрон рассчитан на непрерывную работу – поддержание заданного напряжения (при малой допустимой импульсной мощности), а TVS-диод – на кратковременный удар (за наносекунду гасит киловольтный импульс помехи, от которого стабилитрон сгорает).

Стабилитроны применяются там, где нужна параметрическая стабилизация напряжения: в блоках питания и зарядных устройствах (создают эталонное напряжение параметрической стабилизацией), в измерительных приборах и датчиках, а на входах интегральных схем, процессоров и автомобильной электроники, они работают, защищая чувствительные компоненты от выгорания.

Вопросы к разделу 1

1. Опишите три основных этапа возникновения ЭСР: генерация, накопление и сброс заряда. Приведите пример реализации каждого этапа для случая электризации человека.

2. Что такое трибоэлектризация? Объясните, почему при ходьбе по синтетическому ковру человек заряжается отрицательно, а ковер – положительно.

3. Назовите и охарактеризуйте три главных источника ЭСР в электронной промышленности. Для каждого источника укажите диапазоны генерируемого напряжения.

4. В чем заключаются ключевые различия между моделями человеческого тела и механической с точки зрения эквивалентной схемы и формы разрядного тока?

5. Почему модель заряженного устройства считается наиболее опасной для современных интегральных схем, несмотря на относительно небольшую энергию разряда?

6. Перечислите и кратко охарактеризуйте основные типы катастрофических и скрытых повреждений полупроводниковых компонентов, вызываемых воздействием ЭСР.

7. Какие факторы космического пространства способствуют возникновению ЭСР на элементах космического аппарата?

8. Запишите аналитическое выражение для формы тока ЭСР по модели Хайдлера. Поясните физический смысл входящих в него переменных.

9. Сравните две аналитические модели формы тока ЭСР: четырехэкспоненциальную и полиномиальную на основе импульсной функции. В чем преимущество полиномиальной модели?

10. Объясните, почему скрытые повреждения, вызванные ЭСР, могут представлять бóльшую угрозу для надежности РЭУ, чем немедленный катастрофический отказ.

11. Приведите схему включения электронных компонентов для защиты от ЭСР. Опишите процессы, протекающие в схеме, и принцип защиты.

12. Объясните схожие и отличительные черты электронных компонентов для защиты от ЭСР.

2 ИСПЫТАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ НА ВОСПРИИМЧИВОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

2.1 Методики проведения испытаний

2.1.1 Стандартизированная методика испытаний

Проведение испытаний на устойчивость к ЭСР требует строгого соблюдения стандартизированных методик, которые обеспечивают воспроизводимость и достоверность результатов. Международный стандарт устанавливает комплекс требований к организации испытательного процесса, начиная от условий окружающей среды и заканчивая спецификацией измерительного оборудования.

Основой для проведения корректных испытаний служит специально оборудованная лаборатория. Одним из элементов испытательной установки (рисунок 2.1) является заземляющая пластина из металла (1) толщиной не менее 0,25 мм, размеры которой должны обеспечивать выступ за габариты испытуемого объекта на 0,5 м с каждой стороны. Данная пластина выполняет функцию эталонной земли и должна быть надежно соединена с защитным заземлением лаборатории (2).

Испытуемый объект размещается на заземляющей пластине через диэлектрическую подставку, например, непроводящим столом (3), что обеспечивает его гальваническую развязку от земли. Важным требованием является соблюдение минимальных расстояний: не менее 1 м от испытуемого объекта до стен помещения и других металлических конструкций, а также не менее 0,1 м от соединительных кабелей до заземляющей пластины. Заземляющий кабель имитатора ЭСР длиной до 2 м подключается к пластине в точке, максимально приближенной к испытуемому объекту.

Методика испытаний предусматривает два основных способа воздействия: воздушный и контактный. При испытаниях на воз-

37

2.1.2 Установка для измерения формы тока

Экспериментальная установка для измерения формы тока ЭСР представлена на рисунке 2.2. Схема измерения состоит из имитатора ЭСР, аттенюаторов (1) с суммарным ослаблением 40 дБ, коаксиального кабеля (2) и осциллографа (3). Согласование реализовано с помощью сужающегося конусообразного перехода (4) с воздушным заполнением согласно ГОСТ Р 51317.4.2-2010 [2].

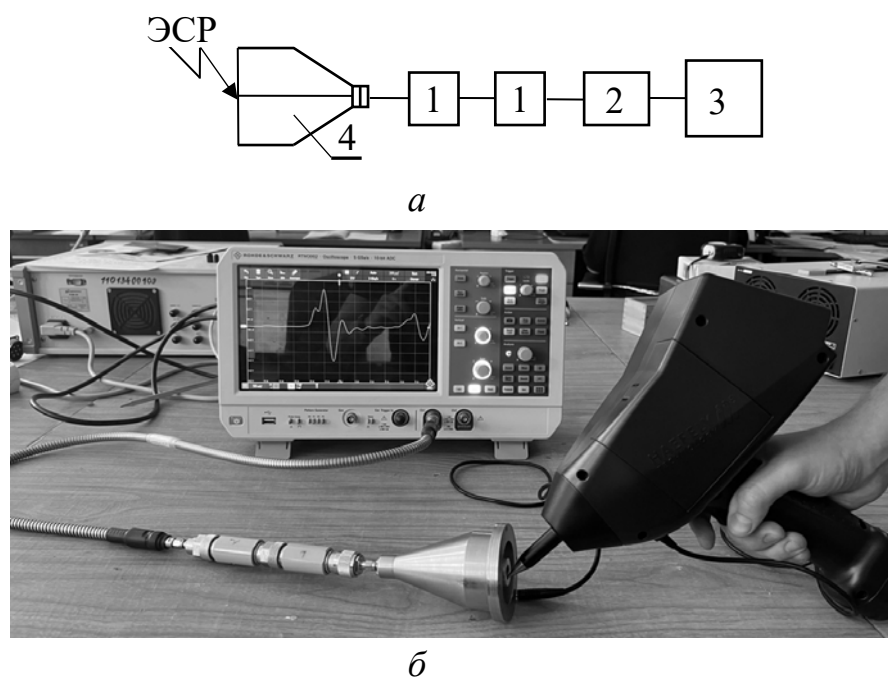


Рисунок 2.2 – Схема для измерения формы тока ЭСР

2.1.3 Установка для исследования печатных плат

Экспериментальная установка с высокой повторяемостью результатов анализа воздействия ЭСР на высокоскоростные печатные платы (рисунок 2.3) представлена в [35]. Используя ее, анализируют влияние импеданса печатной платы и коаксиальных кабелей на изменение напряжения, вызванного ЭСР.

В качестве испытуемого объекта используется связанная микрополосковая линия (1) с волновым сопротивлением $Z = 50$ Ом. Для корректного измерения ИО и осциллограф (3) устанавливают внутри безэховой камеры (БЭК) (4), а имитатор ЭСР (2) – за пределами БЭК.

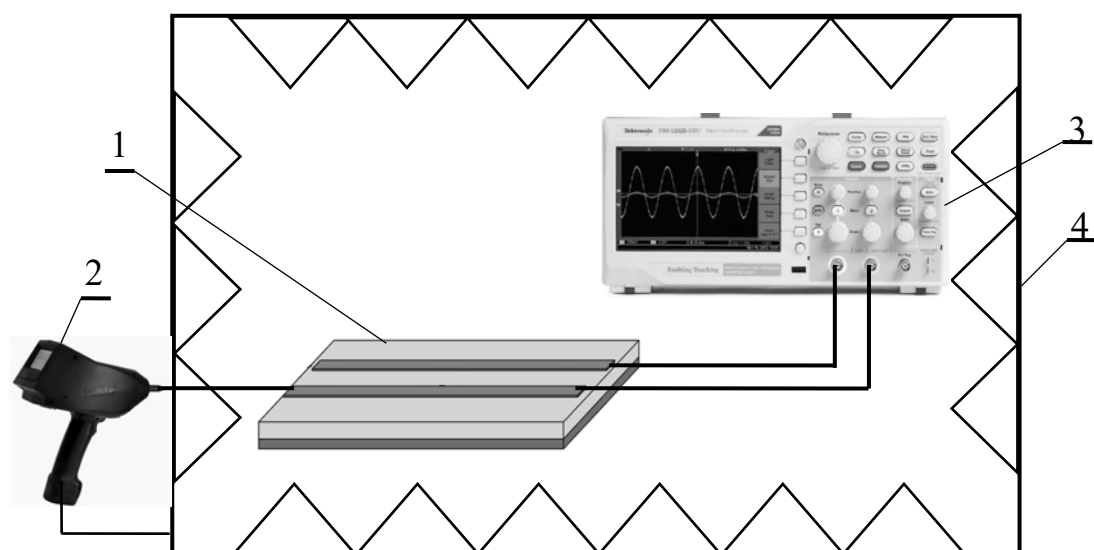


Рисунок 2.3 – Экспериментальная установка для анализа воздействия ЭСР на высокоскоростные печатные платы

Воздействие ЭСР на печатную плату проводят через высокочастотный коаксиальный кабель. Аналогично печатная плата соединяется с осциллографом.

2.1.4 Установка для исследования эффективности экранирования материалов

Экспериментальное исследование эффективности экранирования гибких экранирующих материалов с целью определения возможности их применения для защиты электронных компонентов и устройств авиакосмических систем от воздействия ЭСР приведено в [36]. Экспериментальная установка (рисунок 2.4) содержит регулируемый источник электропитания (1) с заданным напряжением разряда между шаровыми электродами (2) диаметром 20 мм, рецептор (5), металлическую горизонтальную пластину (4), исследуемый гибкий экранирующий материал (7), металлическую пластину заземления (3) и осциллограф (6).

Источником ЭСР является высоковольтный преобразователь, который подключен к регулируемому источнику электропитания с заданным напряжением разряда между шаровыми электродами. Рецептор имеет форму куба с длиной ребра $a = 50$ мм, который изготовлен из медной фольги. Рецептор должен быть изолирован от горизонтальной пластины диэлектрической прокладкой, а пла-

стина соединяться с плоскостью заземления через резисторы $R1 = R2 = 470 \text{ кОм}$.

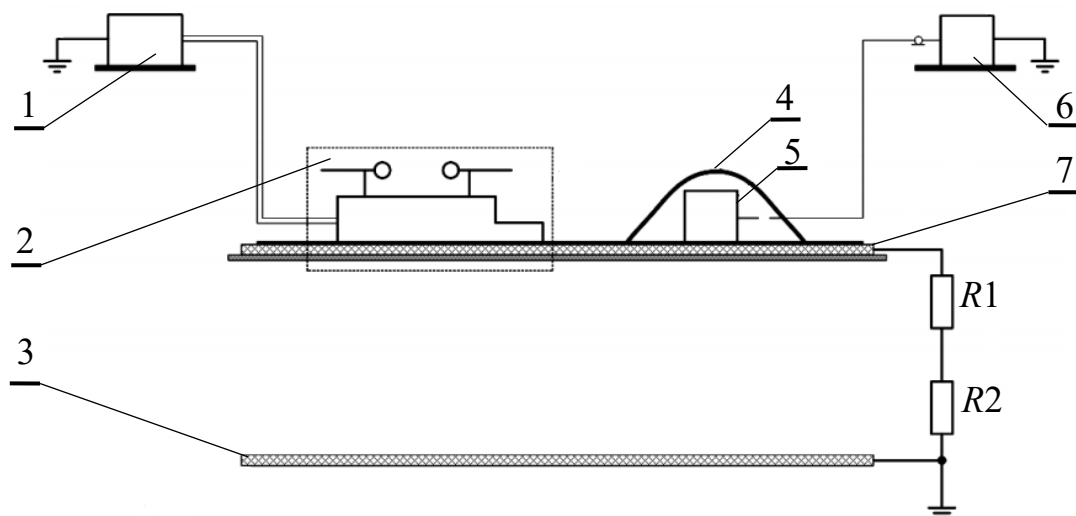


Рисунок 2.4 – Экспериментальная установка для исследования гибких экранирующих материалов

Рецептор подключается к цифровому осциллографу коаксиальным кабелем, центральный проводник которого соединяется с корпусом рецептора, а исследуемый гибкий экранирующий материал соединяется с горизонтальной пластиной. Осциллографом регистрируется форма тока, а эффективность экранирования определяется по измеренным амплитудным значениям на рецепторе.

2.1.5 Установка для исследования воздействия электростатического разряда на кабель

Отдельное направление исследований посвящено изучению воздействия ЭСР на кабели [37]. Экспериментальная установка (рисунок 2.5) включает испытуемый кабель (1), металлическую трубку (2) для имитации крепежных элементов, комплект измерительных датчиков напряжения (3), электрического (4) и магнитного (5) полей, а также пластину заземления (6) и осциллограф (7).

Методика испытаний предусматривает воздействие ЭСР как непосредственно на кабель, так и на металлические элементы крепления, что позволяет моделировать реальные условия его эксплуатации. Особенностью установки является возможность

измерения распределения напряжения вдоль кабеля при помощи перемещаемых датчиков напряжения.

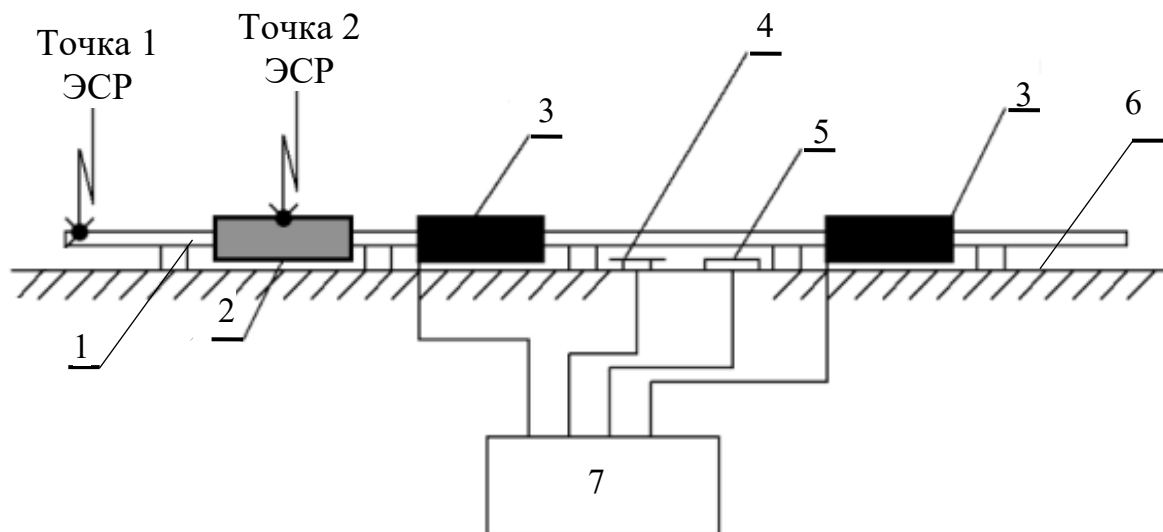


Рисунок 2.5 – Экспериментальная установка для исследования воздействия ЭСР на кабель

Комплексный подход с использованием датчиков поля позволяет получить полную картину воздействия ЭСР на кабельную систему и разработать эффективные методы защиты.

2.1.6 Измерения помехоэмиссии и помехоустойчивости радиоэлектронных устройств с помощью ТЕМ-камеры

Современные подходы к испытаниям на устойчивость к ЭСР предполагают использование специализированных устройств, таких как ТЕМ-камеры [38]. Данное оборудование позволяет проводить комплексные исследования как излучаемой помехоэмиссии [39], так и восприимчивости интегральных схем [40] к электромагнитным воздействиям. Особый интерес представляет возможность локализации сбоев в интегральных схемах, возникающих под воздействием ЭСР [41]. Перспективным направлением является использование малогабаритных ТЕМ-камер с расширенным диапазоном частот до 5,2 ГГц [42, 43]. Такие устройства позволяют проводить испытания современных высокоскоростных устройств, включая мобильные и навигационные системы. Важ-

ной особенностью является возможность исследования характеристик наведенных электромагнитных импульсов, возникающих при воздействии ЭСР на ИО, размещенный внутри камеры.

Экспериментальная установка (рисунок 2.6) для измерения электромагнитного излучения, генерируемого имитатором ЭСР, представлена в [44]. Установка содержит сдвоенную ТЕМ-камеру, имитатор ЭСР и осциллограф. Нижняя ТЕМ-камера используется для возбуждения электромагнитного излучения от ЭСР, а верхняя, подключенная к осциллографу, – для приема. Воздействие имитатором ЭСР проводится на центральный проводник нижней ТЕМ-камеры. Такая конфигурация позволяет детально исследовать механизмы распространения и воздействия электромагнитных помех, генерируемых ЭСР.



Рисунок 2.6 – Установка для измерения электромагнитного излучения, генерируемого имитатором ЭСР

Представленные экспериментальные методики и установки демонстрируют комплексный подход для решения задачи обеспечения устойчивости РЭУ к воздействию ЭСР. Соответствие международным стандартам, воспроизводимость результатов и возможность моделирования реальных условий эксплуатации делают эти методы хорошим инструментом при разработке и сертификации современных РЭУ.

2.2 Имитаторы электростатического разряда

2.2.1 Схемотехнические модели имитатора

Проверить устойчивость разработанного РЭУ к воздействию ЭСР можно в программе схемотехнического моделирования. Известны различные схемы имитаторов ЭСР с соответствующей эталонной формой импульса тока из стандарта.



Так, в [45] предложена модель имитатора, состоящая из трех частей, для формирования каждой составляющей формы тока ЭСР (рисунок 2.7,а). В эквивалентной схеме компонентами $C1$, $C3$, $C5$, $R3$, $R4$ и $L1$ задается время нарастания t_n импульса; $C4$, $R2$ – ам-

плитуда первого пика (I_{max}), а $C1$, $R1$, $L2$ – второго пика ($I_{30нс}$).

Схема из трех частей (рисунок 2.7,б) [46] включает компоненты разряда имитатора ($C1$, $C2$, $R1$) и заземления ($C3$, $R2$, $L1$), а также сопротивление нагрузки $R3$ вместе с индуктивностью наконечника электрода $L2$. Схема из [47] (рисунок 2.7,в) содержит компоненты $C5$, $R3$, $R4$ и $L2$, которые задают требуемую форму тока ЭСР, а $C3$, $C4$ и $R3$ – амплитуду и длительность первого пика (рисунок 2.8,в). В схеме из [48] (рисунок 2.7,г) компоненты $C1$, $R1$ имитируют емкость и сопротивление человеческого тела, элементы $C2$, $R2$ формируют первый пик формы тока, а $L1$ и $L2$ описывают индуктивности наконечника имитатора и кабеля заземления соответственно.

В таблице 2.1 сведены номинальные значения компонентов, используемых в рассмотренных эквивалентных схемах.

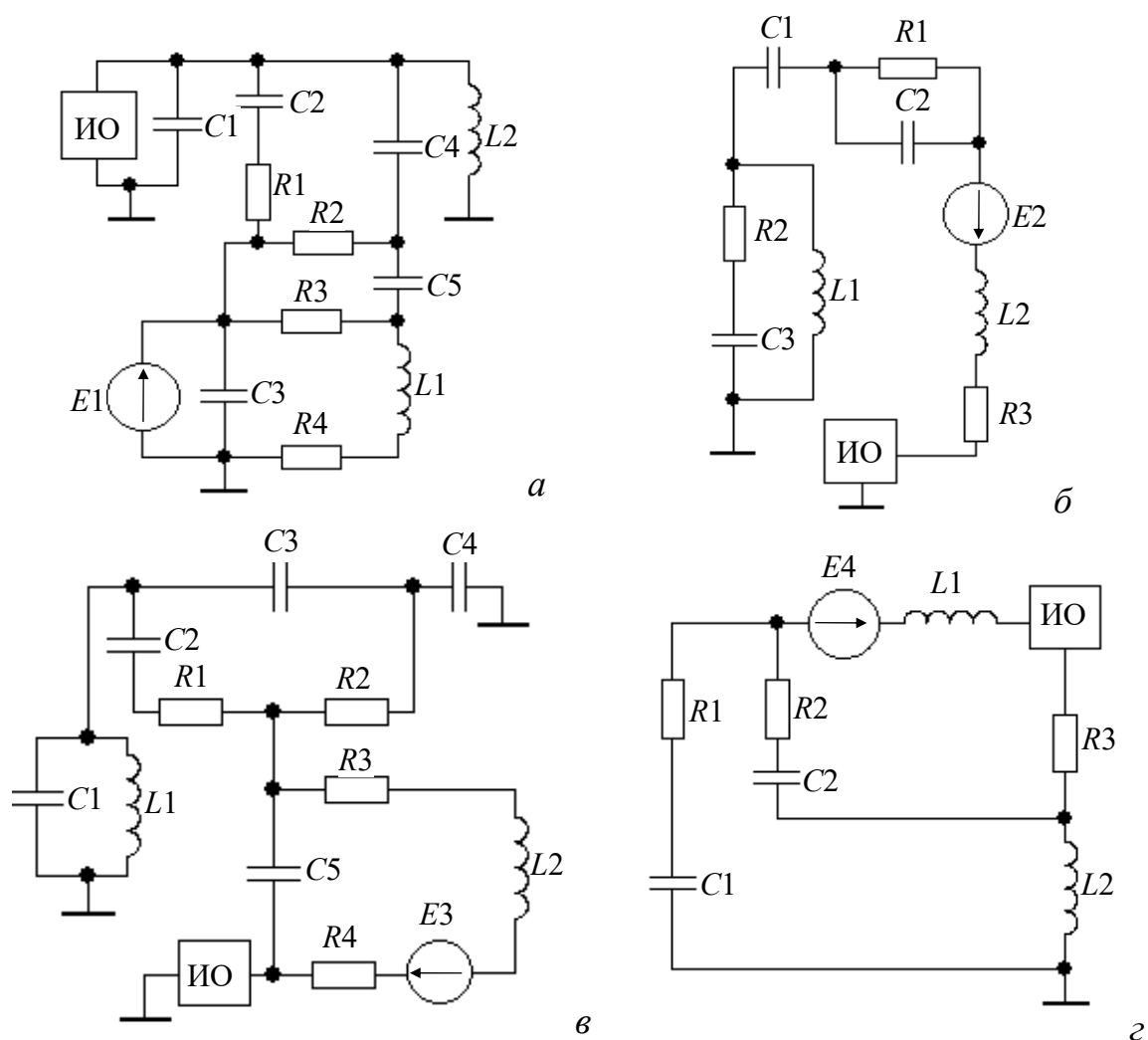


Рисунок 2.7 – Эквивалентные схемы имитаторов ЭСР: [45] (а), [46] (б), [47] (в) и [48] (г)

Таблица 2.1 – Номинальные значения компонентов схемотехнических моделей имитаторов ЭСР

Тип	[45]	[46]	[47]	[48]
$R1$, Ом	330	330	330	330
$R2$, Ом	120	95,6	120	200
$R3$, Ом	50	2	36	50
$R4$, Ом	50	–	36	–
$L1$, мкГн	0,006	1,7	0,006	0,14
$L2$, мкГн	3,5	0,113	3,5	3
$C1$, пФ	20	150	20	150
$C2$, пФ	110	3,45	110	12
$C3$, пФ	20	14	20	
$C4$, пФ	1	–	5	
$C5$, пФ	10	–	15	

Сравнительный анализ приведенных схмотехнических моделей показывает, что, несмотря на различия в наборах и номиналах компонентов (см. таблицу 2.1), все они способны генерировать формы тока (рисунок 2.8), соответствующие требованиям стандарта в заданных пределах допусков (таблица 2.2).

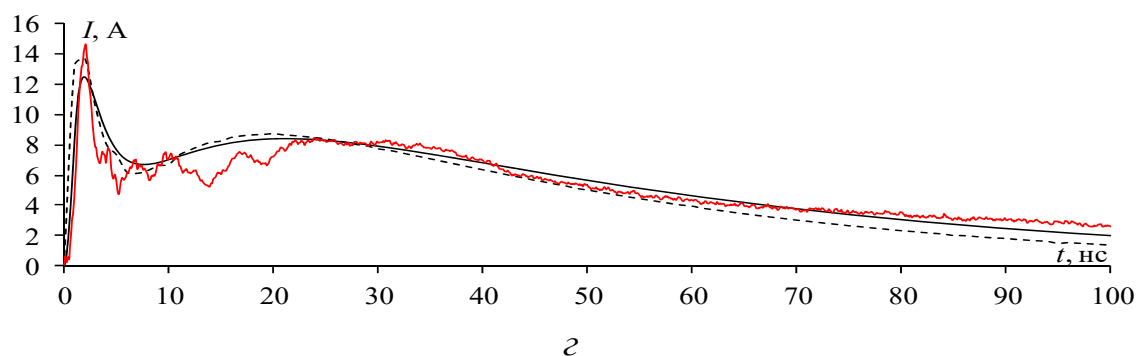
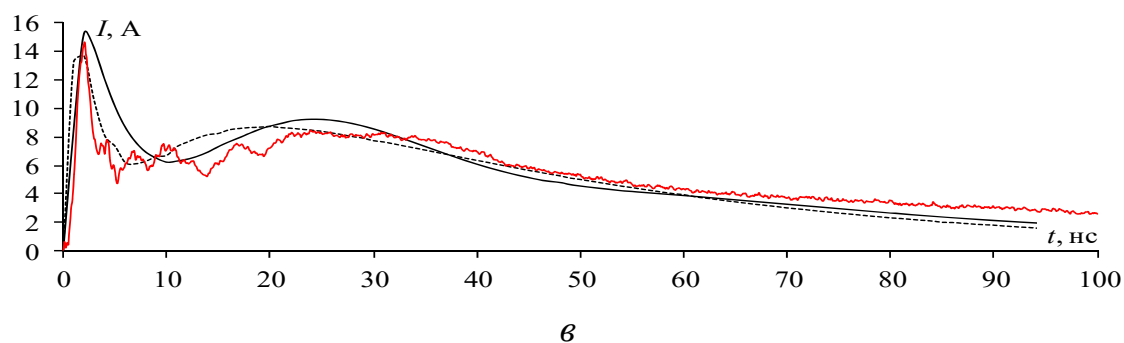
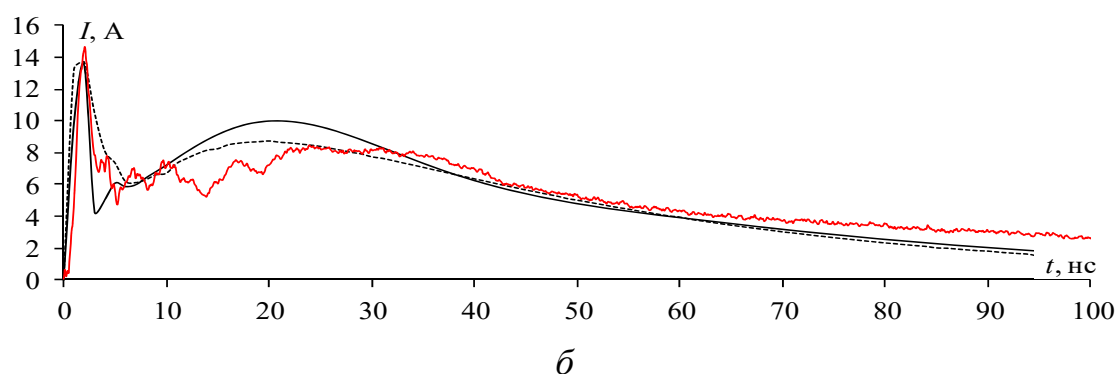
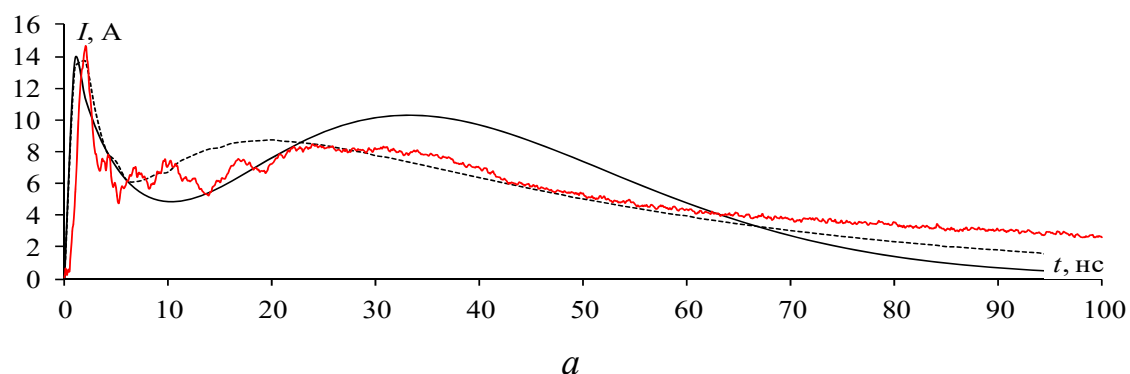


Рисунок 2.8 – Формы токов ЭСР из [2] (---), измеренная (—) и по схмотехническим моделям (—): [45] (*a*), [46] (*б*), [47] (*в*) и [48] (*г*)

Из рисунка 2.8 видно, что все формы тока схожи между собой, а минимальное отклонение параметров наблюдается при использовании модели из [48]. Показано, что минимальная разница $I_{\max}$ и t_n наблюдаются у схемотехнической модели из [48], а токов $I_{30\text{нс}}$ и $I_{60\text{нс}}$ – из [47]. При этом все значения находятся в заданных стандартом пределах. Все эквивалентные схемы из [45–48] могут быть созданы и промоделированы в любой программе для схемотехнического моделирования. Однако набор компонентов для данных схем разный (см. таблицу 2.1), что необходимо учитывать при моделировании или создании макета имитатора.

Таблица 2.2 – Характеристики форм тока ЭСР по схемотехническим моделям и стандарту при разрядном напряжении 4 кВ

Источник	$I_{\max}$, 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
ONYX 30	14,7	8,2	4,4	1,2
[45]	13,7	10,1	4,8	0,9
[46]	13,5	8,6	3,9	0,9
[47]	15,3	8,7	3,8	1
[48]	12,5	7,9	4,6	0,9

Рассмотренные выше модели (см. рисунок 2.7) позволяют имитировать разряд в программе для схемотехнического моделирования, однако они являются упрощенными и не учитывают паразитные параметры элементов реальной конструкции: индуктивность разрядного наконечника, параметры возвратного кабеля («антистатического браслета») и емкостную связь с заземленной поверхностью. На рисунке 2.9 представлена эквивалентная схема имитатора ЭСР, учитывающая реальные параметры.

В схеме есть два переключателя: первый (K1) используется для заряда конденсатора емкостью 150 пФ при номинальном напряжении 8 кВ, второй переключатель (K2) обеспечивает разряд.

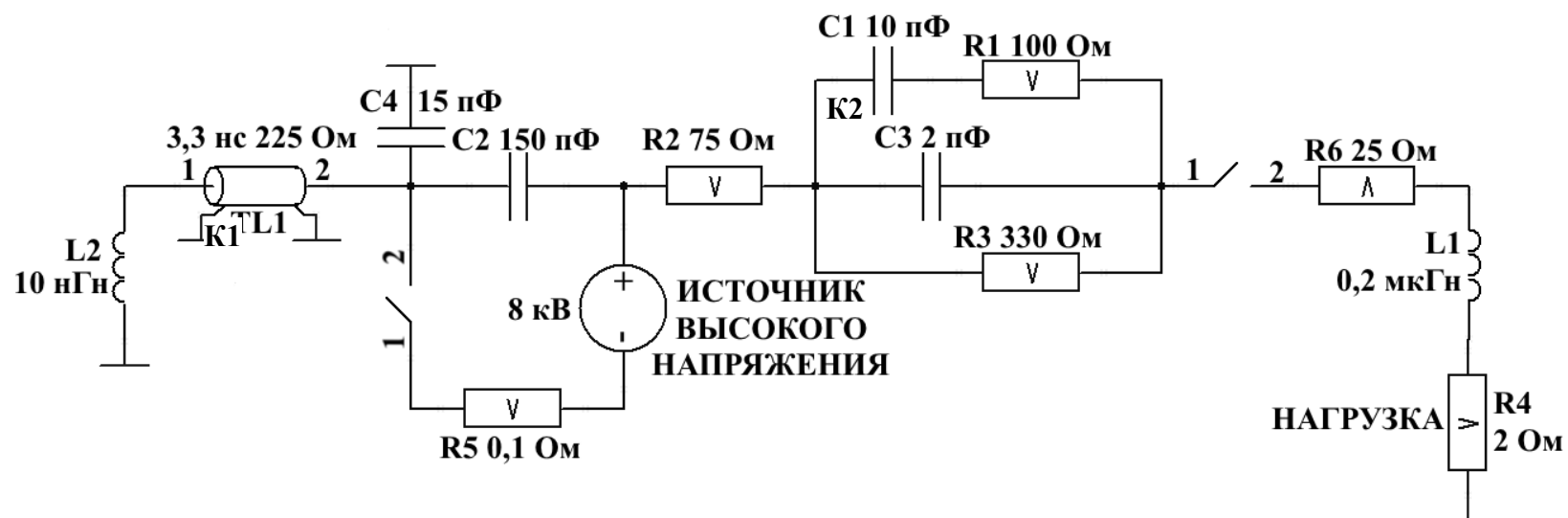


Рисунок 2.9 – Эквивалентная схема имитатора ЭСР с учетом паразитных параметров испытательной установки

Плоский кабель, применяемый в качестве электростатического браслета, подключен к земле и смоделирован последовательным включением линии передачи без потерь, характеризующейся волновым сопротивлением $Z = 225 \text{ Ом}$, временем распространения $\tau = 3,3 \text{ нс}$ и индуктивностью 10 нГн , которая моделирует провод, используемый для соединения плоского кабеля с металлической стенкой. Конденсатор 15 пФ воспроизводит емкостную связь между имитатором и металлической стенкой. Наконечник ЭСР смоделирован последовательным соединением резистора R_6 (25 Ом) и индуктивности L_1 ($0,2 \text{ мкГн}$).

Результаты моделирования схемы при испытательном напряжении 8 кВ представлены на рисунке 2.10.

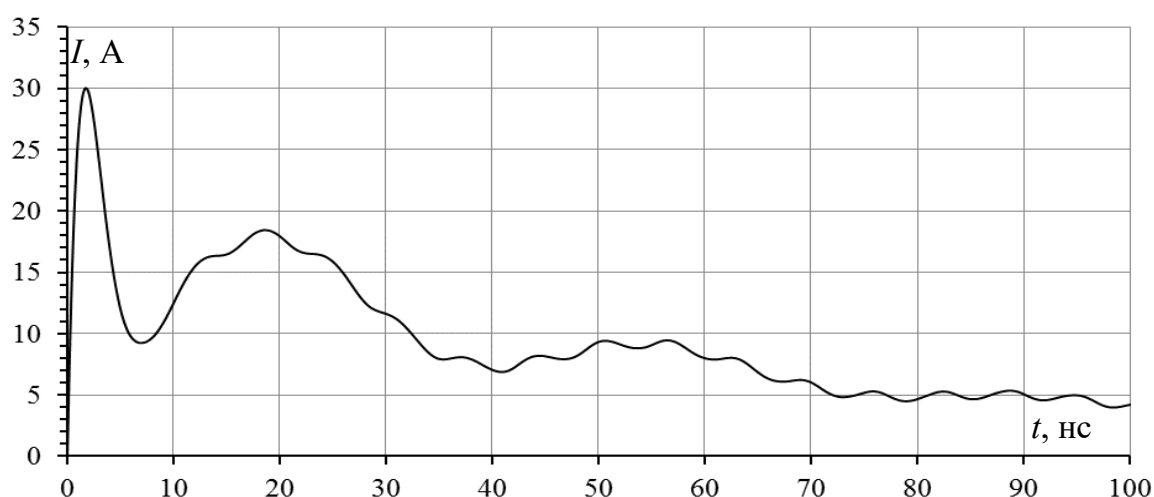


Рисунок 2.10 – Форма тока ЭСР
при испытательном напряжении 8 кВ

Полученная форма тока полностью соответствует форме из стандарта ГОСТ Р 53734.3.1.

2.2.2 Электродинамическая модель имитатора

Схемотехнический анализ дает быстрый и точный результат для формы тока ЭСР, но он не позволяет оценить пространственное распределение электромагнитного поля вокруг генератора. При этом воздействие ЭСР в непосредственной близости к чувствительной цепи РЭУ может наводить высокие амплитуды помех.

Для решения этой задачи можно использовать трехмерную электродинамическую модель испытательной установки (рисунок 2.11). Модель содержит основание стола с диэлектрической подложкой (1), силовую часть имитатора ЭСР (2), кабель питания имитатора ЭСР (3), плоский кабель возвратных токов, подключенный к отрицательному выводу ЭСР и проводящей металлической стенке (4), имитатор ЭСР (5) и проводящую металлическую пластину (6).

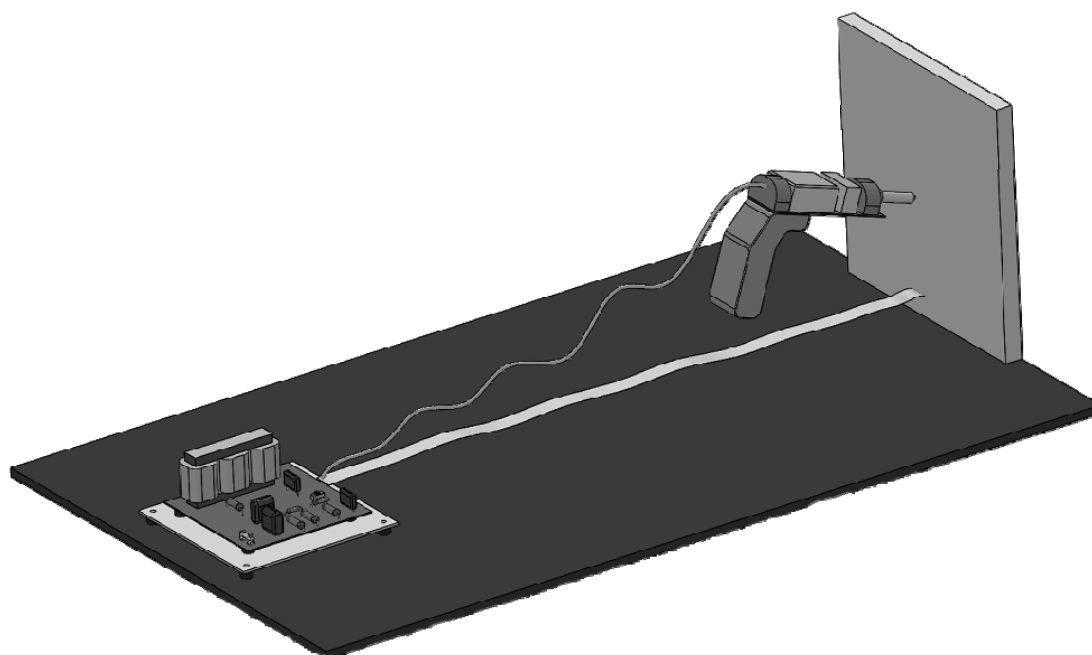
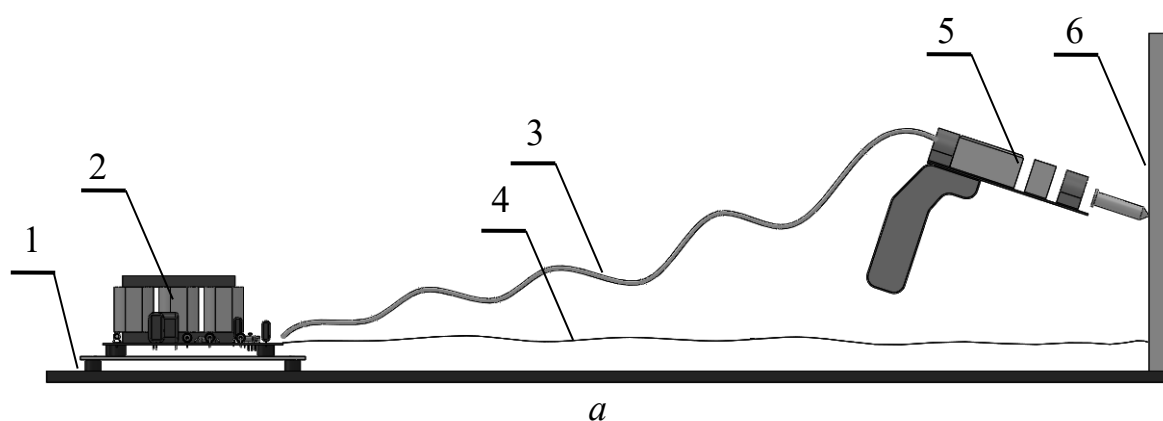


Рисунок 2.11 – Трехмерная модель установки:
вид сбоку (*a*) и общий вид (*б*)

Модель в точности повторяет геометрические размеры пистолета и расположение элементов на испытательном столе со-

гласно ГОСТ Р 53734.3.1. Положение всех элементов в пространстве строго соответствует реальной конструкции.

На рисунке 2.12 представлена форма тока ЭСР при испытательном напряжении 8 кВ, которая соответствует форме, представленной в стандарте.

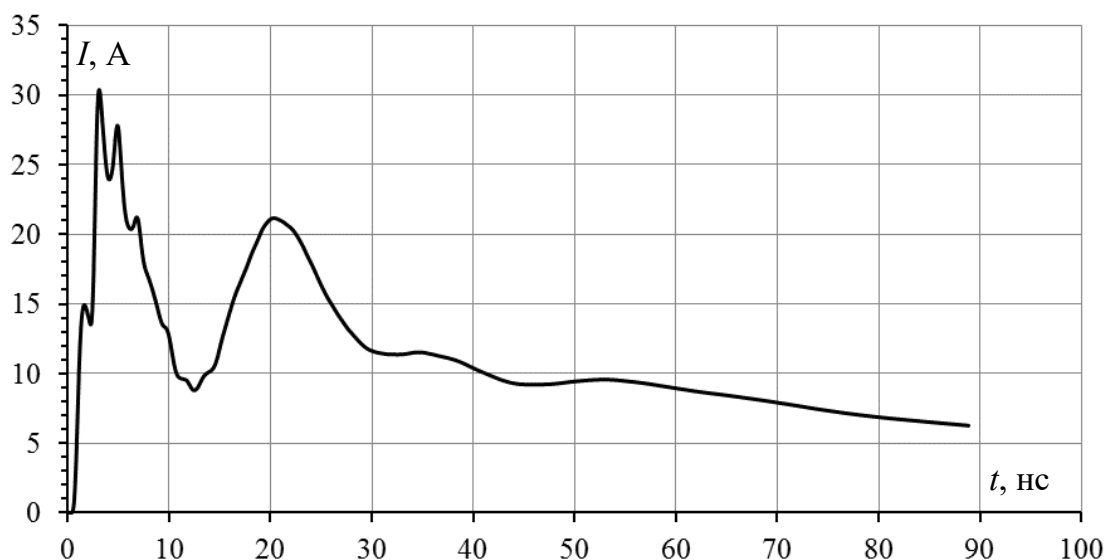


Рисунок 2.12 – Форма тока ЭСР
при испытательном напряжении 8 кВ

Вывод для будущего инженера: проведение испытаний на устойчивость к воздействию ЭСР – это не просто формальность, а критически важный этап, который требует строгого соблюдения стандартизированных методик. Понимание принципов работы устройства и имитатора ЭСР, а также знание различных экспериментальных установок позволяют не только корректно проводить испытания, но и глубоко исследовать механизмы отказов РЭУ. Использование эквивалентных моделей имитаторов в программах для схемотехнического моделирования предоставляет возможность спрогнозировать поведение РЭУ при воздействии ЭСР на этапе проектирования, что значительно экономит время и средства. Помните: надежность РЭУ подтверждается не только расчетами, но и воспроизводимыми экспериментальными результатами, максимально приближенными к реальным условиям эксплуатации.

2.3 Стандарты, применяемые при испытаниях на восприимчивость к воздействию электростатического разряда

2.3.1 Стандарты на методы испытаний и моделирования

В предыдущих подразделах были рассмотрены процесс возникновения ЭСР, модели разряда и испытательное оборудование. Но как инженеру понять, какое значение напряжения подавать на испытуемый объект? Как убедиться, что устройство пройдет сертификацию у заказчика? Ответ на эти вопросы дает стандартизация.

Стандарты в области ЭСР – это правила для разработчиков и инженеров, гарантирующие, что испытания, проведенные в одном месте, дадут те же результаты в другом, т. е. должны быть воспроизводимыми.

Стандартизация при испытаниях на воздействие ЭСР охватывает несколько ключевых направлений.

1. *Стандарты на методы испытаний:* определяют, как именно генерировать, измерять и оценивать воздействие ЭСР на электронные компоненты и РЭУ.

2. *Стандарты на требования к устойчивости:* устанавливают испытательные уровни и критерии соответствия для различных РЭУ.

3. *Стандарты на организацию защиты:* регламентируют предотвращение повреждений чувствительных компонентов при производстве, транспортировке и эксплуатации РЭУ.

В мировой и российской практике сформировалась иерархия стандартов, соответствующих международным нормам и согласованных между собой.

Теоретическое понимание механизмов возникновения, воздействия и методов моделирования ЭСР является фундаментальной основой. Однако для практической инженерной деятельности, обеспечения воспроизводимости результатов, сопоставимости данных и в конечном итоге гарантии надежности и безопасности

РЭУ необходима строгая и единообразная система требований. Эту функцию выполняет стандартизация.

Основу для разработки оборудования, методик и интерпретации результатов закладывают в стандартах, описывающих модели ЭСР (подразд. 1.2). В Российской Федерации для этих целей служит серия национальных стандартов ГОСТ Р 53734.3, разработанных на основе международных стандартов МЭК (IEC) серии 61340-3, каждый из которых определяет вид воздействия ЭСР.

ГОСТ Р 53734.3.1 (Модель человеческого тела): определяет форму и параметры импульса тока (для испытания РЭУ и электронных компонентов используется схема 150 пФ/330 Ом – 100 пФ/1,5 кОм, имитирующая разряд от прикосновения человека). Модель является базовой для оценки устойчивости компонентов к воздействию ЭСР от персонала.

ГОСТ Р 53734.3.2 (Модель механического устройства): описывает разряд от заряженного проводящего объекта (оборудования, инструмента). Модель характеризуется синусоидальным импульсом и применяется для оценки устойчивости к воздействию ЭСР на производстве.

ГОСТ Р 53734.3.3 (Модель заряженного устройства): регламентирует испытания, имитирующие быстрый разряд с предварительно заряженного электронного компонента. Эта модель критически важна для современных интегральных схем, так как характеризуется экстремально коротким временем нарастания (менее 1 нс) и высокой энергией, воздействующей непосредственно на кристалл интегральной схемы.

Данные стандарты определяют не только эквивалентную схему генератора, но и задают требования к измерительному оборудованию (например, полосу пропускания осциллографа), процедурам калибровки и проверки формы импульса, что обеспечивает воспроизводимость результатов в любой аккредитованной лаборатории.

2.3.2 Требования к устойчивости, регламентируемые стандартами, при воздействии электростатического разряда

Оценка устойчивости системы или устройства к воздействию ЭСР осуществляется посредством стандартов, устанавливающих непосредственные требования и методы испытаний. Основным документом является ГОСТ Р 51317.4.2 (МЭК 61000-4-2) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний», в котором описываются методы сертификации большинства видов РЭУ. Стандартом определены два метода испытаний: контактный разряд (предпочтительный и более воспроизводимый) и воздушный разряд. Также стандартом установлены степени жесткости испытаний (уровни испытательного напряжения от ± 2 до ± 15 кВ), которые выбираются исходя из условий эксплуатации. Детально описана организация рабочего места, включая размещение заземляющей пластины, пластины связи для непрямого воздействия и изоляцию испытуемого объекта. Описываются параметры импульса тока имитатора ЭСР (например, первый пик ~ 30 А при 8 кВ, время нарастания 0,8–1 нс), который основан на МЧТ. Предусмотрены критерии оценки результатов (классы А–D) – от нормального функционирования до необратимых повреждений и отказа в целом.

Для РЭУ специального назначения, особенно в военном, промышленном и аэрокосмическом комплексах, применяются более жесткие или специализированные стандарты. Примером является американский военный стандарт MIL-STD-461G, требования CS118 которого основаны на модели человеческого тела, но стандарт может предъявлять особые требования к точкам воздействия разряда и процедурам мониторинга работы РЭУ во время испытаний.

2.3.3 Стандарты для космической техники

Для космического аппарата проблема ЭСР усугубляется спецификой космической среды (вакуум, плазма, радиация), а стандартизация вносит комплексный, системно-инженерный характер.

В основном при испытаниях космических аппаратов на воздействие ЭСР пользуются стандартом ECSS-E-ST-20-06C «Space engineering – Spacecraft charging» Европейского сотрудничества по космической стандартизации.

Данный стандарт требует от инженера:

- *контролировать материалы.* Уменьшить количество диэлектрического материала, применяемого на внешних поверхностях КА, которые могут накапливать заряд и обеспечить электрическую непрерывность всех проводящих частей;

- *защищаться от внутренней электризации.* Высокоэнергетические электроны радиационных поясов могут проникать сквозь алюминиевый корпус и накапливаться в диэлектриках печатных плат внутри космического аппарата. Стандарт предписывает проводить анализ и, при необходимости, увеличивать толщину экранирующих стенок, однако это скажется на массе космического аппарата;

- *бороться с вторичными дугами.* Особенно критично для солнечных батарей. Первичный разряд по поверхности стекла может инициировать электрическую дугу высокой амплитуды между элементами батареи, что приведет к их расплавлению и полной потере энергоснабжения. Стандарт требует проводить испытания образцов солнечных батарей на устойчивость к этому эффекту.

Данный стандарт тесно связан с другими документами ECSS, описывающими космическую среду и требования ЭМС, образуя целостную систему обеспечения надежности.

2.3.4 Стандарты на организацию системы защиты от электростатического разряда

Представьте, что вы спроектировали идеально защищенное устройство, но на заводе оператор без заземляющего браслета взял в руки интегральную схему, и она получила скрытое повреждение. Чтобы этого не произошло, существуют стандарты, регламентирующие работу с чувствительными компонентами на производстве. Базовым является ГОСТ IEC 61340-5-1 «Электро-

статика. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Общие требования». Стандарт определяет основу для создания защищенной зоны, основанной на трех принципах.

1. *Заземление.* Все проводящие поверхности, инструменты и персонал (через браслеты или обувь) должны быть надежно соединены с общим контуром заземления через резисторы, ограничивающие ток.

2. *Нейтрализация.* Диэлектрики (пластиковые корпуса приборов, упаковка) нельзя заземлить. Заряд с них снимают с помощью специальных ионизаторов воздуха.

3. *Экранирующая упаковка.* Все чувствительные к ЭСР компоненты и печатные платы должны транспортироваться и храниться в специальных пакетах или контейнерах, которые работают как «клетка Фарадея», защищая от статического электричества.

Стандарт также требует от предприятия разработать документированную программу управления ЭСР, регулярно обучать персонал и проверять эффективность защитных мер (например, измерять сопротивление заземления браслетов перед началом смены).

Вывод для будущего инженера: современная стандартизация в области ЭСР – это не набор разрозненных документов, а взаимосвязанная система. Она начинается с моделей (модель человеческого тела, механическая модель, модель заряженного устройства), описываемых в ГОСТ Р 53734.3, которые воплощаются в методиках испытаний РЭУ по ГОСТ Р 51317.4.2. Для критических применений (космос, оборона) существуют расширенные и специализированные стандарты (ECSS, MIL-STD). Параллельно действуют стандарты на организацию защиты РЭУ (ГОСТ IEC 61340-5-1), предотвращающие повреждения компонентов на этапе создания. Инженер должен не только понимать процесс возникновения ЭСР и уметь применять модели, но и уверенно ориентироваться в этой системе стандартов, чтобы проектировать надежные устройства, корректно проверять их устойчивость и органи-

зовывать технологические процессы, исключаящие электростатические повреждения.

Вопросы к разделу 2

1. Опишите основные компоненты, входящие в установку для испытания на ЭСР согласно ГОСТ Р 51317.4.2. Каково назначение заземляющей пластины и пластин связи?

2. Поясните различия в методиках проведения испытаний контактным и воздушным способами. Какой из методов считается предпочтительным и почему?

3. Для каких целей при исследовании восприимчивости печатных плат к ЭСР применяется установка с ТЕМ-камерой? Какие параметры испытуемого объекта можно оценить с ее помощью?

4. Опишите устройство и принцип работы экспериментальной установки для измерения эффективности экранирования материалов при воздействии ЭСР.

5. Какие датчики используются в установке для исследования воздействия ЭСР на кабели? Какую информацию дает комплексное измерение электрического и магнитного полей?

6. Какую роль в системе стандартизации ЭСР играет серия стандартов ГОСТ Р 53734.3? Назовите три модели, описанные в этих стандартах, и укажите их ключевые элементы эквивалентных схем.

7. Чем отличаются требования к устойчивости РЭУ к ЭСР, изложенные в ГОСТ Р 51317.4.2, от требований военного стандарта MIL-STD-461G? Приведите пример различия в уровнях испытательного напряжения.

8. Какие три основных принципа организации защиты от ЭСР на производстве регламентирует ГОСТ 61340-5-1? Поясните, почему недостаточно просто заземлить все проводящие поверхности.

3 ОЦЕНКА ВОСПРИИМЧИВОСТИ КОМПОНЕНТОВ К ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМУ РАЗРЯДУ

3.1 Оценка восприимчивости электронных компонентов к контактному воздействию электростатического разряда

3.1.1 Общая методика: от кристалла к печатной плате

Одной из ключевых задач инженера, занимающегося проектированием надежных РЭУ, является не только выбор компонентов с заявленной устойчивостью к воздействию ЭСР, но и умение точно спрогнозировать, как компонент будет вести себя в реальной конструкции при воздействии разряда. При этом лабораторные испытания готового изделия – это необходимый, но зачастую дорогой и поздний этап. Гораздо эффективнее прогнозировать устойчивость на предварительных этапах проектирования, используя современные методы численного и схемотехнического моделирования.

Стандартные схемотехнические модели компонентов, предоставляемые производителями, зачастую не учитывают целый ряд паразитных параметров, возникающих при интеграции компонента в устройство. К ним относятся паразитные емкость и индуктивность посадочного места на печатной плате, паразитные связи между выводами корпуса, влияние самих печатных проводников и пр. При этом паразитные параметры могут существенно повлиять на устойчивость компонента к ЭСР.

Поэтому для получения достоверных результатов необходимо создавать усовершенствованные модели компонентов и их межсоединений: от кристалла до внешних проводников на печатной плате. В качестве примера рассмотрим создание модели транзистора, а также методику оценки его восприимчивости к воздействию ЭСР. Методика включает в себя ряд этапов (рисунок 3.1).

1. Создание усовершенствованной модели транзистора

Определяется математическое описание модели кристалла транзистора, используя модели Гуммеля – Пуна [49] для биполяр-

ного транзистора (БТ) или Шихмана – Ходжеса [50] для полевого транзистора и пр.

Модель кристалла транзистора дополняется паразитными параметрами посадочного места транзистора на печатной плате со слоем припоя, а также паразитными параметрами электродов и межсоединений внутри корпуса. При этом для некоторых моделей транзисторов, предоставляемых производителями, могут быть учтены паразитные параметры электродов, поэтому для таких моделей учитывается влияние только посадочного места.

Учитываются паразитные параметры межсоединения в виде линий передачи на печатной плате, подключенные к электродам транзистора. Для этого создаются геометрические и электростатические модели и вычисляются их собственная и взаимная емкости.

2. *Формирование комплексной эквивалентной схемы.* Создается схемотехническая модель (SPICE-модель) в виде эквивалентной электрической схемы, содержащая модель кристалла, вычисленные емкости межсоединений (электродов и посадочного места транзистора, а также его межсоединений на печатной плате). Назначаются порты на эквивалентной схеме и присваиваются параметры, позволяющие моделировать транзистор как единый компонент.

3. *Подключение модели источника ЭСР.* Подключается к эквивалентной электрической схеме схемотехническая модель источника ЭСР, имитирующая его контактное воздействие.

4. *Проведение анализа и оценка устойчивости.* Вычисляется ВАХ транзистора без источника ЭСР и с ним. По полученным результатам оценивается его чувствительность к контактному воздействию ЭСР.

Методика позволяет инженерам-разработчикам на этапе проектирования выявить критические узлы, уязвимые к воздействию ЭСР, оценить эффективность различных схем защиты и оптимизировать топологию печатной платы, что позволит существенно повысить надежность РЭУ.

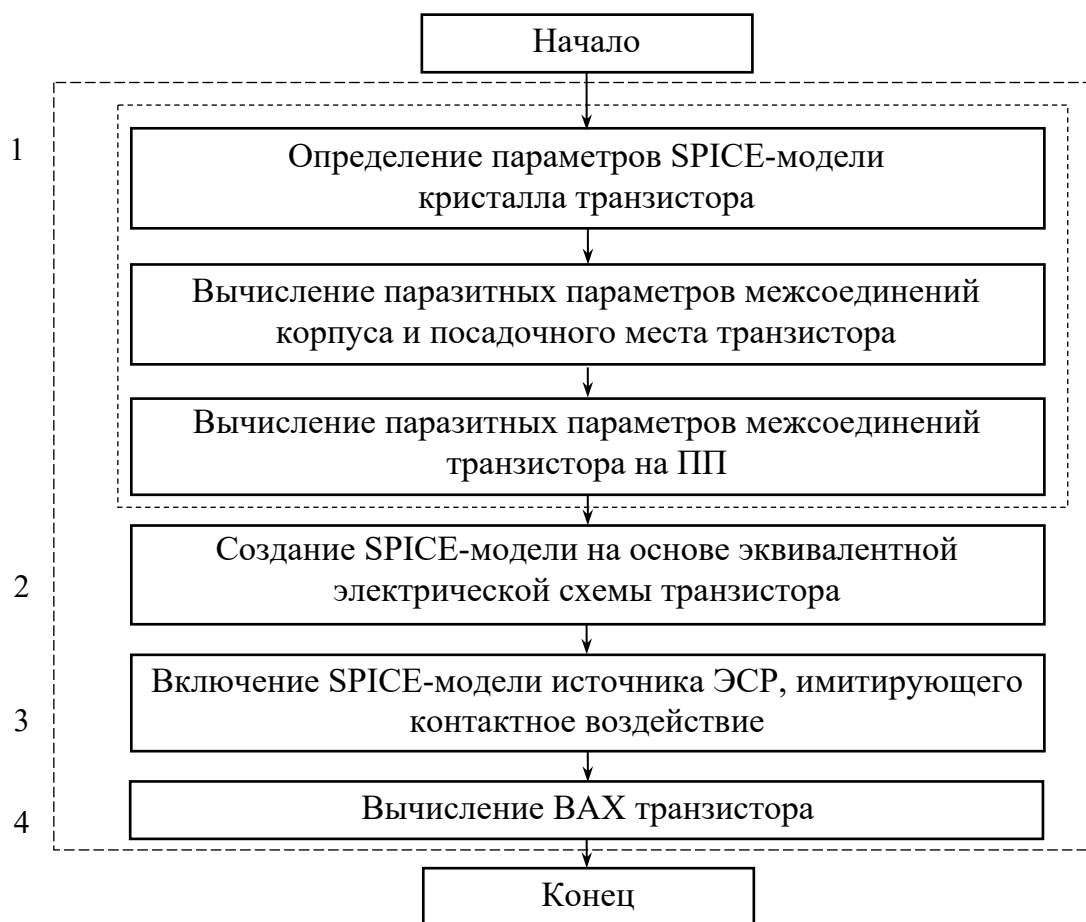


Рисунок 3.1 – Схема методики оценки восприимчивости транзистора к контактному воздействию ЭСР

3.1.2 Модели межсоединений

Для того чтобы учесть влияние печатного монтажа на устойчивость транзистора к ЭСР, необходимо уметь описывать паразитные параметры проводников, соединяющих компоненты. Рассмотрим подходы к построению таких моделей.

Типы линий передачи на печатной плате

Печатные проводники редко бывают изолированы от окружающих элементов. Они проходят над слоями земли, рядом с другими сигнальными цепями, пересекаются под разными углами. Для описания таких структур в электронике используются модели линий передачи. В зависимости от конфигурации различают несколько основных типов (рисунок 3.2).

Микрополосковая линия (МЛП) – одиночный проводник, расположенный над сплошным слоем земли. Это наиболее распро-

страненный случай, характерный для большинства сигнальных и питающих цепей.

Связанная линия передачи (СЛП) – два проводника, расположенные параллельно над слоем земли. Такая ситуация встречается, например, в дифференциальных парах или когда две дорожки расположены рядом на печатной плате.

Копланарная линия передачи (КЛП) – проводник, окруженный полигонами земли на том же слое. Такая топология часто используется в высокочастотных и сверхвысокочастотных цепях.

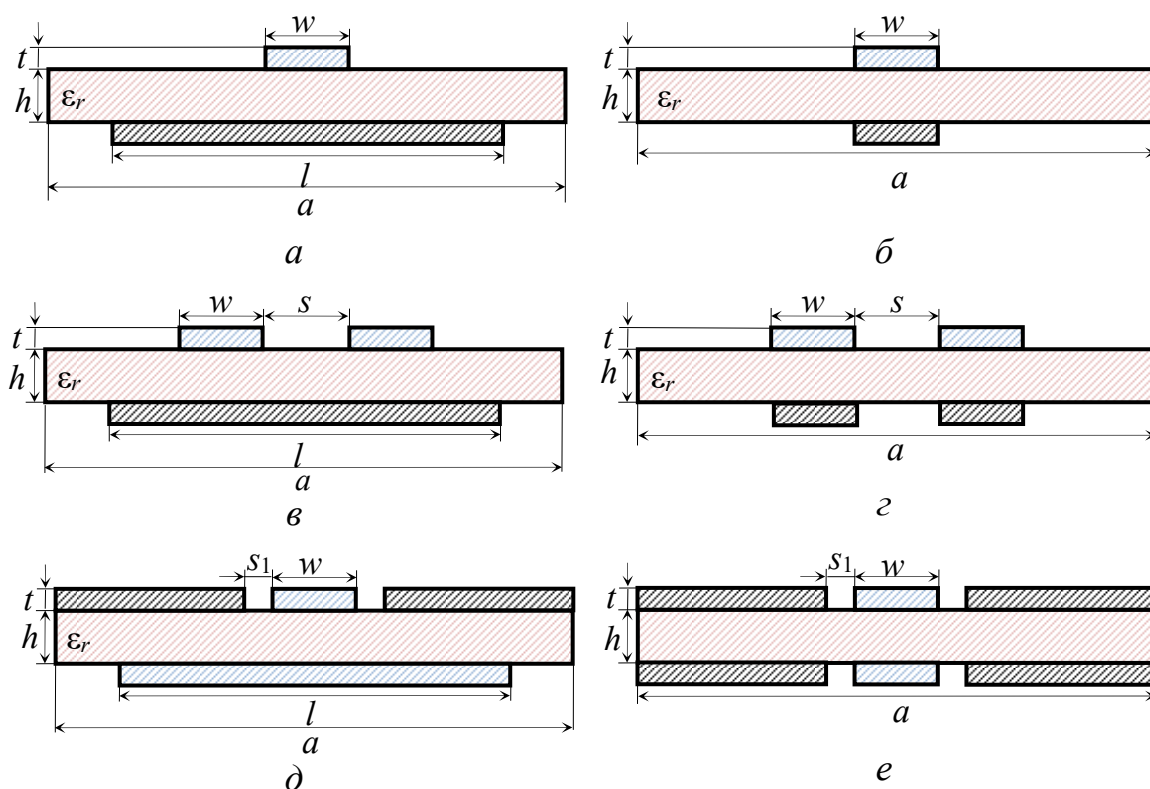


Рисунок 3.2 – Геометрические модели МЛП (а, б), СЛП (в, г) и КЛП (д, е) с перпендикулярно (а, в, д) и параллельно (б, г, е) расположенными проводниками

Пример реальной печатной платы показан на рисунке 3.3, из которого видно, что проводники могут располагаться параллельно, пересекаться под разными углами, проходить на разных слоях. Для каждой такой конфигурации паразитные связи между проводниками различны.

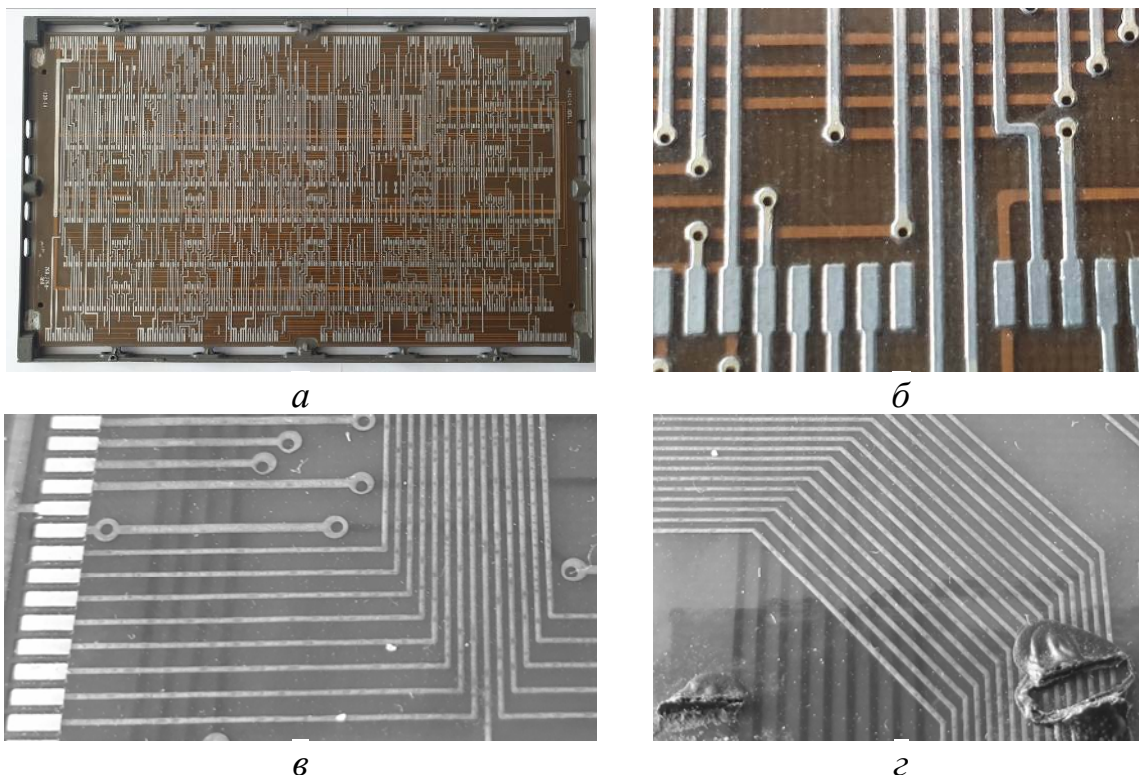


Рисунок 3.3 – Припрессованная к металлическому основанию печатная плата блока космического аппарата (а), ее увеличенный фрагмент (б) и расположение проводников на печатной плате под 90° (в) и 45° (г)

Геометрические параметры линий передачи

Для того чтобы рассчитать паразитные емкости и индуктивности печатных проводников, необходимо знать их геометрические размеры и свойства материала подложки.

В качестве примера рассмотрим параметры, характерные для типовой двухслойной печатной платы на основе стеклотекстолита (материал с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 4,5$), который широко применяется в отечественной электронике.

Для МЛП (см. рисунки 3.2, а, б) основными геометрическими параметрами являются:

ширина проводника w – обычно выбирается из условия обеспечения требуемого волнового сопротивления (для согласования с измерительным трактом часто используется $Z_0 = 50 \text{ Ом}$);

толщина проводника t ;

толщина подложки h ;

длина линии l – определяется топологией конкретного устройства.

Для СЛП (см. рисунки 3.2, в, г) дополнительным параметром является расстояние между проводниками s – чем меньше расстояние, тем сильнее связь и взаимное влияние друг на друга.

Для КЛП (см. рисунки 3.2, д, е) ключевыми параметрами выступают ширина центрального проводника и зазор до боковых полигонов земли.

Важно отметить, что взаимное расположение проводников (параллельное или перпендикулярное) существенно влияет на величину паразитных связей. При параллельном расположении между проводниками возникает значительная взаимная емкость, при перпендикулярном она минимальна.

Электрические параметры линий передачи

Для количественной оценки паразитных связей необходимо знать значения электрических параметров линии передачи, таких как емкость и индуктивность. Эти параметры можно вычислить, решая электростатическую задачу для заданной конфигурации. Именно данные параметры станут определять, как импульс ЭСР будет распределяться между разными цепями печатной платы. На рисунке 3.4 в качестве примера показаны электростатические модели, созданные в ПО TUSUR.EMC, а также вычислены значения емкостей данных линий передачи.

Для оценки влияния геометрических параметров на электрические характеристики линий передачи проанализированы емкостные параметры МЛП, СЛП и КЛП при изменении толщины диэлектрика h .

Для МЛП (рисунок 3.5) увеличение толщины подложки h от 0,2 до 2 мм приводит к уменьшению емкости между активным и опорным проводниками. Наибольшее изменение наблюдается при параллельном расположении проводников: емкость уменьшается в 7,4 раза (с 33,8 до 4,6 пФ).

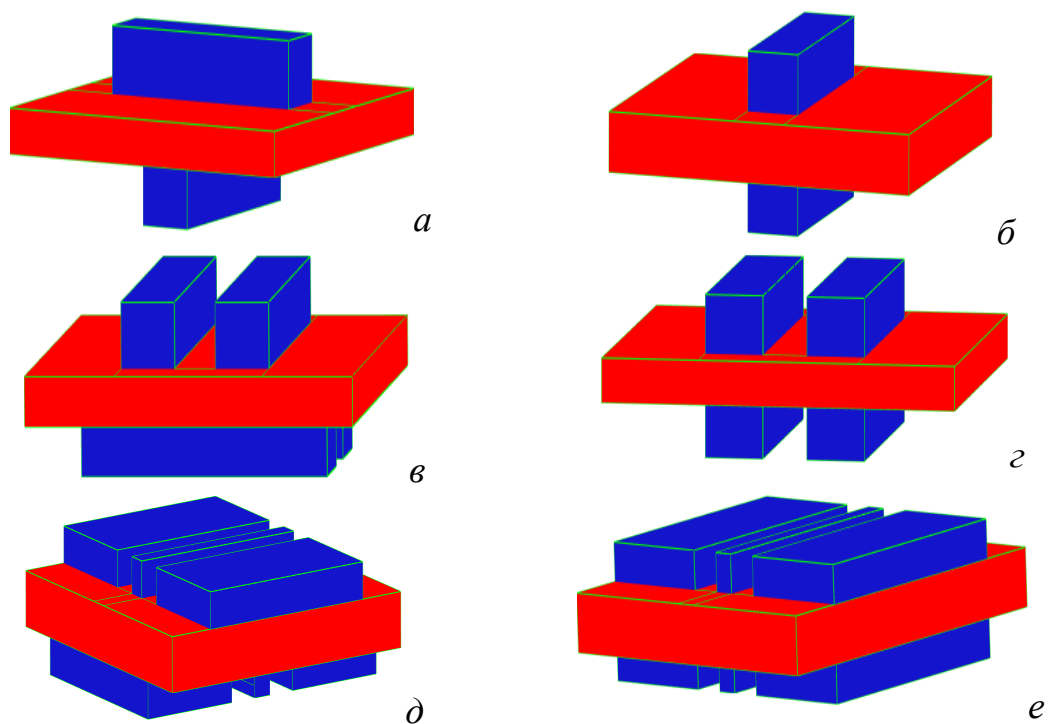


Рисунок 3.4 – Электростатические модели МЛП (а, б), СЛП (в, г) и КЛП (д, е) с перпендикулярно и параллельно расположенными проводниками

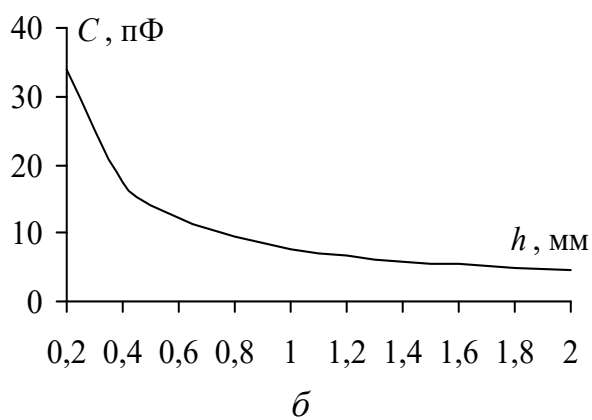
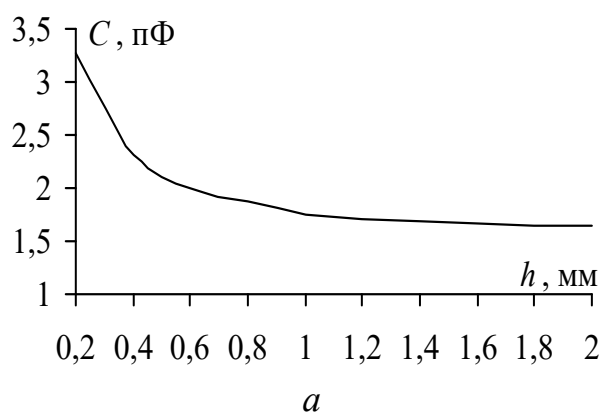


Рисунок 3.5 – Зависимости емкости C от h при перпендикулярно (а) и параллельно (б) расположенных проводниках МЛП

Для СЛП (рисунок 3.6) рост h также уменьшает собственные (C_{11} , C_{22}) и увеличивает взаимные (C_{12}) емкости проводников. Это объясняется ослаблением электрической связи каждого проводника с землей и усилением связи между ними.

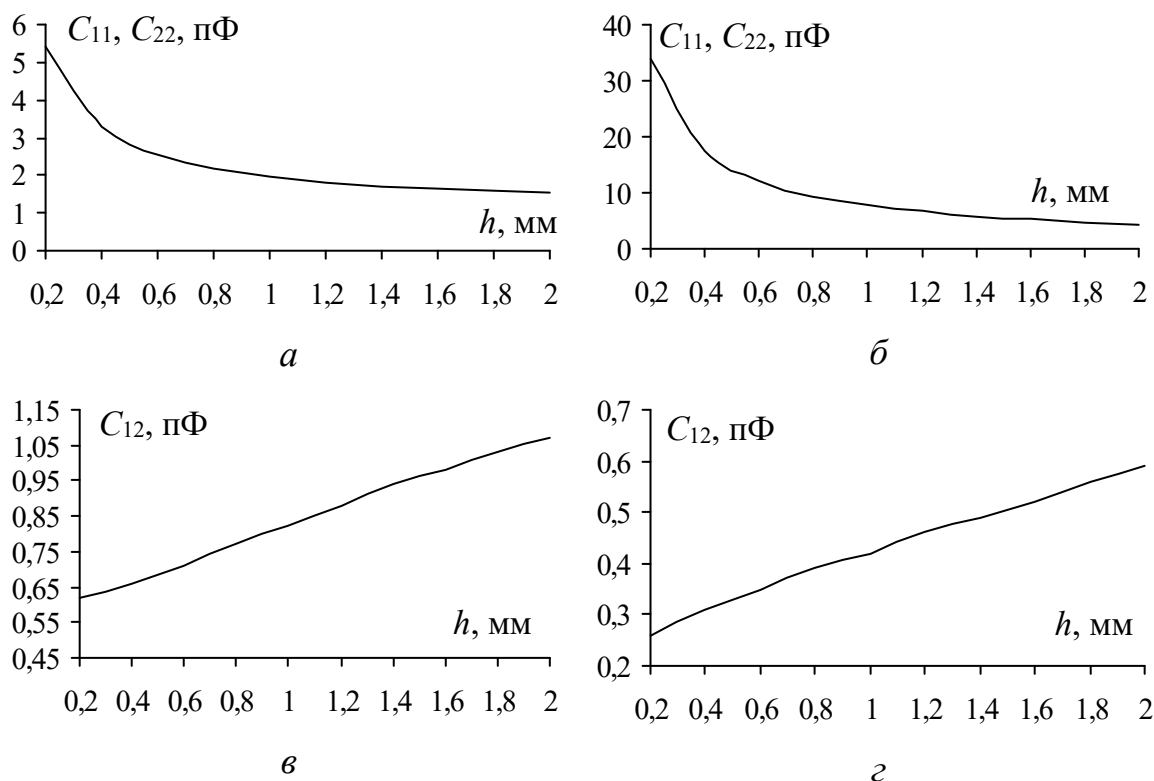


Рисунок 3.6 – Зависимости собственных (a , $б$) и взаимных ($в$, $г$) емкостей C от h при перпендикулярно (a , $в$) и параллельно ($б$, $г$) расположенных проводниках

Для КЛП (рисунок 3.7) выявлена интересная особенность: при параллельном расположении проводников собственные емкости с ростом h увеличиваются, а при перпендикулярном уменьшаются. Это связано с перераспределением электрического поля в сложной структуре КЛП.

Из рисунков 3.5–3.7 видно, что паразитные емкости межсоединений сильно зависят от их геометрии и взаимного расположения. Пренебрежение этими параметрами на этапе проектирования может привести к неучтенным паразитным связям между цепями, что критично при оценке устойчивости РЭУ к ЭСР.

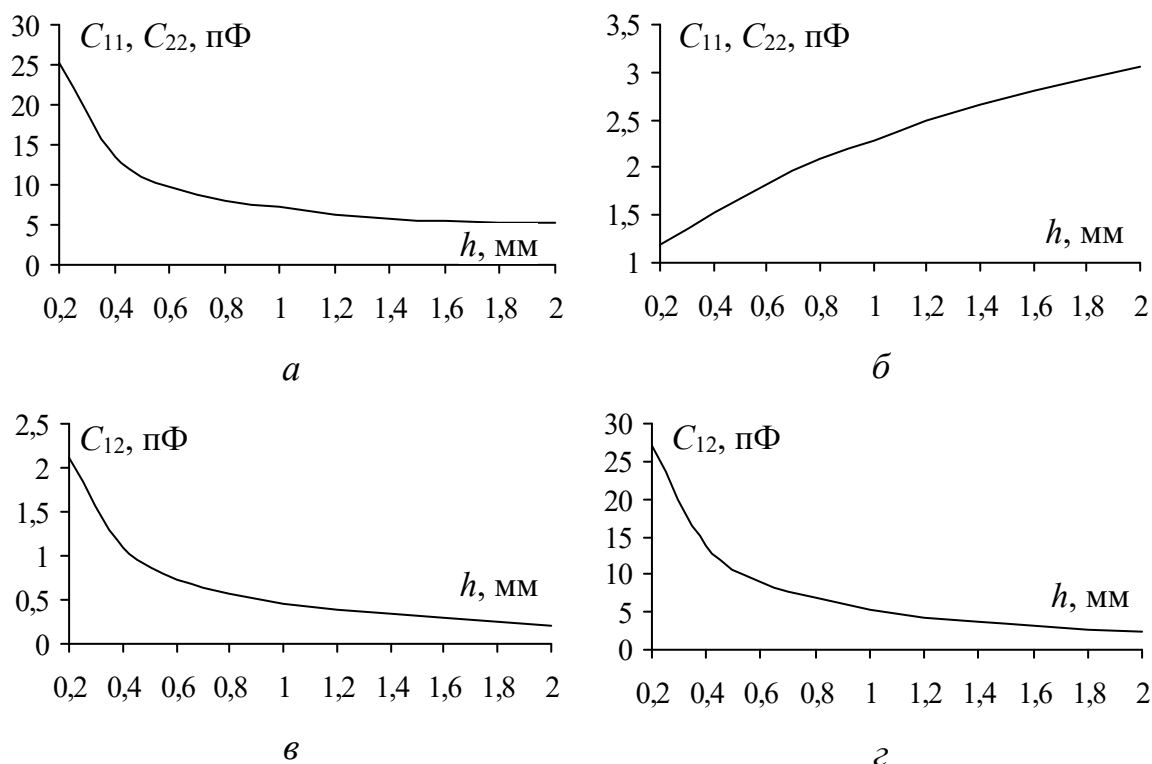


Рисунок 3.7 – Зависимости собственных (а, б) и взаимных (в, г) емкостей от h при перпендикулярно (а, в) и параллельно (б, г) расположенных проводниках

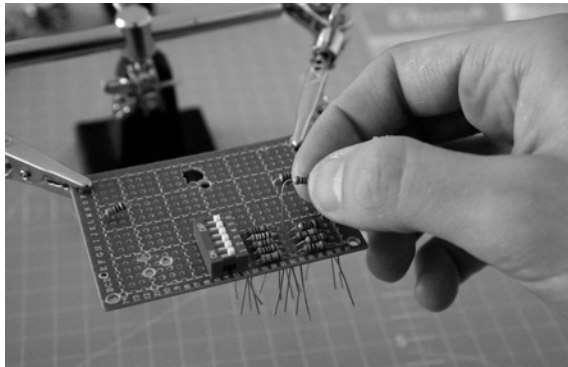
Посадочные места транзистора

Особый интерес представляют посадочные места – участки печатной платы, к которым припаиваются выводы транзистора. Именно здесь паразитные параметры оказывают наиболее существенное влияние на устойчивость компонента. В зависимости от способа монтажа различают:

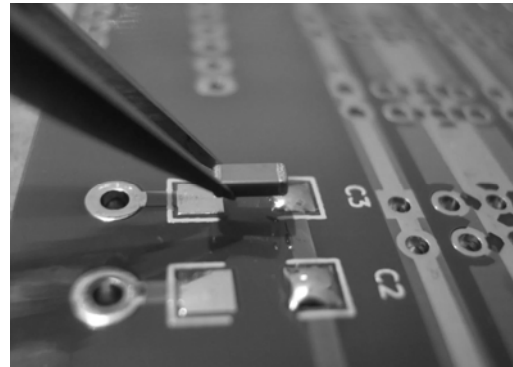
- монтаж в отверстие, когда выводы компонентов устанавливаются в металлизированные отверстия и запаиваются с обратной стороны (рисунок 3.8,а);
- поверхностный монтаж, когда компонент припаивается к контактным площадкам на поверхности печатной платы (рисунок 3.8,б).

В настоящее время преимущественно используется поверхностный монтаж, позволяющий достичь более высокой плотности размещения компонентов. В качестве примера на рисунке 3.9 показаны геометрические модели посадочных мест для четырех распространенных типов корпусов транзисторов: ТО-220 – корпус мощного транзистора, часто применяемый в силовых цепях (ри-

сунок 3.9,а); TO-263 – планарная версия корпуса TO-220 для поверхностного монтажа (рисунок 3.9,б); SOT-89 – компактный корпус для маломощных транзисторов (рисунок 3.9,в); SOT-23-3 – миниатюрный корпус для маломощных транзисторов (рисунок 3.9,г).



а



б

Рисунок 3.8 – Монтаж электронного компонента в отверстие (*а*) и поверхностный монтаж (*б*)

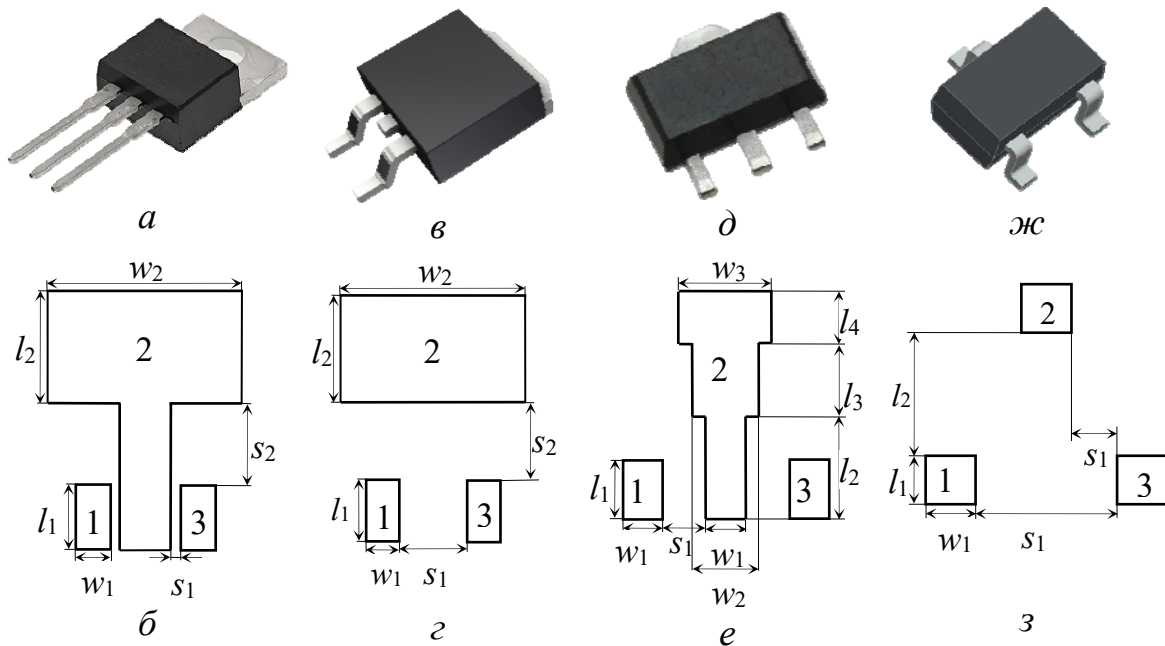


Рисунок 3.9 – Геометрические модели посадочных мест транзисторов в корпусах TO-220 (*а, б*), TO-263 (*в, г*), SOT-89 (*д, е*) и SOT-23-3 (*ж, з*)

Геометрические размеры посадочных мест для каждого типа корпуса приведены в таблице 3.1. Как видно из таблицы, размеры существенно различаются, что, безусловно, сказывается на паразитных емкостях.

Таблица 3.1 – Значения геометрических параметров посадочных мест, мм

Параметр	ТО-220	ТО-263	SOT-89	SOT-23
l_1	5	3,81	1,2	0,9
l_2	15	8,89	2,16	1,3
l_3	–	–	1,1	–
l_4	–	–	1	–
w_1	2	2,08	0,8	0,8
w_2	11	11,43	1,3	–
w_3	–	–	1,94	–
s_1	0,5	3	0,7	0,2
s_2	5	5,08	–	1,2
t_n	0,5	0,5	0,35	0,11

Особое внимание необходимо уделить расчету матриц емкостей посадочных мест, так как они непосредственно влияют на напряжение, приложенное к выводам транзистора. Большинство посадочных мест под электроды корпусов транзисторов имеют три печатных проводника. Поэтому емкостная матрица имеет вид

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}, \Phi.$$

Поскольку исследование $\mathbf{C}$ посадочных мест направлено на повышение устойчивости к воздействию ЭСР полевого и биполярного транзисторов, то будем считать, что диагональные коэффициенты C_{11} , C_{22} и C_{33} являются собственными емкостями затвора (базы), стока (коллектора) и истока (эмиттера) соответственно, тогда как внедиагональные C_{12} (C_{21}), C_{13} (C_{31}) и C_{23} (C_{32}) – взаимными емкостями затвор-сток (база-коллектор), затвор-исток (база-эмиттер) и сток-исток (коллектор-эмиттер) соответственно.

Влияние слоя припоя

Важным фактором, который нужно учитывать, является слой припоя. При пайке компонента на контактных площадках образуется небольшое утолщение металла, которое изменяет конфигурацию проводников и, следовательно, их емкостные характеристики. Существуют трафаретный и дисперсный методы нанесения припоя при пайке компонентов. Трафаретный метод позволяет

наносить припой толщиной до 650 мкм, а дисперсный – толщиной от 750 мкм. При этом после воздействия температуры формируется слой пайки толщиной 200–250 мкм [51]. В таблице 3.2 приведены матрицы емкостей посадочных мест, вычисленные с учетом слоя припоя толщиной 200 мкм и без него.

Таблица 3.2 – Матрицы емкостей посадочных мест, вычисленные с учетом слоя припоя на электродах и без него

Корпус	Припой	C, фФ						$\delta_{\max}$, %
		МоМ			МКЭ			
SOT-89	Нет	$\begin{bmatrix} 92,6 & 26,4 & 1,6 \\ 26,4 & 370,3 & 26,8 \\ 1,6 & 26,8 & 89,2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 103,2 & 27,2 & 1,4 \\ 27,2 & 354,3 & 27,2 \\ 1,4 & 27,2 & 103,3 \end{bmatrix}$			14,3		
	Есть	$\begin{bmatrix} 111,1 & 51,8 & 3,3 \\ 51,8 & 408,8 & 51,8 \\ 3,3 & 51,8 & 108,5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 123,4 & 47,9 & 3,1 \\ 47,9 & 394,8 & 47,9 \\ 3,1 & 47,9 & 123,6 \end{bmatrix}$			12,2		
SOT-23-3	Нет	$\begin{bmatrix} 89,4 & 4,8 & 7,4 \\ 4,8 & 91 & 4,8 \\ 7,4 & 4,8 & 89,4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 96,8 & 4,6 & 7,3 \\ 4,6 & 99,1 & 4,6 \\ 7,3 & 4,6 & 96,7 \end{bmatrix}$			8,2		
	Есть	$\begin{bmatrix} 94,7 & 7,5 & 11,3 \\ 7,5 & 97,2 & 7,5 \\ 11,3 & 7,5 & 94,6 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 109,1 & 6,6 & 10,4 \\ 6,6 & 112,3 & 6,6 \\ 10,4 & 6,6 & 109,1 \end{bmatrix}$			13,6		
TO-220	Нет	$\begin{bmatrix} 445,2 & 127,2 & 4,1 \\ 127,2 & 5866,5 & 127,2 \\ 4,1 & 127,2 & 445,2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 481,6 & 138 & 3,6 \\ 138 & 5972 & 138 \\ 3,6 & 138 & 480,5 \end{bmatrix}$			13,8		
	Есть	$\begin{bmatrix} 456,6 & 204,6 & 6,6 \\ 204,6 & 6082,7 & 204,6 \\ 6,6 & 204,6 & 456,6 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 516,9 & 219 & 5,8 \\ 219 & 6253,9 & 219 \\ 5,8 & 219 & 517 \end{bmatrix}$			13		
TO-263	Нет	$\begin{bmatrix} 426,2 & 6,1 & 11,3 \\ 6,1 & 3373,5 & 6,1 \\ 11,3 & 6,1 & 426,2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 500 & 5,3 & 11,5 \\ 5,3 & 3536,9 & 5,3 \\ 11,5 & 5,3 & 504,2 \end{bmatrix}$			14,8		
	Есть	$\begin{bmatrix} 471,3 & 12,1 & 18,3 \\ 12,1 & 3566,3 & 12,1 \\ 18,3 & 12,1 & 471,3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 517,7 & 10,6 & 17,4 \\ 10,6 & 3685,5 & 10,6 \\ 17,4 & 10,6 & 517,5 \end{bmatrix}$			14,2		

Наличие слоя припоя толщиной 200 мкм приводит к значительному (до 106% для SOT-89) увеличению взаимных емкостей между выводами, особенно между затвором и истоком (базой и эмиттером). Это связано с увеличением площади перекрытия и уменьшением зазора между проводящими поверхностями. Рост собственных емкостей при этом не превышает 20%.

Зависимости взаимных емкостей от толщины припоя ($t_{\text{п}}$) линейно характеризуются (рисунок 3.10), что позволяет экстраполировать данные для различных технологических процессов пайки.

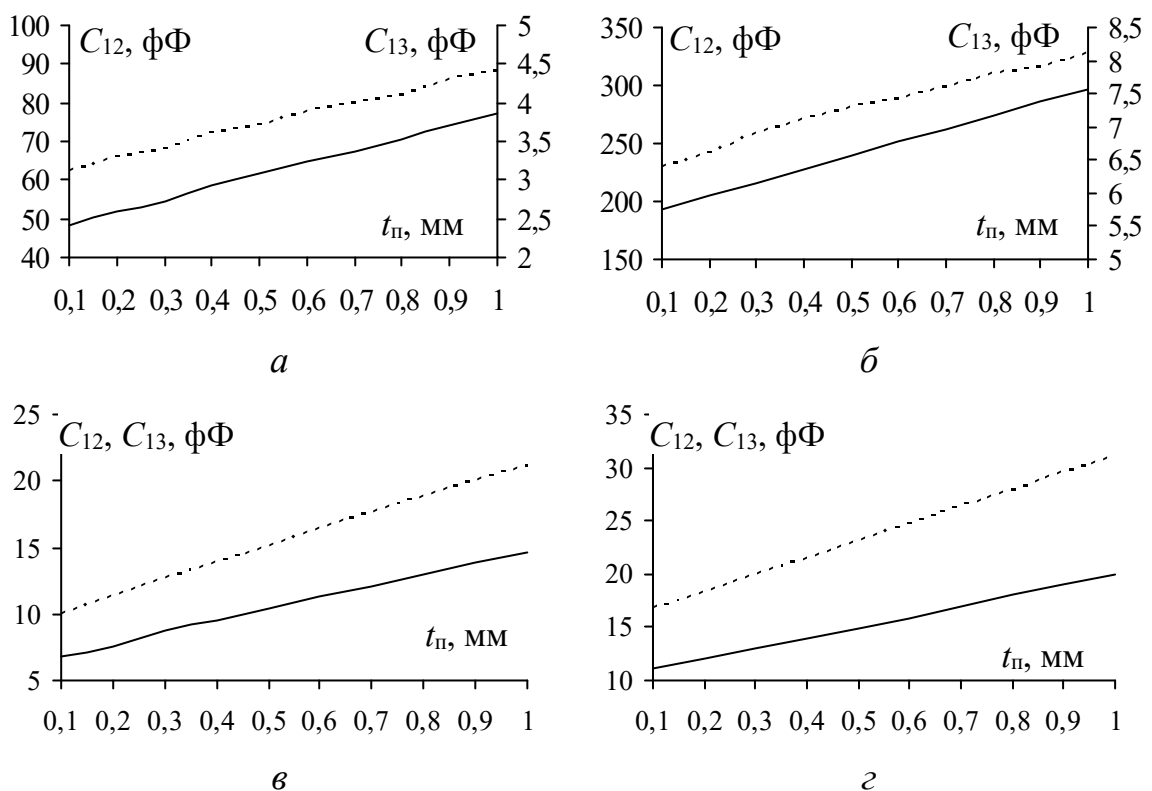


Рисунок 3.10 – Зависимости C_{12} (—) и C_{13} (---) от $t_{\text{п}}$ для корпусов SOT-89 (а), TO-220 (б), SOT-23-3 (в) и TO-263 (г)

Внутренние соединения в корпусе транзистора

Помимо посадочного места на плате, необходимо учитывать также соединения внутри самого корпуса транзистора. На рисунке 3.11 показан вид транзистора без корпуса. Здесь хорошо видны кристалл полупроводника, проводники, соединяющие кристалл с внешними выводами (обычно это тонкие золотые или алюминиевые проволочки) и электроды, выходящие из корпуса.

Эти внутренние проводники также обладают собственными индуктивностью и емкостью, а также создают емкостные связи между выводами.

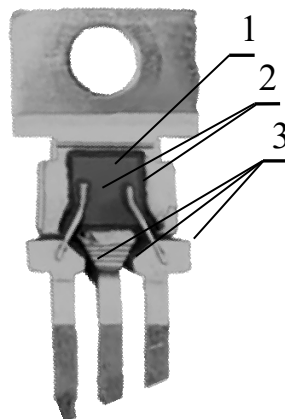


Рисунок 3.11 – Вид транзистора без корпуса: 1 – кристалл; 2 – межсоединения; 3 – электроды

На рисунке 3.12 показана геометрическая модель этих внутренних соединений. Модель включает электроды 1 в корпусе и проводники межсоединений 2, необходимые для контакта электродов с кристаллом 3. На рисунке 3.13 представлены соответствующие ей электростатические модели.

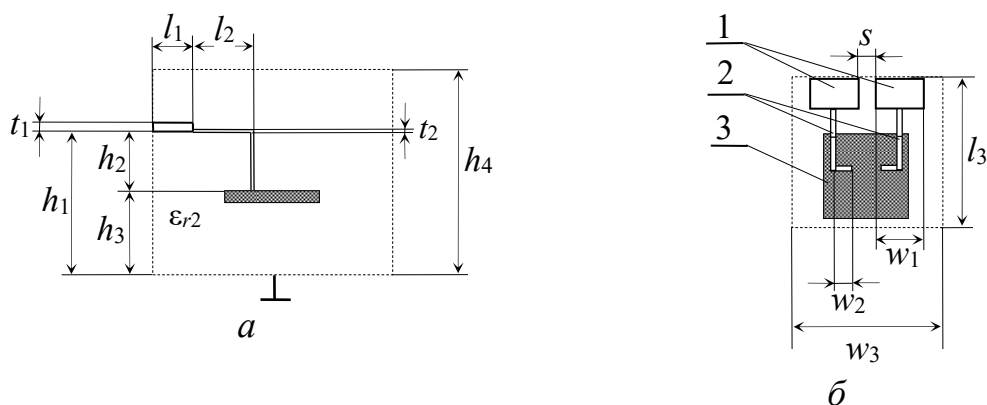


Рисунок 3.12 – Общий вид геометрической модели межсоединения «электрод–кристалл»: *a* – вид сбоку; *б* – вид сверху

Учет внутренней структуры корпуса особенно важен, поскольку импульс ЭСР содержит высокочастотные составляющие

в спектре. На таких частотах даже короткие внутренние проводники проявляют свои паразитные свойства и могут влиять на распределение энергии разряда.

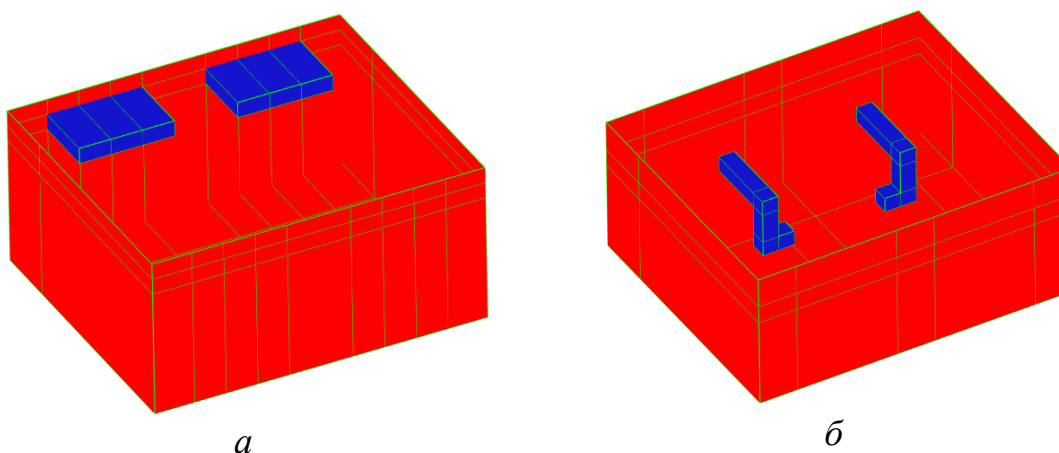


Рисунок 3.13 – Электростатические модели электродов в корпусе транзистора (а) и межсоединений для контакта электродов с кристаллом (б)

В результате для корректной оценки устойчивости транзистора к ЭСР необходимо располагать моделями, описывающими все уровни конструкции: от кристалла до внешних проводников на печатной плате.

3.1.3 Схемотехническая модель воздействия электростатического разряда на компонент

Усовершенствованная схемотехническая модель транзистора

После анализа паразитных параметров межсоединений необходимо объединить их в единую модель транзистора. На рисунке 3.14 представлены модели биполярного и полевого транзисторов, включающие три уровня.

1. *Уровень кристалла.* Используется физически обоснованная модель кристалла (например, модель Шихмана – Ходжеса для ПТ или Гуммеля – Пуна для БТ), описывающая основные статические вольт-амперные характеристики транзистора.

2. *Уровень корпуса.* К модели кристалла добавляются паразитные элементы, связанные с конструкцией корпуса, например

индуктивность внутренних проводников от кристалла до внешних выводов корпуса и емкостные связи между выводами внутри корпуса.

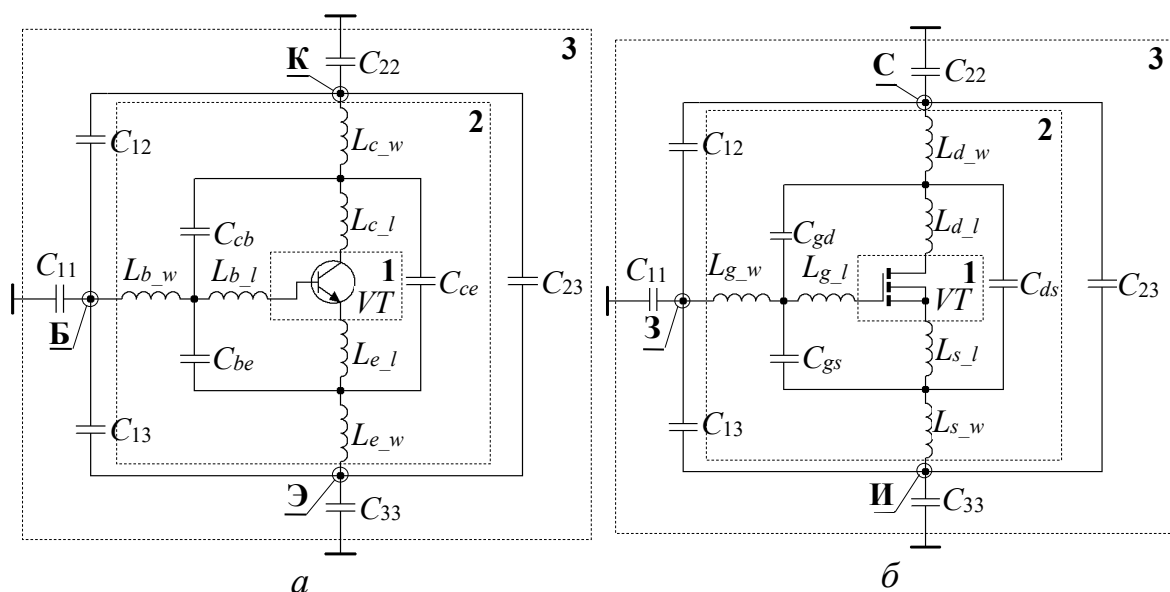


Рисунок 3.14 – Схематехнические модели БТ (а) и ПТ (б) с учетом межсоединений

3. *Уровень монтажа на печатную плату.* На этом уровне учитывается влияние печатного монтажа. Емкость посадочного места рассчитывается на основе электростатических моделей и включает емкость между контактными площадками и емкость относительно земли.

Корректность модели транзистора может быть проверена путем сравнения рассчитанных статических характеристик с данными технической документации [52]. В качестве примера на рисунке 3.15 показаны вычисленные проходная и выходная вольт-амперные характеристики мощного МОП-транзистора IRFZ46N в корпусе ТО-220.

Как видно из рисунка 3.15, схематехническая модель транзистора с учетом межсоединений соответствует данным производителя, что подтверждает корректность используемого подхода. Учет паразитных элементов позволяет использовать данную модель не только для анализа статических режимов, но и для исследования динамических процессов, в том числе воздействия ЭСР.

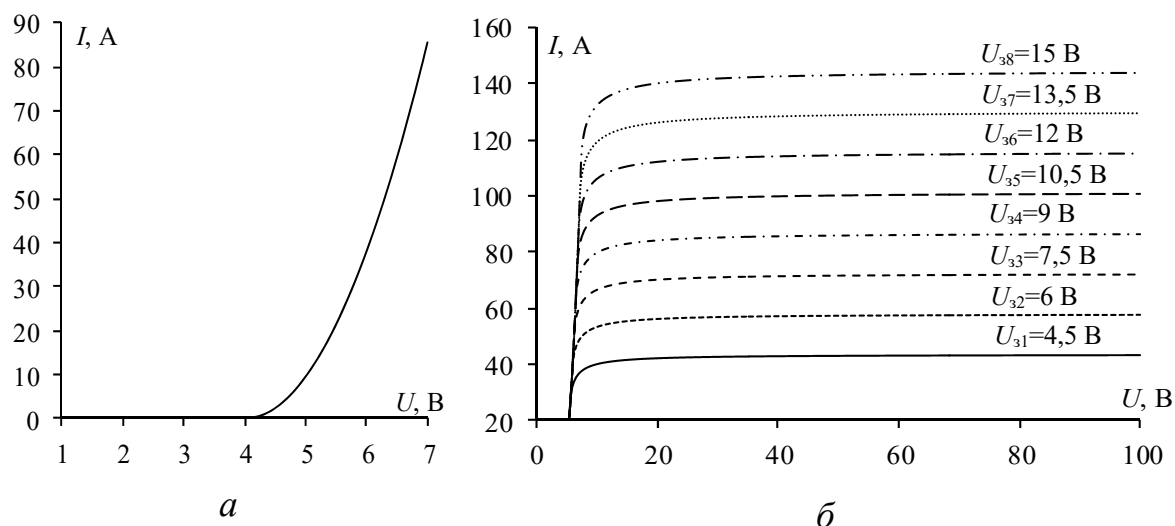


Рисунок 3.15 – Вычисленные проходная (а) и выходная (б) ВАХ схемотехнической модели МОП-транзистора IRFZ46N в корпусе TO-220

Выбор модели источника ЭСР

Для достоверного моделирования воздействия ЭСР на компонент недостаточно иметь точную модель самого компонента. Необходимо также адекватно представить источник воздействия – имитатор ЭСР. Как показано в разделе 1, форма и параметры разрядного тока существенно различаются в зависимости от модели разряда (человеческого тела, механической, заряженного устройства и др.). Поэтому выбор и верификация модели генератора определяют точность всех последующих расчетов.

На основе данных, представленных в подразд. 2.1, для практических расчетов может быть использована схемотехническая модель, показавшая наилучшее соответствие с эталонными параметрами. В результате сравнения (см. таблицу 2.2 и рисунок 2.8) установлено, что модель из [48] демонстрирует минимальное отклонение ключевых параметров (максимального тока $I_{\max}$ и времени нарастания t_n) от измеренной формы тока имитатора ONYX 30 и требований стандарта. Данная модель является компромиссной между точностью воспроизведения формы тока и простотой схемы.

Полная схема для моделирования

На основе верифицированной схемотехнической модели имитатора ЭСР, схемотехнической модели транзистора с учетом

межсоединений и линий передачи может быть создана комплексная модель для анализа устойчивости транзистора к воздействию ЭСР (рисунок 3.16). Данная модель позволяет вычислять не только токи, протекающие через компонент, но и напряжения, возникающие на его внутренних структурах (например, напряжение затвор-исток $U_{зи}$), которые непосредственно приводят к пробое.

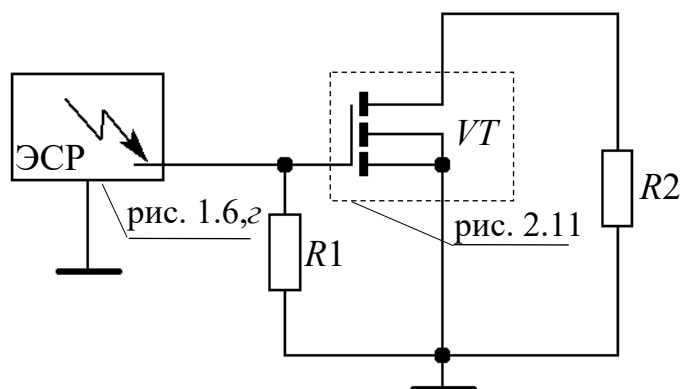


Рисунок 3.16 – Принципиальная электрическая схема воздействия ЭСР на транзистор

3.1.4 Прогнозирование устойчивости транзистора к воздействию электростатического разряда

Описанные модели транзисторов и генератора ЭСР позволяют перейти от анализа паразитных параметров к прямому прогнозированию последствий воздействия ЭСР на транзистор. Целью данного этапа является количественная оценка того, как емкости межсоединений влияют на уровень напряжения ЭСР, приводящий к отказу компонента, на примере полевого транзистора серии IRF.

Ключевым параметром, определяющим устойчивость полевого транзистора к ЭСР, является напряжение пробоя $U_{пр}$ подзатворного диэлектрика. Для транзисторов серии IRF, согласно [53], напряжение между затвором и истоком $U_{зи}$ не должно превышать 80 В. Задача моделирования – определить, при каком напряжении ЭСР напряжение $U_{зи}$ достигнет критического значения.

Моделирование проводилось для двух мощных МОП-транзисторов: IRFZ46N и IRF4095 SPbF. Для каждого из них в программе для схемотехнического моделирования были собраны

две схемы: с усовершенствованной моделью транзистора, учитывающей паразитные емкости межсоединений, и аналогичная модель без учета емкостей межсоединений (для сравнения).

Напряжение на имитаторе ЭСР плавно увеличивалось, и на каждом шаге фиксировалось пиковое значение напряжения затвор-исток $U_{ЗИ}$. Это напряжение является ключевым для пробоя подзатворного диэлектрика. На рисунке 3.17 представлены зависимости $U_{ЗИ}$ от напряжения ЭСР, полученные в результате моделирования.

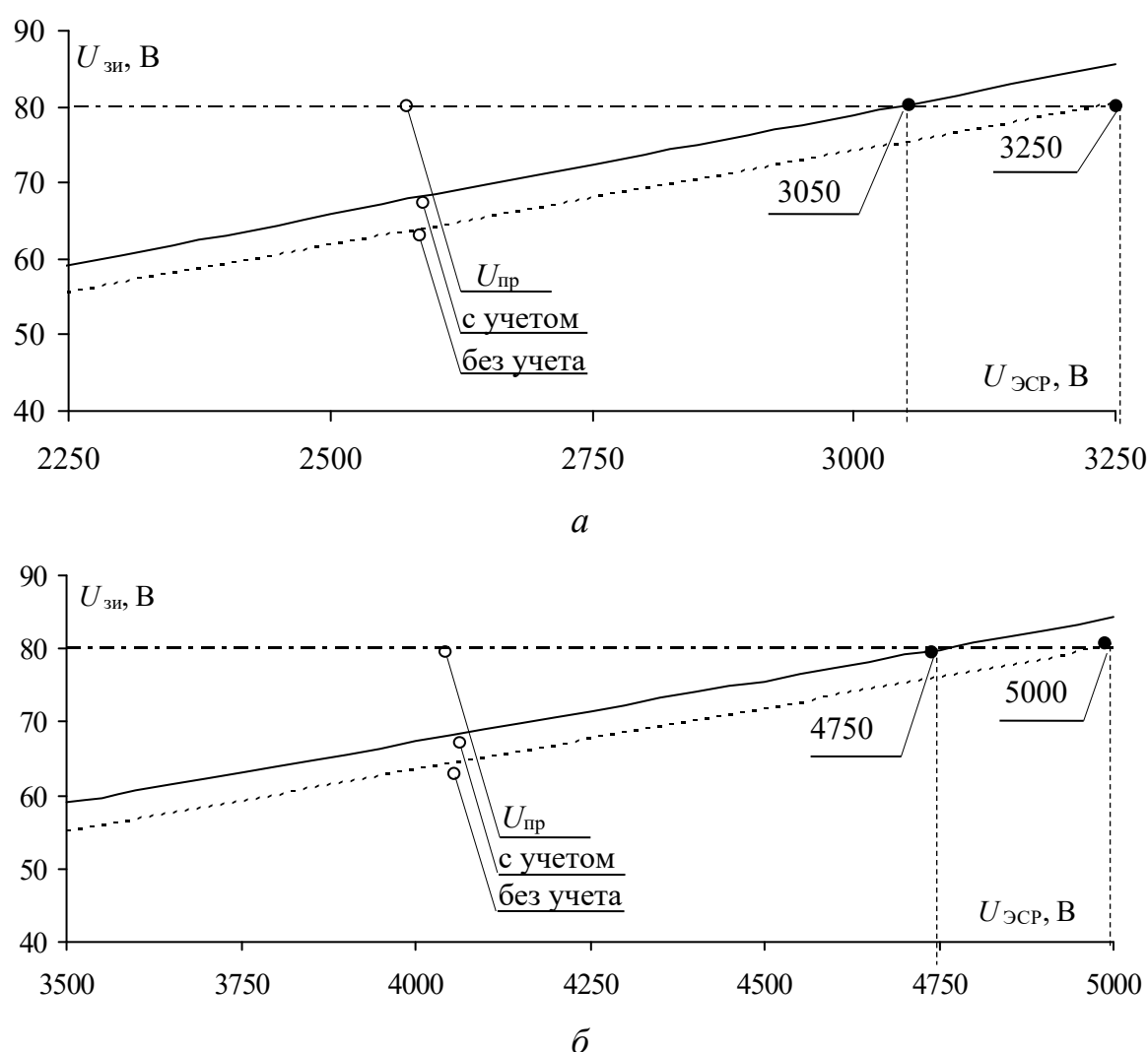


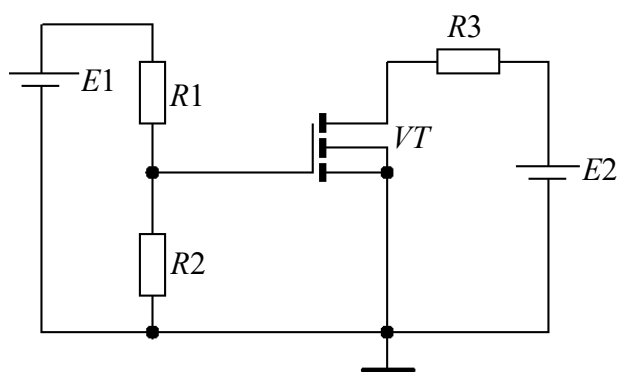
Рисунок 3.17 – Зависимости напряжений затвор-исток от напряжения ЭСР с учетом и без учета емкости посадочного места для IRFZ46N (а) и IRF4095 SPbF (б)

Из рисунка 3.17,*а* видно, что для транзистора IRFZ46N без учета емкости посадочного места пробой происходит при воздействии ЭСР с напряжением 3,25 кВ, а с его учетом – при 3,05 кВ, что составляет разницу 200 В. Для транзистора IRF4095 SPbF без учета емкости посадочного места пробой происходит при воздействии ЭСР с напряжением 5 кВ, а с его учетом – при 4,75 кВ, что на 250 В меньше. В результате для транзистора IRFZ46N восприимчивость к ЭСР увеличилась на 6,2%, а для IRF4095 SPbF – на 5%. Результаты моделирования воздействия ЭСР на полевой транзистор с учетом емкости межсоединений показывают, что оно существенно влияет на воздействующее напряжение ЭСР, при котором происходит пробой подзатворного диэлектрика транзистора. Важно отметить, что во всех случаях зависимость $U_{ЗИ}$ от $U_{ЭСР}$ носит линейный характер. Угловые коэффициенты этой зависимости составили 0,025 для IRFZ46N и 0,017 для IRF4095 SPbF. Это указывает на то, что влияние паразитных параметров можно предсказать и экстраполировать в рамках определенного диапазона напряжений.

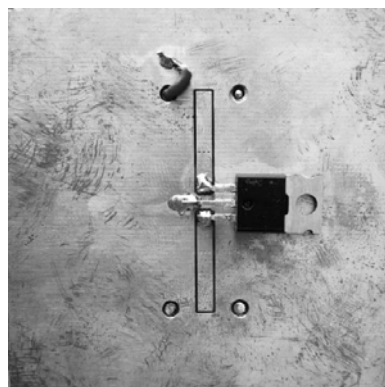
Экспериментальное исследование контактного воздействия ЭСР на транзисторы

Проверка полученных результатов может быть выполнена за счет натурного эксперимента. Его цель – верификация разработанной комплексной модели и методики оценки восприимчивости на реальных компонентах, а также наблюдение за характером деградации параметров транзисторов при воздействии ЭСР.

Выбраны две группы по три однотипных транзистора из одной производственной партии: IRFZ46N и IRF4095 SPbF в корпусах ТО-220 и ТО-263 соответственно. Разработана и изготовлена печатная плата с макетами (рисунок 3.18,*б*), содержащая испытуемый транзистор; делитель напряжения на резисторах $R1 = R2 = 1$ кОм, введенный в цепь затвор-исток для подключения управляющего напряжения и контроля напряжения на затворе; нагрузочный резистор $R3 = 23,5$ Ом (два параллельно соединенных резистора по 47 Ом суммарной мощностью 20 Вт) в цепи стока для измерения передаточных ВАХ.



a



б



в



г

Рисунок 3.18 – Принципиальная схема (*a*), макет печатной платы с транзистором (*б*) и лабораторные установки для измерения передаточной ВАХ (*в*) и воздействия ЭСР (*г*)

Измерения проводились следующим образом:

- 1) на имитаторе ЭСР ONYX 30 задавалось начальное значение разрядного напряжения;
- 2) проводилось воздействие ЭСР от имитатора на затвор транзистора;
- 3) ступенчато увеличивалась амплитуда напряжения ЭСР с шагом 0,1 кВ (от 1 до 3 кВ для IRFZ46N и от 1 до 5 кВ для IRF4095 SPbF);
- 4) после каждого воздействия задавалась и измерялась передаточная ВАХ транзистора (зависимость тока стока I_C от напряжения затвор-исток $U_{ЗИ}$) с помощью лабораторного блока питания (рисунок 3.18, *в*, *г*);
- 5) измерения ВАХ повторялись через 1 минуту, 3 и 24 часа после воздействия ЭСР для контроля возможных «скрытых» деградаций и временной стабильности параметров.

Усредненные результаты измерений приведены на рисунке 3.19.

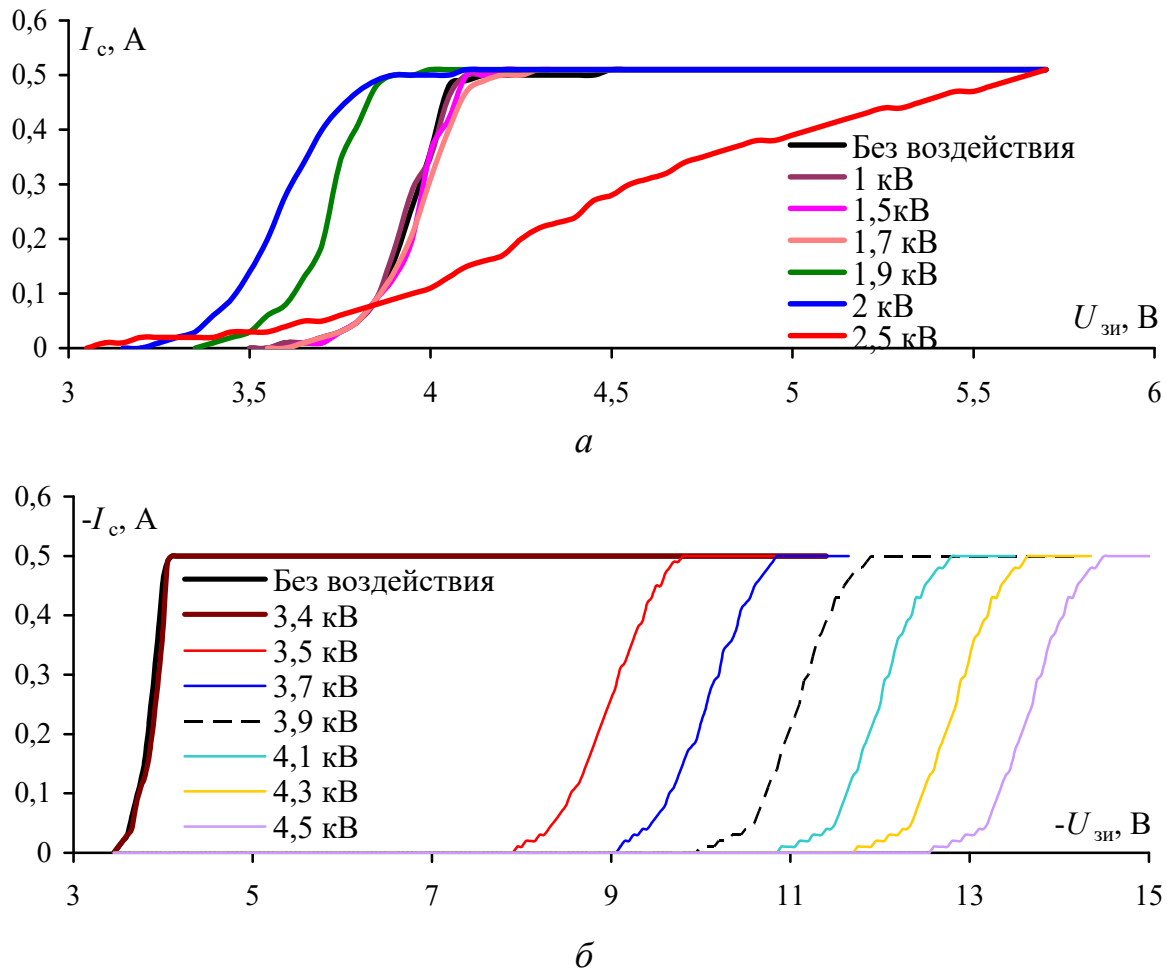


Рисунок 3.19 – Измеренные передаточные ВАХ транзисторов IRFZ46N (а) и IRF4095 SPbF (б) после воздействия ЭСР

Из рисунка 3.19,а видно, что воздействия ЭСР с напряжениями 1 и 1,5 кВ почти не влияют на передаточную ВАХ транзистора IRFZ46N, а крутизна сохраняется в пределах 2–2,2 А/В. Кроме того, нет существенных изменений в передаточной ВАХ транзистора после воздействия ЭСР с амплитудой 1,7 кВ. Однако после воздействия ЭСР с амплитудами 1,9, 2 и 2,5 кВ передаточная ВАХ транзистора существенно изменялась. Так, после воздействия ЭСР с амплитудами 1,9 и 2 кВ ВАХ сместилась в область более низких напряжений: на $U_{зи} = 0,2 B$ (с 3,8 В до 3,6 В) при 1,9 кВ и $U_{зи} = 0,4 B$ (с 3,8 В до 3,4 В) при 2 кВ. В то же время крутизна ВАХ при амплитуде ЭСР 1,9 кВ существенно не изме-

нялась, тогда как при 2 кВ уменьшилась до 1,2 А/В. Воздействие ЭСР с амплитудой 2,5 кВ сильнее (8–10 раз) снизило крутизну до 0,2–0,3 А/В. ЭСР с амплитудой 3 кВ пробilo подзатворный диэлектрик. В результате транзисторы оказались неработоспособными. Для транзистора IRF4095 SPbF воздействие ЭСР с амплитудой от 1 до 3,4 кВ не повлияло на ВАХ, при этом крутизна составила 2–2,2 А/В (рисунок 3.19,б). Однако после воздействия ЭСР с амплитудой 3,5–4,6 кВ ВАХ транзистора сместило в область высоких напряжений. Так, воздействие ЭСР с амплитудой 3,5 кВ сместило ВАХ на $U_{зи} = 4,4$ В (с 3,5 В до 7,95 В). С последующим ростом амплитуды воздействия ЭСР на каждые 0,1 кВ ВАХ смещалась на $U_{зи} = 0,45$ –0,5 В. Так, при воздействии ЭСР с амплитудой 4,6 кВ ВАХ сместилась на $U_{зи} = 9,6$ В (с 3,5 В до 13,1 В). При этом крутизна уменьшилась в 5–5,5 раза (0,4–0,45 А/В). Воздействие ЭСР с амплитудой 4,7 кВ пробilo подзатворный диэлектрик и транзистор перестал функционировать.

Эксперимент позволил выявить интересные особенности поведения транзисторов при воздействии ЭСР до наступления полного пробоя.

1. Транзисторы различных типов реагируют по-разному: IRFZ46N демонстрирует смещение ВАХ в область низких напряжений, а IRF4095 SPbF – в область высоких напряжений, что связано с их разными типами проводимости.

2. Деградация параметров происходит постепенно: сначала изменяется пороговое напряжение, затем снижается крутизна, и только потом наступает пробой подзатворного диэлектрика.

3. После воздействия ЭСР, не приводящего к немедленному отказу, параметры транзистора не восстанавливаются – деградация носит необратимый характер.

Вывод для будущего инженера: реальная устойчивость компонента к воздействию ЭСР может отличаться от заявленной производителем. Оценить устойчивость компонентов на этапе проектирования можно с помощью предложенной методики. Это позволит выявить «слабые места» печатной платы, оптимизировать трассировку и выбрать элементы за-

щиты до прототипирования и испытаний, что позволит сэкономить время и средства.

Пренебрежение паразитными параметрами электронных компонентов может привести к завышению оценки устойчивости на 5–10%. Для применения в космической технике, оборонных системах такая погрешность может оказаться критической.

3.2 Оценка восприимчивости электронных компонентов к воздушному воздействию электростатического разряда

Контактный ЭСР – не единственный механизм воздействия ЭСР. Не менее опасна ситуация, когда разряд происходит не в конкретную точку РЭУ, а через воздушный зазор. В момент разряда генерируется мощное электромагнитное излучение, способное наводить помехи на близлежащие цепи и компоненты даже без прямого контакта. Это явление сложнее предсказать и смоделировать, но им нельзя пренебрегать. Например, оператор, заряженный до определенного потенциала статическим электричеством, может дотронуться до корпуса прибора – разряд произойдет в месте касания, но электромагнитная помеха от этого разряда наведет напряжение на внутренних цепях, которые могут выйти из строя, даже не имея прямого контакта с местом разряда. Испытания на устойчивость к такому воздействию требуют специального оборудования, например ТЕМ-камеры (камера с поперечной электромагнитной волной). Она позволяет создавать однородное электромагнитное поле и имитировать наводки от ЭСР в контролируемых лабораторных условиях.

3.2.1 Модели для оценки уровня тока и напряжения, наведенных на электронный компонент

Как возникает наведенная помеха?

Когда ЭСР происходит через воздушный зазор, возникает искра – узкий канал ионизированного воздуха, по которому протека-

ет ток. Этот ток не постоянный, он быстро меняется во времени. При этом любой изменяющийся ток создает вокруг себя переменное электромагнитное поле. Это поле в свою очередь взаимодействует с проводниками на печатной плате, наводя в них напряжение и токи помех.

Физически этот процесс описывается двумя механизмами:

индуктивная связь – переменное магнитное поле от тока разряда наводит ЭДС в соседних проводниках (как во вторичной обмотке трансформатора);

емкостная связь – переменное электрическое поле между местом разряда и проводниками создает ток смещения через паразитную емкость.

Важно понимать: наведенная помеха может быть опасна даже в том случае, если сам разряд произошел в другой точке устройства или даже за его пределами. Именно поэтому испытания только на контактный разряд недостаточны для оценки реальной надежности изделия.

Для оценки амплитуды наведенной помехи можно использовать два подхода, которые дополняют друг друга.

Аналитическая модель для оценки уровня наведенного тока

На ранних этапах проектирования, когда нужно быстро понять порядок ожидаемых величин, удобно использовать упрощенные аналитические выражения. Они не требуют сложных расчетов и позволяют оценить, стоит ли беспокоиться о проблеме.

Рассмотрим типичную ситуацию (рисунок 3.20): в центре ТЕМ-камеры (1) расположена печатная плата (2) с МЛП (3).

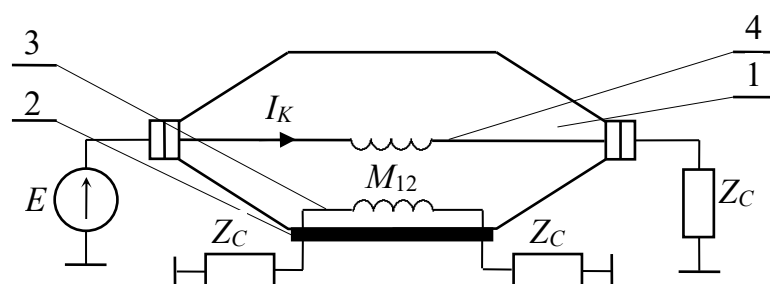


Рисунок 3.20 – Связь магнитного поля в ТЕМ-камере с МЛП

При подаче импульса ЭСР на вход камеры по центральному проводнику (4) начинает протекать ток I_K . Этот ток создает магнитное поле, поток которого пронизывает площадку, занимаемую МЛП.

Используя теорему Гаусса для магнитной индукции и учитывая геометрию камеры, наведенный на электронный компонент ток I может быть оценен как

$$I = \frac{\omega \mu_0 I_K l h}{2(a+b) Z} \text{КСВН}, \quad (3.1)$$

где ω – круговая частота; μ_0 – магнитная постоянная; l – длина МЛП; h – высота подложки печатной платы; a и b – размеры поперечного сечения ТЕМ-камеры; Z – сопротивление нагрузки на МЛП (обычно 50 Ом); КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению.

Это выражение позволяет быстро оценить порядок величины наведенной помехи. Однако оно не учитывает многие факторы: потери в материалах, отражения от концов линии, взаимное влияние нескольких проводников. Поэтому для точных расчетов необходимы более сложные квазистатические и электродинамические модели.

Геометрические модели для численного анализа

Когда требуется высокая точность (например, для критически важных узлов космического аппарата), необходимо использовать численное моделирование, например метод моментов (МоМ) или метод конечных разностей во временной области (МКРВО). Этот подход требует больше времени и вычислительных ресурсов, но позволяет учесть реальную геометрию конструкции, свойства материалов и форму воздействующего сигнала. Для создания точной модели нужно пройти путь от простого к сложному. Рассмотрим это на двух примерах: монополь (одионый вертикальный проводник) и МЛП.

Модель ТЕМ-камеры с монополем. Начнем с построения поперечного сечения исследуемой структуры (рисунок 3.21). Здесь показана ТЕМ-камера с размещенным внутри монополем.

Задав геометрические размеры и материалы, можно вычислить параметры линий передачи.

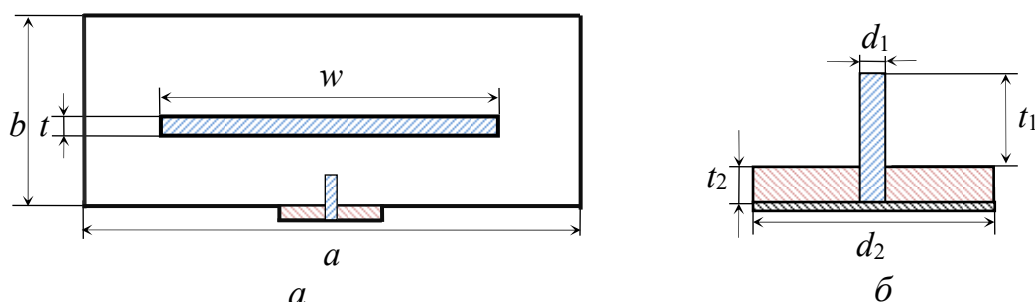


Рисунок 3.21 – Поперечные сечения ТЕМ-камеры (а) с расположенным в центре монополем (б)

На следующем шаге создается квазистатическая модель – схема из отрезков линий передачи (рисунок 3.22). Каждый отрезок соответствует однородному участку конструкции: вход камеры, область с подложкой, область с монополем. Данная модель позволит вычислить S -параметры структуры, а также токи и напряжения, наводимые на монополь, достаточно точно и с хорошим приближением.

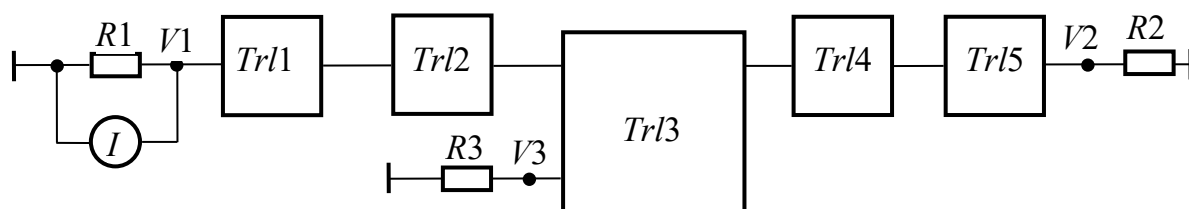


Рисунок 3.22 – Схема воздействия ЭСР на вход ТЕМ-камеры с монополем для квазистатического анализа

Для учета высших типов волн, излучения и дисперсии может быть создана трехмерная электродинамическая модель (рисунок 3.23,а). Модель включает в себя геометрическое представление ТЕМ-камеры (1), печатной платы (2) и размещенного в ней монополя (3) (рисунок 3.23,б). Такая модель решается методом конечных элементов или методом конечных разностей во временной области, что обеспечивает максимальную точность результатов.

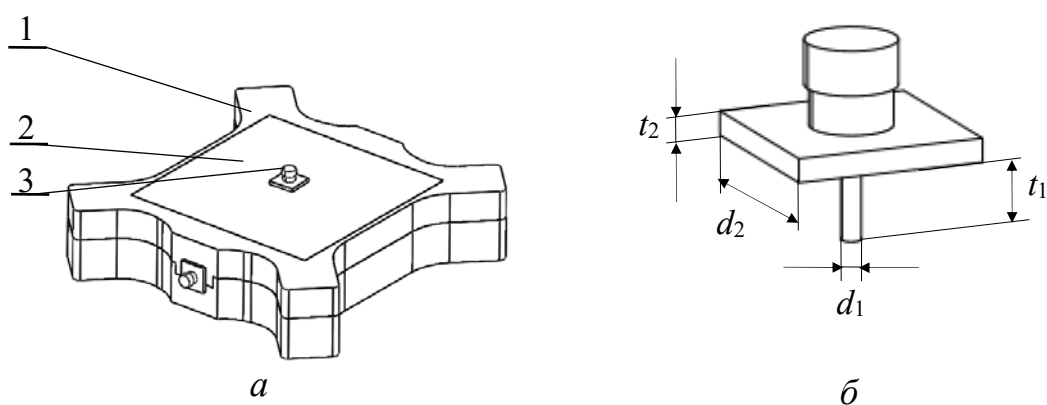


Рисунок 3.23 – Геометрические модели для электродинамического анализа самой ТЕМ-камеры (а) и с размещенной в ее апертуре печатной платой с монополем (б)

Модель ТЕМ-камеры с МЛП. Аналогичные модели создаются для МЛП (рисунки 3.24–3.26).

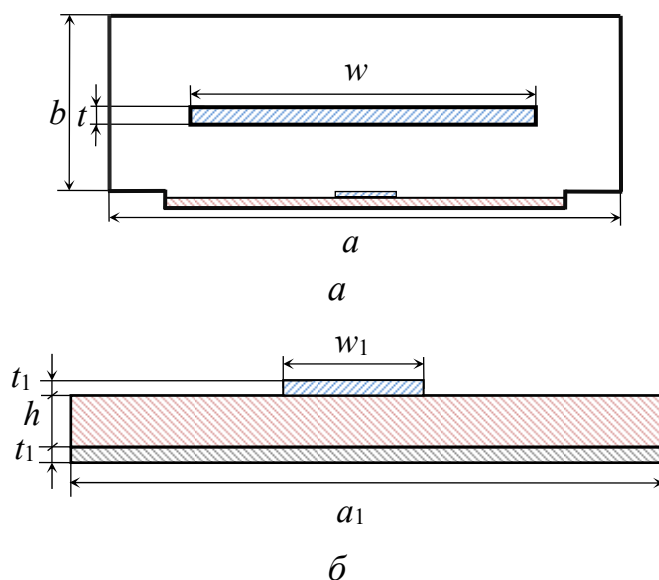


Рисунок 3.24 – Поперечные сечения ТЕМ-камеры (а) с МЛП (б)

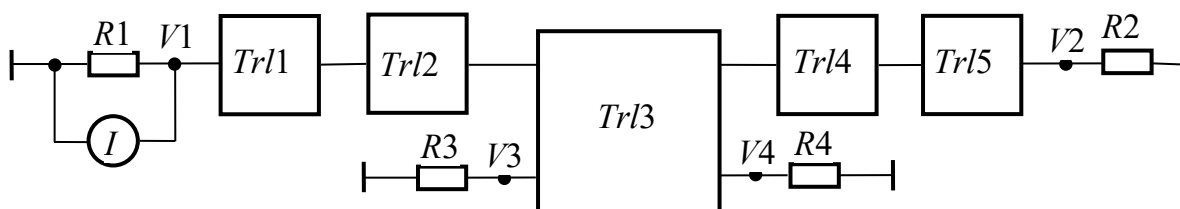


Рисунок 3.25 – Схема воздействия ЭСР на вход ТЕМ-камеры с МЛП для квазистатического анализа

В качестве диэлектрика печатной платы используется типичный для отечественной электроники стеклотекстолит ($\epsilon_r = 4,5$) толщиной 0,8 мм. Ширина проводника – 0,5 мм, длина – 70 мм, что обеспечивает волновое сопротивление 50 Ом.

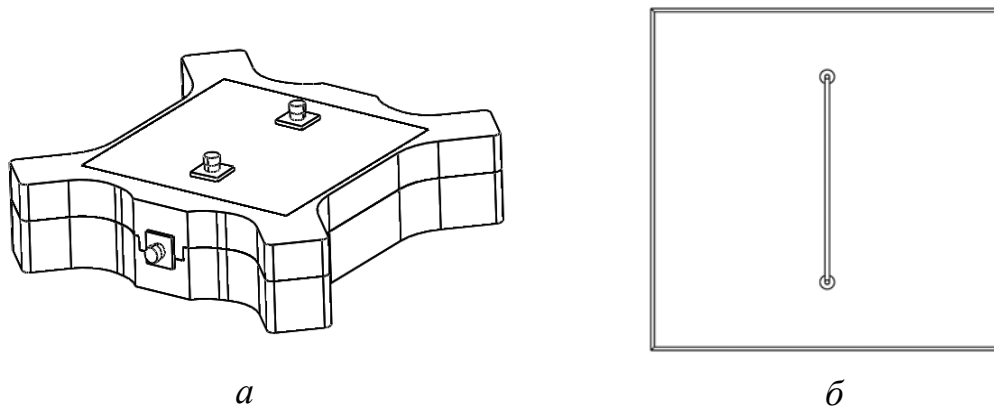


Рисунок 3.26 – Электродинамические модели ТЕМ-камеры (а) с размещенной в ее апертуре печатной платы с МЛП (б)

Почему важно использовать разные типы моделей? На этапе предварительного анализа вы можете использовать быстрые квазистатические модели, чтобы перебрать множество вариантов конструкции. Финальная проверка наиболее критичных узлов проводится с помощью электродинамического моделирования. Такой подход экономит время и средства, не снижая качества разработки.

3.2.2 Верификация и валидация моделей

Любая модель – это приближение реальности. Например, выражение (2.1) получено исходя из ряда допущений, таких как неучет потерь в диэлектрике, а также предполагалось распространение поперечной Т-волны. Прежде чем рекомендовать этот инструмент инженеру для прогнозирования отказов, необходимо убедиться в его адекватности.

Процесс проверки модели в инженерной практике делится на два этапа:

1) *верификация* – сравнение результатов расчета с эталонными данными, полученными более точными численными методами (например, МоМ или МКРВО);

2) *валидация* – сравнение результатов расчета с данными натурального эксперимента для подтверждения работоспособности модели в реальных условиях эксплуатации.

В реальных условиях эксплуатации форма тока ЭСР может сильно варьироваться в зависимости от того, какой объект переносит заряд (человек, инструмент, кабель). Пригодная для оценки уровня тока и напряжения модель должна одинаково хорошо предсказывать наводки для разных видов сигнала.

Для проверки универсальности выражения (2.1) на вход ТЕМ-камеры подавались восемь разных форм напряжения с амплитудой 1 кВ (рисунок 3.27).

1. ЭСР по механической модели: форма тока представляет собой затухающую синусоиду с временем нарастания около 10 нс (рисунок 3.27,а).

2. ЭСР по модели заряженного устройства: самый опасный вид разряда с временем нарастания всего 0,1 нс и длительностью 1–2 нс (рисунок 3.27,б). Спектр такого сигнала простирается вплоть до единиц гигагерц.

3. ЭСР по модели заряженной печатной платы: характерен для конвейерных линий, фронт 2–3 нс, длительность около 50 нс (рисунок 3.27,в).

4. ЭСР модели заряженного кабеля: прямоугольный импульс с временем нарастания 1 нс и длительностью 40 нс (рисунок 3.27,г).

5. Сверхкороткий импульс (СКИ): гауссов импульс с временем нарастания 0,1 нс и длительностью 0,55 нс (рисунок 3.27,д).

6. Гармонические сигналы с частотами 1 ГГц, 100 МГц и 10 МГц (рисунки 3.27,е–ж).

Для каждого из этих восьми сигналов вычислены наведенные токи в МЛП длиной 70 мм с использованием аналитической модели (2.1), квазистатического (МоМ) и электродинамического (МКРВО) моделирования.

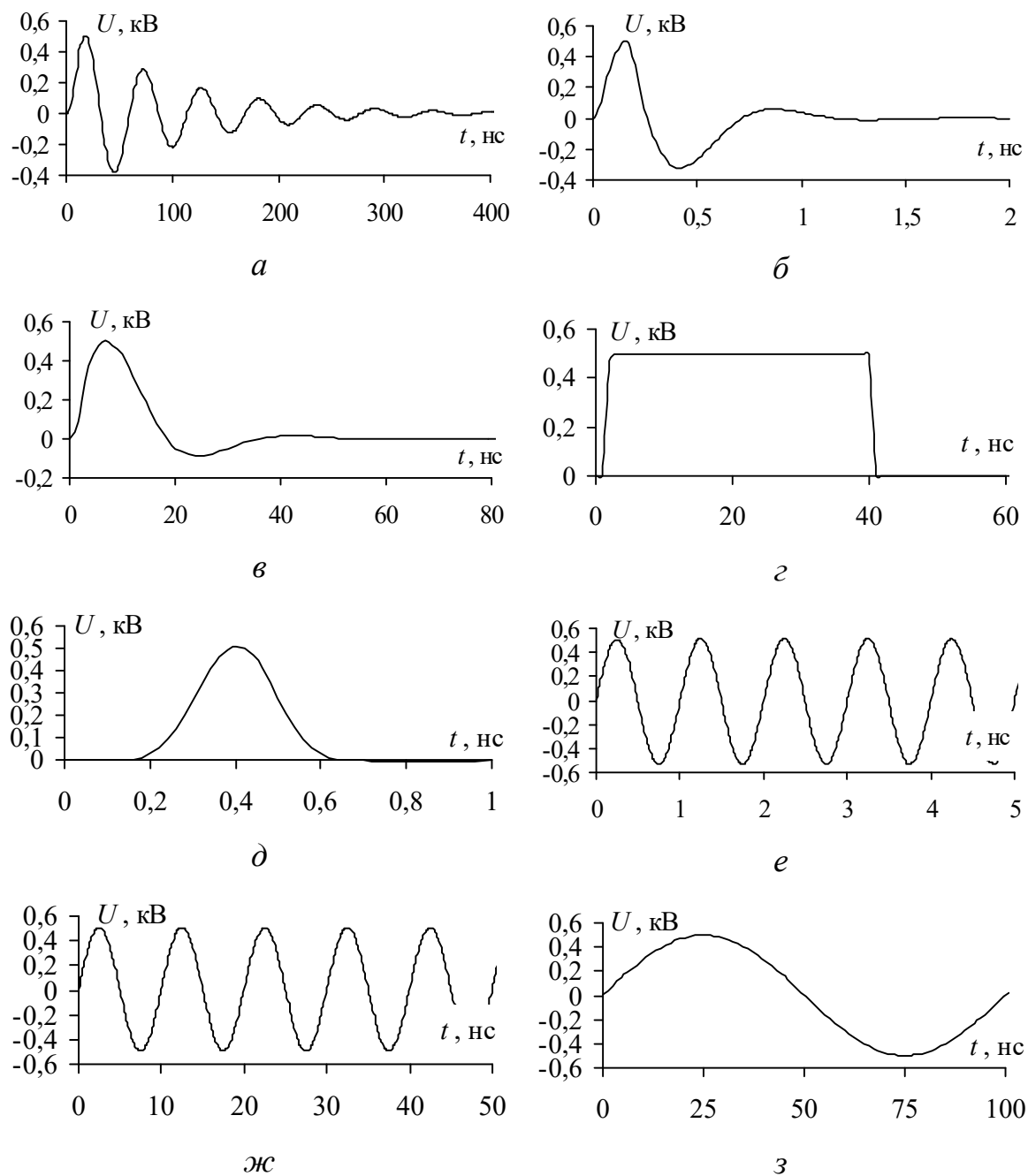


Рисунок 3.27 – Формы напряжения испытательных сигналов с ЭДС 1 кВ на входе ТЕМ-камеры

Результаты расчета представлены на рисунке 3.28, а их количественные характеристики сведены в таблицу 3.3.

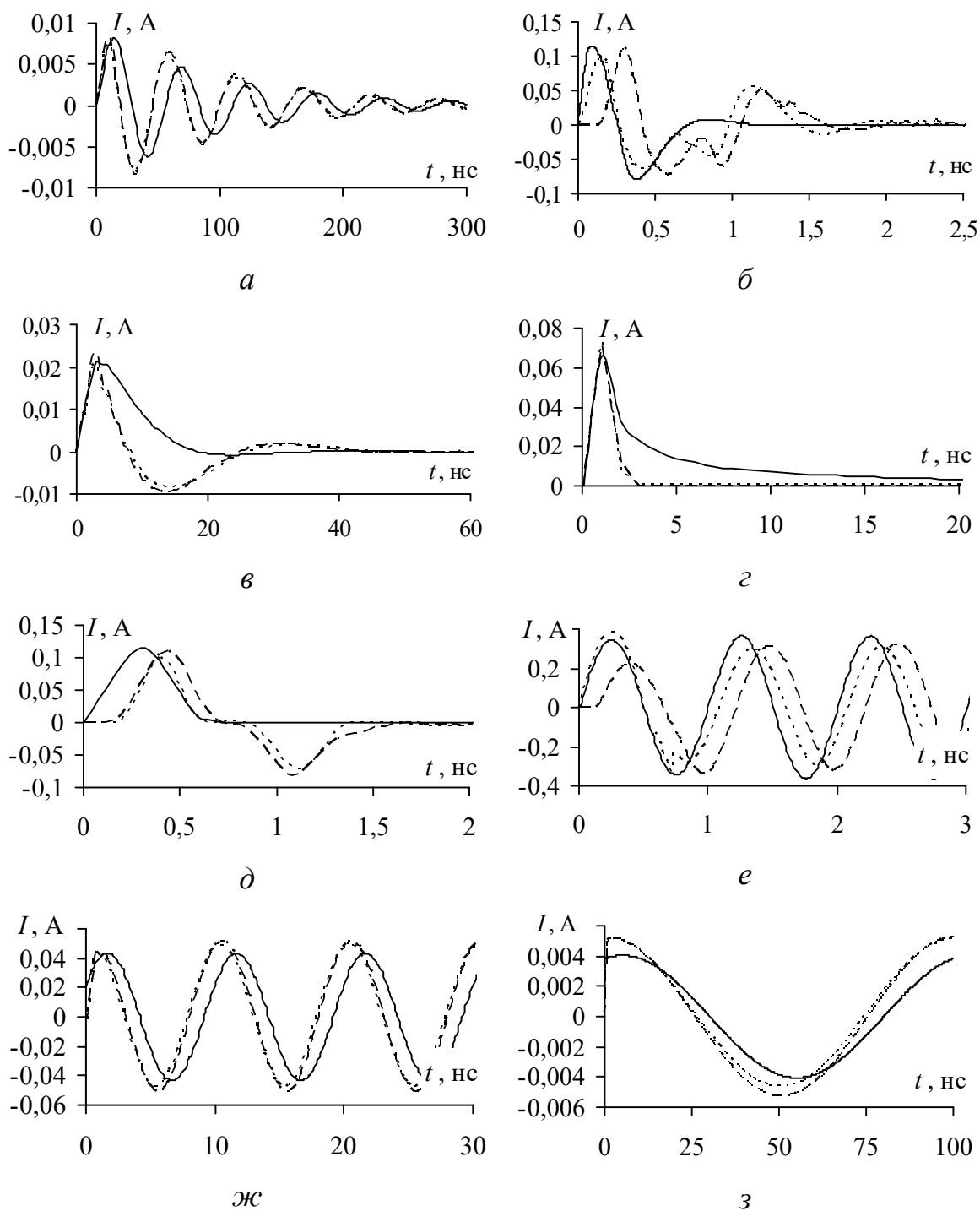


Рисунок 3.28 – Вычисленные аналитически (—), МоМ (---) и МКРВО (— · —) формы тока, наведенные на МЛП

Обратите внимание на таблицу 3.3. В ней сведены амплитуды наведенного тока и время нарастания. Что мы видим?

1. Для медленных сигналов (время нарастания от 2 до 10 нс) наблюдается хорошая согласованность результатов. Например, для ЭСР по модели заряженной печатной платы разница между аналитической моделью и МоМ составляет всего 1,9%.

2. Для сверхбыстрых сигналов (время нарастания до 1 нс) разница возрастает до 15–19%. Это связано с тем, что при длительности фронта 0,1 нс начинают проявляться волновые эффекты (запаздывание сигнала вдоль проводника), которые не учтены в аналитическом выражении. Однако даже в этом случае ошибка менее 20% позволяет инженеру оценить порядок наведенного тока, что уже достаточно для выбора защитных мероприятий.

3. Для гармонических сигналов на частоте 1 ГГц разница достигает 16%.

Таблица 3.3 – Амплитуды и время нарастания тока, наведенного на МЛП при воздействии на вход ТЕМ-камеры разных форм сигналов

Воздействие	$I_{\max}$, мА			t_n , нс		
	Аналитическая модель	МоМ	МКРВО	Аналитическая модель	МоМ	МКРВО
ММ	8,5	7,8	8,4	9	8	8
МЗУ	115,4	100,8	110,9	0,06	0,07	0,07
МЗПП	21,3	20,9	23,5	2,1	2	1,9
МЗК	71,1	75,5	73,4	0,7	0,6	0,6
СКИ	119,2	100,3	109,3	0,15	0,14	0,16
10 МГц	4,7	5,2	5,3	0,55	0,66	0,65
100 МГц	40,9	48,9	51	0,35	0,38	0,4
1 ГГц	322,7	382,7	365	0,16	0,17	0,2

Влияние геометрических параметров проводников печатной платы на наведенный ток

Верификация модели при изменении геометрических параметров – обязательный этап, так как ошибка может накапливаться нелинейно. Для сверхкороткого импульса были построены зависимости наведенного тока и напряжения от толщины подложки h (в диапазоне от 0,2 до 2,0 мм) и длины l МЛП (от 10 до 80 мм). Результаты представлены на рисунке 3.29.

Из рисунка 3.29 видно, что все три метода дают линейную зависимость наведенного сигнала от геометрических размеров. Увеличение толщины платы h в 10 раз ведет к росту наведенного тока примерно в 7–8 раз. Увеличение длины дорожки l прямо пропорционально увеличивает ток наводки. Это классическое

правило антенн: чем длиннее проводник, тем большая ЭДС наводится на нем.

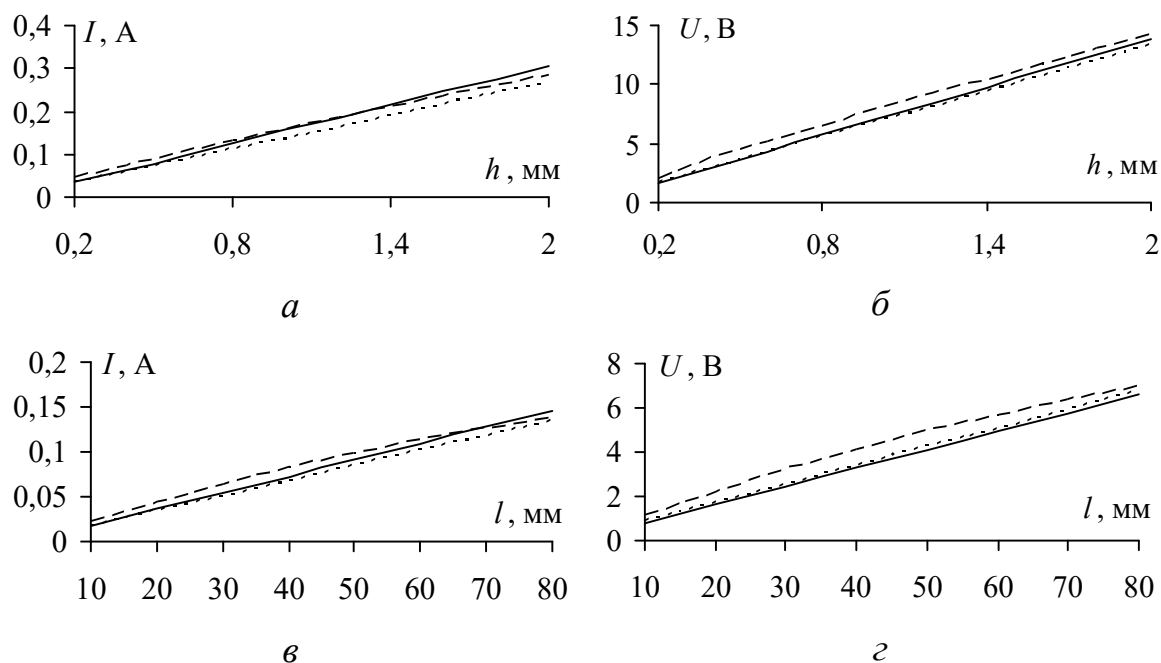


Рисунок 3.29 – Зависимости тока (*a*, *в*) и напряжения (*б*, *г*), наведенных на МЛП, от толщины h (*a*, *б*) и длины l (*в*, *г*), вычисленные по аналитической модели (—), МоМ (- -) и МКРВО (- · -)

Результаты натурного эксперимента

Прежде чем доверять результатам моделирования, нужно убедиться их соответствию реальным условиям эксплуатации. С этой целью была собрана лабораторная установка (рисунок 3.30, *б*). Особенностью схемы является использование коаксиальной ТЕМ-камеры в качестве адаптера между имитатором ЭСР и камерой. Это решение, предложенное в [54], позволяет эффективно передавать ЭСР от имитатора в центральный проводник ТЕМ-камеры. Схема измерения (рисунок 3.30, *а*) состоит из источника ЭСР, адаптера в виде половины коаксиальной камеры (5), коаксиального перехода РК2-20-03Р-13 (3), ТЕМ-камеры (2), к которой подключена согласованная нагрузка с $Z_{\text{в}} = 50$ Ом (4), а также монополя (6), расположенного на печатной плате (7), помещенной во внутреннее пространство ТЕМ-камеры. Напряжение на монополе фиксировалось при помощи программно реализо-

ванной маски в осциллографе Rohde&Schwarz RTO2044. В качестве источника ЭСР использовался имитатор ЭСР ONYX 30, соответствующий требованиям из [2].

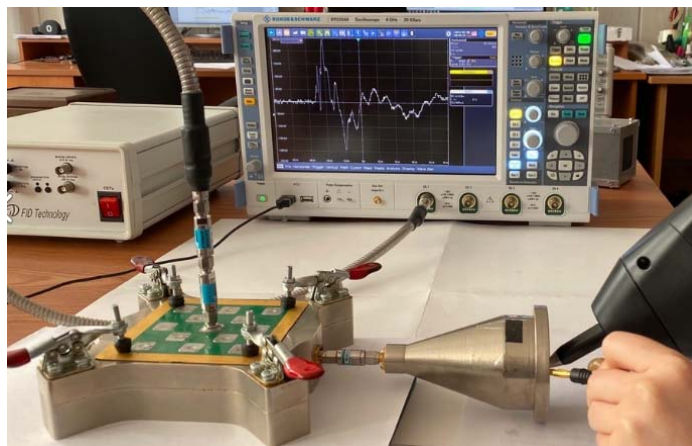
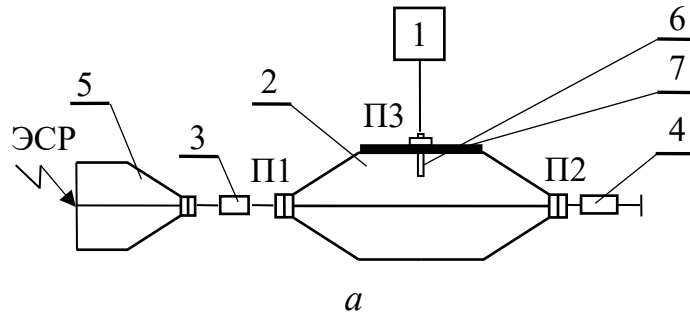


Рисунок 3.30 – Схема (а) и лабораторная установка (б) для измерения формы наведенного напряжения на монополь при воздействии имитатором ЭСР

На рисунке 3.31 представлены формы тока и напряжения, наведенные на монополь.

Из рисунка 3.31,а видно, что вычисленные и измеренные формы сигналов схожи, но отличаются по амплитуде и времени. Так, длительность сигнала t_d при аналитическом расчете 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 спада (t_c) сигнала составляют: $t_n = 0,2$ нс и $t_c = 0,6$ нс, при измерении $t_n = 0,6$ нс и $t_c = 0,5$ нс, а при аналитическом расчете $t_n = 0,22$ нс и $t_c = 0,53$ нс соответственно. Максимальная амплиту-

да наведенного тока при квазистатическом расчете составила 10 мА, при аналитическом – 9 мА, при электродинамическом – 11 мА, а при измерении – 8 мА.

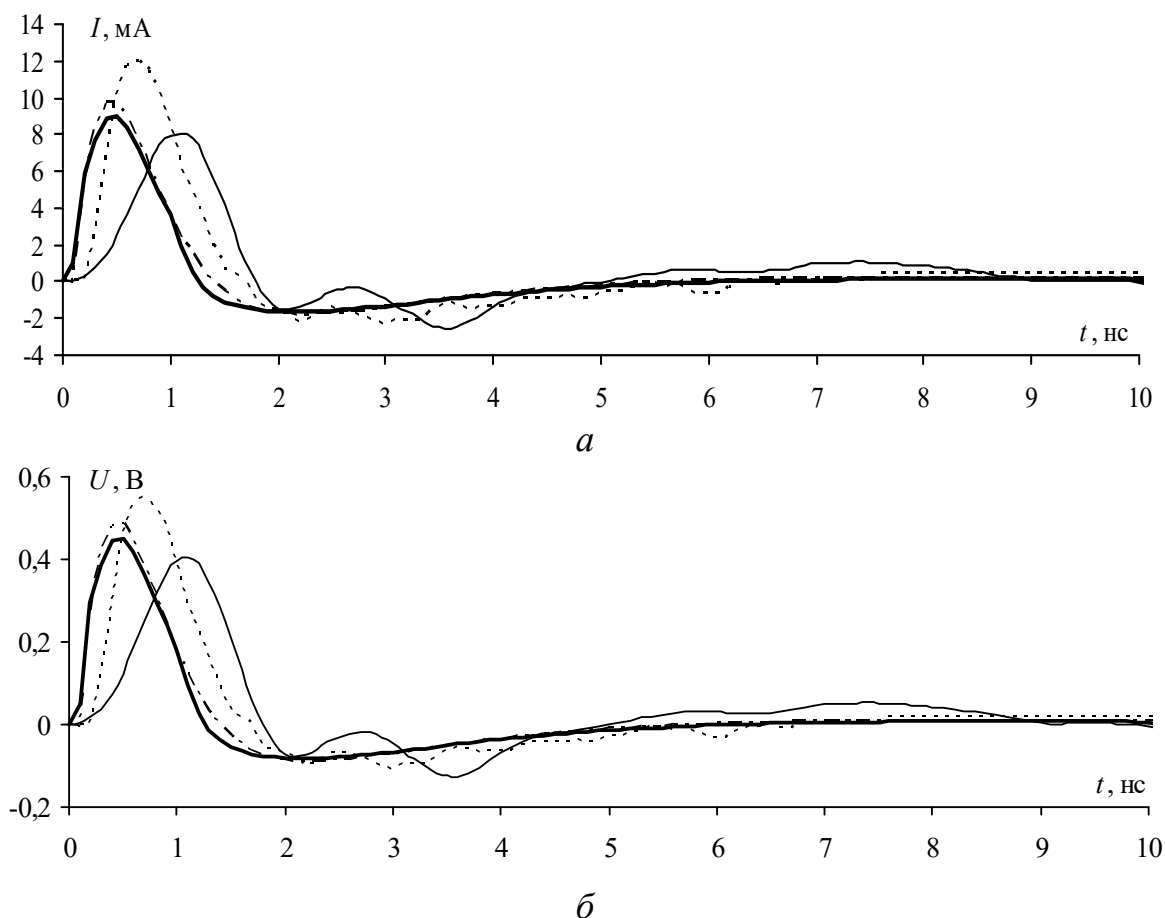
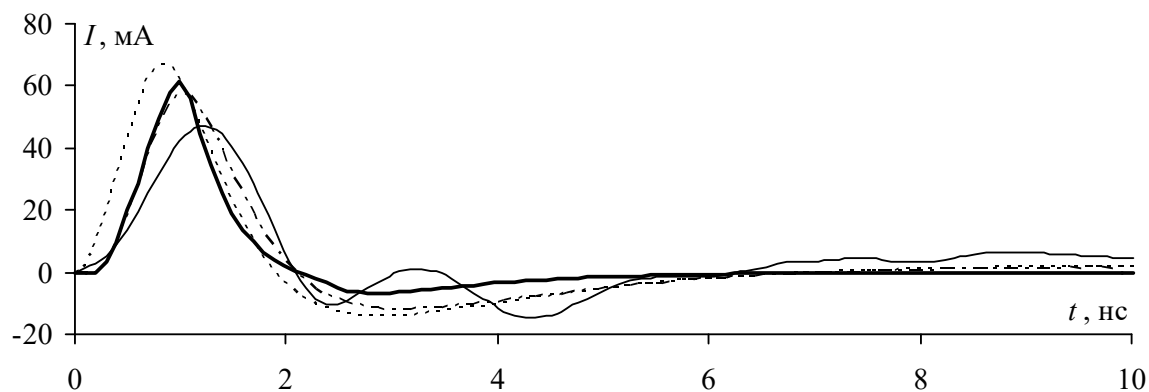


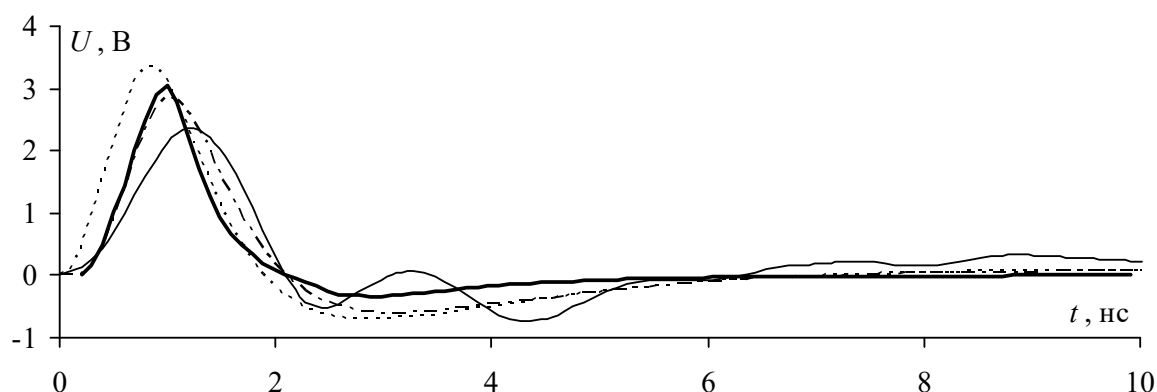
Рисунок 3.31 – Измеренные (—) и вычисленные аналитическим (—), квазистатическим (- -) и электродинамическим (- · -) методами формы тока (а) и напряжения (б), наведенных на монополь

В результате максимальные, вычисленные по аналитике значения (9 мА) близки к измеренным (8 мА). Максимальная разница результатов между аналитическим расчетом и результатами электродинамического вычисления и измерения составляет 22,2 и 11,1% соответственно. Стоит отметить, что напряжение, наведенное на монополь, при квазистатическом моделировании составляет 0,5 В, при электродинамическом – 0,55 В, при аналитическом расчете – 0,45 В, а при измерении 0,4 В (рисунок 3.31,б).

Аналогичные результаты получены при анализе уровня наведенного тока и напряжения на МЛП (рисунок 3.32).



a



б

Рисунок 3.32 – Измеренные (—) и вычисленные аналитическим (—), квазистатическим (- -) и электродинамическим (- -) методами формы тока (*a*) и напряжения (*б*), наведенных на монополю

Из рисунка 3.32,*a* видно, что значения наведенных токов на МЛП при аналитическом, квазистатическом, электродинамическом расчетах и измерении согласуются, но различаются по амплитуде и времени. Так, t_d наведенного сигнала при аналитическом расчете составляет 1,28 нс, при квазистатическом – 1,53 нс, при электродинамическом – 1,58 нс, а при измерении – 1,9 нс. Время нарастания и спада сигнала при аналитическом расчете – $t_n = 0,4$ нс, $t_c = 0,6$ нс, при квазистатическом – $t_n = 0,48$ нс, $t_c = 0,7$ нс, при электродинамическом – $t_n = 0,52$ нс, $t_c = 0,73$ нс, а при измерении – $t_n = 0,7$ нс, $t_c = 0,6$ нс. Максимальный ток, наведенный на МЛП, не превышает 60,5 мА при аналитическом, 58,4 мА – при квазистатическом, 68 мА – при электродинамическом расчетах и 47 мА – при измерении. В то же время амплитуда напряжения при аналитическом расчете составляет 3 В, квазиста-

тическом – 2,9 В, электродинамическом – 3,4 В, а при измерении – 2,35 В (рисунок 3.32,б).

Максимальная разница значений между аналитическим расчетом и электродинамическим и квазистатическим моделированием составляет 3,3% и 13,3% соответственно. При этом разница значений между аналитическим расчетом и измерением достигает 25%. Различия амплитуд напряжений моделирования и измерения связаны с потерями в проводнике и диэлектрике МЛП, а также неучетом припоя СВЧ-соединителей типа SMA, расположенных с внутренней стороны печатной платы. Тем не менее даже с погрешностью в 25% модель позволяет предсказать порядок величины наводки.

Вывод для будущего инженера: используя аналитическую модель, можно с достаточной для начального этапа проектирования точностью (погрешность не более 25%) спрогнозировать уровни наведенных токов и напряжений от электромагнитного излучения ЭСР. Этой точности достаточно для принятия принципиальных схемотехнических и конструкторских решений на ранних этапах проектирования, когда проведение полноценного 3D-моделирования или дорогостоящих испытаний в сертифицированной лаборатории еще невозможно. Если расчетное напряжение наводки превышает 30–50% от напряжения питания, необходимо в этом месте установить дополнительные фильтрующие конденсаторы или TVS-диод. Помните: протяженные проводники на ПП – это отличные антенны для приема помех от воздействия ЭСР.

3.3 Оценка ослабления электростатического разряда в полосковых устройствах

3.3.1 Модальное разложение импульсных воздействий на составляющие

Среди средств защиты от ЭСР выделяется оригинальный подход для его ослабления. Подход основан на разложении ЭСР на составляющие меньшей амплитуды в полосковых устройствах.

Приведем примеры таких устройств и результаты их численного моделирования.

Прежде всего следует рассмотреть общий принцип разложения импульсных воздействий на составляющие в полосковых устройствах. При распространении воздействия, возбуждаемого в активном проводнике отрезка линии передачи из N проводников (не считая опорного) в неоднородном диэлектрике, воздействие будет подвергаться модальным искажениям, вплоть до полного разложения на N составляющих меньшей амплитуды. Для такого разложения нужно, чтобы общая длительность воздействия t_{Σ} была меньше модуля разности задержек распространения мод в отрезке длиной $l_{\min}$, т. е. выполнялось условие [55]

$$t_{\Sigma} < l_{\min} |\tau_i - \tau_k|, \quad i, k = 1, \dots, N, \quad i \neq k, \quad (3.2)$$

где $\tau_{i(k)}$ – погонная задержка $i(k)$ -й моды отрезка.

Для пары связанных линий ($N = 2$) условие (3.2) сводится к простому виду:

$$t_{\Sigma} < l_{\min} (\tau_2 - \tau_1), \quad (3.3)$$

где τ_2 и τ_1 – максимальная и минимальная из погонных задержек мод отрезка.

Если на вход отрезка между активным и опорным проводниками подается импульсное воздействие длительностью меньшей, чем разность задержек мод, то на выход его активного проводника придут две составляющие (рисунок 3.33): синфазная и дифференциальная моды (в линиях с симметричным поперечным сечением их называют четная и нечетная). Авторы называли подход модальной фильтрацией, а устройства на его основе – модальными фильтрами (МФ). Отклики на рисунке 3.33 получены при сопротивлении резисторов, выбранных из условия псевдосогласования отрезка с трактом. Уровень составляющих на выходе МФ зависит от связи и может быть в два и более раз меньше чем на его входе (при равенстве уровней составляющих на выходе МФ). Равенство уровней обеспечивается выбором R из условия [56]

$$R = (Z_c Z_d)^{0.5}, \quad (3.4)$$

где Z_c и Z_d – импедансы синфазной и дифференциальной мод отрезка.

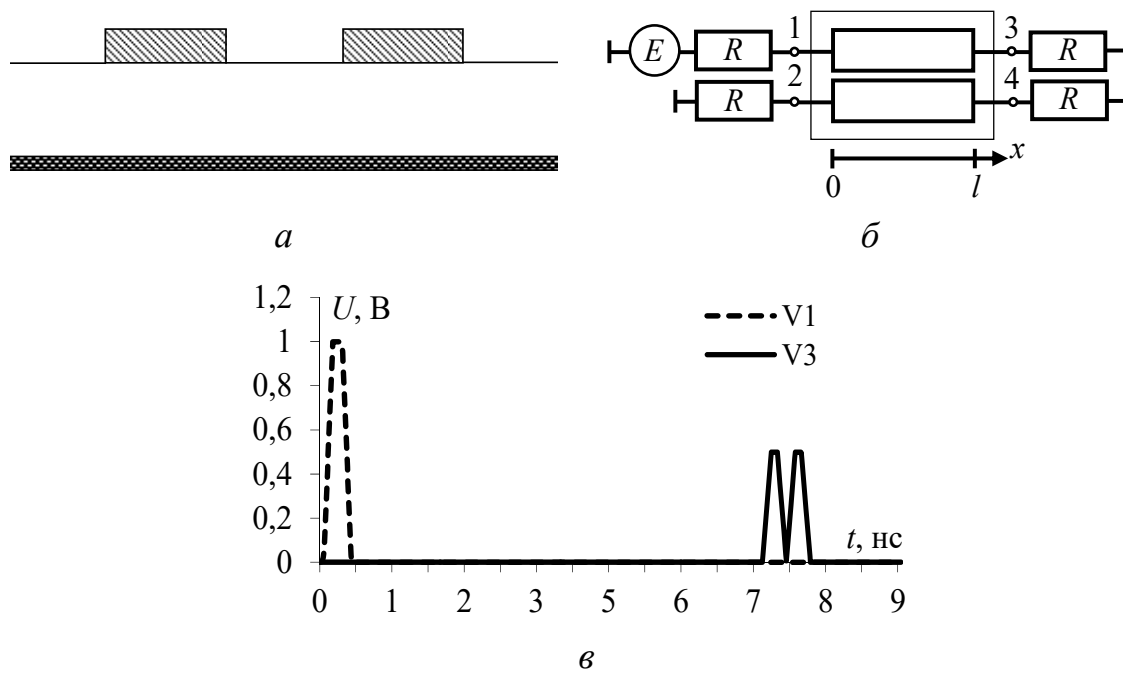


Рисунок 3.33 – Поперечное сечение (а), схема (б) и отклик на СКИ (в) МФ

Устройства на основе витка меандровой линии (МЛ) являются еще одним примером полосковых устройств, основанных на модальном разложении [57]. По существу, виток МЛ является парой связанных линий, закороченных на одном из концов (в СВЧ-технике его также называют С-секцией). В его отклике, кроме импульсов мод, из-за сильной электромагнитной связи также существует перекрестная помеха, которая наводится на выход одновременно с началом распространения основного сигнала. Выбор связи позволяет ослабить уровень напряжения на выходе за счет выравнивания уровней составляющих отклика. В самом общем случае на выход витка МЛ придут 3 составляющие: перекрестная помеха и импульсы синфазной и дифференциальной мод. Преимуществом витка является вдвое меньшая l_{min} (по сравнению с МФ) для разложения воздействия той же длительности. Выражение (3.3) для витка примет вид

$$t_{\Sigma} < 2l_{min} (\tau_2 - \tau_1). \quad (3.5)$$

Если на вход витка влияет импульсное воздействие, длительность которого меньше, чем удвоенная разность задержек мод, а сопротивления на концах выбраны из условия (3.4), то на выход придут три составляющие с равными амплитудами (рисунок 3.34).

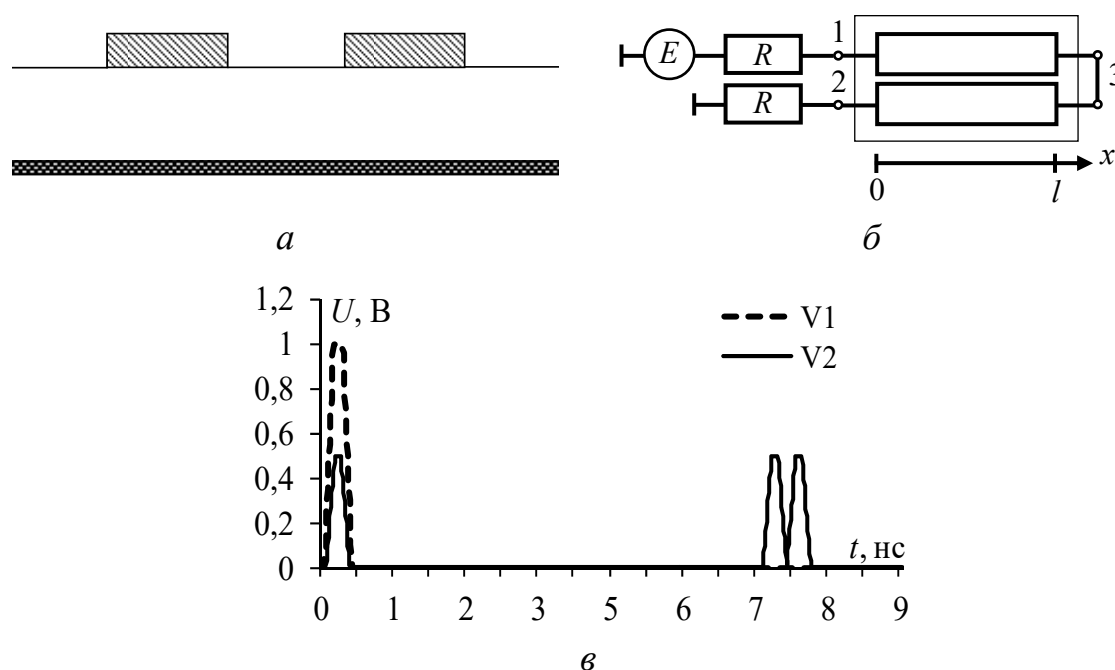


Рисунок 3.34 – Поперечное сечение (а), схема (б) и отклик на СКИ (в) витка МЛ

Полосковые линии являются простыми в проектировании, поэтому на их основе можно построить различные устройства с модальным разложением для ослабления импульсных помех. Ниже приведены примеры реализации таких устройств и результаты их численного моделирования.

3.3.2 Возможность ослабления электростатического разряда в витке меандровой линии

Симметричное поперечное сечение

Рассмотрим возможность разложения ЭСР по модели человеческого тела, сокращение было в витке меандровой микрополосковой линии. Поперечное сечение витка такое же, как на рисунке 3.34, а его схема соединений показана на рисунке 3.35. Один из его проводников соединен с генератором в виде идеального ис-

точника тока I с параллельным сопротивлением R . Другой проводник витка соединен с приемником, представленным на схеме сопротивлением R .

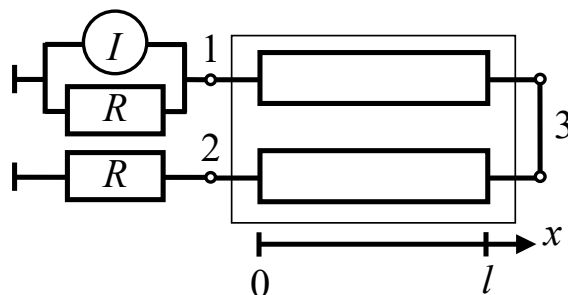


Рисунок 3.35 – Поперечное сечение (а) и схема соединений (б) витка для моделирования воздействия ЭСР

При моделировании ширина проводников витка w принята равной 2,45 мм, а расстояние между ними $s = 0,3$ мм. Толщина основы диэлектрика h принята 2 мм (толщина фольги $t = 45$ мкм), а относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 5,4$. Эти параметры обеспечивают равенство среднего геометрического волновых сопротивлений четной и нечетной мод: $\epsilon_r (Z_e Z_o)^{0,5} \approx 50$ Ом. В качестве воздействия принята форма тока, близкая к третьей степени жесткости ЭСР ($\tau_1 = 1,3$ нс, $\tau_2 = 1,7$ нс, $\tau_3 = 6$ нс, $\tau_4 = 58$ нс, $I_1 = 21,51$ А, $I_2 = 10,1$ А, $n = 3$) согласно ГОСТ Р 53734.3.1 [1]. На рисунке 3.36 приведена форма сигнала в узле I1 схемы рисунка 3.35 при $l = 0,1$ м.

Вычисленные погонные задержки четной и нечетной мод для структуры составили: $\tau_e = 6,66$ нс/м, $\tau_o = 5,9$ нс/м. В результате для полного разложения ЭСР длительностью 100 нс (см. рисунок 3.36) согласно выражению (3.5) нужно обеспечить его длину $l = 66$ м. Очевидно, что виток такой длины на практике не применим. Поэтому целесообразно рассмотреть не полное разложение ЭСР, а разложение только его пикового выброса длительностью около 4 нс. Для этого должно выполняться условие

$$2l_{\min} (\tau_2 - \tau_1) \approx 4 \text{ нс.} \quad (3.6)$$

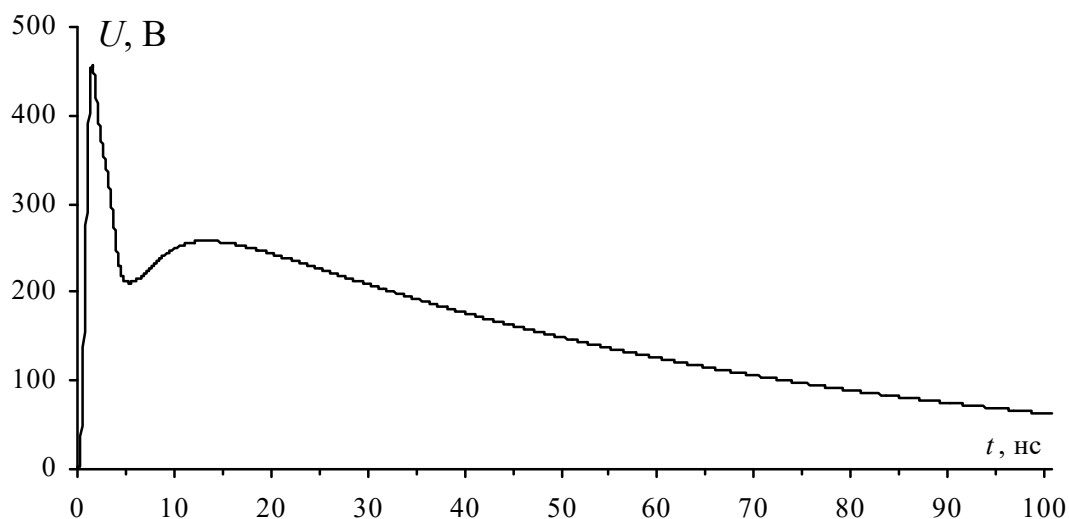


Рисунок 3.36 – Форма напряжения на входе витка (в узле V1)

Тогда для разложения только пикового выброса достаточно обеспечить длину $l_{\text{opt}} = 2,63$ м. Для понимания изменения формы ЭСР в витке выполнено детальное моделирование отклика при увеличении длины l от 0,1 м до 10 м. На рисунке 3.37 приведена зависимость амплитуды ЭСР (V_{max}) на выходе витка от l .

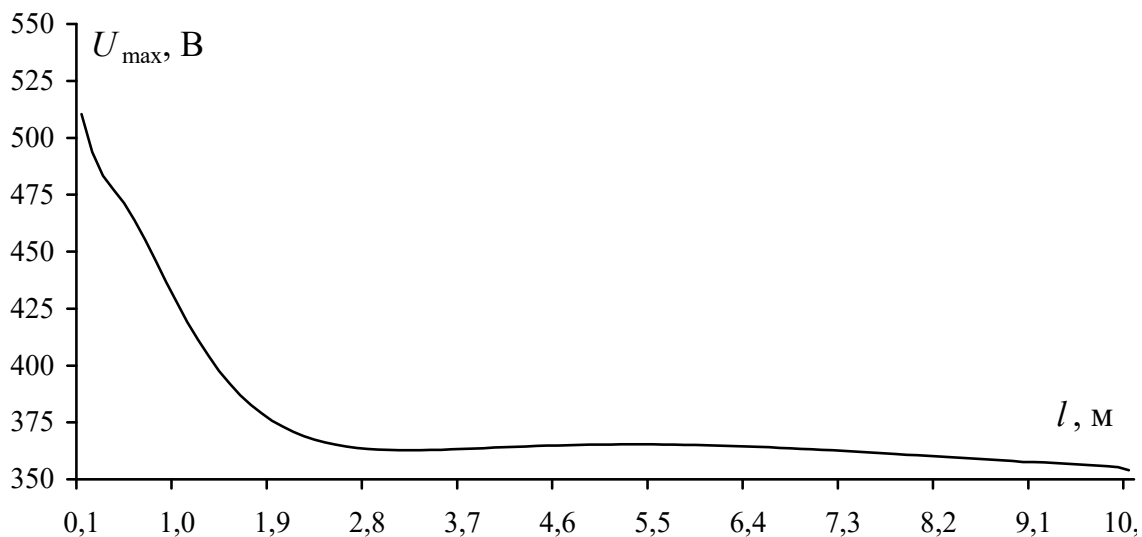


Рисунок 3.37 – Зависимость V_{max} на выходе витка от l

Из рисунка 3.37 видно, что при длине до 2 м на выходе витка наблюдается высокая амплитуда ЭСР из-за неполного разложения его пикового выброса, а увеличение l до 2,5 м оказывает на нее незначительное влияние. Так, амплитуда ЭСР при $l = 0,1$ м со-

ставляет 510 В, при $l = 2$ м – 373 В, а при $l = 3$ м – 362 В. При этом его амплитуда при $l_{\text{opt}} = 2,63$ м составила 364 В. В результате увеличение длины витка после l_{opt} согласно выражению (3.6) нецелесообразно, поскольку не приводит к дополнительному уменьшению амплитуды ЭСР. Вычисленные отклики в узле $V/2$ при $l = 0,1, 0,5, 2, 3,5$ м сведены на рисунке 3.38. Здесь наблюдается проявление перекрестной помехи (выброс 1), а также рост задержек основных составляющих (выбросов 2 и 3) при росте длины l . Отметим незначительное (в 1,1 раза) увеличение амплитуды на выходе витка относительно входа (при $l = 0,1$ м). Это обусловлено наложением пикового выброса, прошедшего по витку, на выброс перекрестной помехи. При росте l до 3,5 м все более отчетливо проявляются выбросы 2 и 3 (далее будем называть их выбросами нечетной и четной мод).

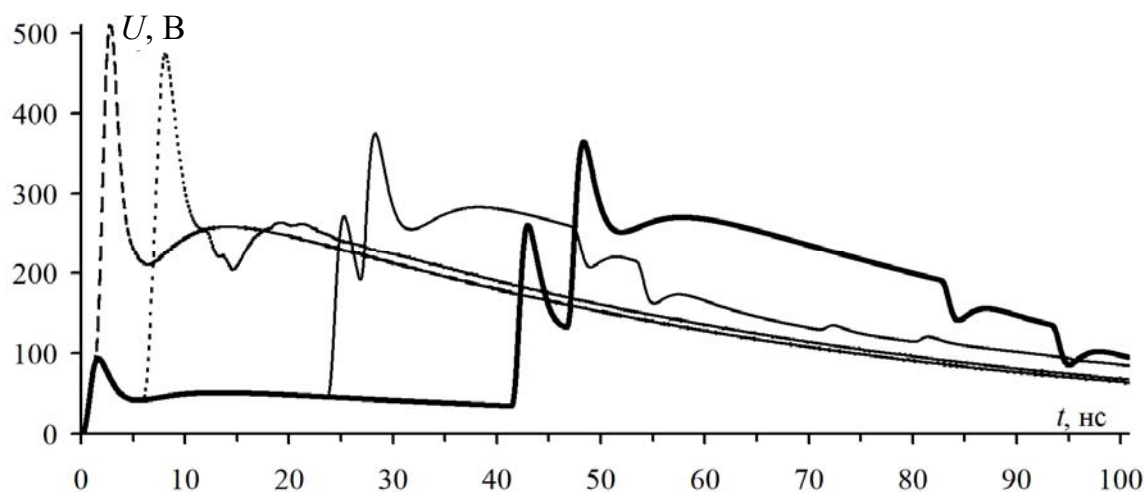


Рисунок 3.38 – Формы напряжения ЭСР на выходе витка при $l = 0,1$ (---), $0,5$ (- -), 2 (—), $3,5$ (—) м

Ранее выявлено, что увеличение связи между проводниками приводит к увеличению амплитуды перекрестной помехи и уменьшению амплитуды импульсов нечетной и четной мод. Поэтому для минимизации амплитуды ЭСР выполнено моделирование при последовательном уменьшении расстояния s от 300 до 1 мкм. При уменьшении s от 300 до 50 мкм использовался шаг 50 мкм, от 50 до 10 мкм – 10 мкм, от 10 до 1 мкм – 1 мкм. Длина

витка фиксирована: $l = 3$ м. При моделировании сопротивления R определяются как $R = (Z_e Z_o)^{0,5}$ и изменяются относительно s . На рисунке 3.39 приведены зависимости амплитуд первых трех выбросов ЭСР на выходе витка (выбросов перекрестной наводки, нечетной и четной мод) от s .

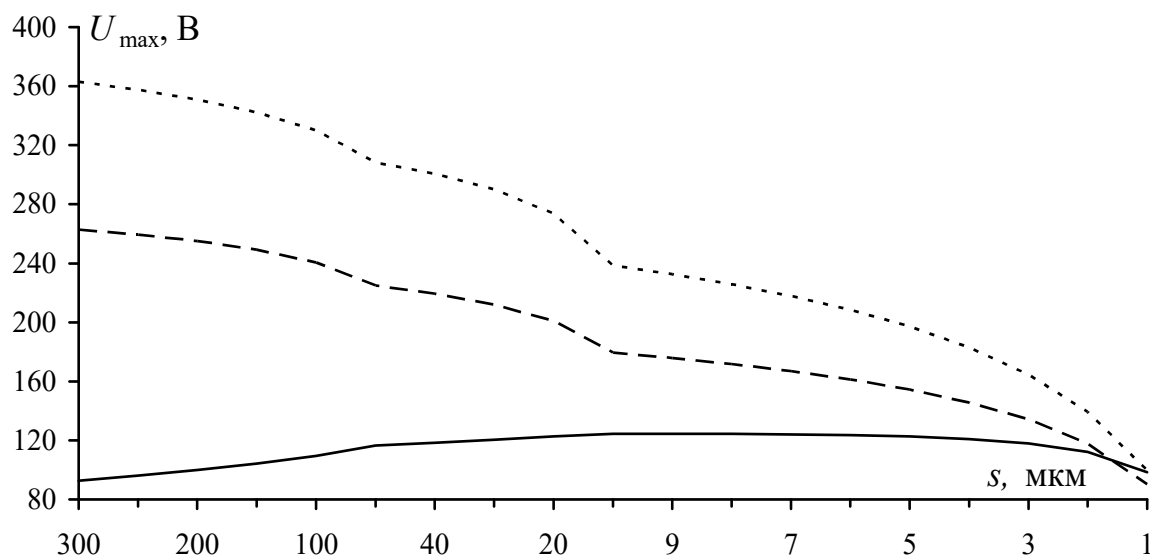


Рисунок 3.39 – Зависимости максимальных амплитуд первого (—), второго (---) и третьего (-.-) выбросов ЭСР на выходе витка от s при $l = 3$ м

Из рисунка 3.39 видно, что при уменьшении расстояния s амплитуды выбросов нечетной и четной мод уменьшаются, а перекрестной помехи – растет. При $s = 1$ мкм амплитуды всех трех выбросов равны и составили около 100 В.

Отклики на выходе витка при расстоянии $s = 250, 150, 50, 10, 1$ мкм показаны на рисунке 3.40.

Видно, что время прихода выбросов 1 и 3 не меняется при убывании s , тогда как задержка выброса 2 существенно уменьшается. Это объясняет рисунок 3.41, где сведены зависимости τ_o , τ_e и $\Delta\tau$ от s .

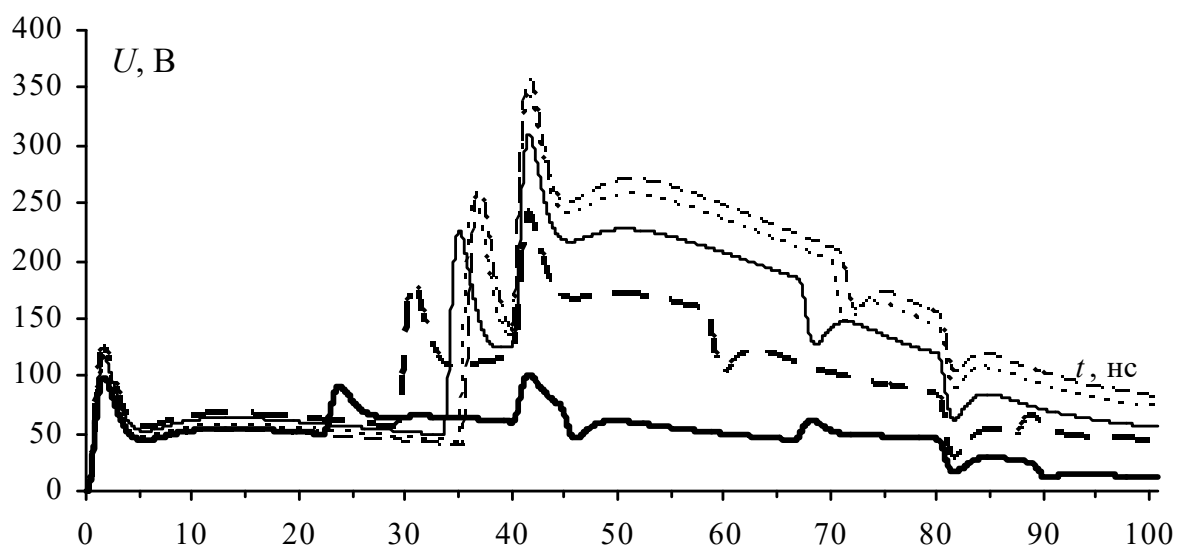


Рисунок 3.40 – Формы напряжения ЭСР на выходе витка
длинной $l = 3$ м при $s = 250$ (---), 150 (- -), 50 (—),
10 (— —), 1 (— —) мкм

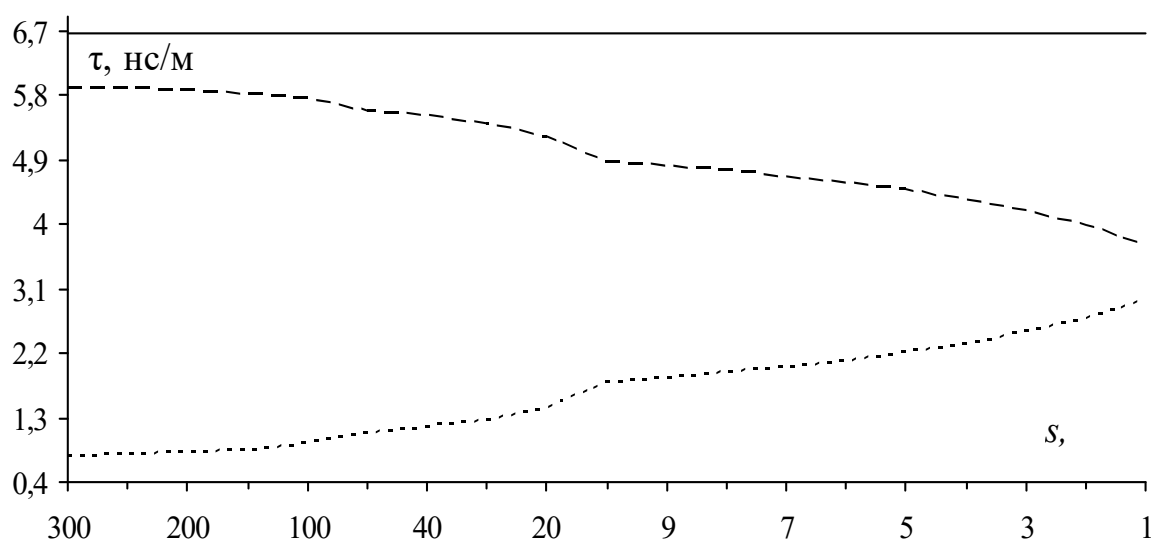


Рисунок 3.41 – Зависимости погонных задержек
 τ_o (---), τ_e (—) и $\Delta\tau$ (- -) от s при $l = 3$ м

Поскольку при изменении расстояния между проводниками s изменяется и значение сопротивления $(Z_e Z_o)^{0,5}$, приведем зависимости Z_o , Z_e и $(Z_e Z_o)^{0,5}$ от s (рисунок 3.42).

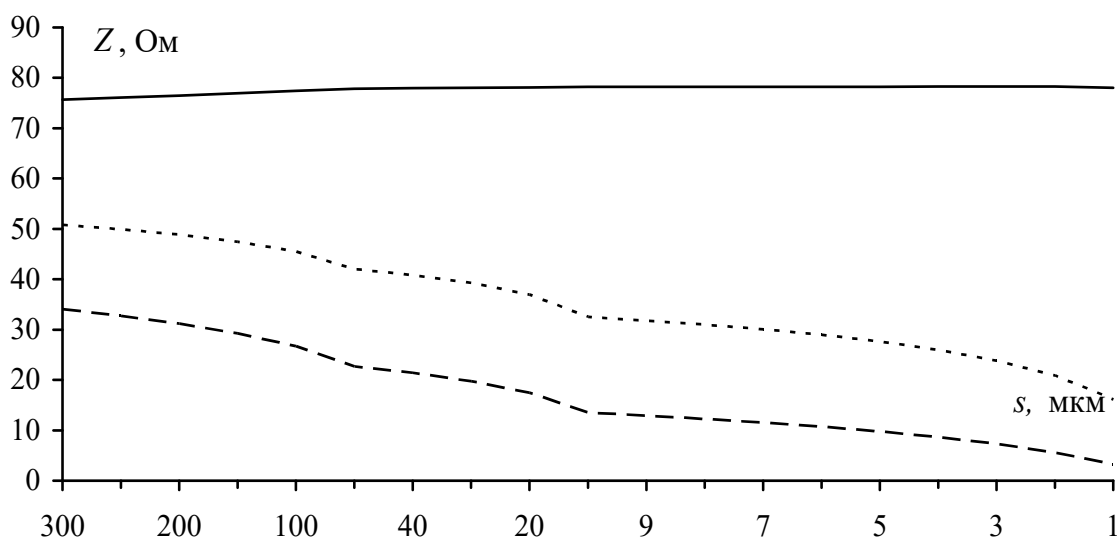


Рисунок 3.42 – Зависимости Z_0 (---), Z_c (—) и $(Z_c Z_0)^{0.5}$ (-.-) от s

Важно отметить, что при уменьшении расстояния s сокращается задержка отраженного выброса нечетной моды, имеющего отрицательную полярность, а при $s = 1$ мкм наблюдается наложение выбросов четной моды и отраженного импульса нечетной моды. Таким образом, при дальнейшем усилении связи между проводниками есть возможность уменьшения амплитуды выброса четной моды за счет его наложения на отраженный выброс нечетной моды. Однако для достижения такого результата нужен другой набор параметров поперечного сечения витка, поскольку дальнейшее уменьшение s для усиления связи между проводниками невозможно. Такое наложение обеспечивает условие

$$\tau_{\min} 4l = \tau_{\max} 2l, \quad (3.7)$$

где $\tau_{\min}$ и $\tau_{\max}$ – наименьшее и наибольшее из значений погонных задержек четной и нечетной мод. После упрощения формула (3.7) примет вид

$$\tau_{\max} = 2\tau_{\min}. \quad (3.8)$$

Условие (3.8) можно выполнить за счет других параметров поперечного сечения (t , h , ε_r , w) таким образом, что реализация устройства на практике будет возможна.

Для проверки достоверности полученных результатов проведено полноволновое моделирование. На рисунке 3.43 приведены формы напряжения ЭСР на выходе витка с $l = 3$ м при

$s = 300$ мкм, полученные двумя видами моделирования – с помощью квазистатического и электродинамического подхода (с грубой и учащенной сеткой). В таблице 3.4 сведены максимальные амплитуды и задержки основных выбросов последовательности.

Из представленных результатов видно, что отклики на выходе витка, полученные разными методами, хорошо согласуются, но имеются и различия (в пределах 1% по амплитуде выбросов и 3% по задержке). Примечательно, что при моделировании электродинамическим подходом учащение сетки приводит к уменьшению задержки выброса 2 (так, что задержка становится ближе к задержке, полученной квазистатическим подходом), а задержка выброса 3 практически не меняется.

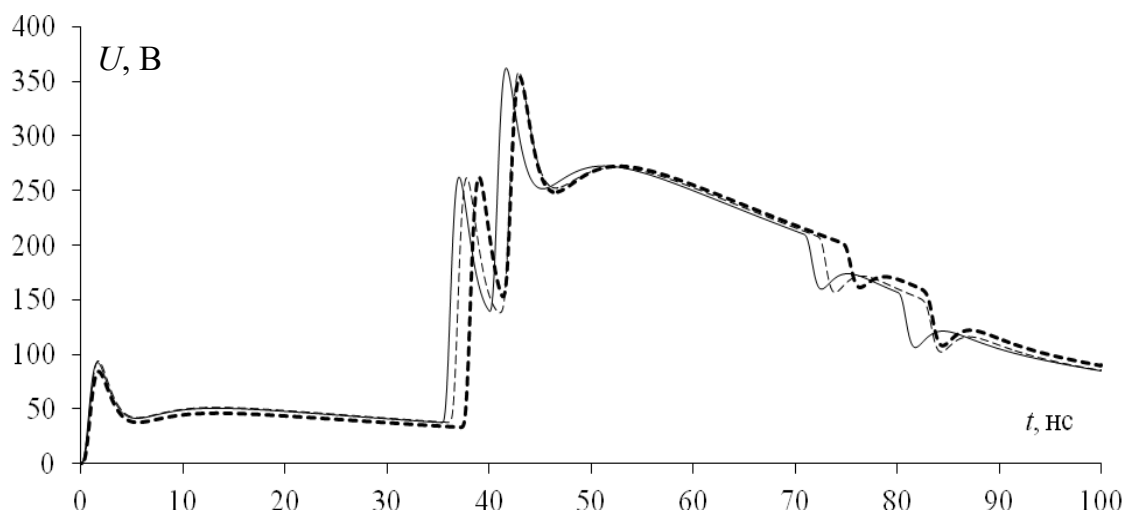


Рисунок 3.43 – Форма напряжения ЭСР на выходе витка длиной $l = 3$ м при $s = 300$ мкм, полученная с помощью квазистатического подхода (—) и электродинамического подхода с грубой (- -) и учащенной (— · —) сеткой

Таблица 3.4 – Амплитуды (В) и задержки (нс) выбросов 2 и 3 на выходе витка, полученные разными методами

Подход	t_2	t_3	U_1	U_2	U_3
Квазистатический	35,42	40,11	92,67	262,72	362,73
Электродинамический (с грубой сеткой)	37,16	41,32	84,12	262,19	354,15
Электродинамический (с учащенной сеткой)	35,96	41,05	94,01	261,64	358,82

Таким образом, простой виток МЛ позволяет ослабить ЭСР, однако уменьшение его амплитуды (1,38 раза) не столь существенно из-за большой длительности (составляющие разложения пикового выброса накладываются на спад ЭСР и это не позволяет добиться существенного уменьшения амплитуды). Рост ослабления возможен лишь за счет чрезмерного уменьшения расстояния между проводниками витка, что на практике не реализуемо. Нужно отметить, что здесь рассмотрен только один набор параметров поперечного сечения, чтобы продемонстрировать принцип разложения ЭСР в витке МЛ. Другой набор параметров даст иную l_{opt} (особенно h и ε_r) и результат разложения.

Асимметричное поперечное сечение

Рассмотрим другой тип связи (лицевая связь). Схема соединений витка такая же, как на рисунке 3.35, а поперечное сечение приведено на рисунке 3.44.

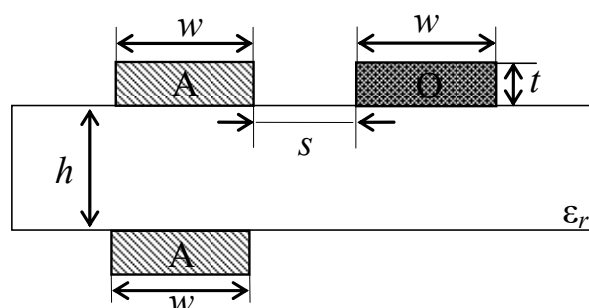


Рисунок 3.44 – Поперечное сечение витка МЛ с лицевой связью

Форма тока воздействующего ЭСР, как и ранее, принята близкой к третьей степени жесткости по стандарту ГОСТ Р 53734.3.1 [1]. Параметры витка установлены следующими: $w = s = 2$ мм, $t = 18$ мкм, $\varepsilon_r = 4$, $l = 0,1$ м. Сначала выполнен анализ влияния l на форму и амплитуду ЭСР на выходе витка. Погонные задержки четной и нечетной мод витка составили $\tau_e = 4,314$ нс/м, $\tau_o = 5,956$ нс/м. На рисунке 3.45 приведены формы ЭСР на входе и выходе витка (в узлах $V1$ и $V2$ схемы) при изменении l от 0,1 м до 1 м с шагом 0,1 м и от 1 м до 5 м с шагом 1 м. В таблице 3.5 сведены амплитуда ЭСР в узле $V2$ (V_{max}) и ее ослабление относительно напряжения ЭСР на входе (464,2 В).

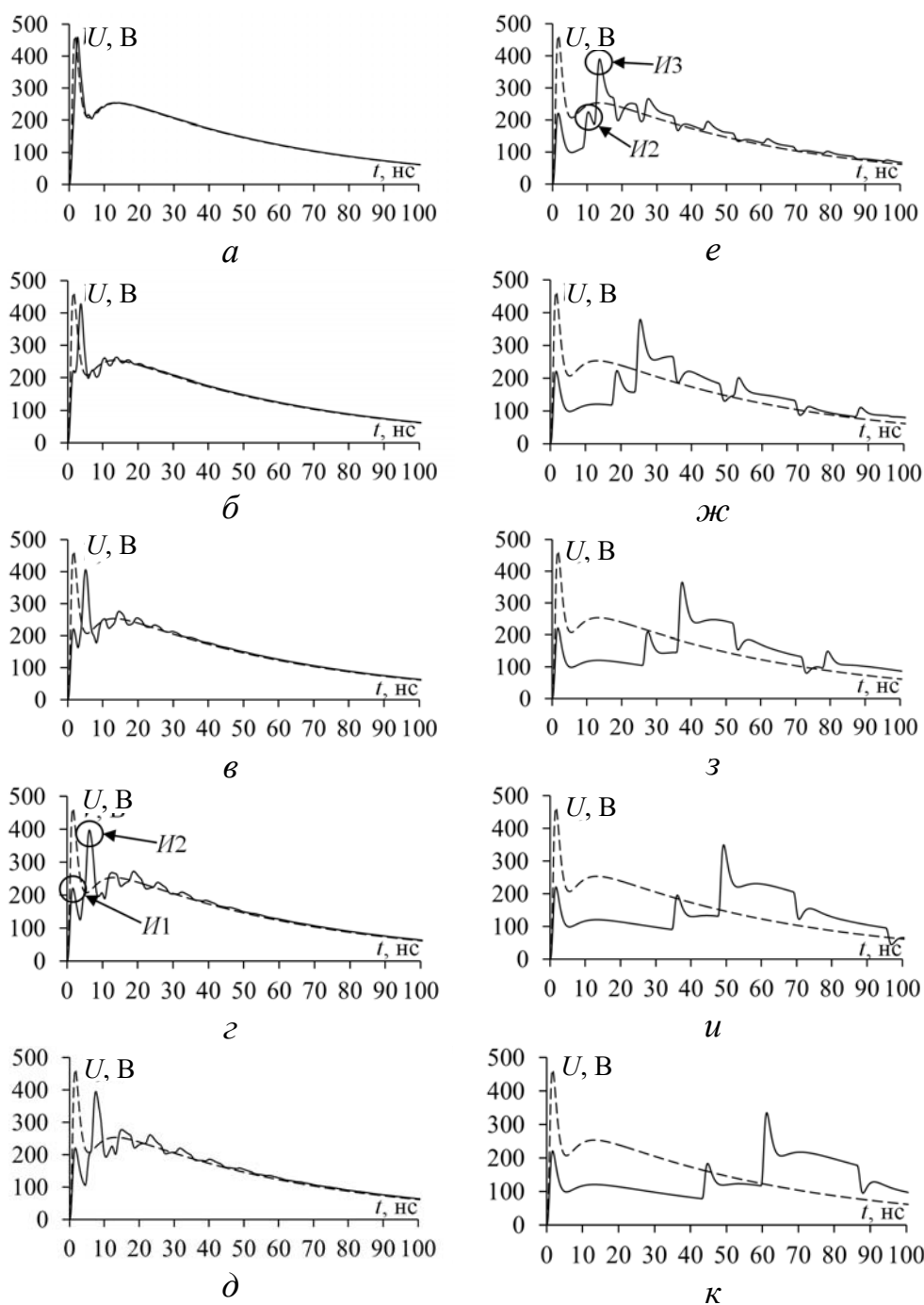


Рисунок 3.45 – Форма ЭСР на входе (---) и выходе (—) исследуемого витка при $l = 0,1$ (а), $0,2$ (б), $0,3$ (в), $0,4$ (г), $0,5$ (д), 1 (е), 2 (ж), 3 (з), 4 (и) и 5 (к) м

Из рисунка 3.45 видно, что при росте l до $0,4$ м начинают проявляться выбросы 1 и 2, которые являются результатом разложения пикового выброса ЭСР. Первый импульс (И1) является перекрестной помехой от фронта сигнала на ближнем конце витка, а второй (И2) – суммой четной и нечетной мод (рисунок 3.45,г). Также на выход будут приходить отраженные состав-

ляющие. При этом ослабление ЭСР увеличится от 1,01 раза до 1,17 раза (см. таблицу 3.5). Дальнейшее увеличение l до 1 м приводит к разложению основного сигнала на импульсы нечетной и четной мод ($И2$ и $И3$ на рисунке 3.45, e соответственно). При этом ослабление составляет уже 1,19 раза. Увеличение l до 5 м приводит к возрастанию разности задержки между основными составляющими, а также ослаблению ЭСР до 1,39 раза.

Таблица 3.5 – Зависимость амплитуды ЭСР и ослабления на выходе витка от длины l

l , м	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	2	3	4	5
$V_{\max}$, В	459,2	428,3	405,9	397,3	395,0	390,2	379,4	365,3	349,7	335,2
Ослабление	1,01	1,08	1,14	1,18	1,18	1,19	1,22	1,27	1,33	1,39

Увеличение разности задержек импульсов $И2$ и $И3$ дает разложение ЭСР из-за влияния модальных искажений и уменьшение амплитуды ЭСР на выходе витка. Для полного разложения пикового выброса и минимизации амплитуды задержка каждого последующего импульса разложения должна быть не меньше суммы задержки предыдущего и длительности пикового выброса. Условие (3.6) позволяет такое разложение. Однако, в отличие от случая витка на основе МПЛ, в условии (3.6) погонные задержки поменяются местами, поскольку в структурах с лицевой связью четная мода быстрее нечетной.

Для минимизации амплитуды ЭСР на выходе витка нужно выровнять амплитуды составляющих выбросов после разложения. Из полученных ранее результатов известно, что равенства можно достичь за счет оптимизации связи между проводниками витка. В исследуемой структуре максимальное влияние на связь между проводниками оказывает толщина диэлектрической основы h . Поэтому выполнена оценка ее влияния на форму и амплитуду ЭСР на выходе витка. На рисунке 3.46 приведена форма ЭСР на входе и выходе витка (в узлах $V1$ и $V2$ схемы) при исходных параметрах и $l = 5$ м и при уменьшении h от 800 до 200 мкм с шагом 200 мкм, а в таблицу 3.6 сведены амплитуда ЭСР на выходе витка, его ослабление и погонные задержки мод.

На рисунке 3.46 заметно, что при уменьшении h амплитуда выброса 1 увеличивается, а выброса 3 – уменьшается. Из таблицы 3.6 видно, что при уменьшении h от 800 мкм до 400 мкм ослабление сначала увеличивается от 1,42 до 1,54 раза соответственно, а затем при $h = 200$ мкм уже уменьшается до 1,332 раза из-за увеличения амплитуды выброса 1. Это дает возможность выравнивания амплитуд выбросов и уменьшения общей амплитуды выходного сигнала за счет выбора h . Отметим, что после выброса 3 приходит выброс 4 (И4) отрицательной полярности (рисунок 3.46,з), который является отраженным импульсом четной моды. При уменьшении h задержка между выбросами 3 и 4 уменьшается, а при их наложении возможна дополнительная минимизация амплитуды ЭСР, как это было показано ранее.

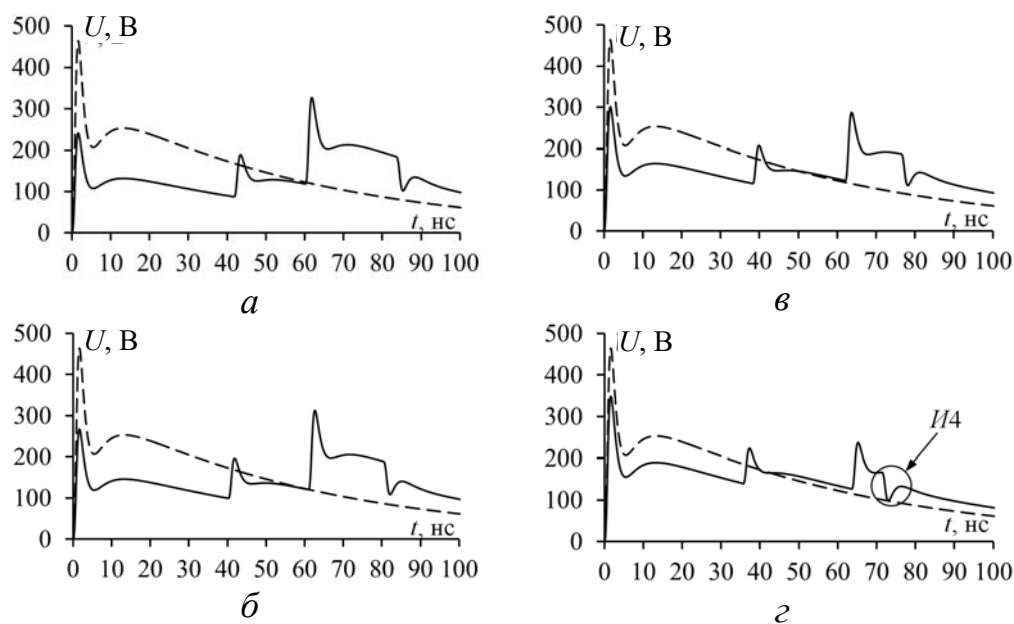


Рисунок 3.46 – Формы ЭСР на входе (---) и выходе (—) исследуемого витка при $h = 800$ (а), 600 (б), 400 (в) и 200 (г) мкм

Таблица 3.6 – Зависимость амплитуды ЭСР, ее ослабление и погонные задержки мод витка от h

h , мкм	$I_{\max}$, В	Ослабление	τ_e , нс/м	τ_o , нс/м
800	327,16	1,45	4,182	6,019
600	312,95	1,48	4,021	6,100
400	301,36	1,54	3,823	6,207
200	348,59	1,33	3,568	6,359

Выполнена оценка влияния изменения t , s и ε_r при $h = 1000$ мкм и $l = 5$ м на искажение ЭСР на выходе витка. На рисунке 3.47 приведена форма ЭСР при прочих исходных параметрах и увеличении w от 2000 до 5000 мкм с шагом 1000 мкм, на рисунке 3.48 – при $t = 18, 35, 50$ и 70 мкм, на рисунке 3.49 – при увеличении s от 2000 до 5000 мкм с шагом 1000 мкм, на рисунке 3.50 – при увеличении ε_r от 4 до 13 с шагом 3.

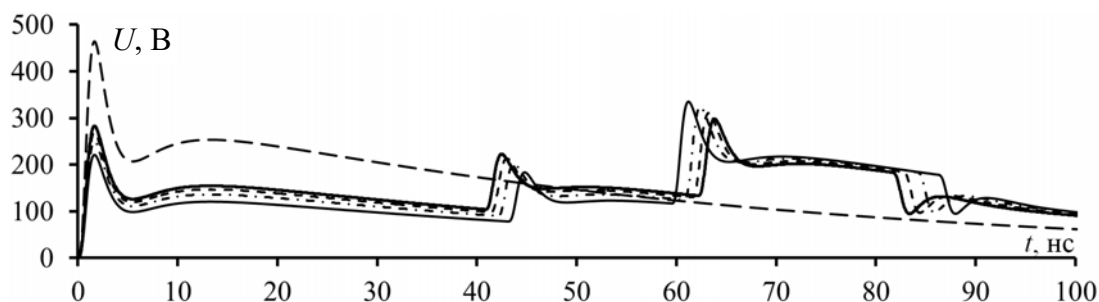


Рисунок 3.47 – Формы ЭСР на входе (---) и выходе исследуемого витка при $w = 2000$ (—), 3000 (— · —), 4000 (— — —) и 5000 (—) мкм

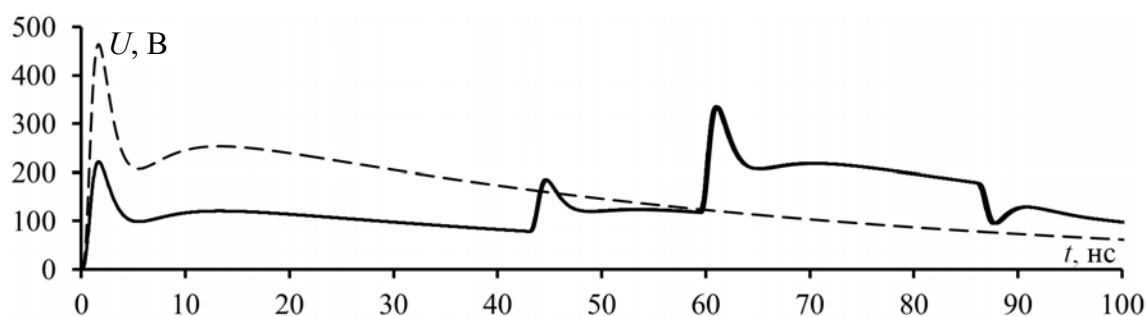


Рисунок 3.48 – Формы ЭСР на входе (---) и выходе исследуемого витка при $t = 18$ (—), 35 (— · —), 50 (— — —) и 70 (—) мкм

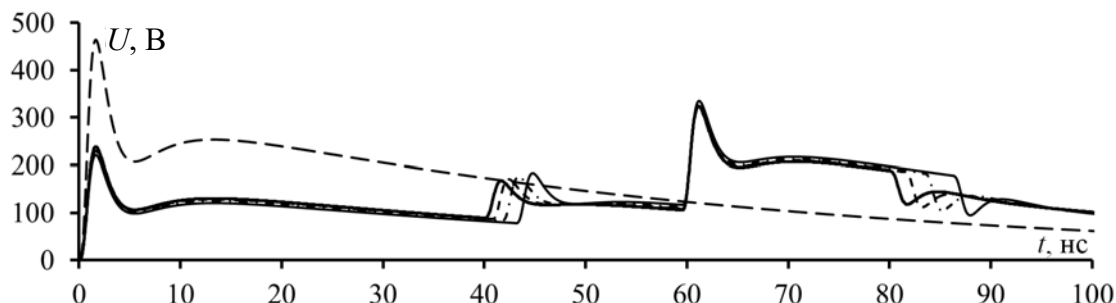


Рисунок 3.49 – Формы ЭСР на входе (---) и выходе исследуемого витка при $s = 2000$ (—), 3000 (— · —), 4000 (— — —) и 5000 (—) мкм

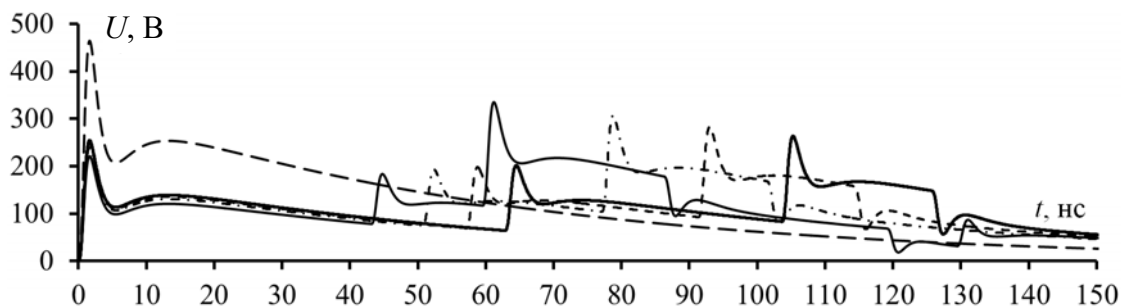


Рисунок 3.50 – Формы ЭСР на входе (---) и выходе исследуемого витка при $\epsilon_r = 4$ (—), 7 (— · —), 10 (— —) и 13 (—)

Из рисунков 3.47–3.50 видно, что увеличение w вызывает рост амплитуды выбросов 1 и 2 и задержку выброса 3, а также уменьшение амплитуды выброса 3 и задержку выброса 2. При этом ослабление ЭСР возрастает и при $w = 5000$ мкм составляет 1,56 раза. Увеличение толщины t практически не оказывает влияния на изменение формы и амплитуды ЭСР (отклики накладываются друг на друга). Увеличение s дает незначительный рост амплитуды выброса 1 и уменьшение амплитуд выбросов 2 и 3. Также при увеличении s уменьшается задержка выброса 2. В этом случае ослабление ЭСР на выходе витка увеличивается и при $s = 5000$ мкм составляет 1,43 раза. Увеличение ϵ_r приводит к увеличению задержек выбросов 2 и 3, а также амплитуд выбросов 1 и 2 (амплитуда выброса 3 уменьшается). При этом ослабление ЭСР на выходе витка увеличивается и при $\epsilon_r = 13$ составляет 1,76 раза.

С учетом представленного характера изменения формы и амплитуды ЭСР на выходе витка при изменении параметров его поперечного сечения выполнена оптимизация витка с учетом реальных геометрических параметров для минимизации габаритов витка с сохранением ослабления. Получен следующий набор оптимальных параметров на подложке из материала FR-4: $w = 7,5$ мм, $t = 18$ мкм, $s = 5,5$ мм, $h = 1,5$ мм, $\epsilon_r = 4$, $l = 4,8$ м. Вычисленные погонные задержки мод: $\tau_e = 3,903$ нс/м, $\tau_o = 6,221$ нс/м. На рисунке 3.51 представлены формы ЭСР на входе и выходе такого витка.

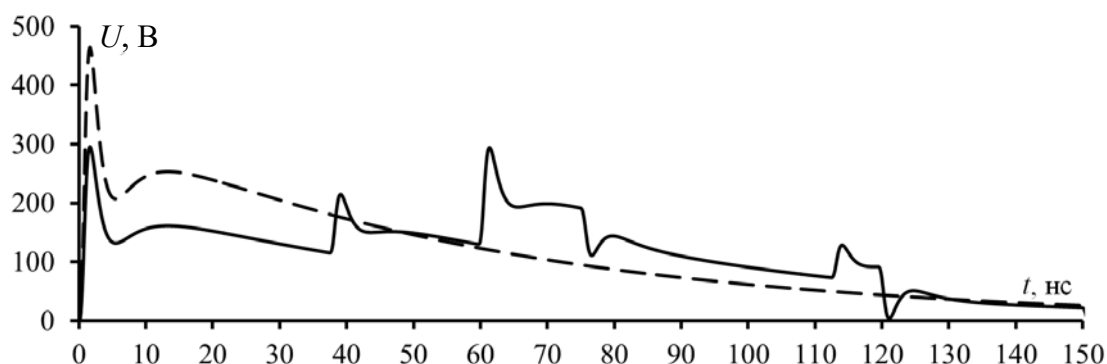


Рисунок 3.51 – Формы напряжения ЭСР без учета его прохождения по исследуемой линии (— —) и на ее выходе (—)

Из рисунка 3.51 видно, что пиковый выброс ЭСР в конце витка раскладывается на последовательность выбросов. Амплитуда ЭСР на выходе витка не превышает 295,7 В. Таким образом, ослабление составило 1,57 раза. Однако длина витка велика и составила 4,8 м, что неприемлемо для практики.

Таким образом, виток МЛ с лицевой связью позволяет ослабить ЭСР за счет разложения его пикового выброса на составляющие. Асимметрия витка (сильная лицевая связь между его проводниками) позволяет увеличить ослабление до 1,57 раза по сравнению с витком на основе МПЛ. Виток может использоваться совместно с другими средствами защиты для ослабления амплитуды ЭСР.

Вопросы к разделу 3

1. Опишите цель и основные этапы методики оценки воздействия контактного ЭСР на транзистор с учетом паразитных параметров межсоединений.
2. В чем заключаются ключевые отличия усовершенствованной модели транзистора от стандартной SPICE-модели, предоставляемой производителем?
3. По каким критериям проводилась верификация схемотехнических моделей имитаторов ЭСР и какая из рассмотренных моделей показала наилучшее соответствие эталону?
4. Как влияет толщина слоя припоя на паразитные емкости посадочного места транзистора?

5. Объясните, почему учет емкости посадочного места приводит к снижению пробивного напряжения подзатворного диэлектрика транзистора при воздействии ЭСР.

6. Опишите наблюдавшиеся в эксперименте виды деградации передаточных характеристик транзисторов IRFZ46N и IRF4095 SPbF при воздействии ЭСР до наступления отказа.

7. В чем заключается основное преимущество аналитической модели для оценки наведенных токов и напряжений перед численными методами (MoM, МКРВО)?

8. Опишите конструкцию и назначение согласующего адаптера, использованного в экспериментальной установке для исследований воздействия электромагнитного излучения ЭСР.

9. Проанализируйте результаты эксперимента по измерению наведенных сигналов на монополь и МЛП. Для какого объекта согласованность между аналитической моделью и экспериментом была лучше и почему?

10. Сформулируйте общий вывод о применимости разработанных моделей и методик для инженерной практики при проектировании с учетом устойчивости к воздействию ЭСР РЭУ.

11. Сформулируйте общий принцип модального разложения импульсных воздействий в полосковых устройствах. Как повлияет увеличение длины полоскового устройства на амплитуду выходного напряжения при воздействии импульсным сигналом?

12. Объясните, в чем заключается основное отличие временного отклика полосковых устройств с боковой и лицевой связью. Что является ресурсом для увеличения ослабления ЭСР в витке МЛ?

4 МЕТОДИКА ЛОКАЛИЗАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

4.1 Силовая шина электропитания

Ранее были рассмотрены фундаментальные механизмы воздействия ЭСР и методики оценки восприимчивости отдельных компонентов. Однако на практике отказ оборудования может произойти не только на уровне компонента, но и из-за нарушения работы системы электропитания. На нее воздействуют различные виды импульсных помех, среди которых особую опасность представляют помехи, вызванные ЭСР. Высокоамплитудные и быстрые импульсы ЭСР способны не только спровоцировать сбой в работе аппаратуры, но и привести к необратимым повреждениям силовых элементов и всей системы электропитания в целом. Поэтому задача ее защиты от импульсных помех становится критически важной на этапе проектирования.

Конструкция силовой шины электропитания (СШЭП), разработанная в [58], ослабляет амплитуды импульсных и кондуктивных помех, создаваемых системами электропитания. В отличие от обычных шин, она интегрирует в себе не только функцию передачи энергии, но и специальные элементы защиты от кондуктивных помех в виде фильтров на элементах с сосредоточенными и распределенными параметрами. В качестве примера можно рассмотреть лабораторный макет (рисунок 4.1), разработанный для КА.

Макет состоит из основы (1) длиной $l = 0,5$ м с прямоугольным поперечным сечением. К основе подключены проводные отводы (2), на концах которых имеются соединители (3), необходимые для подключения питания к потребителям – отдельным модулям РЭУ КА. Важным защитным элементом является сплошное покрытие всей шины и отводов электропроводящей лентой из арамидных нитей с обмоткой из медной посеребренной проволоки (ЛМAMc) (рисунок 4.2). Эта лента выполняет роль

электропроводящего экрана для протекания токов ЭСР, предотвращая его проникновение во внутренние проводники шины.

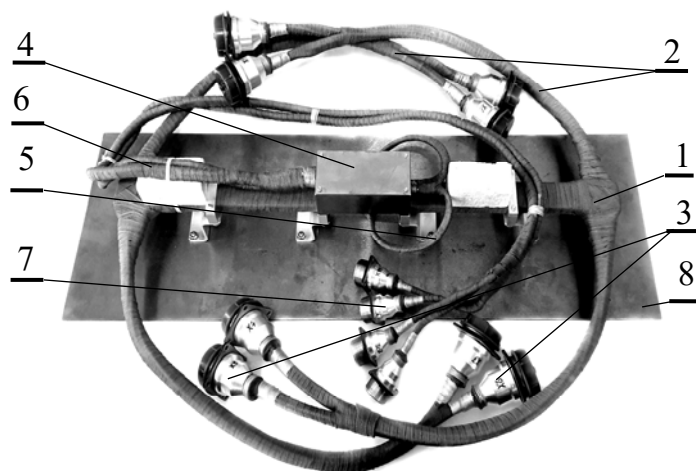


Рисунок 4.1 – Лабораторный макет СШЭП КА



Рисунок 4.2 – Лента ЛМAMc

Неотъемлемой частью конструкции является помехозащитный фильтр (4) с собственными отводами (5), установленный непосредственно на СШЭП. Фильтр реализован на компонентах с сосредоточенными и распределенными параметрами, что позволяет эффективно подавлять широкий спектр кондуктивных помех. Для подключения нагрузки (отдельного модуля КА) используются отводы (6) с соединителями (7).

Конструктивные параметры шины выбраны с учетом требований по токовой нагрузке: площадь поперечного сечения каждого полюса (положительного и отрицательного) составляет 50 мм^2 , что позволяет обеспечить максимальный ток до 200 А. Вся сборка жестко закреплена на металлическом основании, которое служит

для механической фиксации и может использоваться в качестве плоскости земли.

Представленная помехозащищенная СШЭП представляет собой не просто набор проводников, а законченный функциональный узел, в котором вопросы передачи электроэнергии и защиты от помех решаются совместно уже на конструктивном уровне. Это необходимый шаг для создания надежной системы электропитания, устойчивой к внешним импульсным воздействиям.

4.2 Методика анализа и локализации экстремумов воздействия электростатического разряда

Для целенаправленного и экономически обоснованного повышения надежности СШЭП необходимо не просто применять защитные меры, а точно знать, где они наиболее необходимы. С этой целью разработана методика, позволяющая анализировать распространение импульса ЭСР вдоль СШЭП с проводными отводами и локализовывать участки с максимальным значением напряжения – так называемые экстремумы воздействия. Практическая ценность этой методики заключается в возможности точечного повышения устойчивости именно в «слабых» местах, например увеличение слоев изоляции, что повышает общую надежность без излишнего утяжеления конструкции или увеличения ее стоимости. Методика (рисунок 4.3) представляет собой последовательность вычислительных этапов, реализуемых с помощью ПО для квазистатического моделирования (TUSUR.EMC).

Первым этапом является создание детализированных геометрических моделей для каждого характерного участка шины: основания с разными типами поперечного сечения (прямоугольным, коаксиальным, спиральным) и всех типов проводных отводов. Модели строятся на основе реальных электрических и геометрических параметров: площади поперечного сечения проводников, толщины и диэлектрической проницаемости изоляционных материалов, наличия экранирующей ленты.

На втором этапе для каждого созданного поперечного сечения вычисляются матрицы погонных параметров: коэффициентов электромагнитной (L) и электростатической (C) индукции, а также погонных проводимостей (G) и сопротивлений (R). Эти матрицы полностью описывают свойства линии передачи на единицу длины.



Рисунок 4.3 – Методика для анализа и локализации экстремумов воздействия ЭСР на СШЭП

Далее, на третьем этапе, в среде моделирования собирается полная модель всей СШЭП с учетом проводных отводов. Каждому отрезку шины и отвода в этой схеме присваиваются вычисленные ранее матрицы погонных параметров, соответствующие его геометрии. Четвертым шагом задаются физические длины всех отрезков.

Пятый и шестой этапы связаны с подготовкой к расчету. Пользователь выбирает конкретные узлы и проводники вдоль

шины, для которых необходимо получить распределение тока или напряжения, и задает точность вычислений, определяя количество сегментов, на которые будет разбит каждый проводник для численного анализа.

На седьмом, ключевом, этапе выполняется моделирование воздействия ЭСР (например, по МЧТ) на выбранную точку шины. Программа вычисляет отклик (напряжение относительно земли) в каждом сегменте всех проводников во временной области. Анализируя эти данные, автоматически или вручную определяются максимальные амплитуды напряжения и их точное местоположение вдоль шины и отводов.

Восьмой, завершающий, этап носит прикладной характер. В выявленных точках с максимальным напряжением добавляются дополнительные слои диэлектрической изоляции, и моделирование повторяется. Это позволяет количественно оценить эффективность такого локального усиления защиты. Сравнение результатов «до» и «после» дает инженеру четкое обоснование для принятия конструкторского решения. В результате методика замыкает цикл от анализа уязвимости до разработки конкретной меры повышения надежности.

Вывод для будущего инженера: разработанная методика – это инструмент для точечного и экономически эффективного усиления защиты. Вместо того чтобы экранировать всю шину, вы можете точно определить «слабые места» (экстремумы напряжения) и усилить изоляцию или добавить защитные элементы именно там, где это необходимо. Такие действия позволят повысить надежность без увеличения массы, габаритов и стоимости конструкции, что критически важно для космической техники.

4.3 Влияние геометрии и длины силовой шины на амплитуду электростатического разряда

Применяя методику локализации и понимая, где именно возникает опасное напряжение, логично задаться вопросом: а можно ли заранее, на этапе выбора конструкции, повлиять на амплитуду

воздействия? Ключевую роль здесь играют такие параметры силовой шины, как геометрическая форма поперечного сечения и ее длина [59, 60].

На рисунке 4.4 представлены три вида исследованных СШЭП: прямоугольная, коаксиальная и спиральная. Их конструкция напрямую определяет характер распределения электромагнитного поля и путь протекания тока ЭСР.

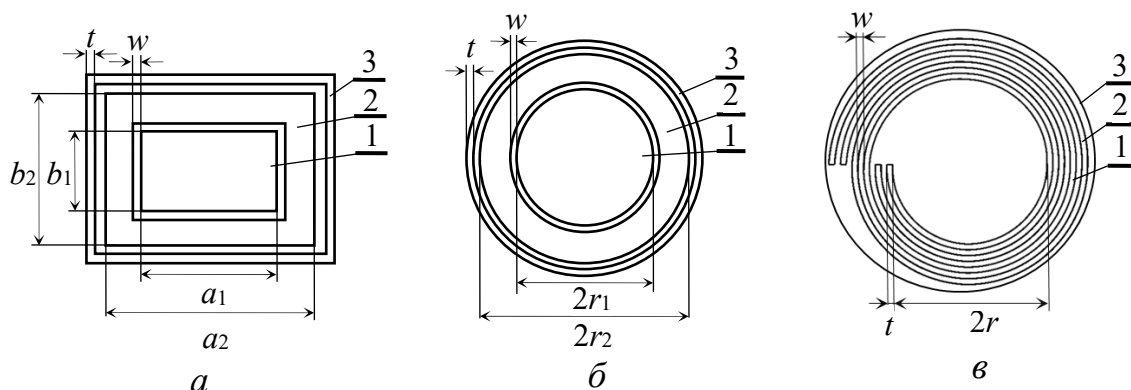


Рисунок 4.4 – Поперечные сечения прямоугольной (а), коаксиальной (б) и спиральной (в) СШЭП

Для оценки восприимчивости разработана схема воздействия ЭСР на СШЭП (рисунок 4.5,а), включающая проводники для прямого «+» (узлы $V1, V2$) и обратного «-» (узлы $V3, V4$) тока, экранирующую ленту ЛМAMс «⊥» (узлы $V5, V6$) и согласованные нагрузки $R1-R6$ по 50 Ом. Воздействие ЭСР (МЧТ с параметрами для 4-й степени жесткости по ГОСТ Р 51317.4.2 [2]) проводится поочередно на каждый узел с вычислением формы токов и напряжения на дальнем конце и в пассивных линиях.

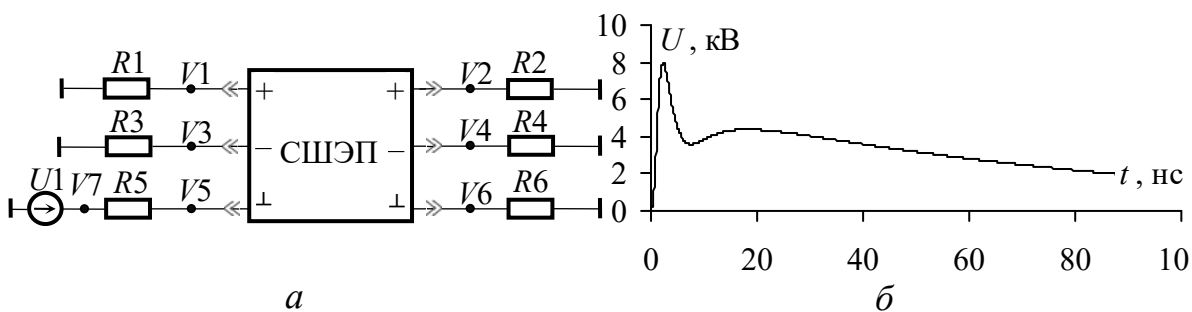


Рисунок 4.5 – Схема воздействия ЭСР на основу СШЭП (а) и форма напряжения ЭСР (б)

Результаты моделирования для СШЭП разной длины показывают (рисунки 4.6, 4.7 и таблица 4.1), что формы импульса на всех видах поперечного сечения качественно совпадают, но амплитуды затухания различны. Для подтверждения результатов моделирование выполнялось в двух программах – основанной на методе моментов (МоМ), а также конечных разностей во временной области.

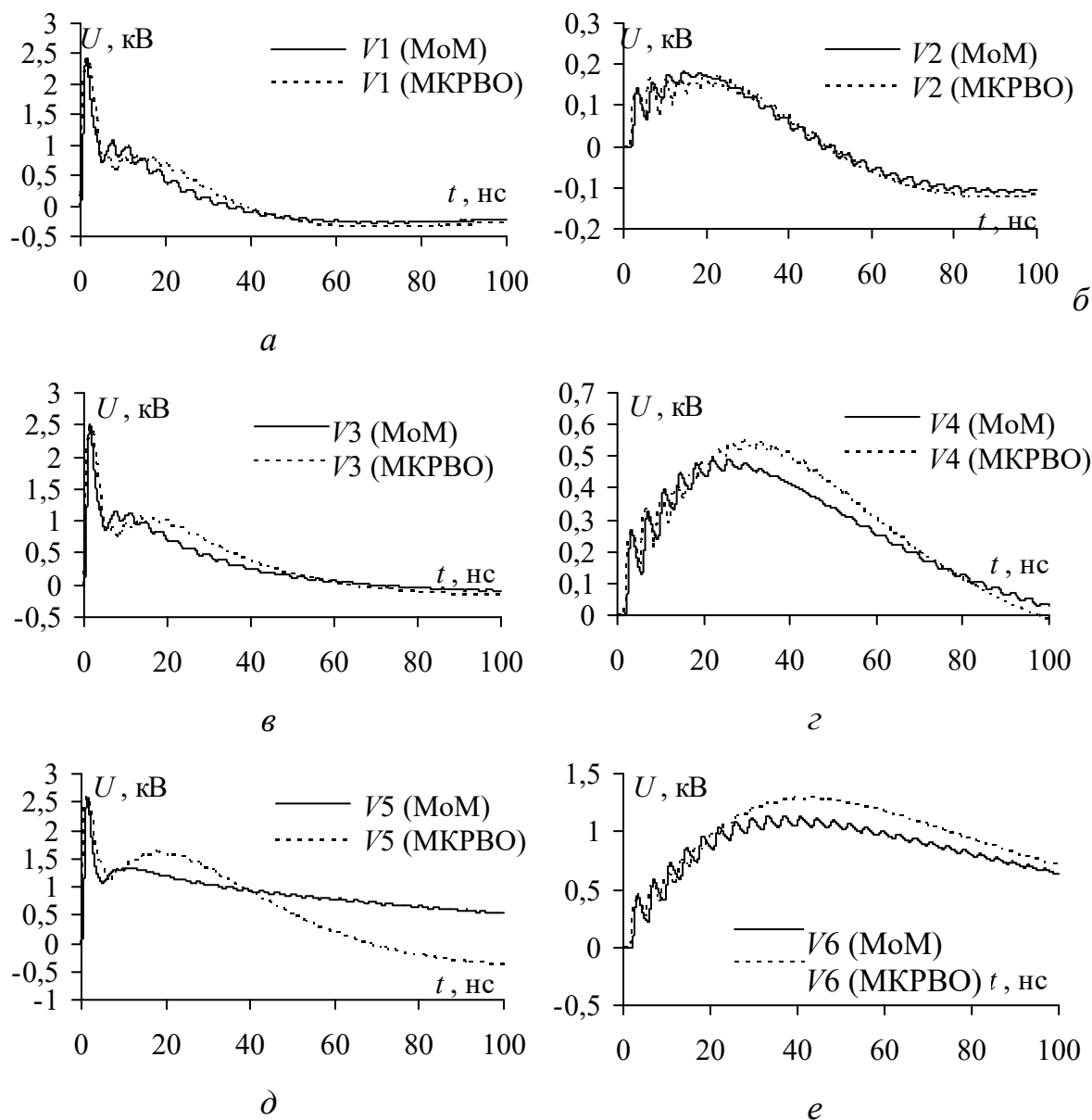


Рисунок 4.6 – Формы напряжения в начале (*a*, *в*, *д*) и конце (*б*, *г*, *е*) на ленте « $\perp$ », шинах « $+$ » и « $-$ » при воздействии ЭСР на ленту « $\perp$ » СШЭП с прямоугольным поперечным сечением основы ($l = 0,5$ м)

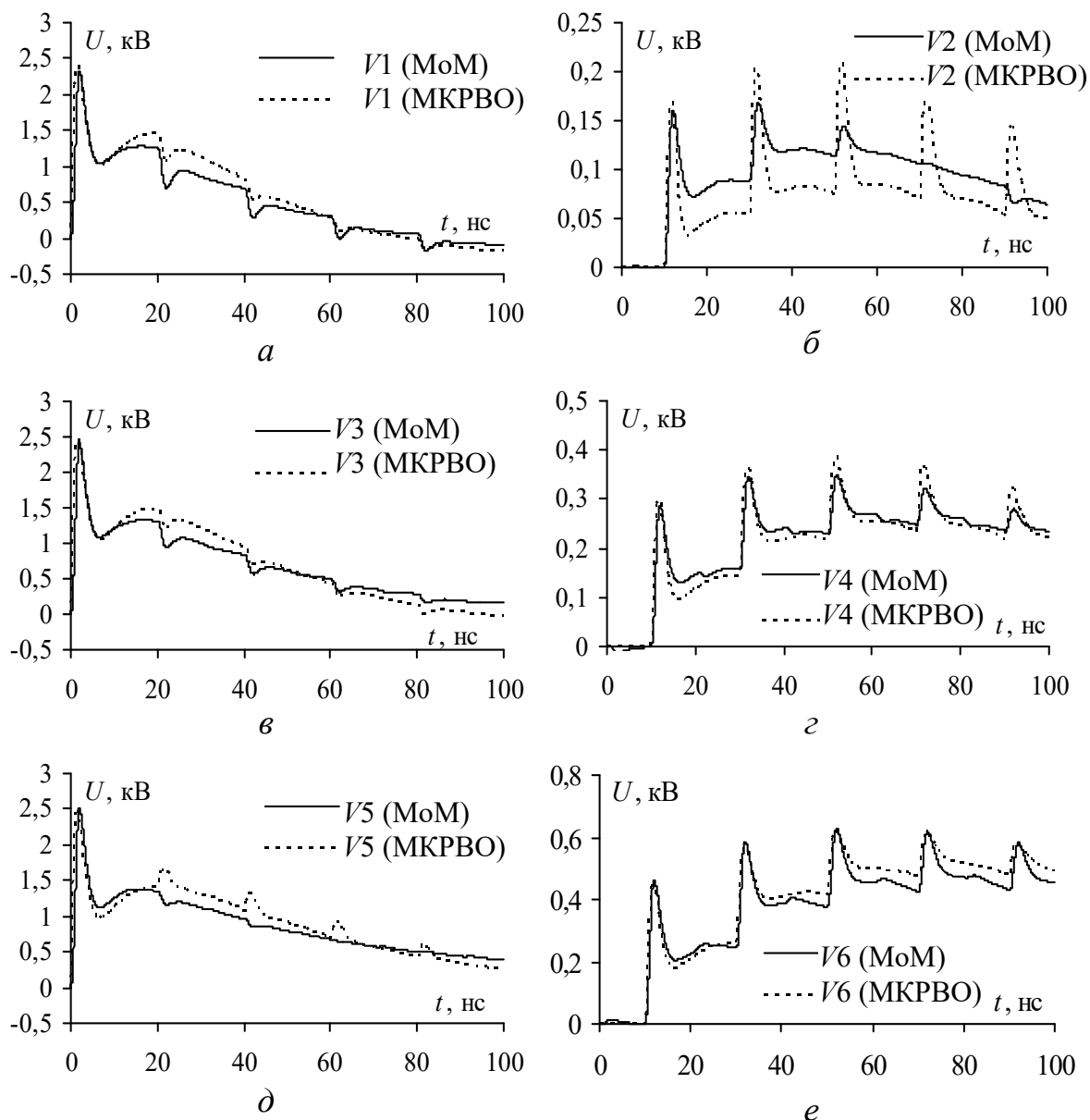


Рисунок 4.7 – Формы напряжения в начале (*a, в, д*) и конце (*б, г, е*) на ленте « $\perp$ », шинах « $+$ » и « $-$ » при воздействии ЭСР на ленту « $\perp$ » СШЭП с прямоугольным поперечным сечением основы с $l = 3$ м

Из рисунков 4.6 и 4.7 видно, что формы напряжения, вычисленные с использованием МоМ и МКРВО, согласуются. При воздействии ЭСР на ленту « $\perp$ » максимальное напряжение в начале шин « $+$ » и « $-$ » не превышает 2,4 кВ, а на « $\perp$ » – 2,5 кВ при $l = 0,5$ м (см. рисунок 4.6) и $l = 3$ м (см. рисунок 4.7). Однако при $l = 0,5$ м в конце шины максимальная амплитуда существенно уменьшается и не превышает на « $\perp$ » 1,2 кВ, на « $+$ » шине – 0,18 кВ, на « $-$ » шине – 0,5 кВ. С ростом длины СШЭП до $l = 3$ м в конце шины на « $\perp$ » максимальная амплитуда составляет 0,63 кВ, на « $+$ » шине –

0,16 кВ, на «–» шине – 0,35 кВ. В результате ослабление амплитуды ЭСР при воздействии на ленту «⊥» составило: на «⊥» – 6,4 дБ, на «+» шине – 22,7 дБ, на «–» шине – 13,8 дБ. При $l = 3$ м ослабление амплитуды ЭСР на ленте «⊥» увеличилось на 5,6 дБ, на «+» шине – на 0,2 дБ, а на «–» шине – на 2,8 дБ. В этой связи длина СШЭП почти не влияет на ослабление пассивных для тока ЭСР проводников, но оно существенно (в 2 раза) для активного проводника (лента «⊥»). Аналогичная ситуация наблюдается для СШЭП с коаксиальным и спиральным поперечными сечениями основания.

Таблица 4.1 – Ослабление амплитуды ЭСР, дБ

Воздействие	СШЭП	Шина «+»		Шина «–»		Лента «⊥»	
		0,5 м	3 м	0,5 м	3 м	0,5 м	3 м
Шина «+»	Прямоугольная	5,8	11,3	15,7	18,0	22,7	22,9
	Коаксиальная	5,4	10,8	16,4	18,6	25,2	25,4
	Спиральная	14,3	15,1	14,5	15,2	17,9	18,1
Шина «–»	Прямоугольная	15,7	18,0	8,5	14,1	13,8	16,6
	Коаксиальная	16,4	18,6	8,1	13,8	14,1	16,7
	Спиральная	14,5	15,3	14,4	15,2	17,7	17,9
Лента «⊥»	Прямоугольная	22,7	22,9	13,8	16,6	6,4	12,0
	Коаксиальная	25,2	25,4	14,1	15,7	6,7	12,0
	Спиральная	17,9	18,1	17,7	18,0	7,0	12,2

Ослабление при $l = 0,5$ м составило: на «⊥» – 6,1 дБ, на «+» шине – 23 дБ и «–» шине – 13,1 дБ. При $l = 3$ м затухание составило: на «⊥» – 12,1 дБ, на шине «+» – 23,2 дБ, на шине «–» – 16,1 дБ. Максимальная разница между значениями, вычисленными с помощью квазистатического и электродинамического моделирования, – 5,3%.

Из таблицы 4.1 видно, что при $l = 0,5$ м наименьшее (5,4 дБ) и наибольшее (25,2 дБ) ослабления наблюдаются для СШЭП с коаксиальным поперечным сечением. При $l = 3$ м минимальное (10,8 дБ) и максимальное (25,4 дБ) ослабления отмечаются также для коаксиальной СШЭП. При воздействии ЭСР на «+» шину ослабление на «+» и «–» шинах прямоугольной СШЭП увеличилось на 5,5 и 2,3 дБ соответственно. На «+» шине для коаксиаль-

ной и спиральной СШЭП ослабление увеличилось на 5,4 дБ и 0,8 дБ, а на « $\rightarrow$ » шине – на 2,2 дБ и 0,7 дБ соответственно. При воздействии на « $\rightarrow$ » шину ослабление на « $+$ » шине и ленте « $\perp$ » прямоугольной СШЭП увеличилось на 1,3 дБ и 2,8 дБ соответственно. На « $+$ » шине коаксиальной и спиральной СШЭП ослабление увеличилось на 2,2 дБ и 0,7 дБ, а на « $\perp$ » – на 2,6 дБ и 0,2 дБ соответственно. При воздействии ЭСР на ленту « $\perp$ » ослабление на « $+$ » шине прямоугольной, коаксиальной и спиральной СШЭП увеличилось на 0,2 дБ, на « $\rightarrow$ » шине – на 2,8, 1,6 и 0,3 дБ соответственно.

Вывод для будущего инженера: для систем, где критично максимальное подавление энергии прямого разряда, следует выбирать коаксиальные или спиральные шины и не обращать внимание на их длину, поскольку увеличение длины шины приводит к положительному эффекту. Если же основная задача – защита чувствительных потребителей от наведенных помех по цепям электропитания, то акцент следует делать не на длине и форме основы, а на установке помехозащитных фильтров и корректном проектировании проводных отводов. Совокупное применение позволит создать более помехозащищенную СШЭП.

4.4 Влияние проводных отводов на амплитуду электростатического разряда

СШЭП – это лишь электрическая магистраль, к которой через проводные отводы подключаются конечные потребители энергии: блоки аппаратуры, преобразователи, приборы и пр. Эти отводы, представляющие собой жгуты проводов или шины меньшего сечения, становятся неотъемлемой частью системы. Возникает закономерный вопрос: улучшают или ухудшают они устойчивость системы электропитания к ЭСР?

В системе могут присутствовать отводы разной геометрии: короткие жгуты для соседних модулей, длинные линии для удаленных нагрузок, специальные отводы для фильтров (рисунок 4.8).

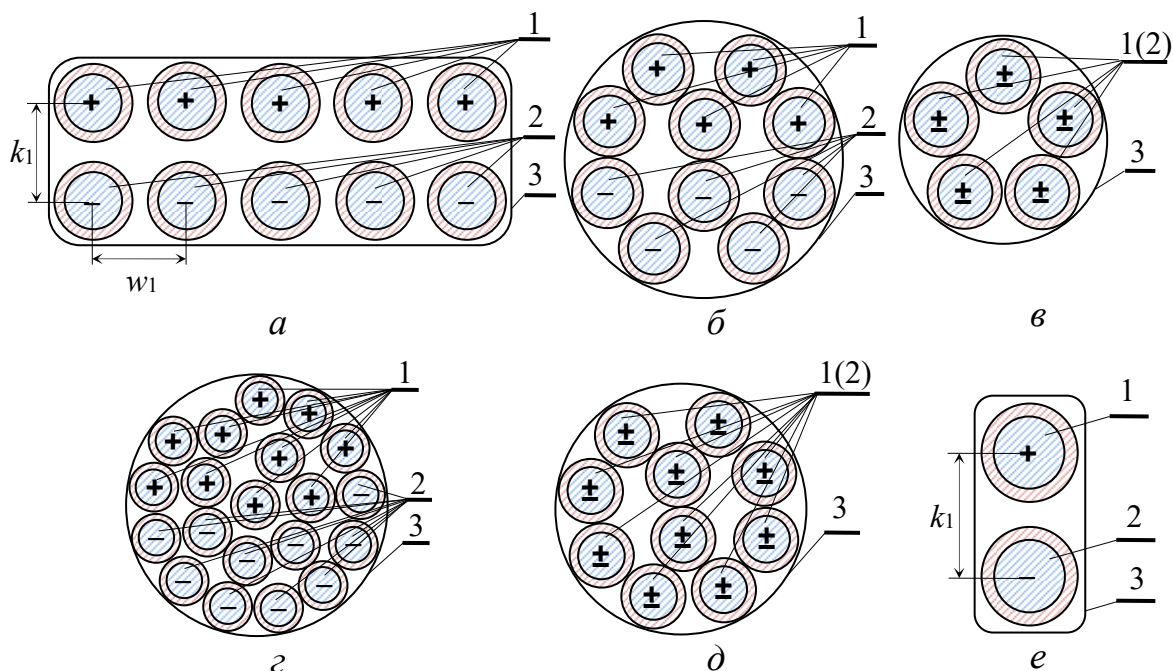


Рисунок 4.8 – Геометрические модели проводных отводов СШЭП

Их моделирование требует учета реальных параметров авиационно-космических проводов (например, БС 35-1298, МС 26-15). Конструкция провода БС 35-1298 (рисунок 4.9,а) содержит токопроводящую жилу из скученных медных луженых проволок (1), изоляцию с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 2,1$ в виде двух сплошных слоев из фторопласта (2). Провод типа МС 26-15 (рисунок 4.9,б) представляет токопроводящую жилу (1) из медной посеребрённой проволоки марки БМС или МСр и изоляцию (2) из электроизоляционного полиимидного лака марки АД-9103 с $\epsilon_r = 3,1$. Для защиты от ЭСР провода в жгуте покрывают ЛМAMс.

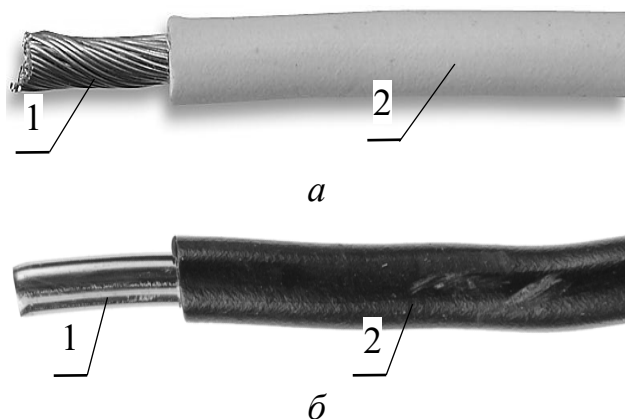


Рисунок 4.9 – Структура проводов БС 35-1298 (а) и МС 26-15 (б)

Вблизи СШЭП поперечное сечение «+/-» отвода представляет собой набор из 10 проводов БС 35-1298 длиной 20–30 мм, расположенных друг над другом (рисунок 4.8,а) на расстоянии $w_2 = k_1 = 4$ мм, с единым экраном в виде металлизированной ленты. Провода расположены таким образом, что сверху имеют положительную полярность (провода 1), а снизу отрицательную (провода 2), вокруг которых находится электропроводящая лента ЛМAMс 3. Подобное расположение необходимо, чтобы соединить провода каждого полюса с основой СШЭП. Суммарная площадь поперечного сечения каждого полюса проводного отвода составляет 25 мм^2 . Каждый проводной отвод (рисунок 4.8,б) выполнен из 10 проводов БС 35-1298 длиной 350 мм (5 проводов на положительный полюс и 5 проводов на отрицательный полюс с поперечным сечением 5 мм^2 , что в сумме дает 50 мм^2). Далее провода каждого полюса разветвляются (поперечные сечения «+» и «-» отводов) и образуют два отвода по 5 проводов БС 35-1298 длиной 100 мм (рисунок 4.8,в). Для повышения электрической надежности каждый полюс электропитания имеет собственный соединитель 2РМДТ33Б7Г9В1В (рисунок 4.10). Проводные отводы (рисунок 4.8,г) необходимы для соединения СШЭП с прибо-



Рисунок 4.10 – Соединитель типа 2РМДТ33Б7Г9В1В

рами, входящими в состав бортовых РЭУ КА. Отводы выполнены из провода МС 26-15 с соединителями 2РМДТ33Б7Г9В1В на концах. При этом поперечное сечение «+/-» отвода содержит 20 проводов МС 26-15 с сечением каждого по $0,5 \text{ мм}^2$ и длиной 900 мм. Возле соединителя провода разветвляются и имеют поперечное сечение для каждого полюса

отдельное по 10 проводов МС26-15, которые припаиваются к соединителю на конце (рисунок 4.8,д). Проводные отводы 5 (см. рисунок 4.1), необходимые для соединения СШЭП с помехозащитным фильтром, представляют собой два провода разной полярности (рисунок 4.8,е), обмотанные металлизированной лен-

той. При этом положительный и отрицательный выводы располагаются в вертикальной плоскости (положительный сверху).

Используя методику из подраздела 4.2, создается модель полной СШЭП с отводами (рисунок 4.11) и анализируется отклик на воздействие ЭСР. Участки с ответвлениями Trl_{13} и Trl_{17} имеют длину $l = 30$ мм с поперечным сечением, представленным на рисунке 4.8,а, а Trl_{14} и Trl_{16} – длину $l_2 = 215$ мм (см. рисунок 4.4,а). Участок соединения СШЭП с помехозащитным фильтром Trl_{15} имеет длину $l = 10$ мм (см. рисунок 4.4,а). Проводные отводы Trl_{18} и Trl_{19} имеют длину $l = 80$ мм (рисунок 4.8,е), а в местах соединения с помехозащитным фильтром (Trl_{20} и Trl_{21}) $l = 20$ мм.

В начале и конце центрального проводника к СШЭП подключены отводы для ее соединения с приборами, входящими в состав КА. При этом поперечное сечение «+/-» отвода содержит 10 проводов БС 35-1298 ($Trl_9 - Trl_{12}$) длиной 350 мм (рисунок 4.8,б). Возле соединителя проводá разветвляются и имеют поперечное сечение для каждого полюса отдельное по 5 проводов ($Trl_1 - Trl_8$) длиной 100 мм (рисунок 4.8,в). Изменение поперечного сечения в соединителях не учитывается, поскольку они имеют малую длину 25 мм.

На рисунке 4.12 представлены формы напряжения в начале (V_1, V_3, V_4) (рисунок 4.12,а) и конце (V_5, V_7, V_8) (рисунок 4.12,б) ленты «⊥», отводах «+» и «-» при воздействии ЭСР на ленту «⊥» положительного отвода. На рисунке 4.12,в, г показаны формы напряжения в начале (V_2, V_3, V_4) и конце (V_6, V_7, V_8) на отводах «⊥», «+» и «-» при воздействии ЭСР на ленту «⊥» отрицательного отвода.

Формы напряжений для прямоугольного, коаксиального и спирального поперечных сечений одинаковы, а различаются только амплитуды.

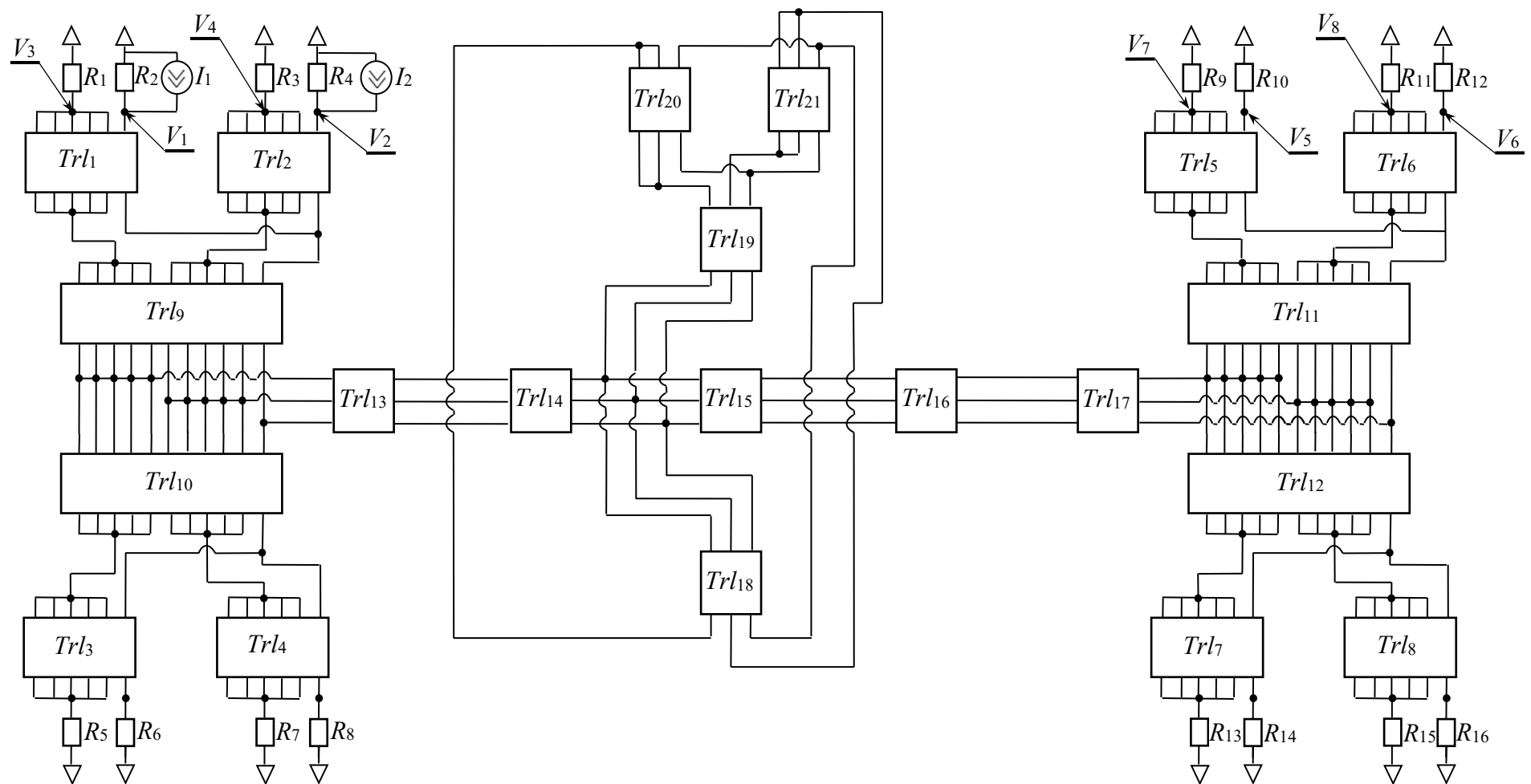


Рисунок 4.11 – Модель СШЭП с проводными отводами в системе TUSUR.EMC

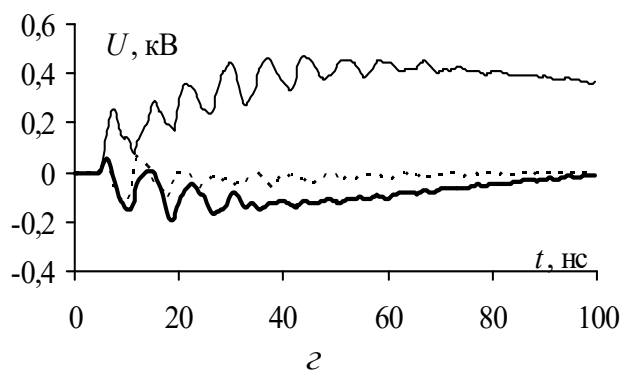
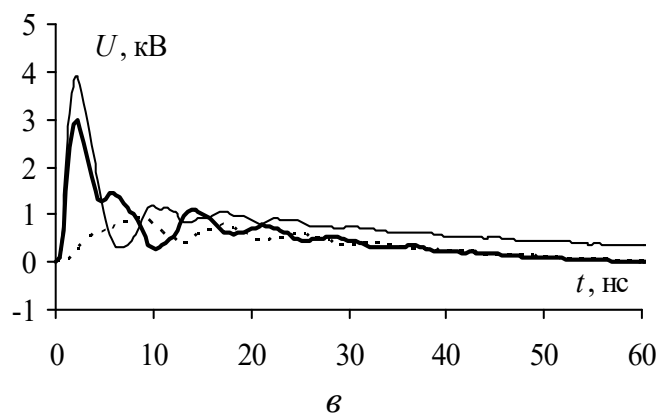
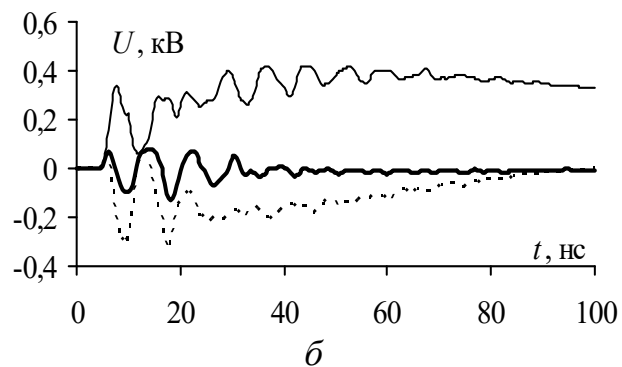
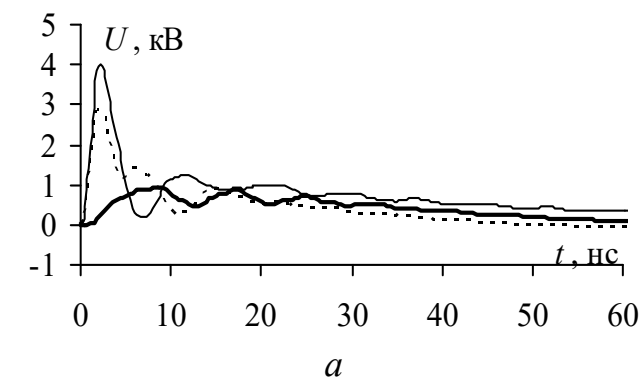


Рисунок 4.12 – Формы напряжения в начале ($a, в$) и в конце ($б, г$) на ленте « $\perp$ » (—), « $+$ » (- -) и « $-$ » (—) отводах при воздействии ЭСР на ленту « $\perp$ » положительного ($a, б$) и отрицательного ($в, г$) отводов СШЭП с прямоугольным поперечным сечением основы

Из рисунка 4.12 видно, что при воздействии ЭСР на ленту «⊥» у «+» и «-» отводов формы напряжения в начале и конце СШЭП схожи между собой, но меняются амплитуды в конце линии. Так, при воздействии ЭСР на ленту «⊥» у «+» отвода максимум в начале линии на «⊥» составляет 4 кВ, на «+» отводе – 2,9 кВ, на «-» отводе – 0,97 кВ, а в конце линии – 0,45; 0,31 и 0,11 кВ соответственно. При воздействии ЭСР на ленту «⊥» у «-» отвода максимальная амплитуда в начале линии на «⊥» составляет 3,9 кВ, на «+» отводе – 0,97 кВ, на «-» отводе – 3 кВ, а в конце линии – 0,45; 0,13 и 0,22 кВ соответственно.

Ослабления ЭСР при воздействии на СШЭП с прямоугольным, коаксиальным и спиральным поперечными сечениями с проводными отводами сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Ослабление амплитуды ЭСР с проводными отводами, дБ

Воздействие на ленту «⊥»	СШЭП	Отвод «+»	Отвод «-»	Лента «⊥»
У «+» отвода	Прямоугольная	20,8	19,3	18,6
	Коаксиальная	25,3	20,3	18,8
	Спиральная	26,1	17,2	18,3
У «-» отвода	Прямоугольная	17,4	22,7	18,4
	Коаксиальная	21,2	25,3	18,2
	Спиральная	17,9	26,1	18,5

Из таблицы 4.2 видно, что при воздействии ЭСР на ленту «⊥» отвода «+» минимальное (17,4 дБ) ослабление наблюдается для прямоугольной формы поперечного сечения СШЭП, а максимальное (26,1 дБ) – для спирального. Вычисление отклика на отводе, соответствующем воздействию ЭСР, показывает наилучшие результаты по ослаблению и составляет не ниже 20 дБ для всех форм поперечного сечения основания СШЭП. Замечено, что для спиральной и коаксиальной форм поперечного сечения ослабление имеет наибольшее (25,3 и 26,1 дБ) значение, а наименьшее (17,4 дБ) – у прямоугольной СШЭП. Из результатов сравнения минимальное (5,4 дБ) ослабление наблюдается при воздействии ЭСР на СШЭП без проводных отводов. С проводными отводами

минимальное ослабление составляет 17,4 дБ. Из этого следует, что проводные отводы способствуют уменьшению амплитуды ЭСР. Максимальное ослабление наблюдается для коаксиальной и спиральной форм поперечного сечения основания.

Вывод для будущего инженера: наличие проводных отводов в системе электропитания снижает амплитуду воздействия (ослабление увеличивается с минимальных 5,4 дБ без отводов до 17,4 дБ и более с отводами), так как они создают дополнительные пути протекания тока и вносят потери. Однако это не отменяет необходимости их правильного проектирования.

4.5 Локализация максимума напряжения электростатического разряда

Применение методики локализации при проектировании системы электропитания позволяет выявить опасные участки вдоль СШЭП с проводными отводами. При воздействии ЭСР на ленту «┐» отвода «+» СШЭП с прямоугольным поперечным сечением основы на отводе «—» максимум напряжения (2,1 кВ) наблюдается на участке $Trl9$ (см. рисунок 4.11) на длине 145 мм от его начала (рисунок 4.13,а). На рисунке 4.13,б представлена форма напряжения на отводе «+» при воздействии ЭСР на ленту «┐» отвода «—». При этом максимум напряжения (2,2 кВ) находится на том же участке ($Trl9$), но на длине 140 мм от его начала.

В результате обнаружено, что при воздействии ЭСР на ленту «┐» отвода «+» наблюдается существенное увеличение амплитуды в середине длины отвода «—». Аналогичное происходит и с отводом «+».

Локализация максимума напряжения при воздействии ЭСР на СШЭП с коаксиальным и спиральным поперечными сечениями основания показала, что форма напряжения и участок этих сечений совпадают с формой напряжения и участком для СШЭП с прямоугольным поперечным сечением. В таблице 4.3 представлены значения максимального напряжения и локального места для СШЭП с прямоугольным, коаксиальным и спиральным поперечными сечениями основы.

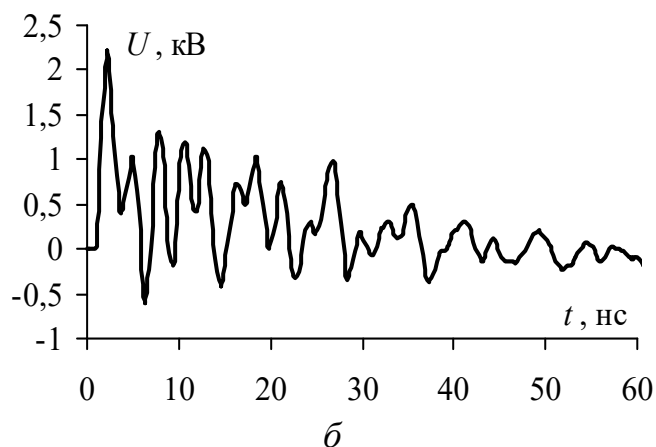
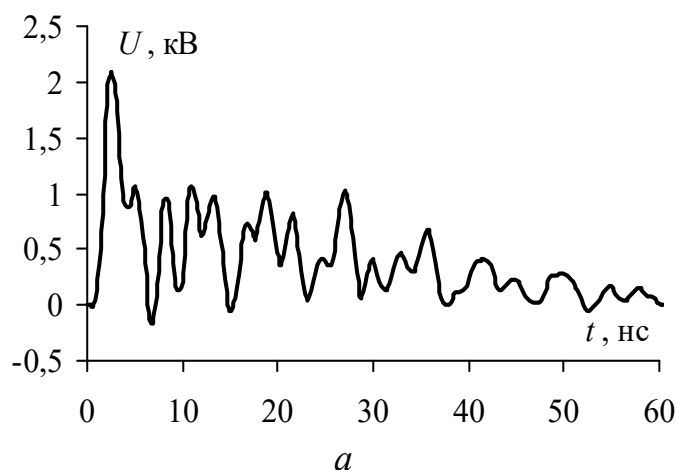


Рисунок 4.13 – Формы напряжения на участке $Trl9$ при воздействии ЭСР на ленту « $\perp$ » отводов «+» (а) и «-» (б)

Таблица 4.3 – Значения максимальной амплитуды напряжения

Воздействие на ленту « $\perp$ »	СШЭП	$Trl9$
У «+» отвода	Прямоугольная	2,1 кВ при $l = 145$ мм
	Коаксиальная	2 кВ при $l = 105$ мм
	Спиральная	2 кВ при $l = 100$ мм
У «-» отвода	Прямоугольная	2,2 кВ при $l = 140$ мм
	Коаксиальная	2,1 кВ при $l = 100$ мм
	Спиральная	2 кВ при $l = 100$ мм

Из таблицы видно, что максимальные амплитуды (2,1 кВ и 2,2 кВ) наблюдаются для СШЭП с прямоугольным поперечным сечением основы на длине 145 и 140 мм. Для коаксиальной СШЭП амплитуда на 100 В меньше (2 кВ и 2,1 кВ) и наблюдается на длине 105–100 мм.

Примечательно, что для спиральной СШЭП максимальные напряжения как на отводе «+», так и на отводе «–» одинаковы (2 кВ) и фиксируются на длине 100 мм. Стоит отметить, что для СШЭП с коаксиальным и спиральным поперечными сечениями основы максимальная амплитуда наблюдается на длине 100–105 мм от начала. В результате использование СШЭП с коаксиальным и спиральным поперечными сечениями позволит сместить максимум напряжения ЭСР к соединителям на 40–45 мм от основы.

Вывод для будущего инженера: максимальное напряжение при воздействии ЭСР не обязательно возникает в точке воздействия ЭСР. Как показал анализ, пиковые значения могут формироваться в середине длины противоположного по полярности проводного отвода из-за сложных волновых процессов и паразитных связей.

Вопросы и задачи к разделу 4

1. Объясните, почему цепям электропитания радиоэлектронных устройств, особенно космических аппаратов, уделяется особое внимание при защите от ЭСР.

2. Опишите ключевые конструктивные особенности помехозащищенной СШЭП, представленной в пособии. Какую функцию выполняет лента ЛМAMс?

3. В чем заключается основная практическая ценность методики локализации экстремумов воздействия ЭСР на СШЭП?

4. На основании данных таблицы 4.1 сделайте вывод: как длина СШЭП влияет на ослабление амплитуды ЭСР на экранирующей ленте и на силовых проводниках («+» и «–»)? Дайте физическое объяснение этому явлению.

5. При проектировании отвода СШЭП выбирают между использованием жгута из 10 проводов типа БС 35-1298 или 20 проводов типа МС 26-15 при прочих равных условиях. Какие факторы (помимо ослабления ЭСР) должен учесть инженер при выборе?

6. Предложите конструктивное решение для защиты участка отвода СШЭП с максимальным напряжением ЭСР. Какие элементы защиты и где именно их следует установить?

7. Комплексно обобщите подход к проектированию цепей электропитания РЭУ для обеспечения максимальной устойчивости к кондуктивным и импульсным помехам, возникающим вследствие воздействия ЭСР?

Список сокращений

БТ –	биполярный транзистор
БЭК –	безэховая камера
ВАХ –	вольт-амперная характеристика
ИО –	испытываемый объект
ИС –	интегральная схема
КА –	космический аппарат
КЛП –	копланарная линия передачи
ЛМAMc –	лента из арамидных нитей с обмоткой из медной посеребрённой проволоки
ЛП –	линия передачи
МЗК –	модель заряженного кабеля
МЗПП –	модель заряженной печатной платы
МЗУ –	модель заряженного устройства
МК –	микроконтроллер
МКРВО –	метод конечных разностей во временной области
МЛ –	меандровая линия
МЛП –	микроразрывная линия передачи
ММ –	механическая модель
МОП –	металл-оксид-полупроводник
МФ –	модальный фильтр
МЧТ –	модель человеческого тела
ПП –	печатная плата
ПТ –	полевой транзистор
РЭУ –	радиоэлектронное устройство
СКИ –	сверхкороткий импульс
СЛП –	связанная линия передачи
СШЭП –	силовая шина электропитания
СЭП –	система электропитания
ЭМС –	электромагнитная совместимость
ЭСР –	электростатический разряд
ЭЭ –	эффективность экранирования

MoM –	method of moments
SMA –	subMiniature version A (тип СВЧ-разъема)
SPICE –	simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
TEM –	transverse electromagnetic mode
TVS –	transient Voltage Suppressor

Литература

1. ГОСТ Р 53734.3.1-2013. Электростатика. Методы моделирования электростатических явлений. Электростатический разряд. Модель человеческого тела. М.: Стандартиформ, 2014. 11 с.
2. ГОСТ Р 51317.4.2-2010 (МЭК 61000-4-2:2008) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний. М.: Стандартиформ, 2010. 26 с.
3. ГОСТ Р 53734.3.2-2013 (МЭК 61340-3-2:2006). Электростатика. Методы моделирования электростатических явлений. Электростатический разряд. Модель механического устройства. М.: Стандартиформ, 2013. 11 с.
4. ГОСТ Р 53734.3.3-2016. Методы моделирования электростатических явлений. Электростатический разряд. Модель заряженного устройства. М.: Стандартиформ, 2016. 23 с.
5. 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.
6. Konstantinov U.A. Investigation of electrostatic discharge effect on high-power MOSFET-transistors considering the influence of PCB / U.A. Konstantinov, E.D. Pozhidaev, S.R. Tumkovskiy // Int. Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). Prague, Czech Republic, 2019. P. 1–4.
7. Kuznetsov V. Charged board model ESD simulation for PCB mounted MOS transistors / V. Kuznetsov, L. Kechiev // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2015. Vol. 57, N 5. P. 947–954.
8. Stadler W. Cable discharges into communication interfaces / W. Stadler, T. Brodbeck, R. Gartner // Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium. Tucson, USA, 2006. P. 144–151.
9. Model-based guidelines to suppress cable discharge event (CDE) induced latch up in CMOSICs / K. Chatty [et al.] // Int. Reliability Physics Symposium. Proceedings. USA, 2004. P. 130–134.

10. Design automation to suppress cable discharge event (CDE) induced latch up in 90-nm CMOSASICs / C.J. Brennan [et al.] // *Microelectronics Reliability*. 2007. Vol. 47, N 7. P. 1069–1073.
11. Проблема электростатического разряда и современные методы защиты интегральных схем от него / С. Волков [и др.] // *Рынок микроэлектроники*. 2007. № 7. С. 40–49.
12. Wang A.Z. On-chip ESD protection for integrated circuits: an overview for IC designers / A.Z. Wang, H.G. Feng, K. Gong // *Microelectronics Journal*. 2001. Vol. 32, N 9. P. 733–747.
13. Amerasekera A. ESD in silicon integrated circuits / E. Amerasekera, C. Duvvury // *Physics and operation of ESD protection circuit elements*. 2nd Ed. 2002. 421 p.
14. Cerri G. ESD indirect coupling modeling / G. Cerri, R. De Leo, V.M. Primiani // *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 1996. Vol. 38, N 3. P. 274–281.
15. Berghe S.V. Study of ESD signal entry through coaxial cable shields / S.V. Berghe, D. De Zutter // *Journal of Electrostatics*. 1998. Vol. 44, N 3–4. P. 135–148.
16. Heidler H. Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP Berechnung / H. Heidler // *18th Int. Conf. Lightning Protection*. Munich, Germany, 1985. P. 63–66.
17. Songlin S. A new analytical expression of current waveform in standard IEC61000-4-2 / S. Songlin, B. Zengjun, T. Minghong // *High power laser and particle beams*. 2003. Vol. 15, N 5. P. 464–466.
18. Keenan R.K. Some fundamental aspects of ESD testing / R.K. Keenan, L.A. Rosi // *IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat.* 1991. P. 236–241.
19. New mathematical descriptions of ESD current waveform based on the polynomial of pulse function / Z. Yuan [et al.] // *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 2006. Vol. 48, N 3. P. 589–591.
20. Katsivelis P. Estimation of parameters for the electrostatic discharge current equation with real human discharge events reference using genetic algorithms / P. Katsivelis, I. Gonos, I. Stathopoulos // *Measurement Science and Technology*. 2010. Vol. 21, N 10. P. 105703.

21. Wang K. Four order electrostatic discharge circuit model and its simulation / K. Wang, J. Wang, X. Wang // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2012. Vol. 10, N 8. P. 2006–2012.
22. Горлов М.И. Воздействие электростатических зарядов на изделие полупроводниковой электроники и радиоэлектронной аппаратуры / М.И. Горлов, А.В. Андреев, И.В. Воронцов. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 1997. 160 с.
23. Investigation on ESD EMP damage effects of electronic components / Z.L. Tan [et al.] // 5th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics. 2009. P. 89–92.
24. Analysis of indium–zinc–oxide thin-film transistors under electrostatic discharge stress / Y. Liu [et al.] // IEEE Trans. on Electron Devices. 2017. Vol. 65, N 1. P. 356–360.
25. Дроздова А.А. Воздействие электростатического разряда на транзистор с учётом ёмкости посадочного места / А.А. Дроздова, И.И. Николаев, М.Е. Комнатнов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2022. № 2. С. 47–52.
26. Горлов М.И. Статическое электричество и полупроводниковая электроника / М.И. Горлов // Природа. 2006. С. 27–36.
27. Кечиев Л.Н. Защита электронных средств от воздействия статического электричества / Л.Н. Кечиев, Е.Д. Пожидаев. М.: Изд. дом «Технологии», 2005. 352 с.
28. Study on effect experiment of ESD EMP to single chip microcontroller / X. Zhang [et al.] // IEEE Int. Symp. on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. 2005. Vol. 1. P. 631–634.
29. Методика испытания микроконтроллеров на чувствительность к электростатическим разрядам / В.Ф. Алексеев [и др.] // Электроника, радиофизика, радиотехника, информатика. 2011. № 5(59). С. 5–11.
30. White paper 2: A case for lowering component level CDM ESD specifications and requirements, industry council on ESD target

levels // Industry Council on ESD Target Levels. Revision 2.0. 2010. 173 p.

31. Совместный учёт паразитных параметров компонентов и монтажа при вычислении частотных характеристик пассивных цепей бортовой аппаратуры космических аппаратов / И.Ф. Калимулин [и др.] // Доклады ТУСУР. 2014. № 3 (33). С. 27–35.

32. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л. Н. Кечиев. – М.: Техносфера, 2007. 420 с.

33. Кечиев Л.Н. Защита электронных средств от воздействия статического электричества: учеб. пособие / Л.Н. Кечиев. 2-е изд. М.: Группа ИДТ, 2008. 352 с.

34. Проектирование вашей печатной платы для подавления переходных напряжений [Электронный ресурс] // Altium Resources. 2021. 19 марта. URL: <https://resources.altium.com/> (дата обращения: 14.04.2026).

35. Huang Y. Numerical and experimental investigation of noise coupling perturbed by ESD currents on printed circuit boards / Y.S. Huang, T.L. Wu // IEEE Symp. on Electromagn. Compat. Boston, 2003. Vol. 1. P. 43–47.

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

37. Воршевский А.А. Обеспечение электромагнитной совместимости морской техники при возникновении электростатических разрядов / А.А. Воршевский, Е.С. Гришаков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 1. С. 106–114.

38. Crawford M.L. Generation of standard EM fields using TEM transmission cell / M.L. Crawford // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1974. N 4. P. 189–195.

39. IEC 61967-2:2005. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz. Part 2: Measurement of radiated emissions – TEM cell and wideband TEM cell method. First Edit. 2005. 43 p.

40. IEC 62132-2:2010. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic immunity. Part 2: Measurement of radiated immunity – TEM cell and wideband TEM cell method. First Edit. 2010. 49 p.

41. Measurement of Microcontroller Radiated Emissions at Different Operation Modes / A.V. Demakov [et al.] // IEEE 22th Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials. IEEE, 2021. P. 193–197.

42. Демаков А.В. Разработка ТЕМ-камеры для испытаний интегральных схем на электромагнитную совместимость / А.В. Демаков, М.Е Комнатнов // Доклады ТУСУР. 2018. № 1 (21). С. 52–56.

43. Demakov A.V. TEM cell for Testing Lowprofile Integrated Circuits for EMC / A.V. Demakov, M.E. Komnatnov // 21th Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials. 2020. P. 154–158.

44. Soohoo K. Erratic nature of product ESD immunity testing investigated using a dual TEM cell / K. Soohoo, A. Rybak, M. Wielgos // 17th Int. Zurich Symp. on Electromagn. Compat. Zurich, Switzerland, 2006. P. 453–456.

45. Numerical modeling of electrostatic discharge generators / K. Wang [et al.] // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2003. Vol. 45, N 2. P. 258–271.

46. Efficient circuit and an EM model of an electrostatic discharge generator / J. Yousaf [et al.] // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2018. Vol. 60, N 4. P. 1078–1086.

47. Establishment of ESD generator model for transient susceptibility analysis from chip to system level / H-N. Lin [et al.] // Joint Int. Symp. on Electromagn. Compat. Sapporo, Japan, 2019. P. 209–212.

48. S-parameter based modeling of system-level ESD test bed / Y. Xiu [et al.] // 37th Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symp. Reno, USA, 2015. P. 1–10.
49. Gummel H.K. An integral charge control model of bipolar transistors / H.K. Gummel, H.C. Poon // Bell System Technical Journal. 1970. Vol. 49, N 5. P. 827–852.
50. Shichman H. Modeling and simulation of insulated-gate field-effect transistor switching circuits / H. Shichman, D.A. Hodges // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1968. Vol. 3, N 3. P. 285–289.
51. Mangin C.H. Surface Mount Technology: The Future of Electronics Assembly / C.H. Mangin, S. McClelland, K. Rathmill // IFS. 1990. 276 p.
52. IRFZ46NPbF, HEXFET Power MOSFET [Electronics resource]. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRFZ46N-DataSheet-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a40153563b734b2220, свободный (accessed: 26.09.2021).
53. International rectifier. ESD testing of MOS gated power transistors : Application note AN-986. 1998. 20 p.
54. Дроздова А.А. Оценка уровня наведенного тока на испытуемый объект в ТЕМ-камере при воздействии на её вход электростатического разряда / А.А. Дроздова, М.Е. Комнатнов // Доклады ТУСУР. 2022. № 4(25). С. 28–36.
55. Заболоцкий А.М. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. 2014. № 3. С. 79–83.
56. Самотин И.Е. Условие выравнивания амплитуд импульсов на выходе модального фильтра / И.Е. Самотин // Технологии электромагнитной совместимости. 2010. № 4 (35). С. 31–34.
57. New printed structures for protection against UWB pulses / A.T. Gazizov [et al.] // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. 2015. P. 120–122.
58. Помехозащищенная силовая шина электропитания : пат. 2822924 Рос. Федерация. № 2024103349 / Комнатнов М.Е.,

Дроздова А.А., Николаев И.И., Газизов Т.Р. ; заявл. 12.02.2024 ;
опубл. 16.07.2024, Бюл. № 20.

59. Drozdova A. Quasi-static analysis of susceptibility of the spacecraft power bus bar to the effects of electrostatic discharge / A. Drozdova, M. Komnatnov // 16th Int. Conf. on Electronic Devices and Control Systems. Tomsk, Russia, 2020. Vol. 1862. P. 012009.

60. Дроздова А.А. Квазистатический анализ восприимчивости к воздействию электростатического разряда силовой шины электропитания космического аппарата / А.А. Дроздова, М.Е. Комнатнов // Электронные средства и системы управления: материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2020. № 1-1. С. 270–274.

Учебное издание

Дроздова Анастасия Александровна

Комнатнов Максим Евгеньевич

Суровцев Роман Сергеевич

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ: ОЦЕНКА
УСТОЙЧИВОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ
К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА**

Учебное пособие

Подписано в печать 00.09.26. Формат 60х84/16.

Усл. печ. л. 8,37. Тираж 100 экз. Заказ № .

Федеральное государственное автономное учреждение
высшего образования «Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники»

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.