

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет
информационных технологий
и электроники
наименование факультета

Кафедра
Нано – и микроэлектроника
наименование кафедры

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»
код и наименование

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника
наименование профиля

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

ПензГУ 2. 11.03.04. 012 ПЗ
обозначение, присваиваемое кафедрой

на тему

Разработка методики расчета тонкопленочных аттенюаторов с распределенным
сопротивлением

тема бакалаврской работы

Студент группы 20ПД1 Попов Г.В.
номер группы подпись, дата фамилия, иниц.

Руководитель к.т.н. доцент Доросинский А.Ю.
должность подпись, дата фамилия, иниц.

ПГУ
наименование организации

Нормоконтролер ст. преподаватель Рыжова Т.Н.
должность подпись, дата фамилия, иниц.

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 10.06.24 № 10)
Заведующий кафедрой Пронин И.А.
подпись, дата фамилия, иниц.

Работа защищена с оценкой хор. (протокол ГЭК от 26.06.24 № 12)
Секретарь ГЭК Вольсков А.А.
подпись, дата фамилия, иниц.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка состоит из 85 страниц, 20 рисунков, 18 таблиц, списка использованных источников из 13 наименований и 3 приложений.

Ключевые слова: тонкопленочный аттенюатор, задача анализа, задача синтеза.

Цель: разработка методики расчета тонкопленочного аттенюатора с распределенным сопротивлением.

Актуальность данной темы: необходимость разработки методики расчета обусловлена тем, что их разработка играет немаловажную роль в производстве, так как они позволяют выбирать подходящие материалы и оптимальные толщины пленок при производстве аттенюаторов.

Объект исследования: Методика расчета тонкопленочного аттенюатора с распределенным сопротивлением для улучшения качества и ресурса электронного устройства.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Анализ современного состояния производства тонкопленочных аттенюаторов	5
1.1 Особенности современного состояния производства тонкопленочных аттенюаторов	5
1.2 Анализ характеристик выпускаемых тонкопленочных аттенюаторов .	8
2 Исследование существующих методик расчета тонкопленочных аттенюаторов и их недостатков	10
3 Разработка методики расчета тонкопленочных аттенюаторов с распределенным сопротивлением	Ошибка! Закладка не определена.
3.1 Разработка методик расчета тонкопленочных аттенюаторов ..	Ошибка!
Закладка не определена.	
3.2 Экспериментальная проверка методики расчета	Ошибка! Закладка не определена.
3.3 Разработка конструкции аттенюатора и топологии	40
3.4 Разработка методики подгонки параметров аттенюаторов и испытания экспериментальных образцов.....	49
4. Безопасность труда при работе на ЭВМ.....	56
4.1 Организация рабочего места оператора ЭВМ с расчетом искусственного освещения.....	56
4.2 Эргономические требования к рабочему месту оператора.	58
4.3 Описание рабочего места оператора ЭВМ.....	62
Заключение	65
Список использованных источников	66
Приложение А. Задание на выпускную квалификационную работу	67
Приложение Б. Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе «Антиплагиат ВУЗ».....	70
Приложение В. Презентация ВКР	74

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе рассматриваются вопросы разработки методик расчета тонкопленочных аттенюаторов с распределенным сопротивлением на основании методов численного решения уравнений Лапласа итеративным способом. Данный метод имеет преимущество в том, что позволяет определить параметры схемы замещения по известной топологии резистивного элемента.

Выбор темы работы обусловлен тем, что разработка методик тонкопленочных аттенюаторов играет важнейшую роль в производстве, так как они позволяют определять оптимальное соотношение между ослаблением и минимальным искажением передаваемого сигнала. Так же они позволяют выбирать подходящие материалы и оптимальные толщины пленок для производства конечного продукта.

Правильно составленная методика расчета позволяет инженерам и проектировщикам создавать эффективные и точно отрегулированные аттенюаторы, что в свою очередь способствует улучшению качества и надежности работы электронных устройств.

В первом разделе приводится анализ современного состояния производства тонкопленочных аттенюаторов.

Во втором же разделе проводится исследование существующих методик расчета тонкопленочных аттенюаторов и их недостатков.

В третьем речь идет о разработке методики расчета тонкопленочных аттенюаторов с распределенным сопротивлением.

					ПГУ 2. 11.03.04. 012 ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Введение	Лит.	Лист	Листов	
Разраб.		Попов							
Пров.		Доросинский							
Н.контр.		Рыжова		10.01.24		гр. 20ПД1			
Утв.									

1 Анализ современного состояния производства тонкопленочных аттенюаторов

1.1 Особенности современного состояния производства тонкопленочных аттенюаторов

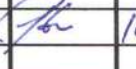
Аттенюатор – это устройство, применяемое в тех случаях, когда необходимо плавно или экстренно ослабить сильный сигнал до нормального уровня, [1].

Первые аттенюаторы, предназначенные для изменения уровня сигнала, появились в начале 1900-х годов. Спустя пол века исследователи начали экспериментировать с различными материалами и методами нанесения тонких пленок на поверхность подложки, в результате этих экспериментов были разработаны тонкопленочные аттенюаторы. Производство аттенюаторов играет огромную роль в сфере радиотехники и электроники, ведь данные приспособления активно используются в различных электронных устройствах, таких как радиоприемники, передатчики, спутниковые системы связи.

В качестве материалов при производстве тонкоплёночных аттенюаторов используются: металлические плёнки, оксиды металлов и нитриды.

В качестве подложки чаще всего используют оксид и нитрид алюминия, оксид бериллия, реже - поликристаллический алмаз. Подложки, изготовленные из нитрида алюминия имеют в 1,5 раза меньшую теплопроводность, чем подложки из оксида бериллия. На подложках из оксида алюминия изготавливаются в основном маломощные аттенюаторы (до 0,5–1 Вт), на керамических подложках из нитрида алюминия и оксида бериллия – более мощные (до 10 Вт).

В качестве резистивного материала чаще всего применяют пленки из тантала и нитрида тантала [2].

					ПГУ 2. 11.03.04. 012 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Попов			Лит.	Лист	Листов
Пров.		Доросинский				5	85
Н.контр.		Рыжова		10.06.21	гр. 20ПД1		
Утв.							

Анализ современного состояния производства тонкопленочных аттенюаторов

На данный момент существует несколько основных технологий создания тонкопленочных аттенюаторов, магнетронное распыление – одна из них.

Данная технология проводится либо на постоянном токе, либо на переменном.

Преимущество работы на постоянном токе в том, что плазма может быть распределена равномерно на большой площади, при этом источник испарения может быть установлен на большой площади. С другой стороны, при распылении электроны, которые выбрасываются из катода, ускоряются и не эффективно используются для поддержания разряда.

Недостаток метода заключается в том, что плазма ограничена вблизи катода и не доступна для реактивных газов вблизи подложки для реактивного распыления.

При распылении на переменном токе, работающем на частотах ниже 50 кГц, потенциал на мишени периодически меняется, и ионы обладают достаточной подвижностью, чтобы общее падение потенциала вблизи катода могло сформировать переменный потенциал на каждом электроде. Стенки камеры могут использоваться в качестве противоиэлектрода. На частотах выше 50 кГц ионы не обладают достаточной подвижностью и электроны не приобретают достаточную энергию для возникновения ионизирующих столкновений в пространстве между электродами [3].

Данная технология является самой применяемой, с помощью неё можно получить тонкие пленки высокого качества, по сравнению с другими методами, покрытие магнетронным распылением обладает преимуществами высокой скорости формирования плёнки, низкой температурой подложки, хорошей адгезией мембранного покрытия и отсутствием загрязнения окружающей среды.

Химическое осаждение из паров – ещё одна распространенная технология, позволяющая получать тонкопленочные аттенюаторы.

Данный метод имеет ряд преимуществ, он позволяет наносить тонкие пленки в широком диапазоне скоростей осаждения, позволяет проводить процесс без необходимости условий высокого или сверхвысокого вакуума, допускает

					ПГУ 2. 11.03.04. 012 ПЗ	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

масштабирование процесса для массового производства и равномерного осаждения на широкой области образца, а также даёт способность контролировать критические аспекты процесса осаждения и, следовательно, управлять свойствами тонких пленок.

Свойства, которые данный метод позволяет контролировать в процессе осаждения, включает в себя: чистоту процесса и пленки, уровень легирования, стехиометрию, однородность, толщину слоя, а также селективность осаждения [4].

Следующая технология – фотолитография, используется для создания рисунка при производстве электронных компонентов, основным преимуществом метода является получение узорчатых структур микро- и нанометровых размеров с контролируемой геометрией [5].

Импульсное лучевое осаждение, данный метод – универсальный. Поскольку источник энергии расположен вне камеры, возможно использование сверхвысокого вакуума, а также окружающего газа. При использовании данного метода мы получаем возможность нанесения всех видов различных материалов, например, высокотемпературные сверхпроводники, оксиды, нитриды, карбиды, полупроводники, металлы и даже полимеры могут быть выращены с высокой скоростью осаждения. Импульсный характер процесса позволяет получать даже сложные соединения полимер-металл и многослойные материалы. Подготовка в атмосфере инертного газа позволяет даже настраивать свойства пленки (напряжение, текстуру, отражательную способность, магнитные свойства) путем изменения кинетической энергии наносимых частиц. Все это делает импульсно лучевое осаждение альтернативным методом нанесения для выращивания высококачественных тонких пленок [6].

Для снижения затрат на производство и упрощения работы, аттенюаторы интегрируют с другими элементами электронных устройств.

Для получения сенсоров тонкопленочные аттенюаторы интегрируют на гибкие подложки. Если преследуется цель регулирования интенсивности света

или оптических сигналов, то тонкопленочные аттенюаторы интегрируют в оптические системы.

Интеграцию в микроволновые и радиочастотные устройства проводят для регулирования мощности сигнала, используется в радиосвязи, радарх, антеннах.

Так же тонкопленочные аттенюаторы интегрируют в многослойные структуры с целью создания сложных устройств с такими функциональными элементами, как фильтры, усилители и модуляторы.

1.2 Анализ характеристик выпускаемых тонкопленочных аттенюаторов

Проанализировав рынок тонкопленочных аттенюаторов, я выделил несколько лидирующих компаний:

- *Thin Films Technology Corp*;
- *Passive Plus*;
- *NANOWAVE Technologies*.

Характеристики тонкопленочных аттенюаторов вышеперечисленных компаний различаются в зависимости от конкретной модели и спецификации.

Одной из самых важных характеристик является диапазон частот, компании предлагают аттенюаторы с диапазоном от 18 гигагерц до 40 гигагерц [7].

Следующей немаловажной характеристикой является затухание, оно показывает, насколько сильно сигнал будет ослаблен аттенюатором. У различных моделей свой уровень затухания, самые высокие значения данной характеристики имеют компании *Passive Plus* и *Thin Films Technology Corp* [8].

Следующей характеристикой, определяющей качество аттенюатора, служит максимальная мощность. Данный параметр определяет, насколько высокую мощность выдержит аттенюатор без повреждений, его значения у компании *NANOWAVE Technologies* не указано [9].

Крайняя характеристика – габариты, в зависимости от конкретного применения, этот параметр аттенюатора может быть важным фактором.

Сравнение характеристик выпускаемой продукции вышеперечисленных компаний указано в таблице 1.

					ПГУ 2. 11.03.04. 012 ПЗ	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 1 – Сравнение характеристик тонкопленочных аттенюаторов

Наименование компании	Диапазон частот	Затухание	Максимальная мощность	Размер
<i>Thin Films Technology Corp</i>	до 30 ГГц	от 0 до 20 дБ	до 16 Вт	-
<i>Passive Plus</i>	до 40 ГГц	от 0,5 до 24,5 дБ	до 16 Вт	50x50x50
<i>NANOWAVE Technologies</i>	до 18 ГГц	от 0,2 до 10 дБ	-	55x55x15

Проанализировав характеристики аттенюаторов, указанных в таблице 1, можно сделать вывод, что компания *Passive Plus* занимает главенствующую позицию в данной нише.

2 Исследование существующих методик расчета тонкопленочных аттенюаторов и их недостатков

Одной из основных методик расчета тонкопленочных аттенюаторов является методика расчета на основе передачи мощности.

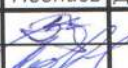
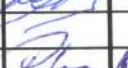
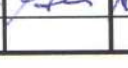
Она основана на принципах передачи мощности через аттенюатор и измерении изменения мощности. По результатам измерений можно определить коэффициент затухания аттенюатора.

Главный недостаток данной методики заключается в самом процессе, ведь для точного определения коэффициента затухания аттенюатора необходимо как можно точнее измерить мощность, а сделать это в реальных условиях проблематично, виной тому служат шумы, потери и другие помехи в сигнале. Так же к недостаткам данного метода можно отнести то, что данная методика требует дополнительного специализированного оборудования, например наличия спектральных анализаторов, что приводит к увеличению как стоимости, так и сложности проведения измерений. Так же следует учитывать, что данный метод не всегда даёт полную информацию о поведении аттенюатора при различных частотах и уровнях мощности, соответственно на выходе мы получаем неточные результаты расчётов. Но, несмотря на все вышеперечисленные недостатки, данная методика широко используется.

Следующая методика - методика расчета на основе сопротивлений.

Этот метод использует модель аттенюатора с резистивными элементами для расчета потерь мощности. Расчеты выполняют с использованием формул, связанных с электрическими сопротивлениями.

Главный недостаток такой же, как и у предыдущей методики, а именно идеальные условия. Все элементы цепи имеют четко определенные и постоянные значения сопротивлений.

					ПГУ 2. 11.03.04. 012 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Попов			Лит.	Лист	Листов
Пров.		Доросинский				10	85
Н.контр.		Рыжова		06.04	гр. 20ПД1		
Утв.							

В реальных схемах же часто встречаются неточности, такие как изменение сопротивлений из-за температурных эффектов, нелинейности элементов, влияние паразитных параметров. Эти факторы могут привести к неточностям в расчётах, основанных исключительно на значениях сопротивлений. Так же стоит добавить, что данная методика может быть ограничена в случаях, когда необходимо учитывать другие параметры цепи, такие как индуктивность, емкость или частотные характеристики элементов. В таких случаях исключительное использование сопротивлений может привести к недостаточно точным результатам. Данную методику не стоит применять в случае наличия сложных цепей или систем с большим количеством элементов, где необходимо учитывать их взаимосвязь.

Методика расчета на основе материалов и геометрии.

Данный метод подразумевает под собой наличие знаний параметров материалов и геометрии аттенюатора. Используя физические характеристики материалов и структуру аттенюатора, можно провести расчеты потерь мощности.

Данная методика расчёта имеет больше всего недостатков по сравнению с другими.

Первый из них – сложность моделирования. Расчёт требует сложных математических моделей и вычислений, особенно при учете нелинейных эффектов, дисперсии материалов и других факторов. Это существенно усложняет процесс проектирования и требует специализированных инструментов для точного моделирования.

Второй – неоднородность материалов, ведь на практике, зачастую материалы, используемые в тонкопленочных аттенюаторах, имеют неоднородности, влияющие на точность расчетов. Например, изменение свойств материала в зависимости от температуры или частоты может привести к неточностям в предсказании характеристик аттенюатора.

Третий недостаток данной методики – это ограничения геометрии. Толщина плёнки, ширина полосы, длина – это геометрические параметры аттенюатора. Они оказывают существенное влияние на его характеристики.

Определение оптимальных значений данных параметров является непростой задачей из-за ограничений материалов и технологических возможностей.

Заключительным недостатком данной методики является чувствительность к изменениям. Тонкопленочные аттенюаторы могут быть чувствительны к небольшим изменениям параметров материалов или геометрии, что приводит к значительным отклонениям от ожидаемых характеристик. Дабы такого не допустить, необходимо тщательно контролировать производственный процесс и калибровку оборудования.

Ещё одной распространенной методикой является методика расчета на основе согласования: Метод использует согласованные линии передачи для измерения коэффициента отражения и передачи сигнала через аттенюатор. На основе полученных данных можно определить потери мощности.

Данная методика имеет ряд недостатков. Первый – чувствительность к изменениям в среде. Тонкопленочные аттенюаторы, рассчитанные данным способом, бывают чувствительны к изменениям окружающей среды. Температура, влажность, давление и другие факторы оказывают на них сильное влияние, они приводят к изменению характеристик аттенюатора и требуют дополнительной коррекции или калибровки.

Следующим недостатком является сложность настройки, так как она требует определенного опыта и специализированных знаний. Неправильная настройка или расчет параметров согласования приведёт к нежелательным эффектам, таким как отражения или потери сигнала. Ограничения диапазона частот – ещё один недостаток данного метода, ведь он может иметь ограничения по диапазону рабочих частот, в пределах которого аттенюатор обеспечивает нужное согласование и подавление сигнала. Данный факт может сильно ограничить применимость аттенюатора в различных частотных диапазонах.

Каждая из этих методик имеет свои особенности, недостатки и применимость в зависимости от конкретной задачи и доступной информации о параметрах аттенюатора.

					ПГУ 2. 11.03.04. 012 ПЗ	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3 Разработка методики расчета тонкопленочных аттенюаторов с распределенным сопротивлением

3.1 Разработка методик расчета тонкопленочных аттенюаторов

Разработка методики расчета тонкопленочных аттенюаторов с распределенным сопротивлением.

Конфигурации резистивных элементов тонкопленочных аттенюаторов, для которых решается задача анализа и синтеза в данной работе, приведены на рисунке 1.

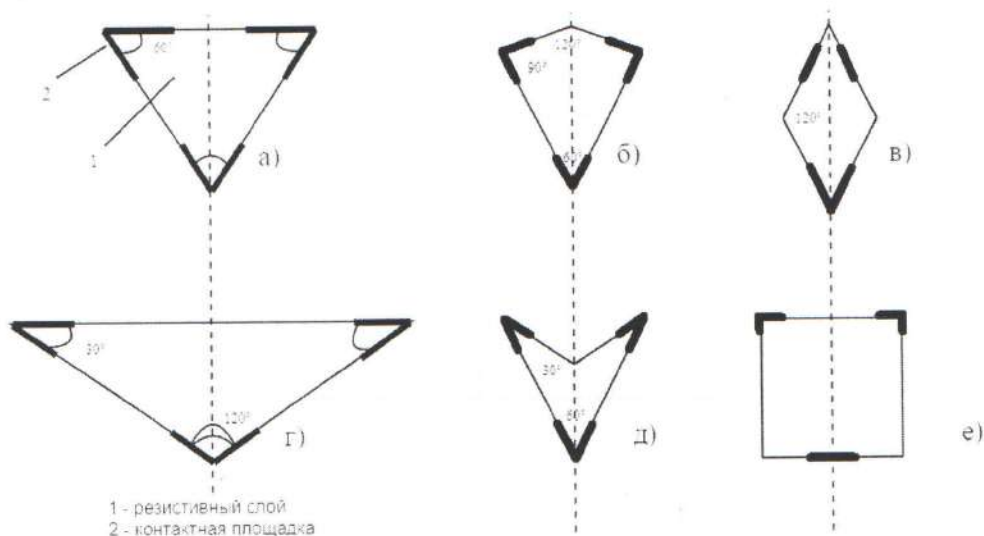


Рисунок 1 - Схемы тонкоплёночных аттенюаторов

Варианты схем, изображенных на рисунке 1 а, б, в, г, д, е обозначены буквами А, Б, В, Г, Д, Е соответственно.

Дабы разобраться в схеме, изображенной на рисунке 1а более подробно, необходимо рассмотреть схему, изображенную на рисунке 2.

					ПГУ 2. 11.03.04. 012 ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Разработка методики расчета тонкопленочных аттенюаторов с распределенным сопротивлением	Лит.	Лист	Листов	
Разраб.	Попов								
Пров.	Доросинский						13	85	
Н.контр.	Рыжова			10.06.14		гр. 20ПД1			
Утв.									

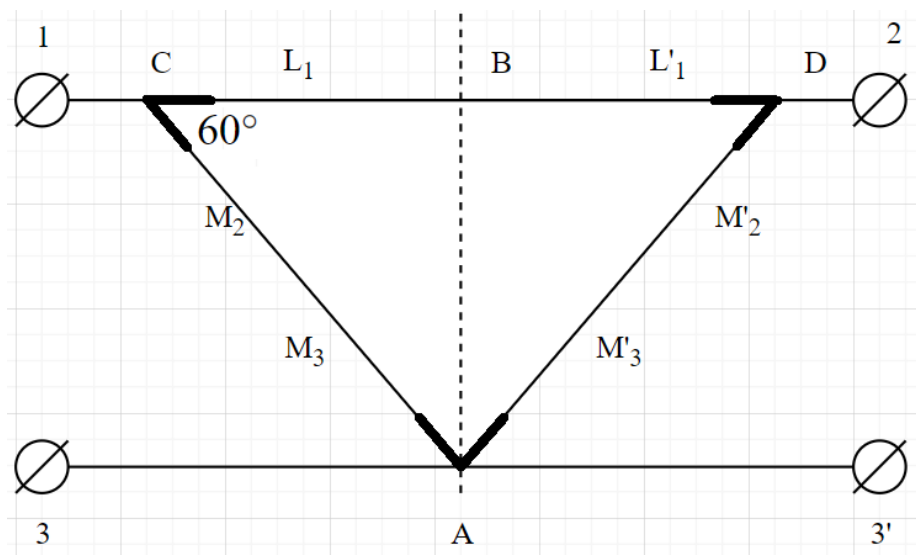


Рисунок 2 – Схема тонкоплёночного треугольного аттенюатора

В зависимости от расположения входного M_2CL_1 , и выходного $M'_2DL'_1$ контактов на сторонах треугольника ACD , можно выделить несколько модификаций этой схемы.

В работе рассматривается только симметричное расположение входного и выходного контакта относительно линии AB . Различные модификации схемы, изображенные на рисунке 2, а также схемы, изображённых на рисунке 1, приведены в таблице 2 и таблице 3.

Таблица 2 – Модификации схем тонкопленочных аттенюаторов

Условно е обознач ение	Схема (рису нок 1а)	Условно е обознач ение	Схема (рисуно к 1б)	Условное обозначение	Схема (рисунок 1в)
A1		Б1		B1	
A2		Б2		B2	

Продолжение таблицы 2

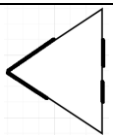
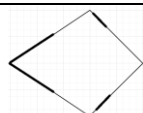
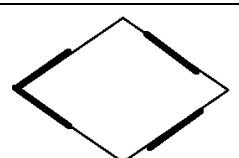
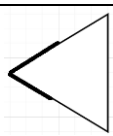
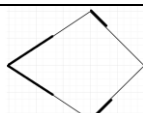
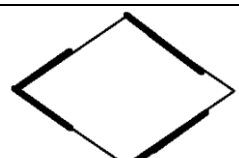
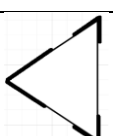
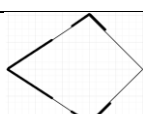
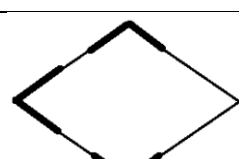
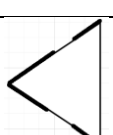
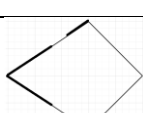
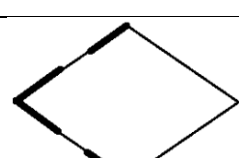
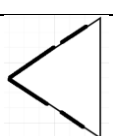
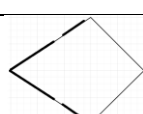
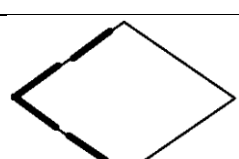
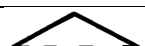
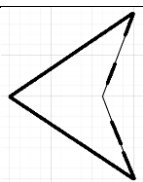
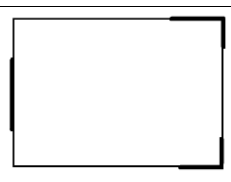
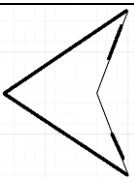
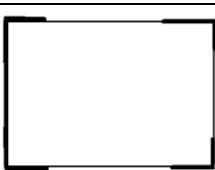
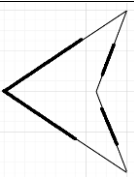
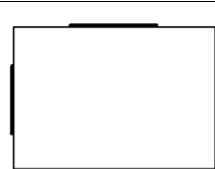
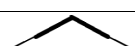
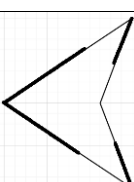
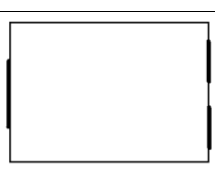
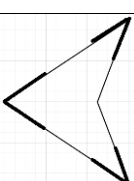
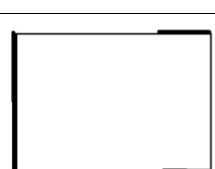
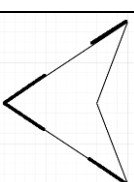
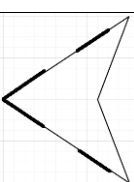
A3		B3		B3	
A4		B4		B4	
A5		B5		B5	
A6		B6		B6	
A7		B7		B7	

Таблица 3 – Модификации схем тонкопленочных аттенюаторов

Условно е обознач ение	Схема (рисуно к 1г)	Условно е обознач ение	Схема (рисуно к 1д)	Условное обозначен ие	Схема (рисунок 1е)
Г1		Д1		Е1	

Продолжение таблицы 3

Г2		Д2		Е2	
Г3		Д3		Е3	
Г4		Д4		Е4	
Г5		Д5		Е5	
Г6		Д6		Е6	
Г7		Д7		Е7	

Далее будет рассматриваться решение задачи анализа и синтеза на примере варианта А треугольной схемы, модификации А1 -А7, указанные в таблице 2. В качестве примера рассматривается схема А1.

Рассмотрим задачу анализа. Резистивный элемент схемы А1 представляет собой тонкую пленку резистивного материала с известным поверхностным сопротивлением R_s в виде равностороннего треугольника. Геометрические размеры контактов L_1CM_2 , $M_3AM'_3$ и $L'_1DM'_2$ считаются заданными

Схему, изображённую на рисунке 2, можно рассматривать, как симметричный, относительно входных (1,3) и выходных (2,3) зажимов, четырёхполюсник. Найдём затухание A и волновое сопротивление R_0 такого четырёхполюсника при работе его на согласованную нагрузку $R_n = R_0$.

Так как схема симметрична, то применив теорему Бартлетта для разомкнутой и короткозамкнутой половины четырёхполюсника, можно записать:

$$Z_{к.з.} = Z_{11} - Z_{12}, \quad (1)$$

$$Z_{х.х.} = Z_{11} + Z_{12}. \quad (2)$$

где Z_{11} и Z_{12} Z – параметры рассматриваемого четырёхполюсника;

$Z_{к.з.}$ и $Z_{х.х.}$ – сопротивление короткого замыкания и холостого хода соответственно.

Разомкнутые и короткозамкнутые половины четырёхполюсника изображены на рисунке 3.

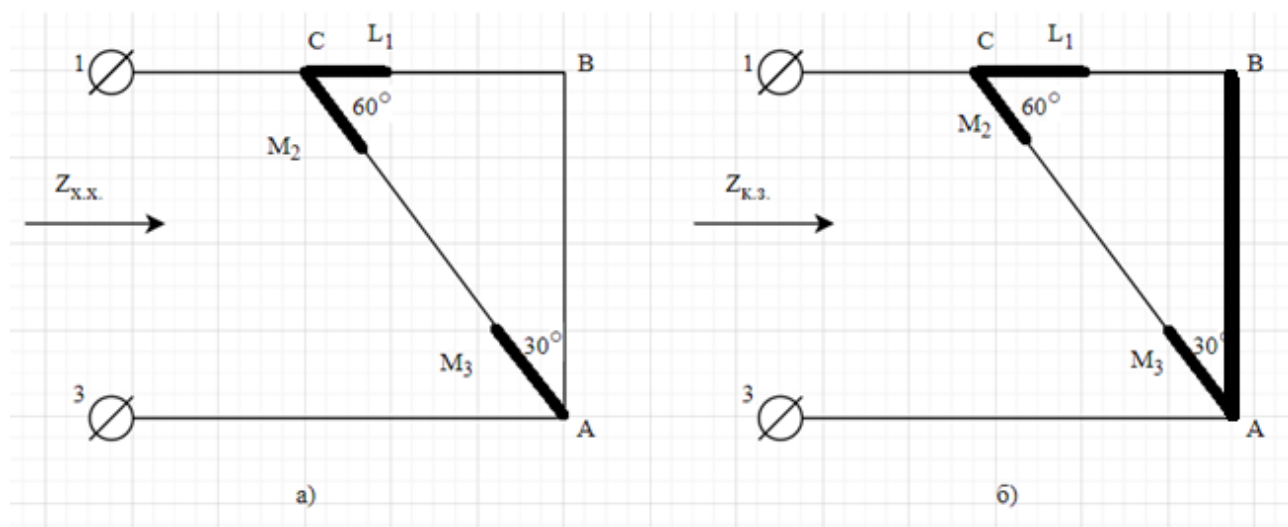


Рисунок 3 – Разомкнутая и короткозамкнутая половинки треугольной схемы

Определив $Z_{к.з.}$ и $Z_{х.х.}$, мы, таким образом, однозначно характеризуем схему данного четырёхполюсника. Можно показать, что переход от величин $Z_{к.з.}$ и $Z_{х.х.}$ к затуханию A и волновому сопротивлению R_0 и обратный переход осуществляется с помощью выражений:

$$A = 20 \lg \left(\frac{\sqrt{Z_{\text{к.з.}} * Z_{\text{х.х.}}} + 0,5(Z_{\text{к.з.}} + Z_{\text{х.х.}})}{0,5(Z_{\text{х.х.}} - Z_{\text{к.з.}})} \right), \quad (3)$$

$$R_0 = \sqrt{Z_{\text{к.з.}} * Z_{\text{х.х.}}}, \quad (4)$$

$$Z_{\text{к.з.}} = R_s * \alpha_2, \quad (8)$$

$$Z_{\text{х.х.}} = R_s * \alpha_1,$$

$$\alpha_1 = \frac{K'_1}{K_1},$$

$$\alpha_2 = \frac{K'_2}{K_2}.$$

Сопротивления $Z_{\text{к.з.}}$ и $Z_{\text{х.х.}}$ могут быть найдены методом конформных преобразований. Для этого следует отобразить разомкнутую и короткозамкнутую половинки на прямоугольник так, чтобы контакты совпадали с противоположными сторонами прямоугольника, данные преобразования изображены на рисунке 4.

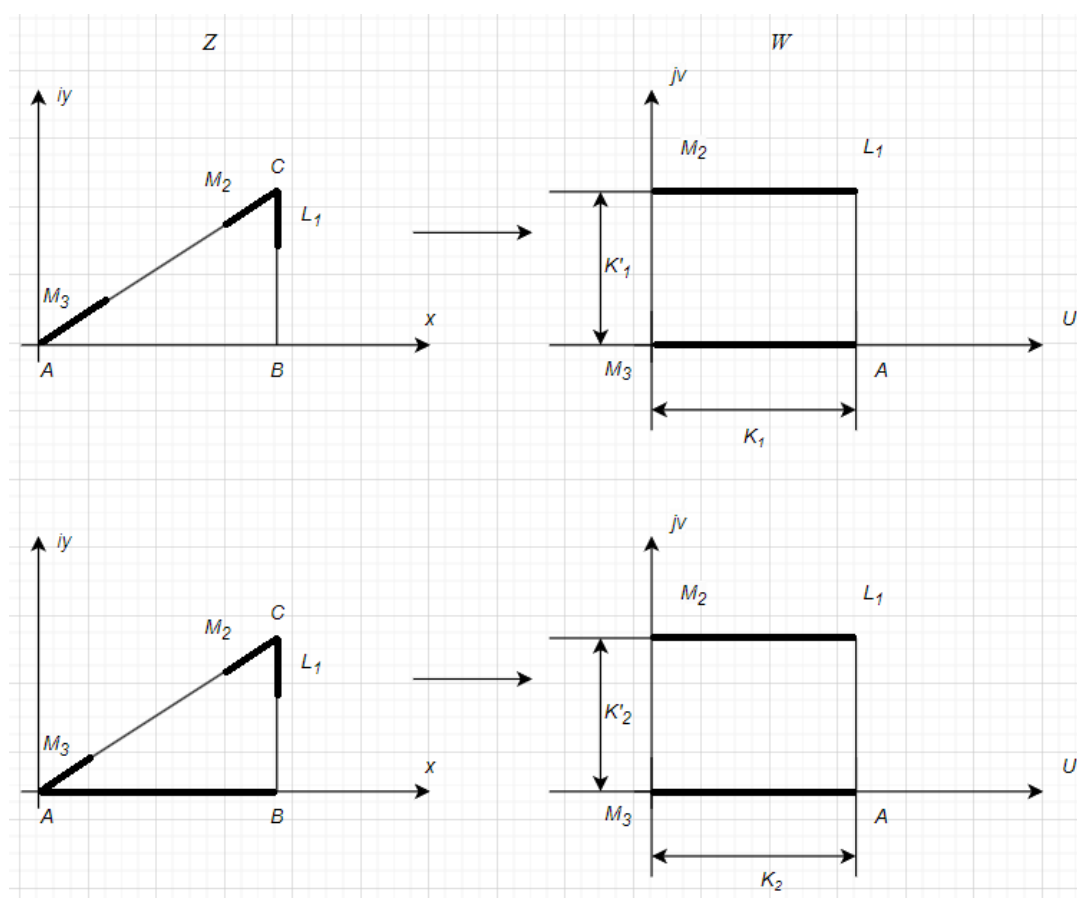


Рисунок 4 - Преобразование прямоугольной схемы

Тогда $Z_{к.з.}$ и $Z_{х.х.}$ определяются с помощью простых выражений

$$Z_{к.з.} = R_s * \mathfrak{a}_2, \quad (8)$$

$$Z_{х.х.} = R_s * \mathfrak{a}_1. \quad (9)$$

где $\mathfrak{a}_1 = \frac{K'_1}{K_1}$ – геометрическое сопротивление разомкнутой половины;

$\mathfrak{a}_2 = \frac{K'_2}{K_2}$ – геометрическое сопротивление замкнутой половины;

$K_1; K'_1; K_2; K'_2$ - полные эллиптические интегралы.

Последовательность такого отображения рассмотрены на примере определения $Z_{х.х.}$. Методика определения $Z_{к.з.}$ идентична.

Для нахождения $Z_{х.х.}$ сделаем последовательно ряд преобразований, изображенных на рисунке 5.

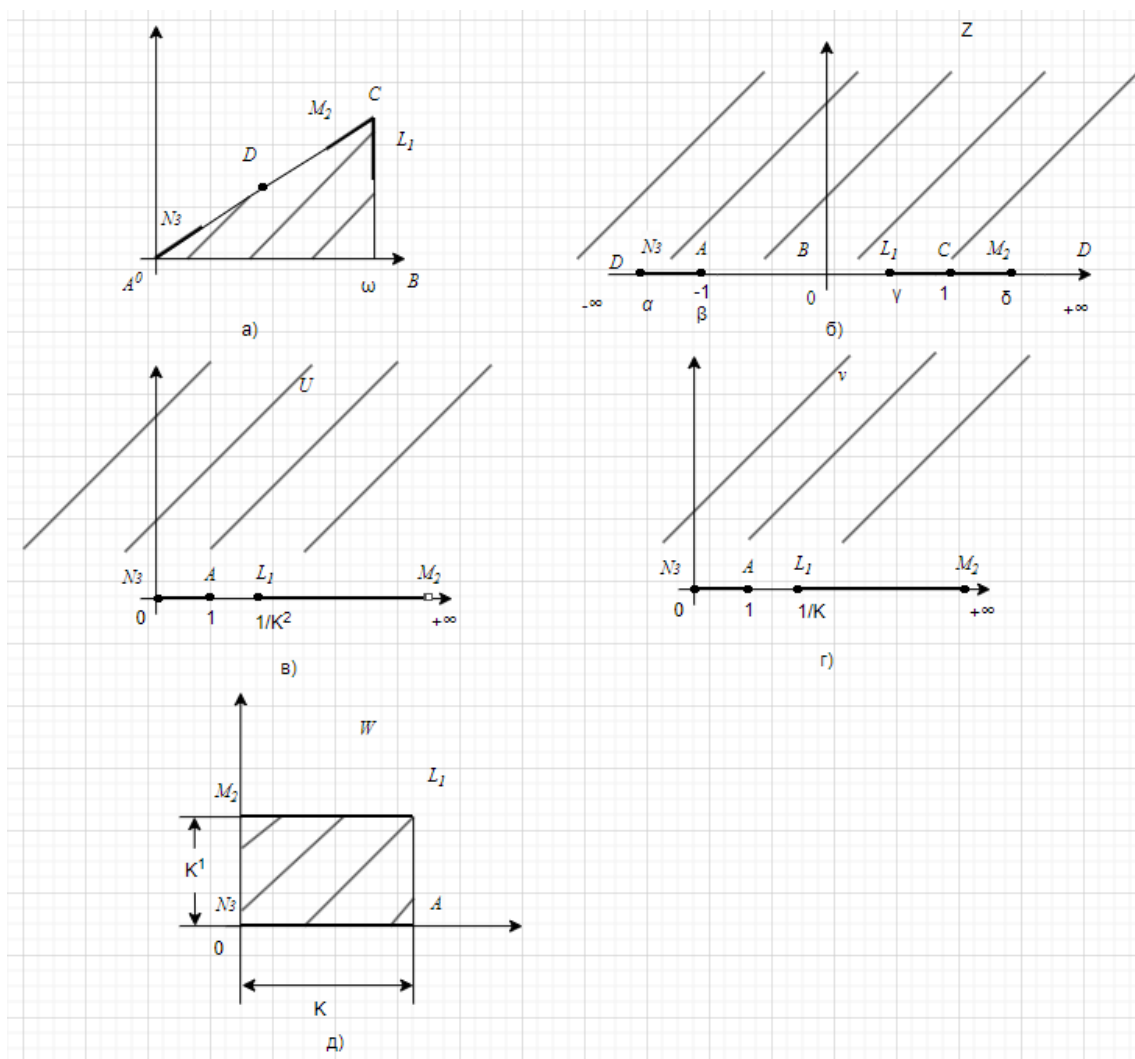


Рисунок 5 – Последовательность преобразований треугольной схемы

Осуществим преобразование W - плоскости в плоскость Z . Функция, осуществляющая конформное преобразование верхней полуплоскости плоскости Z в треугольник ABC с углами 30° , 60° и 90° плоскости W , имеет следующий вид:

$$W = W(Z) = \frac{1}{2} \int_U^{\infty} \frac{dt}{\sqrt{t^3 - 1}}, \quad (10)$$

где

$$U = \sqrt{\frac{1-Z}{1+Z}}. \quad (11)$$

Используя уравнения 10, 11 точки N_3, A, L_1, M_2 в W - плоскости преобразуются соответственно в точки $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ плоскости Z . Определение координат точек $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ будет рассмотрено ниже. Отобразим Z - плоскость на плоскость с помощью дробно линейной функции таким образом, чтобы точки α, β, δ Z - плоскости переходили соответственно в точки $0, 1, \infty$ U – плоскости.

Это отображение осуществляется дробно-линейной функцией:

$$U = U(Z) = \frac{\delta - \beta}{\beta - \alpha} * \frac{Z - \alpha}{\delta - Z}. \quad (12)$$

Точка γ при этом переходит в некоторую точку на действительной оси U - плоскости с координатой $1 < U(\gamma) < +\infty$

Пусть

$$U(\gamma) = \frac{1}{K^2}, \quad (13)$$

Тогда имеем:

$$\frac{1}{K^2} = \frac{\delta - \beta}{\beta - \alpha} * \frac{\gamma - \alpha}{\delta - \gamma}, \quad (14)$$

Откуда

$$K^2 = \frac{\beta - \alpha}{\delta - \beta} * \frac{\delta - \gamma}{\gamma - \alpha}, \quad (15)$$

Далее, функция

$$v = \sqrt{U}. \quad (16)$$

отображает верхнюю полуплоскость U – плоскости на первый квадрат v – плоскости.

Наконец:

$$Z = \int_0^v \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-K^2t^2)}}. \quad (17)$$

Функция отображает первый квадрат v – плоскости на прямоугольник $N_3AL_1M_2$ Z - плоскости.

При этом длины сторон прямоугольника будут следующие:

$$|N_3A| = \int_0^1 \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-K^2t^2)}} = K(k) = K, \quad (18)$$

$$|AL_1| = \int_1^{\frac{1}{K}} \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-K^2t^2)}} = K(k') = K'. \quad (19)$$

Геометрическое сопротивление (эквивалентное числу квадратов) между отводами разомкнутой половине схемы выражается отношением

$$\mathfrak{x}_1 = \frac{K'_1}{K_1}, \quad (20)$$

Следуя такой же методике, можно определить геометрическое сопротивление между отводами короткозамкнутой схемы

$$\mathfrak{x}_2 = \frac{K'_2}{K_2}. \quad (21)$$

Задача синтеза, то есть определение размеров контактов для выбранного варианта схемы, решается выполнением преобразования в обратном порядке.

Разработка методики расчёта треугольных аттенюаторов.

Расчет тонкопленочных аттенюаторов серии А.

Схема определяется положением трёх точек (например LM_2M_3) на сторонах BC и CA треугольника ABC , изображенного на рисунке 6.

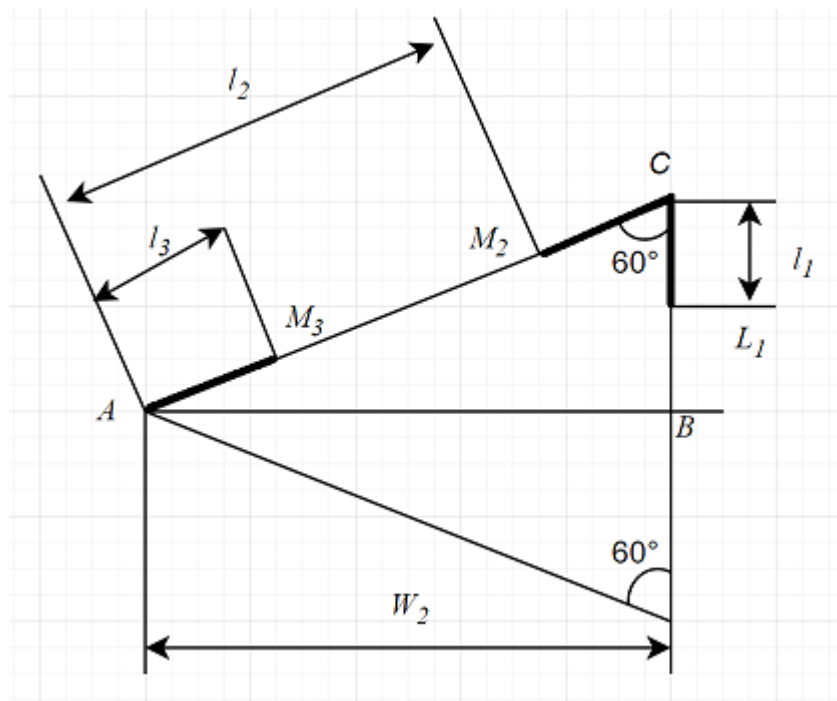


Рисунок 6 – Резистивный элемент (серия А).

Эти три точки и соответствующие им параметры нумеруются в порядке следования при обходе сторон BC и CA треугольника в направлении $B-C-A$.

Положение точки L на стороне BC определяется заданием расстояния $l_L = [CL]$.

Положение точки M на стороне CA определяется заданием расстояния $l_M = [M]$.

Исходными данными анализа схемы являются l – параметры трех точек на сторонах BC и CA треугольника: l_1, l_2, l_3 . В результате анализа мы получим величины, через которые можно определить сопротивления $Z_{x.x.}$ и $Z_{к.з.}$ рассматриваемой схемы.

Находим a – параметры, обращая интегралы

$J_1(a)$ для точек, лежащих на стороне BC (L - точек),

$J_1(a)$ для точек, лежащих на стороне CA (M - точек).

$$J_1(a_L) = 2l_L, \quad (22)$$

$$J_2(a_M) = 2l_M. \quad (23)$$

Находим α – параметры по формулам:

$$\alpha_L = \frac{1 - a_L^3}{1 + a_L^3}, \quad (24)$$

$$\alpha_M = \frac{1 + a_M^3}{1 - a_M^3}. \quad (25)$$

Введём обозначения:

$$\alpha_1 = \alpha, \quad (26)$$

$$\alpha_2 = \beta, \quad (27)$$

$$\alpha_3 = \gamma. \quad (28)$$

Находим K_1^2, K_2^2 по формулам:

$$K_1^2 = \frac{1 + j}{1 + \beta} * \frac{\beta - \alpha}{\gamma - \alpha}, \quad (29)$$

$$K_2^2 = \frac{\gamma}{\beta} * \frac{\beta - \alpha}{\gamma * \alpha}. \quad (30)$$

где K_1^2, K_2^2 модули эллиптических интегралов. Переход от значений величин K_1^2 и K_2^2 к величинам x_1 и x_2 осуществляется с помощью следующих выражений:

$$(K')^2 = 1 - K^2, \quad (31)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} * \frac{1 - \sqrt{K'}}{1 + \sqrt{K'}}, \quad (32)$$

$$g = \varepsilon + 2\varepsilon^5 + 15\varepsilon^9 + 150\varepsilon^{13} + 1707\varepsilon^{17} + \dots, \quad (33)$$

$$x = -\frac{1}{\pi} \ln g. \quad (34)$$

Эта часть расчёта является общей для всех рассматриваемых вариантов схем. Поэтому в дальнейшем при рассмотрении задачи анализа она опускается.

Рассмотрим задачу синтеза. Исходными данными являются величины x_1 и x_2 , характеризующие рассматриваемую схему x_1 и x_2 однозначно определяются через A, R_0 и R_s .

В результате расчета мы получим l – параметры рассматриваемой схемы.

Выражения, позволяющие по известным значениям x_1 и x_2 находить модули эллиптических интегралов K_1^2 и K_2^2 :

$$\ln g = -\pi x, \quad (35)$$

$$K^2 = 16g \left(\frac{1 + g^2 + g^6 + g^{12} + g^{20} + g^{30} + \dots}{1 + 2g + 2g^4 + 2g^9 + 2g^{16} + 2g^{25} + \dots} \right)^4. \quad (36)$$

Эта часть расчёта также является общей для всех вариантов схем, поэтому в дальнейшем при рассмотрении задач синтеза она будет опускаться.

По известным K_1^2 и K_2^2 вычисляем вспомогательные величины:

$$P_1 = \frac{K_1^2}{1 - K_1^2}, \quad (37)$$

$$P_2 = \frac{K_1^2}{1 - K_2^2}, \quad (38)$$

$$P_3 = \frac{K_2^2}{1 - K_2^2}. \quad (39)$$

Выбираем параметр t в соответствие с таблицей 4.

Таблица 4 – Схема и соответствующей ей параметр

Схема	t
A_1	$2P_3 < t < +\infty$
A_2	$t = 2P_3$
A_3	$2P_2 < t < 2P_3$
A_4	$t = 2P_3$
A_5	$2P_1 < t < 2P_2$
A_6	$t = 2P_1$
A_7	$0 < t < 2P_1$

Находим α – параметры по формулам:

$$\alpha_i = \frac{P_i}{t - P_i}, i = 1, 2, 3. \quad (40)$$

Находим a – параметры:

$$a_L = \sqrt[3]{\frac{1 - a_L}{1 + a_L}}, \quad (41)$$

$$a_M = \sqrt[3]{\frac{a_M - 1}{a_M + 1}}. \quad (42)$$

Находим l – параметры, вычисляя интегралы:

$$l_L = \frac{1}{2}J_1(a_L), \quad (43)$$

$$l_M = \frac{1}{2}J_2(a_M). \quad (44)$$

Расчёт тонкопленочных аттенуаторов серии Б.

Схема определяется положением трех точек (например, K, K, L) на сторонах AB и BC треугольника ABC . Эти три точки и соответствующие им параметры нумеруются в порядке следования при обходе сторон AB и BC треугольника в направлении $A-B-C$.

Положение точки K на стороне AB определяется заданием расстояния: $l_K = [AK]$.

Положение точки L на стороне BC определяется заданием расстояния $l_L = [CL]$.

Схема изображена на рисунке 7.

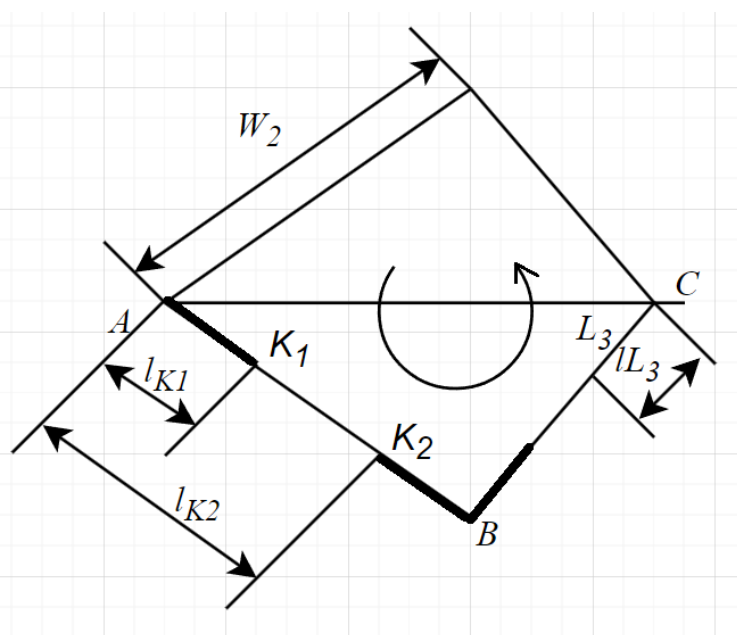


Рисунок 7 – Резистивный элемент (серия Б)

Находим α – параметры по формулам:

$$\alpha_1 = \frac{t - P_3}{t + P_3}, \quad (45)$$

$$\alpha_2 = \frac{t - P_2}{t + P_2}, \quad (46)$$

$$\alpha_3 = \frac{t - P_1}{t + P_1}. \quad (47)$$

Находим a – параметры по формулам:

$$a_i = \sqrt{\frac{1-\alpha_i}{1+\alpha_i}}, \text{ где } i = 1, 2, 3. \quad (48)$$

Находим l – параметры:

$$l_K = \frac{1}{2} J_3(a_K), \quad (49)$$

$$l_L = \frac{1}{2} J_1(a_L). \quad (50)$$

Расчет тонкопленочных аттенуаторов (серия В).

Схема определяется положением трех точек (например, K, L, L) на сторонах AB и BC треугольника ABC .

Эти три точки и соответствующие им параметры нумеруются в порядке следования при обходе контура треугольника в направлении $A \rightarrow B \rightarrow C$. Положение точки K на стороне AB задаётся расстоянием $l_K = |AK|$. Положение точки на стороне BC определяется расстоянием $l_L = |CL|$. Схема изображена на рисунке 8.

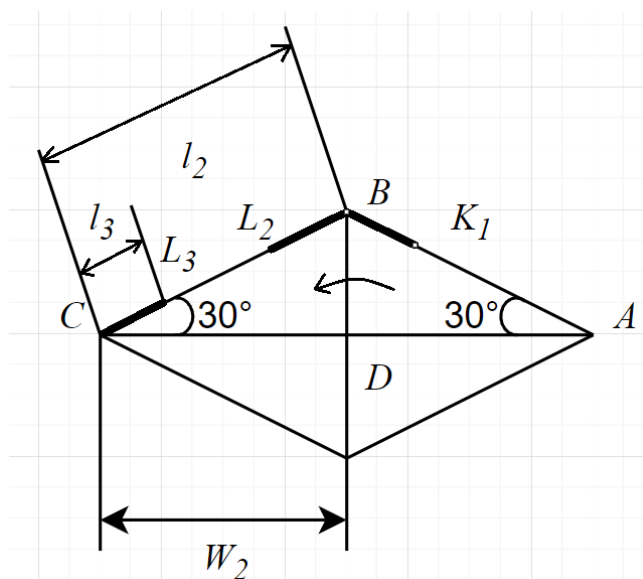


Рисунок 8 – Резистивный элемент (серия В)

Рассмотрим задачу анализа.

Исходными данными являются l – параметры трёх точек на сторонах АВ и ВС треугольника: l_1, l_2, l_3 .

Находим a – параметры, обращая интегралы:

$$J_1(a_L) = 2l_L, \quad (51)$$

$$J_3(a_K) = 2l_K. \quad (52)$$

Находим α – параметры по формулам:

$$\alpha_i = \frac{1 - a_i^3}{1 + a_i^3} \text{ где } i = 1, 2, 3. \quad (53)$$

Введём обозначения, согласно формулам 26 – 28.

Тогда,

$$K_1^2 = \frac{1 + a}{1 + \beta} * \frac{\gamma - \beta}{\gamma - \alpha}, \quad (54)$$

$$K_2^2 = \frac{1 - a}{1 - \beta} * \frac{\gamma - \beta}{\gamma - \alpha}. \quad (55)$$

Рассмотрим задачу синтеза.

По известным значениям K_1^2 и K_2^2 вычисляем P_1, P_2, P_3 . Выбираем параметр t по таблице 5.

Таблица 5 – Схема и соответствующей ей параметр

Схема	t
Б ₁	$P_3 < t < +\infty$
Б ₂	$t = P_3$
Б ₃	$P_2 < t < P_3$
Б ₄	$t = P_2$
Б ₅	$P_1 < t < P_2$
Б ₆	$t = P$
Б ₇	$0 < t < P_1$

Рассмотрим задачу анализа.

Исходными данными являются l – параметры трёх точек на сторонах АВ и ВС треугольника: l_1, l_2, l_3 .

Находим a – параметры, обращая интеграл:

$$J_2(a_i) = 2l_i \text{ где } i = 1, 2, 3. \quad (56)$$

Находим α – параметры по формулам:

$$\alpha_K = \sqrt{\frac{a_K^3}{a_K^3 + 1}}, \quad (57)$$

$$\alpha_L = \sqrt{\frac{a_L^3}{a_L^3 + 1}}. \quad (58)$$

Введем обозначения согласно формулам 26 - 28.

Находим K_1^2 и K_2^2 по формулам

$$K_1^2 = \frac{1 - \gamma}{1 - \beta} * \frac{\beta - a}{\gamma - \alpha}, \quad (59)$$

$$K_2^2 = \frac{1 + \gamma}{1 + \beta} * \frac{\beta - a}{\gamma - \alpha}. \quad (60)$$

Рассмотрим задачу синтеза.

По известным K_1^2 и K_2^2 вычисляем вспомогательные величины P_1, P_2, P_3 .

Выбираем параметр t в соответствии с таблицей 6.

Таблица 6 – Схема и соответствующей ей параметр

Схема	t
B_1	$P_3 < t < +\infty$
B_2	$t = P_3$
B_3	$P_2 < t < P_3$
B_4	$t = P_2$
B_5	$P_1 < t < P$
B_6	$t = P$
B_7	$0 < t < P_1$

Рассмотрим задачу анализа.

Исходными данными являются l – параметры трёх точек на сторонах CA и AB треугольника: l_1, l_2, l_3 .

Находим a – параметры, обращая интеграл:

$$J_2(a_M) = 2l_M, \quad (61)$$

$$J_3(a_K) = 2l_K. \quad (62)$$

Находим α – параметры по формулам:

$$\alpha_K = \frac{1 - \alpha_K^3}{1 + \alpha_K^3}, \quad (63)$$

$$\alpha_M = \frac{1 + \alpha_M^3}{1 - \alpha_M^3}. \quad (64)$$

Введем обозначения, согласно формулам 26 – 28.

Находим K_1^2 и K_2^2 по формулам

$$K_1^2 = \frac{1 - \gamma}{1 - \beta} * \frac{\beta - \gamma}{\alpha - \gamma}, \quad (65)$$

$$K_2^2 = \frac{a}{\beta} * \frac{\beta - \gamma}{\alpha - \gamma}. \quad (66)$$

Рассмотрим задачу синтеза.

По известным K_1^2 и K_2^2 по формулам вычисляем вспомогательные величины P_1, P_2, P_3 . Затем выбираем параметр t в соответствии с таблицей 7.

Таблица 7 – Схема и соответствующей ей параметр

Схема	t
Γ_1	$2P_3 < t < +\infty$
Γ_2	$t = 2P_3$
Γ_3	$2P_2 < t < 2P_3$
Γ_4	$t = 2P_2$
Γ_5	$2P_1 < t < 2P_2$
Γ_6	$t = 2P_1$
Γ_7	$0 < t < 2P_1$

Находим α – параметры:

$$\alpha_1 = \frac{P_3}{P_3 - t}, \quad (67)$$

$$\alpha_2 = \frac{P_2}{P_2 - t}, \quad (68)$$

$$\alpha_3 = \frac{P_1}{P_1 - t}. \quad (69)$$

Находим α – параметры по формулам:

$$\alpha_i = \frac{P_i - t}{P_i + t} \text{ где } i = 1, 2, 3. \quad (70)$$

Находим a – параметры по формулам:

$$a_i = \sqrt[3]{\frac{a_i}{1 - a_i^2}}, \text{ где } i = 1, 2, 3. \quad (71)$$

Находим l – параметры, вычисляя интегралы:

$$l_i = \frac{1}{2} J_2(a_i), \text{ где } i = 1, 2, 3. \quad (72)$$

Расчет тонкопленочных аттенуаторов серии Г

Схема определяется положением трех точек (например M, M, K) на сторонах CA и AB треугольника ABC . Эти три точки и соответствующие им параметры нумеруются в порядке следования при обходе сторон CA и AB треугольника в направлении $C-A-B$.

Положение точки M на стороне CA определяется заданием расстояния $l_M = |AM|$.

Положение точки K на стороне AB задается расстоянием $l_K = |AK|$.

Схема изображена на рисунке 9.

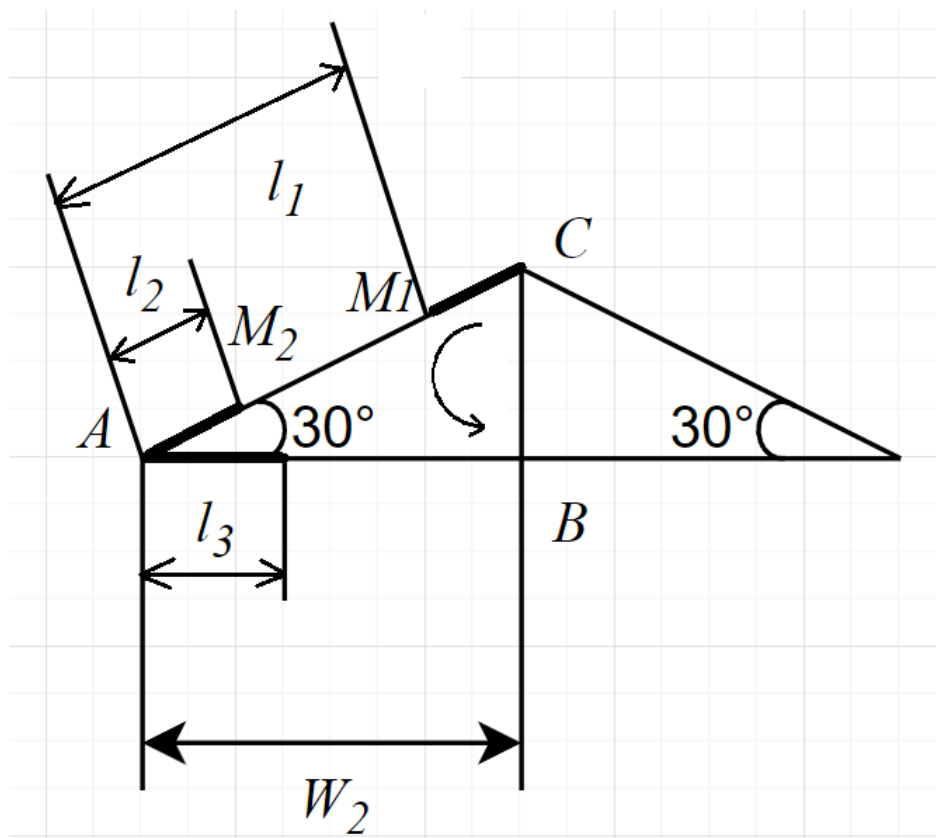


Рисунок 9 – Резистивный элемент (серия Г)

Находим α – параметры:

$$a_K = \sqrt[3]{\frac{1 - a_K}{1 + a_K}}, \quad (73)$$

$$a_M = \sqrt[3]{\frac{a_M - 1}{a_M + 1}}. \quad (74)$$

Находим l – параметры:

$$l_K = \frac{1}{2} J_3(a_K), \quad (75)$$

$$l_M = \frac{1}{2} J_2(a_K). \quad (76)$$

Расчет тонкопленочных аттенуаторов серии Д.

Схема определяется положением трех точек (например, M, N, K) на сторонах CA и AB треугольника ABC . Эти три точки и соответствующие им параметры нумеруются в порядке следования при обходе контура треугольника в направлении $C-A-B$. Схема изображена на рисунке 10.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

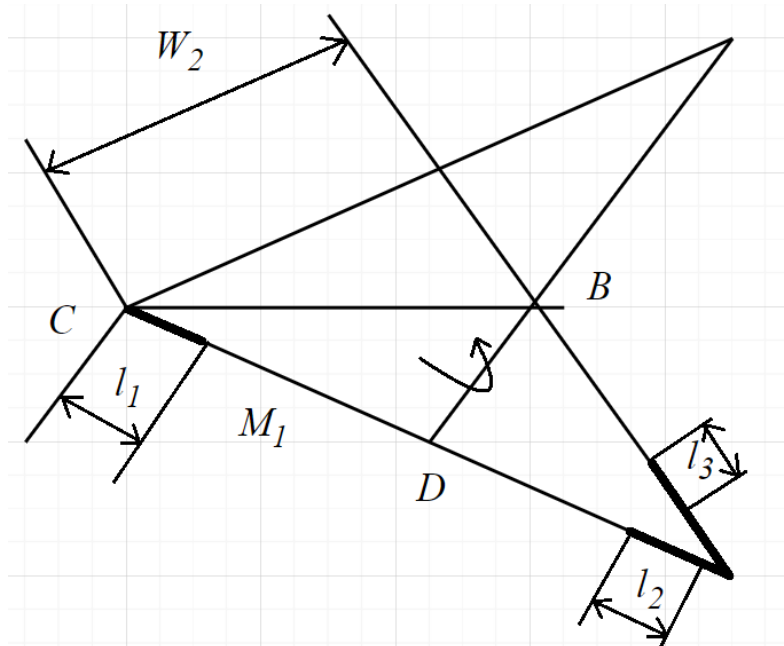


Рисунок 10 – Резистивный элемент (серия Д)

Исходными данными для решения задачи анализа являются l – параметры трех точек на сторонах CA и AB треугольника ABC : l_1, l_2, l_3 .

Находим a – параметры, обращая интегралы:

$$J_3(a_M, N) = 2l_{M,N}, \quad (77)$$

$$J_2(a_K) = 2l_K. \quad (78)$$

Находим α – параметры по формулам:

$$\alpha_M = \frac{\sqrt{a_M^3}}{a_M^3 - 1}, \quad (79)$$

$$\alpha_N = -\frac{\sqrt{a_N^3}}{a_N^3 - 1}, \quad (80)$$

$$\alpha_K = -\frac{\sqrt{a_K^3}}{a_K^3 + 1}. \quad (81)$$

Введем обозначения, согласно формулам 26 – 28.

Находим K_1^2 и K_2^2 по формулам,

$$K_1^2 = \frac{1 - a}{1 - \beta} * \frac{\beta - \gamma}{\alpha - \gamma}, \quad (82)$$

$$K_2^2 = \frac{a}{\beta} * \frac{\beta - \gamma}{\alpha - \gamma}. \quad (83)$$

Рассмотрим решение задачи синтеза.

Используя найденные значения K_1^2 и K_2^2 , по формулам вычисляем вспомогательные величины P_1, P_2, P_3 . Выбираем параметр t по таблице 8.

Таблица 8 – Схема и соответствующей ей параметр

Схема	t
D_1	$2P_3 < t < +\infty$
D_2	$t = 2P_3$
D_3	$2P_2 < t < 2P_3$
D_4	$t = 2P_2$
D_5	$2P_1 < t < 2P_2$
D_6	$t = 2P_1$
D_7	$0 < t < 2P_1$

Находим α – параметры по формулам 67 – 69.

Находим a – параметры по формулам:

$$a_K = \frac{\sqrt[3]{a^2}}{1 - a^2}, \quad (84)$$

$$a_{M, N} = \frac{\sqrt{a^2}}{a^2 - 1}. \quad (85)$$

Находим l – параметры, вычисляя интегралы:

$$l_K = \frac{1}{2} J_2(a_K), \quad (86)$$

$$l_{M, N} = \frac{1}{2} J_3(a_{M, N}). \quad (87)$$

Вычисление интегралов.

Определение постоянной W_2 .

$$W_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} * \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1-x^3}} = \frac{\sqrt{3} * \sqrt{\pi}}{2} * \frac{\Gamma\left(\frac{4}{3}\right)}{\Gamma\left(\frac{5}{6}\right)} = \frac{\sqrt{3} * \sqrt[3]{4}}{12} * \frac{\Gamma^2\left(\frac{1}{3}\right)}{\Gamma\left(\frac{2}{3}\right)}. \quad (88)$$

где Γ - гамма функция Эйлера. Постоянная W_2 может быть вычислена с помощью значений Γ – функции.

Приближенное значение W_2 :

$$W_2 = 1,214325325. \quad (89)$$

Имеют место следующие формулы:

$$\int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1-x^3}} = \frac{2}{3} W_2, \quad (90)$$

$$\int_1^\infty \frac{dx}{\sqrt{x^3-1}} = 2W_2, \quad (91)$$

$$\int_0^\infty \frac{dx}{\sqrt{1-x^3}} = \frac{4}{\sqrt{3}} W_2, \quad (92)$$

$$\int_2^\infty \frac{dx}{\sqrt{1+x^3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} W_2, \quad (93)$$

$$\int_0^2 \frac{dx}{\sqrt{1+x^3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} W_2. \quad (94)$$

Равенства 93, 94 следуют из того, что $\int_2^\infty \frac{dx}{\sqrt{1+x^3}} = \int_0^1 \frac{dt}{\sqrt{1-t^3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} W_2$.

Это соотношение доказывается заменой переменной.

$$x = \frac{2+t}{1-t}. \quad (95)$$

Вычисление интегралов.

При отображении верхней полуплоскости на треугольник требуется вычислять интегралы:

$$J_1(t) = \int_0^t \frac{dx}{\sqrt{1-x^3}}, \quad (-\infty \leq t \leq 1), \quad (96)$$

$$J_2(t) = \int_t^\infty \frac{dx}{\sqrt{1+x^3}}, \quad (-1 \leq t \leq +\infty), \quad (97)$$

$$J_3(t) = \int_t^\infty \frac{dx}{\sqrt{x^3-1}}, \quad (1 \leq t \leq +\infty). \quad (98)$$

Удобно вычислять эти интегралы разложением подынтегральной функции в хорошо сходящиеся ряды. Сведём вычисление этих интегралов в любом из промежутков, где они определены к вычислению трёх рядов, которые назовем основными, в таких промежутках, где для их вычисления с высокой точностью (погрешность вычисления 10^{-10}) требуется сохранять небольшое число слагаемых в соответствующем ряде.

Методика расчёта прямоугольных аттенюаторов.

Расчет тонкопленочных аттенюаторов серии Е.

Схема прямоугольного аттенюатора показана на рисунке 11.

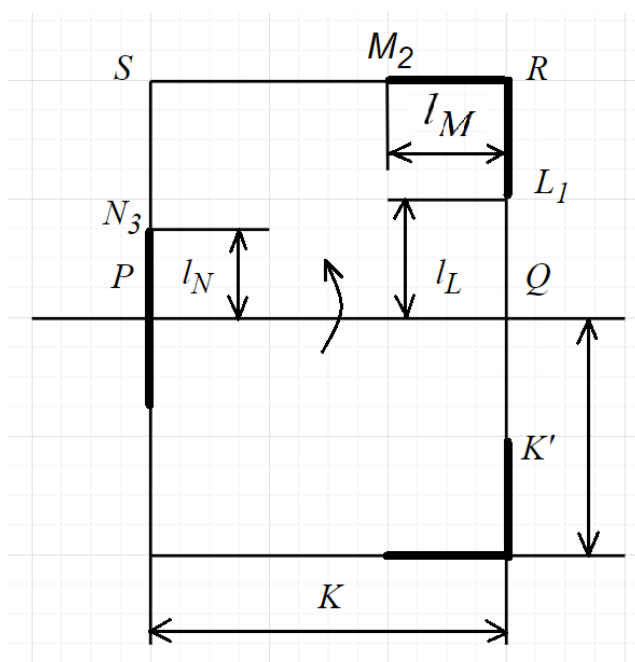


Рисунок 11 – Резистивный элемент (серия Е)

Размеры прямоугольника определяются заданием отношения:

$$\varepsilon = \frac{K'}{K}. \quad (99)$$

Схема определяется положением трех точек (например L, M, N) на сторонах QR, RS, SP прямоугольника $QRSP$. Параметры, вычисленные для этих точек соответственно снабжаются индексами L, M, N .

Эти три точки и соответствующие им параметры нумеруются в порядке следования при обходе контура прямоугольника в направлении $Q-R-S-P$.

Положение этих точек задаётся расстояниями (l – параметрами):

$$l_L = |QL|, \quad (100)$$

$$l_M = |RM|, \quad (101)$$

$$l_N = |RN|. \quad (102)$$

Прямоугольник определяется с точностью до подобия.

Предполагается, что стороны одной половины прямоугольника содержат K и K' единиц масштаба. В этом случае l – параметры имеют l_L, l_M, l_N тех же единиц масштаба.

Рассмотрим решение задачи анализа. Размеры прямоугольника заданы отношением α . Так же считаются заданными l - параметры l_1, l_2, l_3 трех точек на сторонах прямоугольника. В результате анализа, как и в случае треугольных схем, мы должны получить величины α_1 и α_2 , являющиеся геометрическими сопротивлениями $Z_{x.x.}$ и $Z_{к.з.}$ рассматриваемой схемы.

Находим K^2 по заданному α . Находим $(K')^2 = 1 - K^2$. Находим a - параметры, обращая соответствующие интегралы. Для точек L, N a - параметры находим обращением интеграла $F(a, K')$ с модулем K' . Для точки M a - параметры находим обращением интеграла $F(a, K)$ с модулем K .

3.2 Экспериментальная проверка методики расчета

По приведенной выше методике расчёта тонкопленочных аттенюаторов для вариантов схем, изображенных на рисунке 1, была составлена программа для ЭВМ, позволяющая решать задачу анализа-синтеза рассматриваемых аттенюаторов.

Укрупненные блоки схемы алгоритма решения задач синтеза и анализа приведены на рисунках 12, 13 соответственно.

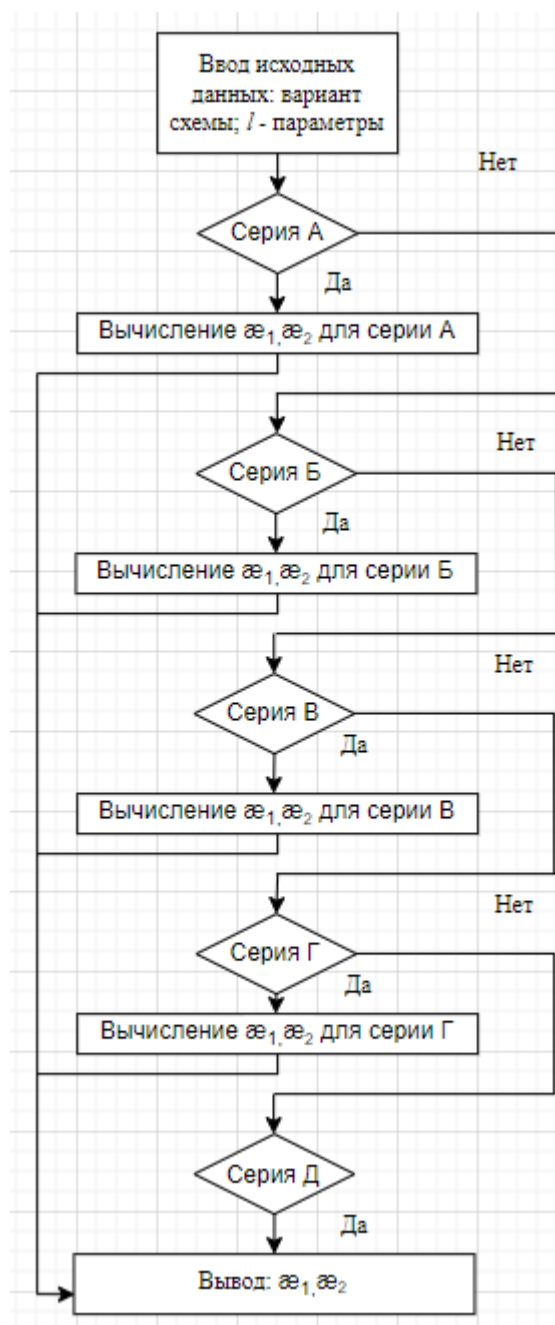


Рисунок 12 – Блок схема решения алгоритма решения задачи анализа

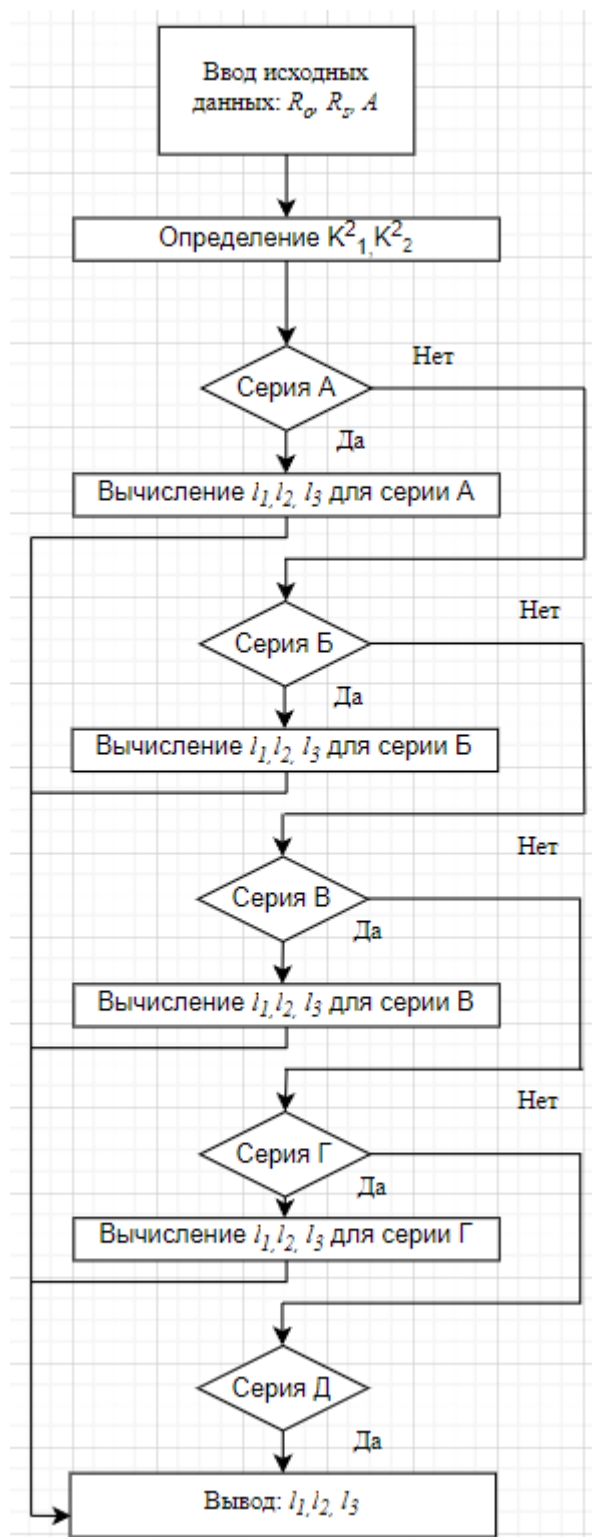


Рисунок 13 – Блок схема решения алгоритма решения задачи синтеза

При решении задачи анализа входной информацией служит топология аттенюатора (вариант схемы, l - параметры). Выходной информацией служат величины α_1 и α_2 , полностью характеризующие данную схему.

При решении задачи синтеза входной информацией служат затухание A , входное сопротивление R_0 и удельное поверхностное сопротивление пленки, а выходной информацией являются геометрические размеры аттенюаторов.

Переход от величин α_1 и α_2 к затуханию A и волновому сопротивлению R_0 аттенюатора осуществляется с помощью выражений (3 - 7).

В таблице 9 приведены результаты решения задачи синтеза тонкопленочных аттенюаторов, выполненной на ЭВМ для различных вариантов схем.

Таблица 9 – Результаты решения задачи синтеза

Схем а	$l_1, \text{мм}$	$l_2, \text{мм}$	$l_3, \text{мм}$	α_1	α_2	$A, \text{дБ}$	$R_0, \frac{\text{Ом}}{\square}$
A_5	0,21033	1,26758	0,70109	2,30479	1,59673	20,77137	26,06385
A_6	0,00000	1,13297	0,70115	2,11354	1,43914	20,37406	28,66899
B_5	0,24286	1,07972	0,46794	3,76346	1,01270	9,98198	25,61154
B_6	0,24286	1,21433	0,23479	3,66874	0,62490	7,68359	33,24964
B_5	0,44870	0,89740	0,70110	2,66922	0,45596	7,63648	45,32250
B_6	0,12143	0,44870	0,00000	7,32242	2,85447	12,71823	10,93654

В таблице 10 приводятся параметры: среднее значение затухания макетных образцов $A_{\text{ср}}$, выборочное стандартное отклонение затухания S_x , расчётное значение затухания A , величина расхождения затухания расчетных и экспериментальных данных δ_A .

Таблица 10 – Параметры аттенюатора

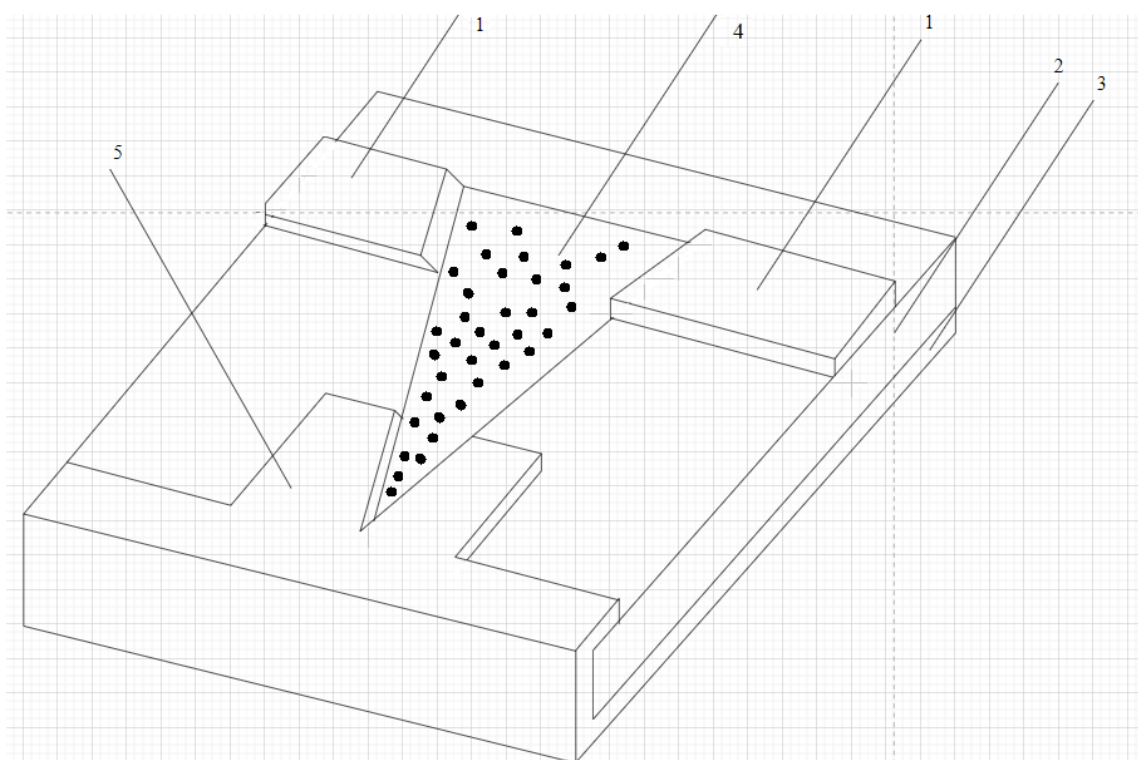
Схема	$A, \text{дБ}$	$A_{\text{ср}}, \text{дБ}$	$S_x, \text{дБ}$	$\delta_A, \%$
A_5	20,77	20,64	0,03	0,63
A_6	20,37	20,39	0,02	0,10
B_5	9,98	10,13	0,03	1,50
B_6	7,68	7,92	0,02	3,12
B_3	7,63	7,69	0,01	0,78

Величина затухания макетных образцов аттенюаторов измерялась на постоянном токе. Как видно из сравнения расчетных и экспериментальных данных, расхождение составляет 0,63 - 3,12 %. Оно может быть в большей степени отнесено к погрешности эксперимента, связанной с технологическими погрешностями изготовления макетных образцов.

Таким образом, результаты эксперимента подтверждают правильность разработанной методики расчета тонкопленочных аттенюаторов с распределенным сопротивлением.

3.3 Разработка конструкции аттенюатора и топологии

Конструктивно разрабатываемые тонкопленочные аттенюаторы выполнялись в виде бескорпусной тонкопленочной СВЧ микросхемы в несимметричном микрополосковом исполнении. На рисунке 14 изображен вариант конструкции тонкопленочного аттенюатора с распределенным сопротивлением.

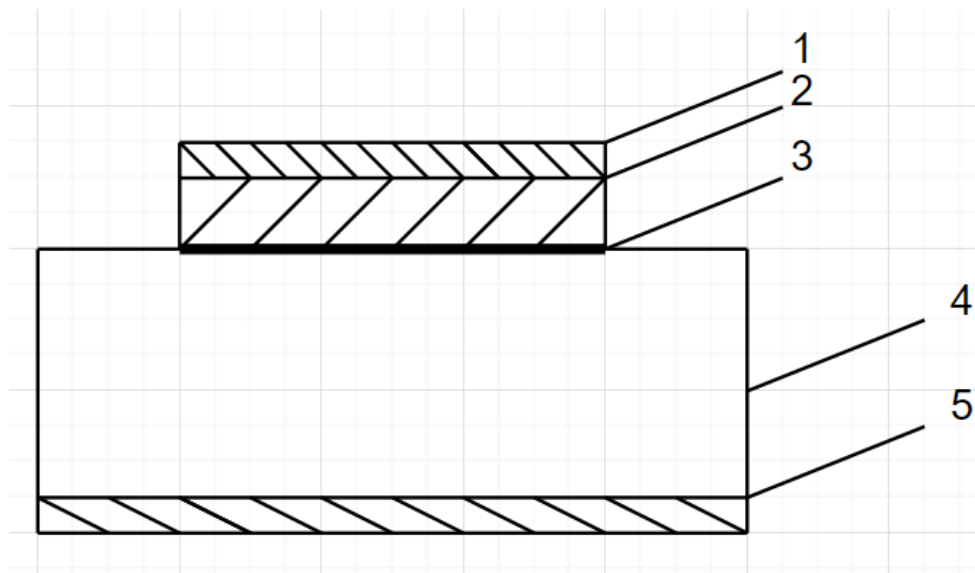


1 – входной и выходной отрезки микрополосковой линии; 2 – подложка; 3 – металлизация; 4 – резистивный слой; 5 – заземляющий контакт.

Рисунок 14 – Конструкция тонкопленочного аттенюатора

Основой такого аттенюатора является подложка из высокочастотного материала, поликристаллического корунда – поликора. $\varepsilon = 9,8$; $tg\delta = 1 * 10^{-4}$. Максимальные размеры подложки 10 * 8 мм, толщина 1 мм. На одной из сторон подложки сформирован СВЧ тракт (входной и выходной отрезки микрополосковой линии) и тонкопленочная резистивная структура. Обратная сторона подложки полностью металлизирована.

Заземляющий контакт 5 соединен с металлизацией 3 с помощью металлической перемычки, напыленной на торец подложки 2. Проводник широкополосковой линии обычно состоит из трёх слоев. Поперечное сечение многослойной структуры микрополосковой линии передачи изображено на рисунке 15.



1 – подслой; 2 – основной проводящий слой; 3 – защитный слой; 4 – подложка; 5 – металлизация.

Рисунок 15 – Поперечное сечение многослойной структуры микрополосковой линии передачи

Нижний слой (подслой) предназначен для обеспечения хорошей адгезии. Верхний является защитным. Материалом подслоя служит C_2 . В качестве защитного слоя использовался сплав $InBi$.

Основной проводящий слой выполнен из меди. Для уменьшения потерь в проводниках микрополосковой линии и заземляющего слоя на обратной стороне

подложки их толщина должна составлять не менее трех скин-слоев. Поэтому толщина слоя меди составляет 5 - 7 мкм. Ширина проводника микрополосковой линии определяется волновым сопротивлением линии, толщиной и диэлектрической проницаемостью подложки из следующего выражения:

$$R_0 = \frac{377h}{\sqrt{\epsilon}W \left[1 + 1,735\epsilon^{-0,0724} \left(\frac{W}{h} \right)^{-0,836} \right]}. \quad (103)$$

где h - толщина подложки, мм; ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки; W - ширина проводника, мм.

Для подложки из поликора с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 9,8$; толщиной 1 мм заданное волновое сопротивление $R_0 = 50$ Ом обеспечивает линия с шириной $W = 0,96$ мм.

Разработка топологии.

Исходными данными для разработки топологии являются: электрические параметры аттенюатора, условия работы, конструктивные и технологические ограничения.

Разрабатываемые аттенюаторы должны иметь следующие электрические параметры:

- номиналы затухания соответствуют ряду: 1, 0; 2, 0; 3, 0; 4, 0; 8, 0; 10; 16; 20; 30; 40; 50; 60 дБ;
- волновое сопротивление 50 Ом;
- диапазон рабочих частот 0 – 18 ГГц
- входная мощность 1 Вт.

Очевидно, что для каждого варианта схемы существует определенный ряд затуханий, который можно реализовать с помощью данной схемы при приемлемых размерах входного, выходного и заземляющего контактов. С этой позиции проанализируем схемы аттенюаторов, приведенных в таблицах 2 и 3. Тонкопленочные аттенюаторы с распределенным сопротивлением можно представить в виде Т-образной эквивалентной схемы замещения.

Последовательные плечи обозначены резисторами R_1 и шунтирующим плечо резистором R_2 . Очевидна следующая взаимосвязь:

$$R_1 = Z_{к.з.}, \quad (104)$$

$$R_2 = \frac{Z_{х.х.} - Z_{к.з.}}{2}. \quad (105)$$

Из конфигурации схем, видно, что $Z_{х.х.} > Z_{к.з.}$ для любого размера выводов. Эта взаимосвязь предполагает, что резисторы R_1 и R_2 являются позитивными и реализуемыми.

Из уравнений (33, 34) можно сделать вывод, что при расчете аттенюатора с большими вносимыми потерями (для $A > 30$ дБ) величины $Z_{х.х.}$ и $Z_{к.з.}$ должны быть близкими друг к другу, тогда как при расчёте аттенюатора с низкими вносимыми потерями (для $A < 5$ дБ) требуется противоположное соотношение, т.е. $Z_{х.х.} > Z_{к.з.}$.

В таблице 11 приведены результаты анализа различных вариантов схем для практически приемлемых размеров контактов.

Таблица 11 – Результаты анализа различных вариантов схем

Вариант схемы	l - параметры			A, дБ	$R_s, \frac{\text{Ом}}{\square}$
	l_1	l_2	l_3		
В ₃	0,22435	0,67305	0,14022	4,09209	34,44513
	0,44870	0,89740	0,14022	5,03327	30,89559
	0,44870	0,89740	0,98153	8,90316	51,91900
	0,44870	0,89740	1,26197	10,15304	58,45311
В ₄	0,12143	1,21433	0,23479	6,45932	28,45034
	0,24286	1,21433	0,23479	7,68356	33,24953
	0,36429	1,21433	0,23479	8,83018	37,51127
	0,48572	1,21433	0,23479	10,04130	41,80704
	0,60715	1,21433	0,23479	11,39934	46,51004

Продолжение таблицы 11

B_6	—	1,13297	0,14023	10,32515	18,04512
	—	1,13297	0,28046	12,51864	20,90044
	—	1,13297	0,42069	14,71739	23,37598
	—	1,13297	0,56092	17,24078	25,86221
	—	1,13297	0,70115	20,37406	28,72633

Анализируя данные таблицы 11, можно сделать вывод, что схема B_3 является аттенуатором с относительно низкими вносимыми потерями.

Теоретически можно получить очень низкие вносимые потери для схемы B_3 , уменьшая размеры l_3 и l_1 , и увеличивая l_2 . Такой аттенуатор изображен на рисунке 16.

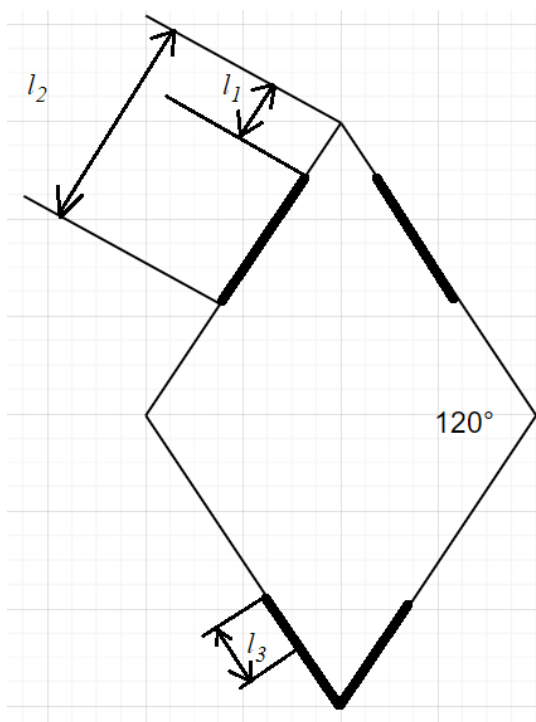


Рисунок 16 – Тонкопленочный аттенуатор с малым затуханием

Практически для схемы B_3 удалось рассчитать l – параметры для затухания $A \geq 3$ дБ. Так как для малых затуханий требуется, чтобы $Z_{x.x.} \gg Z_{к.з.}$ то и величины ε_1 и ε_2 связывает такое же соотношение, то есть $\varepsilon_1 \gg \varepsilon_2$. Это приводит и тому, что модуль эллиптического интеграла $K_1^2 \rightarrow 0$, а $K_2^2 \rightarrow 1$. При этом модуль K_1^2 настолько мал (для $R_s = 50 \frac{\text{Ом}}{\square}$ и $A = 1$ дБ $K_1^2 = 0,7666 \cdot$

10^{-58}), что машина не может оперировать с таким числом и принимает его равным нулю.

Для реализации аттенюатора с затуханием $\gg 30$ дБ был выбран вариант схемы E_5 . Рассмотрим схему E_5 более подробно. Данный аттенюатор изображен на рисунке 17.

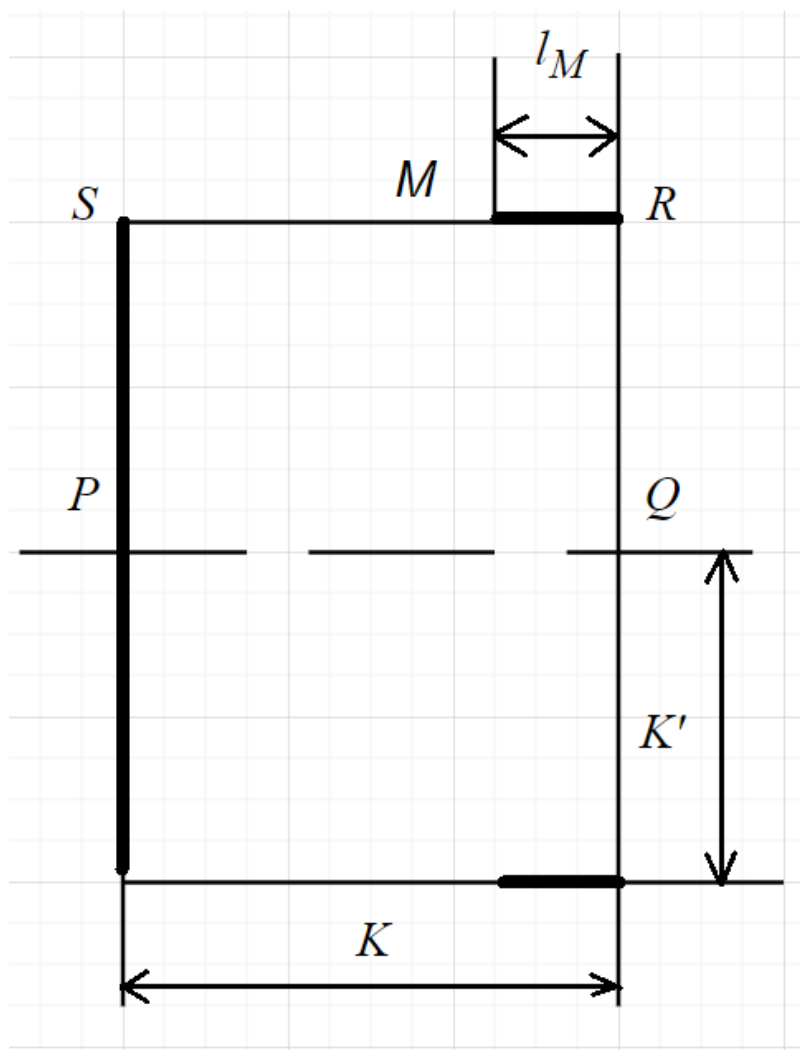


Рисунок 17 – Тонкопленочный аттенюатор E_5

Так как контакты MR и SP совпадают с вершинами прямоугольника, то синтез такой схемы в сущности сводится к однократному использованию таблицы неполных эллиптических интегралов I-го рода.

Для избранного затухания A , волнового сопротивления R_0 и поверхностного сопротивления резистивной пленки R_s , используя общую часть методики расчёта, определяем K_1^2 и K_2^2 связаны с величиной K , определяющей отношение сторон прямоугольника

$$\kappa = \frac{K'}{K}. \quad (106)$$

для выбранного затухания следующими соотношениями

$$K' = \frac{K_1}{K_2} * \frac{K_2'}{K_1'}, \quad (107)$$

$$K = \sqrt{1 - (K')^2}. \quad (108)$$

где K и K' модули ионных эллиптических интегралов первого рода. Тогда значения D и l – параметров можно определить с помощью следующих выражений:

$$D_{m2} = \frac{\sqrt{K_2^2 - K_1^2}}{K * K_1'}, \quad (109)$$

$$l_{m2} = F(a_m, K). \quad (110)$$

Для $R_s = 50 \frac{\text{Ом}}{\square}$:

$$K_1^2 = 1 - K_2^2. \quad (111)$$

В этом случае

$$F = (a_m, K) = \frac{1}{2} K(k). \quad (112)$$

где $K(k)$ - полный эллиптический интеграл первого рода.

Таким образом, для схемы E_5 задача нахождения топологии, реализующей заданное затухание и волновое сопротивление при выбранном поверхностном сопротивлении пленки $R_s = 50 \frac{\text{Ом}}{\square}$, будет заключаться в определении сторон прямоугольника K и $2K'$.

В таблице 12 приведены результаты расчёта топологии аттенуаторов для схемы E_5 .

Таблица 12 – Результаты расчета топологии аттенуаторов для схемы E_5

A, дБ	$R_s, \frac{\text{Ом}}{\square}$	l - параметры		
		K	K'	l м
30	50	1,7957	1,9227	0,8978
40	50	1,6402	2,3574	0,8201

Продолжение таблицы 12

50	50	1,59261	2,8725	0,7963
60	50	1,5776	3,4241	0,7888

На основании анализа данных, приведенных в таблицах 11, 12 для реализации заданного ряда затухания, были выбраны схемы В3, Б4, А5, Е5. Значения l - параметров, рассчитанные для этих схем, для соответствующих затуханий, а также поверхностное сопротивление пленки, необходимое при этом для обеспечения волнового сопротивления 50 Ом, представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Значения l – параметров и поверхностное сопротивление пленки для вышеперечисленных схем

Вариант схемы	А, дБ	$R_s, \frac{\text{Ом}}{\text{о}}$	l - параметры		
			l_1	l_2	l_3
В3	3	60	0,08884	0,72059	0,27306
В3	4	60	0,26720	1,20191	0,31651
Б4	8	35	0,28386	1,21433	0,23479
Б4	10	40	0,45994	1,21433	0,23479
А6	16	25	0,00000	1,13297	0,50100
А6	20	25	0,00000	1,13297	0,65514

Значения l - параметров приведены в относительных единицах относительно постоянной $W_2 = 1,21433$. Значения l - параметров, постоянная W_2 , вариант схемы для данного затухания определяют с точностью до подобия геометрические размеры резистивных элементов, входных, выходных и заземляющих контактов.

Определим далее геометрические размеры резистивного элемента аттенюатора, считая, что размер входного и выходного контакта известен и определяется шириной микрополосковой линии W .

Результаты приведены в таблицах 14, 15.

Таблица 14 – Результаты определения геометрических размеров
резистивного элемента

Вариант схемы	A, дБ	W_2 , мм	l - параметры			Площадь резистивного элемента S см ²
			l_1	l_2	l_3	
В3	3	2,13	0,1561	1,2661	0,4798	0,052
В3	4	1,44	0,3173	1,4273	0,3759	0,023
Б4	8	5	1,1687	5,0000	0,9667	0,144
Б4	10	5	1,8938	5,0000	0,9667	0,144
А6	16	5	0,0000	4,6650	7,0628	0,144
А6	20	5	0,0000	4,6650	2,6975	0,144

Таблица 15 – Результаты определения геометрических размеров
резистивного элемента

Вариант схемы	A, дБ	l – параметры, мм			Площадь резистивного элемента S см ²
		K	K'	l м	
Е5	30	1,9199	2,0558	0,9600	0,0788
Е5	40	1,9199	2,7594	0,9600	0,1058
Е5	50	1,9199	9,4630	0,9600	1,132
Е5	60	1,9199	4,1670	0,9600	1,160

Максимальная входная мощность аттенюатора для затуханий $\gg 10$ дБ полностью определяется допустимой мощностью рассеяния резистора $P_{\text{доп}}$, которая в свою очередь определяется удельной мощностью рассеяния P_0 материала пленки и площадью резистора (S). Удельная мощность рассеяния для C_2 на поликоре составляет 15 Вт/см².

Определим площадь резистивного элемента из условия:

$$S \gg \frac{P}{P_0} = \frac{1 \text{ Вт}}{15 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}} = 0,067 \text{ см}^2. \quad (113)$$

Из таблицы 13 видно, что площадь резистивного элемента схемы В3 при выбранных размерах контактов оказалось недостаточной, поэтому все размеры схем В3 были пропорционально увеличены таким образом, что величина W_2 составила 3 мм. При этом площадь резистивного элемента стала 0,104 см².

В данной работе расчёт тонкопленочных аттенюаторов проведен на постоянном токе. Результаты такого расчета будут верны до частот, на которых будет соблюдаться следующее соотношение:

$$l \leq 0,1\lambda_b, \quad (114)$$

где l – линейный размер резистивного элемента; λ_b – длина волны в линии передачи.

На частотах, на которых длина волны становится соизмеримой с размером резистивного элемента, его уже нельзя рассматривать как сосредоточенный элемент. В этом случае резистивный элемент нужно рассматривать как резистивную линию. Расчет параметров такой линии является очень трудным и не всегда разрешимой с достаточной точностью задачей. Если же в качестве критерия для определения геометрических размеров резистивного элемента использовать выражение (35), то для работы на частоте 18 ГГц линейные размеры резистивного элемента аттенюатора не должны превышать 0,6 мм. В этом случае удельная мощность рассеивания в резистивном элементе значительно превысит допустимую P_0 . Кроме того, размеры резистивного элемента становятся настолько малы, что его практически нельзя включить в микрополосковую линию, не изменяя её геометрии. Поэтому верхняя граничная частота работы разрабатываемых аттенюаторов определяется экспериментально.

3.4 Разработка методики подгонки параметров аттенюаторов и испытания экспериментальных образцов

Для получения аттенюаторов с заданной точностью затухания и

волнового сопротивления $\pm 1\%$ необходимо применить подгонку. Для подгонки тонкопленочных аттенюаторов был применен метод вырезания части резистивного элемента с помощью лазерного излучения.

Трудность подгонки аттенюаторов с распределенными параметрами состоит не только в выборе метода, обеспечивающего необходимую точность, а также в правильном выборе места подгонки, длины реза и последовательности циклов подгонки, так как изменение одного из подгоняемых параметров влечёт за собой изменение двух остальных.

В рассматриваемых аттенюаторах существуют линии 1,2,3 наиболее удобные для подгонки. Аттенюатор с линиями реза изображен на рисунке 18.

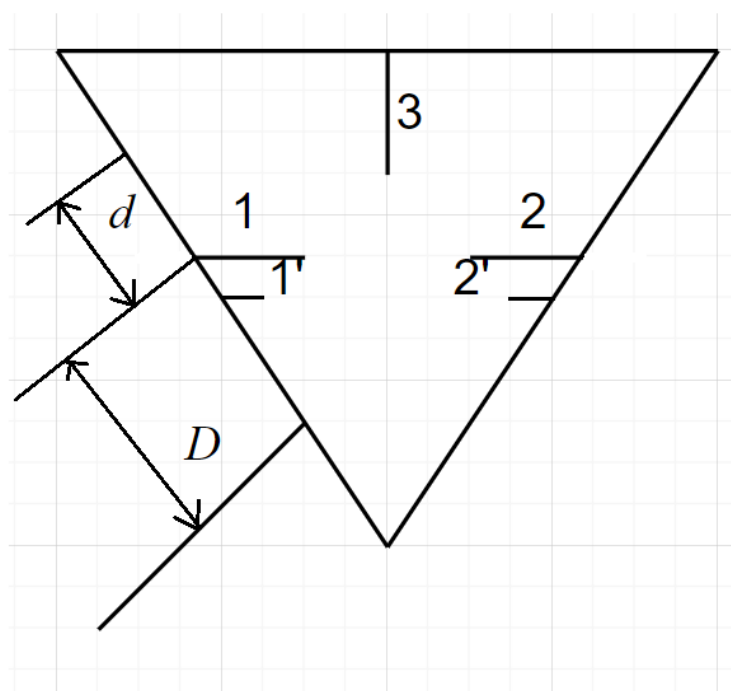


Рисунок 18 – Тонкопленочный аттенюатор с резами подгонки

Подогнав $R_{вх}$ и $R_{вых}$ по линиям 1 и 2, можно подогнать коэффициент деления K_d по линии 3 и при этом величины $R_{вх}$ и $R_{вых}$ изменяться не будут. Однако это будет справедливо только в том случае, если резы будут представлять собой определенные кривые с бесконечно малой толщиной, чего добиться практически невозможно. Поэтому необходимо проводить поочередно подгонку всех трех параметров, последовательно входя в зону допустимых значений.

Рассмотрим влияние резов 1, 2, 3 на параметры аттенюатора на примере схемы А6.

Подгона затухания производится вертикальный резом (3), начинающимся от верхнего края резистора на одинаковом расстоянии от входного и выходного контактов. При этом резе наблюдается относительно небольшое увеличение входного и выходного сопротивления и значительное увеличение затухания.

Подгонка входного сопротивления $R_{вх}$ производится горизонтальной линией 1, начинающейся от боковой стороны резистора между входным и заземляющим контактами. При этом рез 1 наряду с увеличением $R_{вх}$ и незначительным увеличением $R_{вых}$ приводит, в зависимости от расстояния d , либо к увеличению, либо к уменьшению затухания. Поэтому для каждой схемы 1 зависимости от расстояния l надо выбирать такое расстояние d , чтобы рез 1 приводил к незначительному уменьшению затухания.

Для большей точности подгонки на окончательном этапе входное сопротивление $R_{вх}$ подгоняется резом 1'.

Выходное сопротивление подгоняется аналогично входному с помощью резов 2, 2'.

На основании анализа экспериментальных данных о влиянии различных резов на параметры аттенюатора можно предложить следующую последовательность циклов подгонки:

- резом 3 осуществляется подгонка затухания до нормального значения, при этом погрешность затухания становится равной нулю;

- резами 1, 2 подгоняются поочередно $R_{вх}$ и $R_{вых}$ до величины сопротивления $48 + 49$ Ом, при этом затухание незначительно уменьшается;

- резом 3 затухание вновь подгоняется до номинальной величины

- резами 1, 2 $R_{вх}$ и $R_{вых}$ подгоняются до величины $49,5 - 49,8$ Ом, если при этом затухание уменьшилось, то следует повторить подгонку затухания;

- резами 1', 2' $R_{вх}$ и $R_{вых}$ подгоняются до величин сопротивления $50 \pm 0,1$ Ом.

Практически при подгонке входного, выходного сопротивления аттенюатора до величины $50 \pm 0,05$ Ом и затухания с точностью $\pm 1\%$ для схемы А6 достаточно 2-3 цикла подгонки.

Схема технологического процесса изготовления экспериментальных образцов аттенюаторов представлена на рисунке 19.

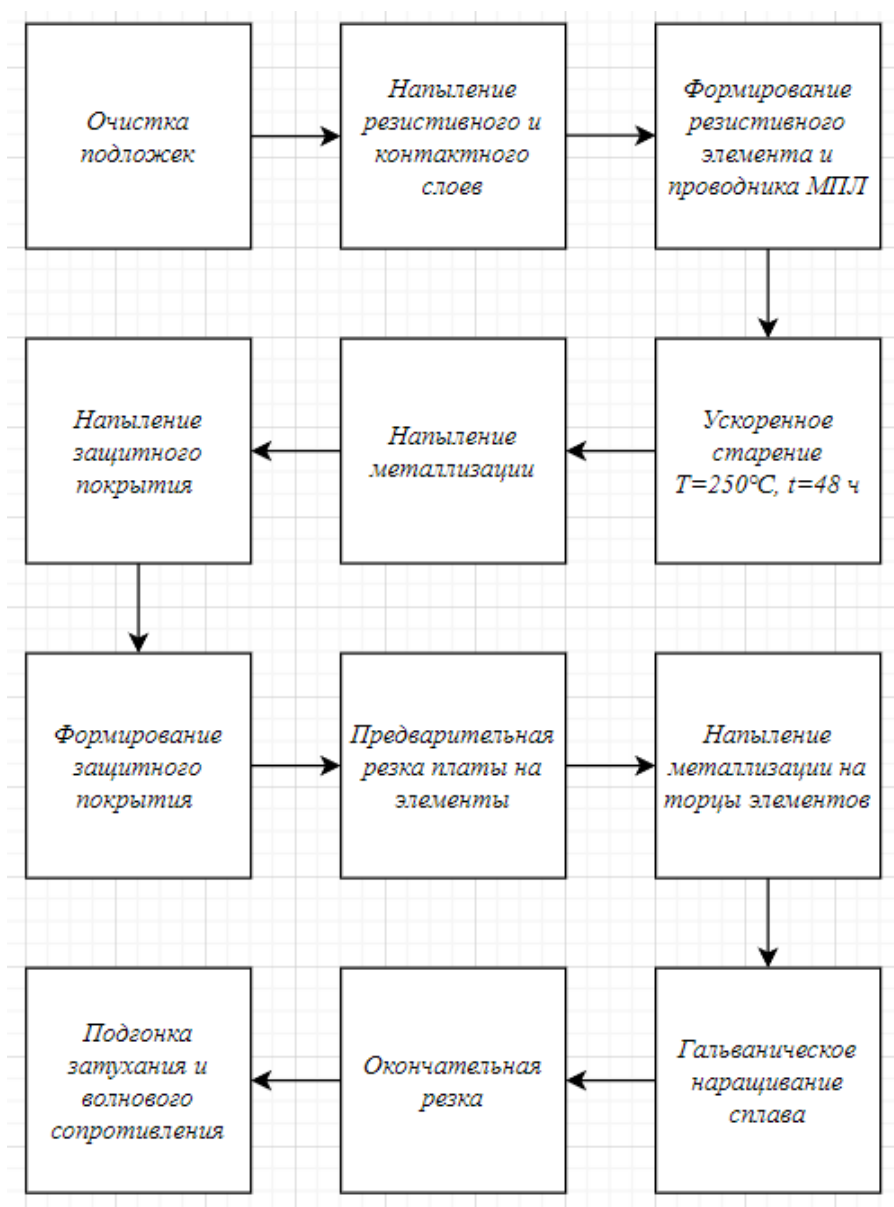


Рисунок 19 – Схема технологического процесса изготовления аттенюаторов

В процессе травления происходит стравливание SiO_2 и никеля с проводника МПЛ.

В процессе предварительной резки подложки на элементы формируется торец аттенюатора, по которому осуществляется контакт заземляющего вывода с общей металлизацией. Резка осуществляется сквозным разделением подложки на элементы с помощью отрезного алмазного круга.

Напыление металлизации на торцы элементов осуществляется аналогично напылению металлизации при температуре подложки 175°C. Затем на медные проводники методом гальванического наращивания наносится защитное покрытие из сплава *InBi* толщиной 5-7 мкм. После гальванического наращивания для удаления остатков электролита подложки промываются в проточной воде в течение 30 минут.

После гальванического наращивания производится окончательная резка и подгонка основных параметров тонкопленочных аттенюаторов на постоянном токе.

Испытания экспериментальных образцов.

Измерение амплитудно-частотных характеристик экспериментальных образцов аттенюаторов.

Измерениям подвергалась партия макетных образцов аттенюаторов (схема Б4, затухание 8 дБ) в количестве 7 штук в диапазоне частот от 6,85 до 10,13 ГГц.

Были проведены измерения следующих характеристик макетных образцов аттенюаторов:

- амплитудно-частотная характеристика;
- коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН).

Измерения проводились с помощью панорамного измерителя КСВН и ослаблений Р2-27Б. Погрешность измерения КСВН этим прибором $\pm 5\%$. Здесь К-измеряемое значение КСВН. Погрешность измерения затухания (для $A = 8$ дБ) в полосе частот $\pm 0,9$ дБ. Исследуемый тонкопленочный аттенюатор встраивался в технологический корпус для проверки полосковых фильтров. Плата аттенюатора приклеивалась к корпусу токопроводящим клеем. Входной и выходной отрезки микрополосковой линии аттенюатора припаивались с помощью перемычек к полоскам микрополосковой линии технологического

					ПГУ 2. 11.03.04. 012 ПЗ	Лист
						53
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

корпуса. После чего корпус с аттенюатором включался в схему измерения, изображенную на рисунке 20.

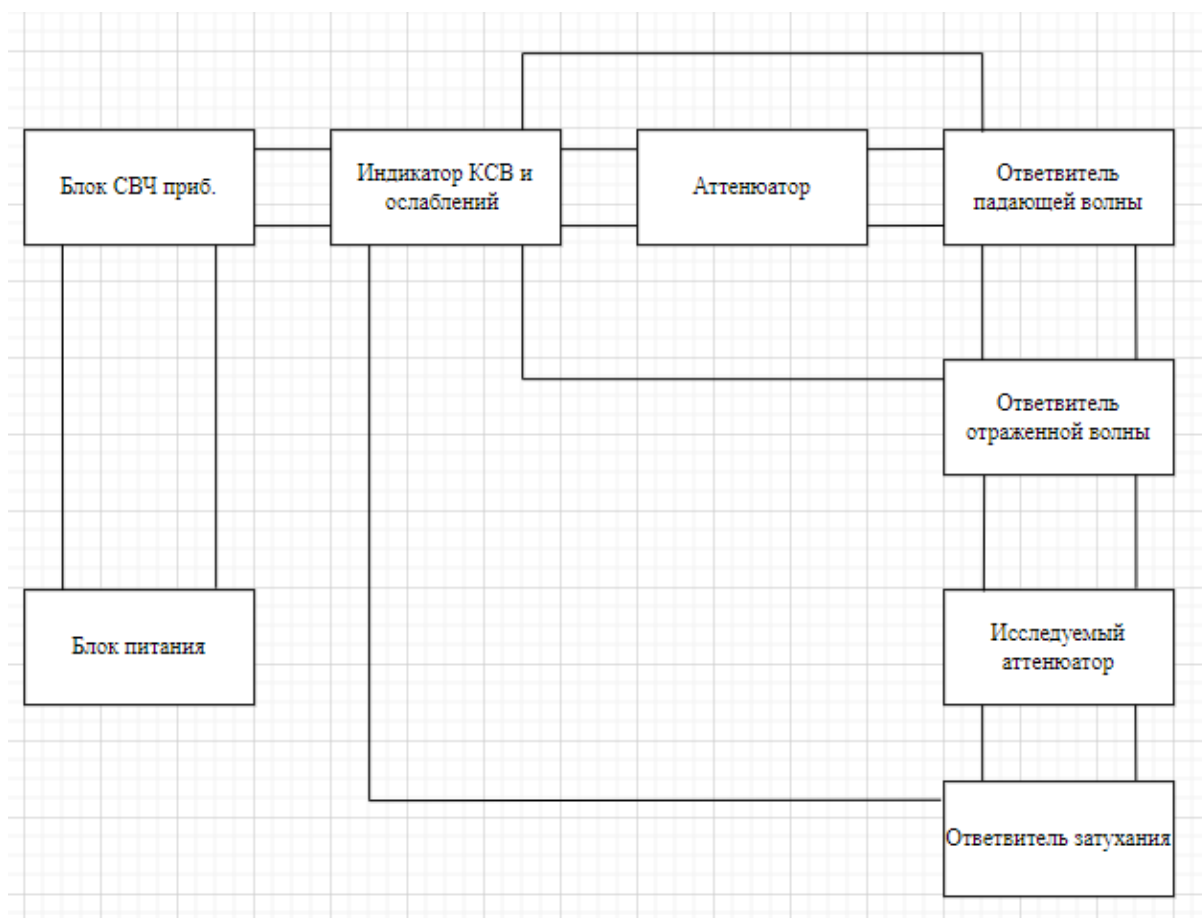


Рисунок 20 – Схема изменения КСВ и затухания

В таблице 16 представлены данные изменения затухания и КСВН исследуемых аттенюатора.

Таблица 16 – Данные изменения затухания и КСВН

Номер образца	Затухание А, дБ				КСВН	
	$f = 0$	$f = 6,85$ ГГц	$f = 10,13$ ГГц	$\delta_0, \%$	$f = 6,85$ ГГц	$f = 10,13$ ГГц
1	8,02	8,4	8,4	4,73	1,25	1,31
2	8,01	9,1	9,1	13,6	1,22	1,32
3	7,98	8,2	8,2	2,75	1,26	1,34
4	8,04	8,4	8,4	4,47	1,18	1,30
5	8,22	9,1	9,1	10,7	1,17	1,28
6	8,01	8,7	8,7	8,61	1,25	1,36

Продолжение таблицы 16

7	7,99	8,4	8,4	5,13	1,17	1,31
---	------	-----	-----	------	------	------

Из таблицы 16 видно, что величина затухания для аттенюаторов равна 8 дБ в диапазоне частот от 6,84 до 10,13 ГГц постоянна. Погрешность величины затухания в частотном диапазоне по отношению к затуханию на постоянном токе для образцов 1, 3, 4, 5, 6, 7 не превышает погрешности измерения прибора. КСВН с ростом частоты растёт, однако, не превышает значения величины 1,36, что говорит об удовлетворительном согласовании аттенюатора с СВЧ трактом.

Результаты испытаний.

Для проверки правильности выбора конструкции и технологии изготовления тонкопленочных аттенюаторов были проведены следующие виды испытаний:

- испытание при повышенной температуре +100°C;
- испытание на циклическое воздействие температуры от - 60°C до +100°C в количестве 5 циклов;

Оценка стабильности аттенюаторов производилась по величине погрешности затухания и волнового сопротивления.

Данные по теплоустойчивости аттенюаторов показала, что изменения волнового сопротивления не превышали 0,21%, а изменение величины затухания 0,29%.

После испытания на циклическое воздействие температуры видимых дефектов у аттенюаторов не наблюдалось, параметры не изменились.

4. Безопасность труда при работе на ЭВМ

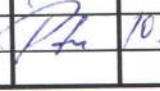
4.1 Организация рабочего места оператора ЭВМ с расчетом искусственного освещения

Компьютеры стали неотъемлемой частью нашей повседневности. Сегодня без них невозможно представить себе нормальную рабочую деятельность на предприятиях. Однако, несмотря на внешнюю невинность, компьютер является источником опасных элементов, которые могут нанести значительный ущерб здоровью человека, проводящего за компьютером много времени. В мире, где использование высокотехнологичных ЭВМ принято, приоритетом является создание рабочих условий, которые способствуют как повышению производительности, так и сохранению здоровья работника. Поэтому ключевой задачей при организации места для оператора является создание оптимальных условий для работы, гарантирующих высокую эффективность и безопасность пользователя [10].

Процесс работы с компьютером требует от операторов значительного умственного и эмоционального вложения, усиленного зрительного труда и высокой нагрузки на мышцы рук при вводе данных на клавиатуру. Важным аспектом является грамотное проектирование и расположение элементов рабочего места, что критически важно для создания комфортной позы пользователя.

Рабочее место определяется как пространство, оборудованное всем необходимым для работы инструментарием, где сотрудник или коллектив сотрудников постоянно или временно осуществляют свои профессиональные обязанности.

Эффективное размещение рабочего места включает в себя обеспечение оптимальных условий для продуктивного труда, надежности и качества

					ПГУ 2. 11.03.04. 012 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Попов			Безопасность труда при работе на ЭВМ	Лит.	Лист	Листов
Пров.		Доросинский					56	85
Н.контр.		Рыжова		10.06.21		гр. 20ПД1		
Утв.								

выполняемых задач, максимально рационального использования оборудования, экономного расходования физических и эмоциональных ресурсов сотрудника, повышения ценности и притягательности его работы, а также защиту здоровья.

Когда рабочее место организовано должным образом, производительность труда сотрудников автоматизированных информационных систем может увеличиваться на 8-20 процентов.

При конструировании рабочих мест необходимо соблюдать следующие основные условия:

- достаточное рабочее пространство для оператора, позволяющее осуществлять все необходимые движения и перемещения при эксплуатации и техническом обслуживании оборудования;
- достаточные физические, зрительные и слуховые связи между оператором и оборудованием;
- оптимальное размещение рабочих мест в помещениях для оперативной работы, а также безопасные в достаточные проходы для операторов;
- оптимальное размещение оборудования (главным образом средств отображения информации, и органов управления), благодаря чему обеспечивается удобное положение оператора при работе;
- необходимое естественное и искусственное освещение для выполнения оперативных задач, технического обслуживания;
- допустимый уровень акустического шума и вибрации, создаваемых оборудованием рабочего места или другими источниками шума и вибраций;
- простота и быстрота сборки и разборки оборудования;
- исключение ошибок при установке, замене и монтаже блоков или элементов техники, а также правильное расположение кабелей и разъемов;
- наличие необходимых конструкций и предупреждающих знаков для предотвращения возможных опасностей и указания необходимых мер предосторожности;
- поддерживающие опоры и стойки для временного хранения извлеченных блоков, приборов, инструментов и технических руководств;

- надежная индикация для случаев отключения электропитания, а также превышения допустимых пределов работы оборудования.

Проектирование рабочих мест с видеотерминалами является ключевой задачей в области эргономики в ИТ-сфере [11].

4.2 Эргономические требования к рабочему месту оператора

Цель научной дисциплины эргономики заключается в обеспечении максимального удобства и эффективности труда для людей на их рабочих местах. Эргономика утверждает, что неправильное, неудобное оборудование на рабочем месте нарушает нормальную производительность и способствует усталости.

Комплексные эргономические показатели подразделяются на четыре основные группы: гигиенические, антропометрические, физиологические и психофизиологические. Группа антропометрических показателей оценивает соответствие изделия размерам и форме человеческого тела, а также распределению веса.

Физиологические и психофизиологические показатели определяют, насколько изделие соответствует силовым, скоростным, энергетическим, зрительным, слуховым и другим психофизиологическим возможностям человека.

В сфере гигиенических показателей важны такие факторы, как освещение, микроклиматические условия и уровень шума. Под микроклиматическими условиями понимают совокупность температуры, влажности воздуха, его скорость и степень загрязненности. Эти факторы оказывают значительное воздействие на работоспособность пользователя, его благополучие и здоровье, а также на надежность функционирования компьютерной техники. Согласно эргономическим стандартам, комната, где расположен компьютер, должна создавать комфортные условия. Оптимальная влажность в помещении колеблется от 40 до 60 процентов. Некоторые склонны считать, что кондиционеры способны обеспечить необходимые условия, но это не совсем верно. Кондиционеры, будучи не самыми удобными устройствами,

могут лишь усилить чувство усталости. А домашние растения, являясь источником кислорода и способствуя поддержанию необходимой влажности, могут решить эту проблему [12].

Для обеспечения удобных условий работы оператора и надежности работы вычислительного процесса в центре обработки данных, санитарные нормы устанавливают дополнительные требования к качеству воздушной среды в помещениях. Скорость воздушного потока не должна превышать 0,5 м/с. Атмосферное давление должно находиться в пределах $1013,25 \pm 266$ ГПа. Особое внимание следует уделять источникам тепла в помещениях центров обработки данных, так как они оказывают значительное влияние на микроклимат. Основными источниками тепла являются: компьютеры и дополнительное оборудование, осветительные приборы, а также обслуживающий персонал. Вычислительная техника выделяет значительное количество тепла, что может привести к повышению температуры и снижению относительной влажности в помещениях. В помещениях с компьютерами необходимо соблюдать определенные параметры микроклимата, указанные в таблице 17.

Таблица 17 – Оптимальные нормы микроклимата для помещений с ЭВМ

Период года	Параметр микроклимата	Величина
Холодный и переходный	Температура воздуха в помещении	22 - 24°C
	Относительная влажность	40 - 60%
	Скорость движения воздуха	до 0,1 м/с
Теплый	Температура воздуха в помещении	23 - 25°C
	Относительная влажность	40 - 60%
	Скорость движения воздуха	0,1 - 0,2 м/с

Объем помещения, в котором размещены работники вычислительных центров, не должны быть меньше 19,5 м³/ч с учетом максимального числа работающих в одну смену. Нормы подачи свежего воздуха в помещении, где

расположены компьютеры, приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Нормы подачи свежего воздуха в помещения, где расположены компьютеры

Характеристика помещения	Объемный расход подаваемого в помещение свежего воздуха, м ³ /на одного человека в час
Объем до 20 м ³ на человека	Не менее 30 м ³
20...40 м ³ на человека	Не менее 20 м ³
Более 40 м ³ на человека	Естественная вентиляция
Помещения без окон	Не менее 60 м ³

Для уменьшения содержания пыли в воздухе обслуживающий персонал должен использовать специальную обувь. Концентрация пыли в помещении не должна превышать 0,5 миллиграмма на кубический метр, а концентрация газов - 2 миллиграмма на кубический метр. Запрещается курение из-за того, что частицы пепла, оседая на поверхностях компьютеров, могут вызвать сбои в их работе.

Уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 децибел, а в помещениях с оборудованием для обработки информации на компьютерах – 65 децибел. Для уменьшения шума стены и потолок должны быть облицованы материалами, поглощающими звук. Вибрация может быть снижена путем установки оборудования на специальные основания и виброизоляторы.

Правильное освещение рабочего места является одним из ключевых факторов, влияющих на производительность труда и предотвращающих травмы и профессиональные заболевания. Хорошее освещение создает комфортные условия труда, повышает работоспособность и эффективность. Освещение на рабочем месте программиста должно быть достаточным для выполнения работы без напряжения глаз.

Утомляемость глаз зависит от различных факторов:

- недостаточность освещенности;
- чрезмерная освещенность;
- неправильное направление света.

Недостаточное освещение может вызвать усталость глаз, снизить концентрацию внимания и привести к преждевременной утомляемости. Слишком яркий свет может вызвать ослепление, раздражение и дискомфорт. Неправильное направление света на рабочем месте может создавать резкие тени, блики и сбивать с толку. Все эти факторы могут повлечь за собой несчастные случаи или профессиональные заболевания, поэтому важно правильно регулировать уровень освещенности. Для создания комфортных условий при выполнении работ, связанных с нагрузкой на зрение, необходимо использовать эффективные системы освещения с правильным выбором осветительного оборудования и источников света.

Исследования показывают, что наилучшее воздействие на зрение оказывают цвета среднего спектра (желто-зелено-голубые), известные как оптимальные цвета. Пульсации светового потока сильно снижают все функции зрения. Соотношение яркости экрана и общего освещения в помещении должно быть примерно 1:10 как при естественном, так и ламповом освещении. Поэтому рекомендуется избегать установки монитора напротив или на фоне окна.

Существует три типа освещения: естественное, искусственное и комбинированное (сочетающее в себе естественное и искусственное световые источники).

Естественное освещение представляет собой свет, проникающий в помещения через оконные проемы и другие открытые элементы внешних стен. Оно изменчиво в зависимости от времени суток, сезона, местоположения и других факторов.

Искусственное освещение используется в темное время суток и в дневное время, когда недостаточно естественного света (пасмурная погода, короткий

световой день). Когда искусственное освещение дополняет недостаток естественного, это называется комбинированным освещением.

При выполнении работ, требующих высокой точности зрения (различение объектов размером 0,3...0,5 мм), коэффициент естественного освещения (КЕО) должен быть не менее 1,5%, а для работ со средней точностью (различение объектов размером 0,5...1,0 мм) - не менее 1,0%.

В центре обработки данных обычно используют одностороннее боковое естественное освещение в сочетании с системой комбинированного освещения. Аварийное освещение предназначено для случаев внезапного отключения основного освещения из-за аварии. Для искусственного освещения помещений центра обработки данных рекомендуется применять в основном люминесцентные лампы с высокой светоотдачей (до 75 лм/Вт и выше), длительным сроком службы (до 10 000 часов), низкой яркостью светящейся поверхности и спектральным составом света, близким к естественному, что обеспечивает точное воспроизведение цветов. Рекомендуемая освещенность для работы составляет 300 - 500 люксов. Местное освещение не должно создавать бликов на экране и повышать освещенность экрана выше 300 люксов [13].

4.3 Описание рабочего места оператора ЭВМ.

При организации рабочего окружения необходимо учитывать возможность использования рабочей поверхности для письменных работ, размещения телефонов и хранения необходимых материалов для оператора. Для работы с документами удобно использовать переносной пюпитр. Использование пюпитра обеспечивает удобство для визуального наблюдения и позволяет сэкономить место на рабочей поверхности. Эргономические аспекты проектирования рабочих мест для операторов ПК включают: высоту рабочей поверхности, размеры пространства для ног, размещение документов (наличие и размер подставки для документов, возможность различного расположения документов, расстояние от глаз пользователя до экрана, документов, клавиатуры и т.д.), характеристики

рабочего кресла, требования к поверхности рабочего стола, регулируемость элементов рабочего места.

Основными элементами рабочего места программиста являются стол и кресло. Основным рабочим положением является сидячее. Сидячая рабочая поза минимизирует утомление программиста. Рациональная организация рабочего пространства предполагает четкое расположение предметов, инструментов и документов. Важными характеристиками рабочего пространства являются зоны досягаемости. То, что требуется для выполнения работ чаще, расположено в зоне легкой досягаемости рабочего пространства.

Рабочая зона двигательной активности - участок рабочего пространства, предназначенный для выполнения двигательных действий человека. Максимальная зона досягаемости рук - это часть рабочей зоны двигательной активности, ограниченная дугами, образуемыми растянутыми руками при движении в плечевых суставах.

Оптимальная зона - это участок рабочей зоны двигательной активности, ограниченный дугами, образуемыми предплечьями при движении в локтевых суставах с опорой на локтевой сустав и с практически неподвижным плечом.

Рассмотрим оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- системный блок размещается в предусмотренной нише стола;
- клавиатура - в зоне г/д;
- «мышь» - в зоне в справа;
- сканер в зоне а/б (слева);
- принтер находится в зоне а/б (справа).

Согласно среднестатистическим данным и антропометрическим характеристикам человека при работе оператора в положении "сидя" рекомендуются следующие параметры рабочего пространства:

- ширина не менее 700 мм;
- глубина не менее 400 мм;

- высота рабочей поверхности стола над полом 700 - 750 мм.

Для комфортной работы необходимо выбирать столы достаточно просторные - от 1200х800 мм до 1600х800 мм. Эти размеры позволят удобно разместить всю необходимую технику. Высота рабочей поверхности стола должна соответствовать высоте кресла оператора. Идеальное расстояние между высотой стола и кресла оператора составляет 270 - 280 мм. Кресло оператора должно иметь высоту сидения от 400 до 500 мм, а высота кресла зависит от длины ног сидящего человека. Рекомендуемый угол наклона спинки кресла к поверхности сидения составляет от 100 до 115 градусов.

Обшивка кресла должна быть гигиеничной, воздухопроницаемой, гигроскопичной. Под столом надо иметь специальную подставку для ног с наклоном от 5 до 15 градусов, она станет обеспечивать комфорт и покой во время длительной работы. У стула должны быть в наличии колесики, высота сидения от пола 42 - 53 см, высота стола - 72 см. Усаживаться за компьютер следует так, чтобы угол между туловищем и бедрами, туловищем и предплечьем равнялся 90 градусам.

Расстояние между глазами и монитором должно быть не менее 45 см, притом желательно наклонить его так, чтобы не смотреть на него «глаза в глаза», следует смотреть на него несколько сверху, под углом от 5 до 35 градусов к поверхности экрана. Угол наклона клавиатуры к столу рекомендуется устанавливать в пределах 5 - 10 градусов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были выполнены следующие задачи:

- проанализировано современное производство тонкопленочных аттенюаторов, рассмотрены особенности современного производства, а так же было произведено сравнение характеристик тонкопленочных аттенюаторов, производимых лидирующими компаниями;
- были исследованы существующие методики расчета тонкопленочных аттенюаторов и были рассмотрены недостатки данных методик;
- было разработано три методики расчета тонкопленочных аттенюаторов;
- была произведена экспериментальная проверка методики расчета;
- произведена разработка конструкции и топологии аттенюатора;
- разработана методика подгонки параметров аттенюатора;
- были произведены испытания экспериментальных образцов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. https://fibertool.ru/news/obzory_oborudovaniya/chto_takoe_attenyuator/
2. Корж, И. А. Тонкопленочный ВЧ-аттенюатор на основе нитрида алюминия / И. А. Корж, А. Н. Кузнецов // Техника радиосвязи. – 2016. – № 2(29). – С. 85-91. – EDN WJIHMV.
3. Зинченко, Т. О. Метод магнетронного распыления для получения тонкопленочных структур / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : Материалы 23-й Всероссийской молодежной научной конференции, Ульяновск, 20–22 октября 2020 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2020. – С. 192-193. – EDN ACMXFK.
4. *Chemical methods of thin film deposition: Chemical vapor deposition, atomic layer deposition, and related technologies* John E. Crowell Citation: J. Vac. Sci. Technol. A 21, S88 (2003).
5. <https://vaccoat.com/blog/thin-films-lithography/>
6. Krebs, HU. et al. Pulsed Laser Deposition (PLD) - A Versatile Thin Film Technique. In: Kramer, B. (eds) *Advances in Solid State Physics. Advances in Solid State Physics*, vol 43. Springer, Berlin, Heidelberg.
7. <https://passiveplus.com/products/thin-film-products/attenuators/>
8. <https://www.thin-film.com/category/products/attenuators/thin-film-attenuators/>
9. <https://www.nanowavetech.com/products/thin-film/>
10. https://vuzlit.com/267781/bezopasnost_raboty_personalnym_kompyuterom
11. https://studwood.net/1644947/informatika/trebovaniya_rabochim_mestam_personala_razrabotchika
12. Смирнов А.Б. Эргономика: учебное пособие. 2016, 125 с.
13. <https://peak-leds.ru/blog-vliyanie-osvescheniya-na-proizvoditelnost-truda-i-bezopasnost-rabochih-mest/>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Задание на выпускную квалификационную работу

					ПГУ 2. 11.03.04. 012 ПЗ	Лист
						67
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

«Утверждаю»
Зав. кафедрой НиМЭ
Пронин И.А.
(фамилия, инициалы)
«05» июня 2024 г.

З А Д А Н И Е
на бакалаврскую работу

1. Студент(ка) гр. 20ПД1 факультета информационных технологий и электроники
Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и микроэлектроника»
Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника
Попов Георгий Витальевич
(фамилия, имя, отчество)

2. Руководитель Доросинский Антон Юрьевич
(фамилия, имя, отчество)

3. Тема бакалаврской работы Разработка методики расчета тонкопленочных аттенюаторов с распределенным сопротивлением
Тема утверждена приказом ПГУ № 396а/о от «17» 04 2024 г.

4. Техническое задание на бакалаврскую работу (вид работы: разработка, проектирование, исследование, и т.д.; назначение; основные параметры; условия функционирования и т.д.)

В работе необходимо выполнить точный аналитический расчет тонкопленочных аттенюаторов методом конформного отображения на основе распределённых резистивных структур. На базе данного расчета разработать методику анализа и синтеза тонкопленочных аттенюаторов различных конфигураций, охватывающий широкий диапазон затуханий.

<u>Параметры</u>	
<u>Затухание</u>	<u>от 0,3 до 20 дБ</u>
<u>Волновое сопротивление</u>	<u>75, 150, 600 Ом</u>
<u>Погрешность затухания</u>	<u>2 %</u>
<u>Частотный диапазон</u>	<u>от 0 до 50 МГц</u>
<u>Максимальная мощность сигнала на входе</u>	<u>0,1 Вт</u>
<u>Коэффициент стоячей волны</u>	<u>не более 1,3</u>

5. Объем и содержание основной части бакалаврской работы

5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)

1 Анализ современного состояния производства тонкопленочных аттенюаторов

1.1 Особенности современного состояния производства тонкопленочных аттенюаторов

1.2 Анализ характеристик выпускаемых тонкопленочных аттенюаторов

2 Исследование существующих методик расчета тонкопленочных аттенюаторов и их недостатков

3 Разработка методики расчета тонкопленочных аттенюаторов с распределенным

сопротивлением

3.1 Разработка методик расчета тонкопленочных аттенюаторов

3.2 Экспериментальная проверка методики расчета

3.3 Разработка конструкции аттенюатора и топологии

3.4 Разработка методики подгонки параметров аттенюаторов и испытания экспериментальных образцов

4 Организация рабочего места оператора ЭВМ с расчетом искусственного освещения

4.1 Организация рабочего места оператора ЭВМ с расчетом искусственного освещения

4.2 Эргономические требования к рабочему месту оператора

4.3 Описание рабочего места оператора ЭВМ

5.2. Иллюстративная часть (перечень и содержание чертежей и слайдов презентации)

1. Титульный лист	Слайд 1
2. Цель работы и задачи	Слайд 2
3. Актуальность работы	Слайд 3
4. Анализ современного состояния производства тонкопленочных аттенюаторов	Слайд 4
5. Сущность методики расчета тонкопленочных аттенюаторов с распределенным сопротивлением	Слайд 5
6. Схемы тонкопленочных аттенюаторов	Слайд 6
7. Решение задач анализа и синтеза на примере резистивного элемента серии А	Слайды 7 – 10
8. Экспериментальная проверка методики расчета	Слайд 11
9. Результаты решения задачи анализа – синтеза	Слайд 12
10. Рекомендации по работе на ЭВМ	Слайд 13
11. Заключение по работе	Слайд 14

6. Консультанты и содержание дополнительных разделов

6.1. _____

Консультант _____

7. Календарный график по выполнению бакалаврской работы

Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
Литературный обзор	15%	05.06.24	
Исследование существующих методик расчёта тонкоплёночных аттенюаторов и их недостатков	15%	06.06.24	
Разработка методики расчета тонкоплёночных аттенюаторов с распределенным сопротивлением	35%	07.06.24	
Безопасность труда при работе на ЭВМ	15%	08.06.24	
Иллюстративная часть	10%	08.06.24	
Оформление пояснительной записки	10%	08.06.24	

Руководитель бакалаврской работы

подпись

Доросинский А. Ю.

фамилия, инициалы

Дата выдачи задания

«05»

июня

2024 г.

Задание к исполнению принял

подпись

Попов Г.В.

фамилия, инициалы

«05»

июня

2024 г.

Бакалаврскую работу к защите допустить

Декан факультета

подпись

Кревчик В.Д.

фамилия, инициалы

«19»

июня

2024 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе
«Антиплагиат ВУЗ»

					ПГУ 2. 11.03.04. 012 ПЗ	Лист
						70
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Ректору Пензенского
государственного университета
А.Д. Гулякову
от студента 4 курса ФИТЭ
очной формы обучения
Попова Георгия Витальевича

ЗАЯВЛЕНИЕ.

Я, Попов Георгий Витальевич, студент 4 курса очной формы обучения, направления подготовки 11.03.04 «Нано- и микроэлектроника», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат» бакалаврской работы на тему **«Разработка методики расчета тонкопленочных аттенюаторов с распределенным сопротивлением»**, выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования – программ бакалавриата, программ специалитета и программ магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.

Студент  Попов Г.В.

ВКР представлена на проверку 17.06.24

Руководитель ВКР  Доросинский А.Ю.

Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной
бакалаврской работы на тему «Разработка методики расчета тонкопленочных
аттенуаторов с распределенным сопротивлением»

студента 4 курса Попова Георгия Витальевича

направления подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»,

профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»

Руководитель ВКР Доросинский Антон Юрьевич



СПРАВКА

Пензенский государственный университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Попов Георгий Витальевич
Самоцитирование
рассчитано для: Попов Георгий Витальевич
Название работы: Разработка методики расчета тонкопленочных аттенуаторов с распределенным
сопротивлением
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ 16.83%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ 81.98%
ЦИТИРОВАНИЯ 1.19%
САМОЦИТИРОВАНИЯ 0%

СОВПАДЕНИЯ 16.83%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ 81.98%
ЦИТИРОВАНИЯ 1.19%
САМОЦИТИРОВАНИЯ 0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 17.06.2024

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 17.06.2024 11:54

« 17 » 06 2024 год

подпись

Доросинский А.Ю.
фамилия, инициалы

СПРАВКА

Пензенский государственный университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Попов Георгий Витальевич
Самоцитирование
рассчитано для: Попов Георгий Витальевич
Название работы: Разработка методики расчета тонкопленочных аттенуаторов с распределенным сопротивлением
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	16.83%	СОВПАДЕНИЯ	16.83%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	81.98%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	81.98%
ЦИТИРОВАНИЯ	1.19%	ЦИТИРОВАНИЯ	1.19%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 17.06.2024

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 17.06.2024 11:54

Структура документа: Проверенные разделы: титульный лист с.1, основная часть с.2-63

Модули поиска: Цитирование; Перефразирования по Интернету (EN); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; СМИ России и СНГ; Библиография; Диссертации НББ; Перефразирования по коллекции IEEE; Переводные заимствования*; ИПС Адилет; Шаблонные фразы; Коллекция НБУ; IEEE; Кольцо вузов; Патенты СССР, РФ, СНГ; Публикации eLIBRARY; Перефразирования по Интернету; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Медицина; Переводные заимствования (RuEn); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования IEEE; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Публикации РГБ (переводы и перефразирования); СПС ГАРАНТ: нормативно-

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи:

17.06.24



Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)
Презентация ВКР

					ПГУ 2. 11.03.04. 012 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74

Министерство образования и науки Российской Федерации
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра «Нано – и микроэлектроника»

Выпускная квалификационная работа:

«Разработка методики расчета тонкопленочных аттенюаторов с
распределенным сопротивлением»

ПГУ 02. 11.03.04. 012

Автор : Попов Г.В.

Руководитель:

к. т. н. доцент Доросинский А. Ю.

Пенза 2024

Цель работы

Создание методики расчета тонкопленочного аттенюатора с распределенным сопротивлением для различных геометрических форм и исполнений

Задачи:

1. Построение математических моделей тонкопленочных аттенюаторов
2. Разработка методики расчета на основе предложенных алгоритмов
3. Экспериментальная проверка методики
4. Разработка конструкции и топологии аттенюатора
5. Разработка методики подгонки параметров аттенюаторов и испытания экспериментальных образцов

Актуальность

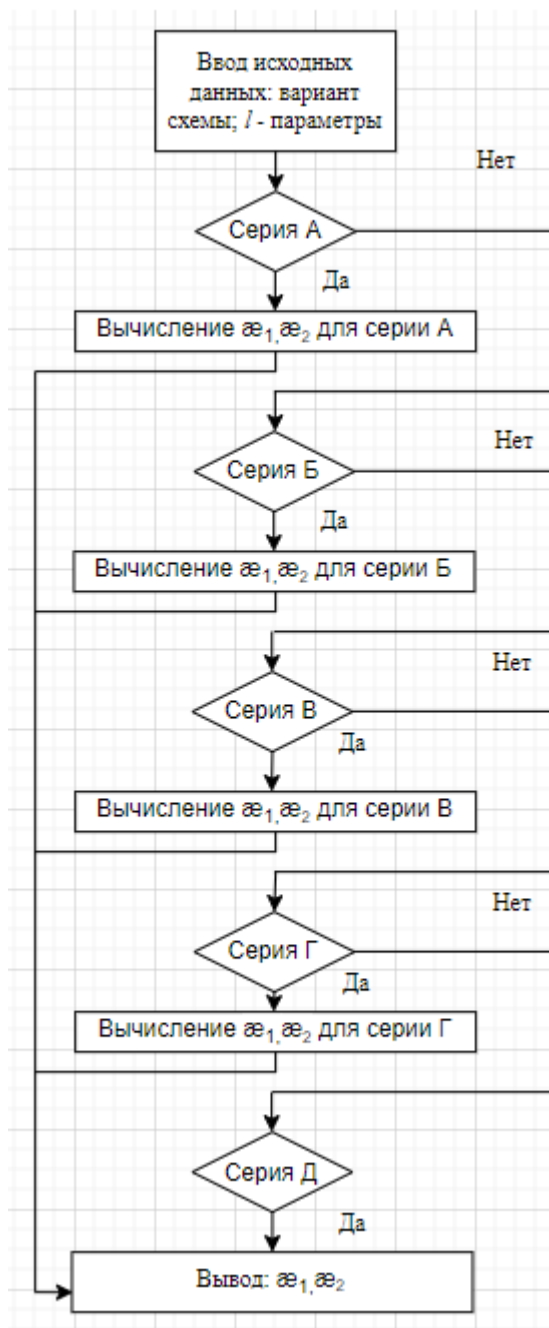
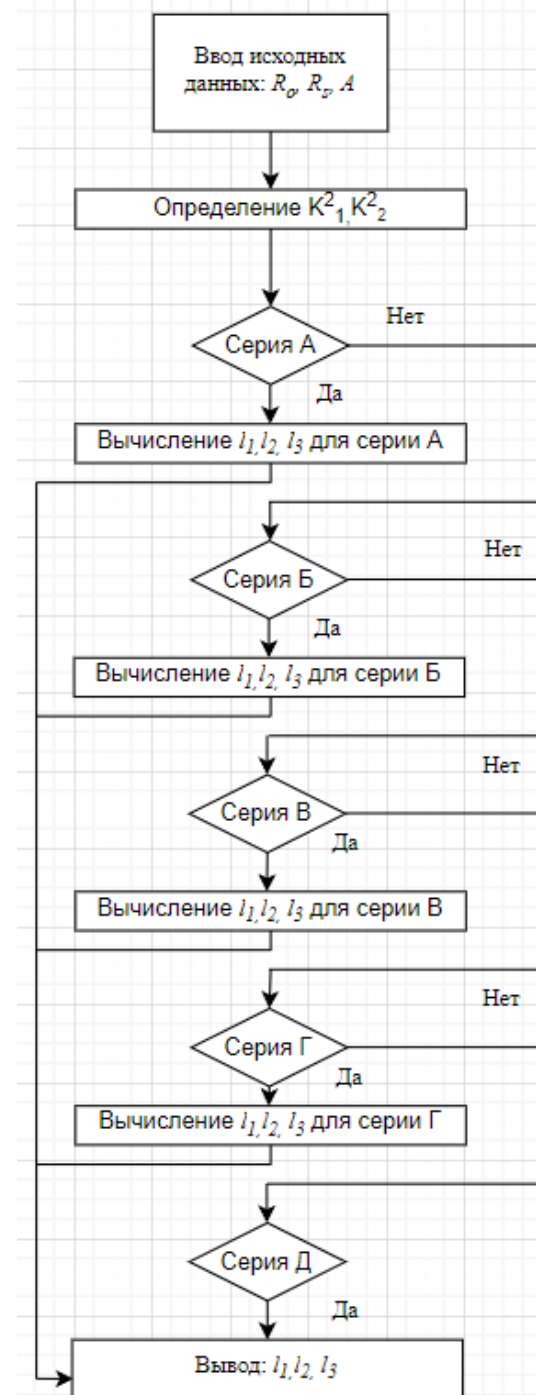
Разработка методик расчета играет важнейшую роль в производстве, так как правильно составленная методика позволяет более точно определить оптимальное соотношение между ослаблением и минимальным искажением передаваемого сигнала.

Анализ современного состояния производства тонкопленочных аттенюаторов

Современное состояние тонкопленочных аттенюаторов
можно классифицировать по таким особенностям, как:

- материалы, использующиеся при производстве;
- технологии производства;
- интеграции с другими электронными устройствами.

Блок схемы решения задачи анализа и синтеза



Основные формулы,
необходимые для решения
задачи анализа и синтеза

$$A = 20 \lg \left(\frac{\sqrt{Z_{\text{к.з.}} * Z_{\text{х.х.}}} + 0,5(Z_{\text{к.з.}} + Z_{\text{х.х.}})}{0,5(Z_{\text{х.х.}} - Z_{\text{к.з.}})} \right),$$

$$R_0 = \sqrt{Z_{\text{к.з.}} * Z_{\text{х.х.}}},$$

$$Z_{\text{к.з.}} = R_s * \mathfrak{x}_2,$$

$$Z_{\text{х.х.}} = R_s * \mathfrak{x}_1,$$

$$\mathfrak{x}_1 = \frac{K'_1}{K_1},$$

$$\mathfrak{x}_2 = \frac{K'_2}{K_2}.$$

Схемы тонкопленочных аттенюаторов

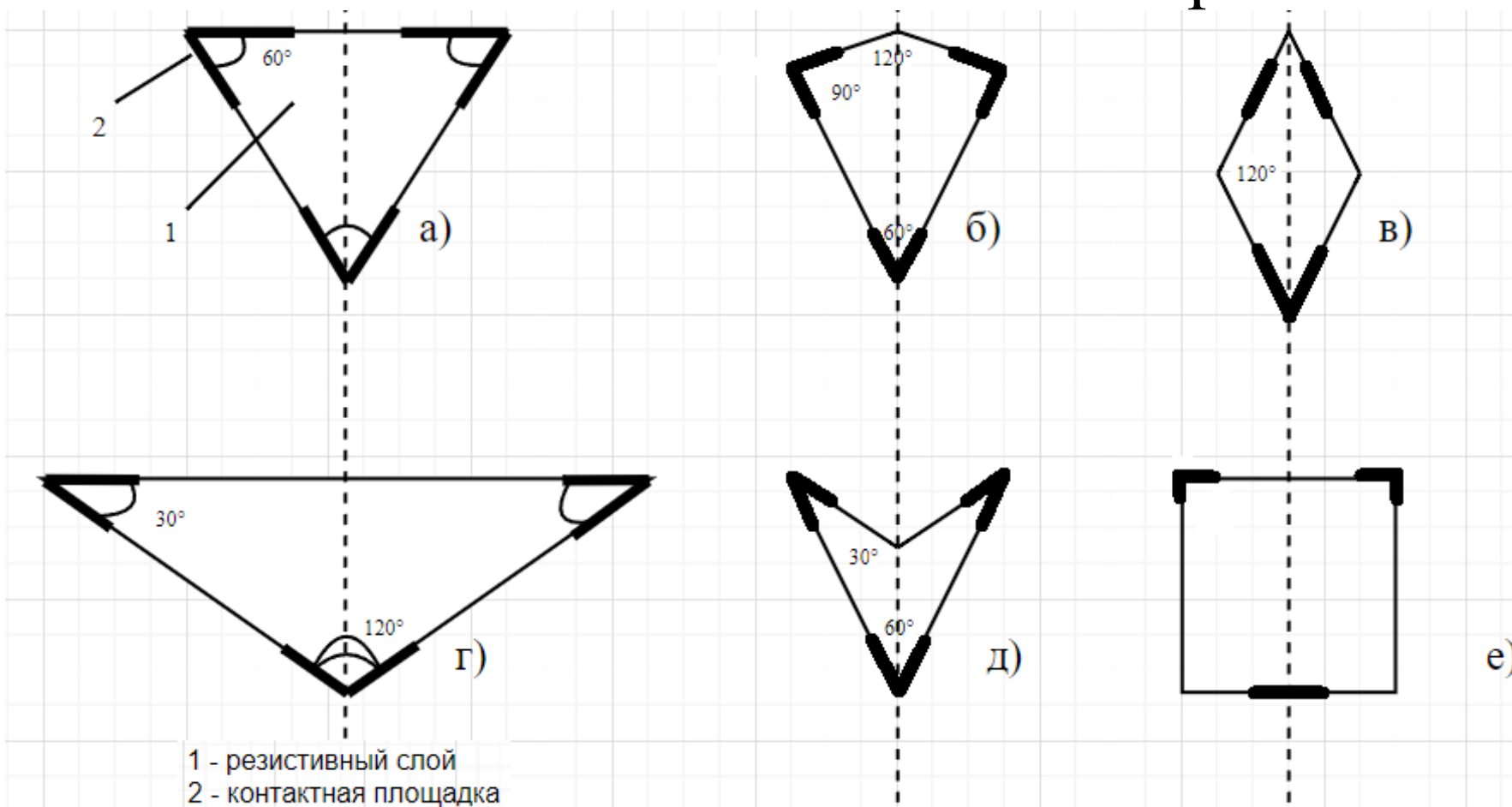
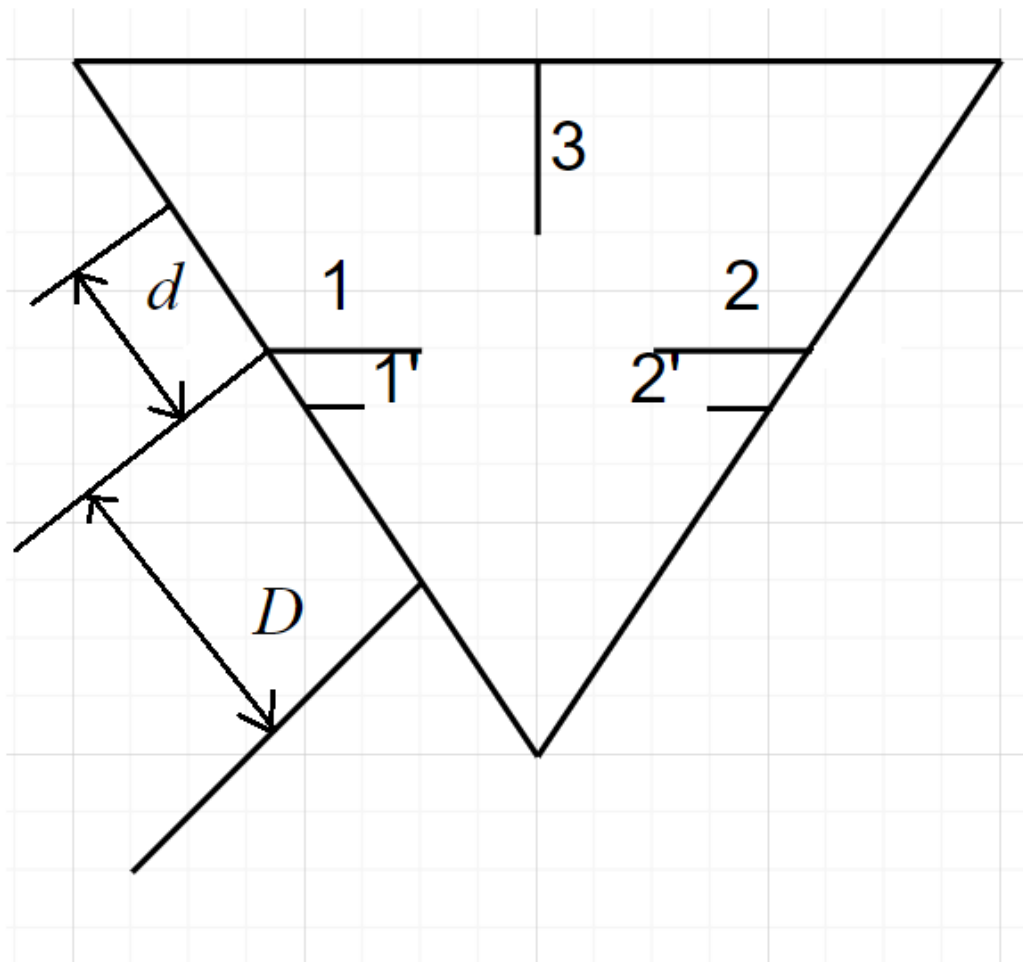


Схема тонкопленочного аттенюатора с резами ПОДГОНКИ



Рекомендации по работе на ЭВМ

При работе на ЭВМ при соблюдении следующих рекомендаций, производительность может увеличиваться на 8-20 процентов:

- достаточное рабочее пространство для оператора, позволяющее осуществлять все необходимые движения и перемещения при эксплуатации и техническом обслуживании оборудования;
- достаточные физические, зрительные и слуховые связи между оператором и оборудованием;
- необходимое естественное и искусственное освещение для выполнения оперативных задач, технического обслуживания;
- допустимый уровень акустического шума и вибрации, создаваемых оборудованием рабочего места или другими источниками шума и вибраций.

Заключение по работе

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были выполнены следующие задачи:

- проанализировано современное производство тонкопленочных аттенюаторов, рассмотрены особенности современного производства, а так же было произведено сравнение характеристик тонкопленочных аттенюаторов, производимых лидирующими компаниями;
- были исследованы существующие методики расчета тонкопленочных аттенюаторов и были рассмотрены недостатки данных методик;
- было разработано три методики расчета тонкопленочных аттенюаторов;
- была произведена экспериментальная проверка методики расчета;
- произведена разработка конструкции и топологии аттенюатора;
- разработана методика подгонки параметров аттенюатора;
- были произведены испытания экспериментальных образцов.

Спасибо за внимание.