

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Конструирование и производство радиоаппаратуры»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

_____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой КиПР

_____ Войтович Н.И.

_____ 2020 г.

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ГЕНЕРАТОРА ГЕТЕРОДИННОГО
СИГНАЛА ДЛЯ ЧЕТЫРЕХПОРТОВОГО ВАЦ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ 11.04.03.2020.601.00 ПЗ

Руководитель работы

_____ Думчев И.А.

_____ 2020 г.

Работу выполнил
студент гр. КЭ-224

_____ Щербинин В.В.

_____ 2020 г.

Нормоконтролер

_____ Юнгайтис Е.М.

_____ 2020 г.

Челябинск 2020 г.

АННОТАЦИЯ

Щербинин В.В. Разработка модуля генератора гетеродинного сигнала для четырехпортового ВАЦ. – Челябинск: ЮУрГУ, ВШЭКН; 2020, 73 с., 33 ил., библиогр. список – 28 наим., 17 прил., 6 листов чертежей ф. А1.

В выпускной квалификационной работе проведена разработка модуля генератора гетеродинного сигнала для четырехпортового векторного анализатора цепей (ВАЦ). Выпускная квалификационная работа состоит из введения, библиографического обзора, четырех разделов, библиографического списка, заключения и приложений. В разделе «Анализ технического задания» приводятся общие сведения и принцип работы ВАЦ, сравнительные характеристики аналогичных зарубежных приборов, а также представлены основные технические требования, предъявляемые к разработке. В схемотехническом разделе произведен выбор элементной базы и осуществлен расчет блоков структурной схемы. В конструкторском разделе представлены этапы разработки печатного узла, расчет волнового сопротивления и согласование линий передач. В разделе «Методика по настройке модуля» описаны основные этапы по отладке готовых модулей. В заключении приведены основные выводы, полученные в ходе разработки модуля генератора гетеродинного сигнала для четырехпортового ВАЦ.

					11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	<i>Щербинин</i>				<i>Разработка модуля генератора гетеродинного сигнала для четырехпортового ВАЦ</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Сазонов</i>						7	73
<i>Реценз.</i>						<i>ЮУрГУ</i>		
<i>Н.контр.</i>	<i>Юнгайтис</i>					<i>Кафедра КуПР</i>		
<i>Утверд.</i>	<i>Войтович</i>							

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	10
ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	11
2 БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ ОБЗОР	12
3 АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ.....	19
3.1 Общие сведения и принцип работы ВАЦ	19
3.2 Сравнение прибора с зарубежными аналогами	20
3.3 Краткие сведения о модуле.....	25
3.4 Технические требования	26
4 СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	27
4.1 Активные элементы цепи.....	27
4.1.1 Опорный генератор	27
4.1.2 Цифровой вычислительный синтезатор.....	30
4.1.3 Основной генератор	31
4.1.4 Смеситель частот.....	32
4.1.5 Умножители и делители частоты	33
4.2 Пассивные элементы цепи	33
4.2.1 Фильтры	33
4.2.2 Атенюаторы и корректоры.....	35
4.2.3 Коммутаторы	37
4.3 Расчет уровней мощности блоков структурной схемы.....	38
5 КОНСТРУКТОРСКИЙ РАЗДЕЛ.....	41
5.1 Разработка конструкции печатного узла.....	41
5.1.2 Выбор типоразмера печатной платы	42
5.1.3 Структура слоев печатной платы	42
5.1.4 Выбор материала печатной платы	44
5.1.5 Выбор финишного покрытия.....	46
5.1.6 Компоновка ИМС на печатной плате.....	47

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

5.1.7 Трассировка печатной платы	48
5.1.8 Типы глухих и переходных отверстий.....	50
5.2 Волновое сопротивление сигнальных линий печатной платы	51
5.2.1 Расчет волнового сопротивления	51
5.2.2 Согласование линии передач.....	55
5.3 Электромагнитная совместимость	59
5.3.1 Проектирование шин питания и заземления	60
5.3.2 Экранирование печатного узла.....	62
6 МЕТОДИКА ПО НАСТРОЙКЕ МОДУЛЯ	64
6.1 Подготовка печатной платы	64
6.2 Настройка опорного генератора.	64
6.3 Настройка выходного уровня мощности	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	69
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	71

ВВЕДЕНИЕ

Одна из наиболее распространенных измерительных задач в радиотехнике включает в себя анализ цепей. Векторный анализатор цепей - это инструмент, предназначенный для выполнения данной работы с высокой точностью и эффективностью. Цепи, которые можно анализировать с помощью векторных анализаторов, варьируются от простых устройств, таких как фильтры и усилители, до сложных модулей, используемых в телекоммуникациях.

Векторный анализатор является сложным и широко применяемым оборудованием в области радиотехники. Он используется при исследованиях и разработках, а также для проведения различных испытаний на производстве.

В сочетании с одной или несколькими антеннами он становится радиолокационной системой. Системы этого типа могут использоваться для обнаружения невидимых дефектов материала, не прибегая к рентгеновской технологии.

Аналогичная система может использоваться для проверки возможности радиолокаторов, которые служат основой для надежной системы управления полетом. Для этой цели немаловажное значение имеет эффективная площадь рассеяния (ЭПР) самолета.

Для измерений с менее строгими техническими требованиями, такими как, например, измерение уровня заполнения какого-либо объема без физического контакта или определение толщины слоев лака, обычно используются более простые подходы.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АРУ – автоматическая регулировка усиления.

АРМ – автоматическая регулировка мощности.

БП – блок питания.

ВАЦ – векторный анализатор цепей.

ВАХ – вольтамперная характеристика.

ГУН – генератор, управляемый напряжением.

МПП – многослойная печатная плата.

ПАС – прямой аналоговый синтез.

ПП – печатная плата.

ПУ – печатный узел.

САПР – система автоматизированного проектирования.

СВЧ – сверхвысокие частоты.

ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты.

ФВЧ – фильтр верхних частот.

ФНЧ – фильтр нижних частот.

ФЧД – фазочастотный детектор.

ЦВС – цифровой вычислительный синтез.

ЦСП – цифровой сигнальный процессор.

ЭМС – электромагнитная совместимость.

ЭПР – эффективная площадь рассеяния.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>11</i>

2 БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ ОБЗОР

В этой книге [1] рассмотрены принцип работы, функционал и методика использования высококачественных и высокоточных векторных анализаторов цепей. Данные векторные анализаторы работают в широком диапазоне частот, в отличие от простых скалярных анализаторов, поскольку измерения связаны не только с амплитудой (мощностью) измеряемого радиосигнала, но и с фазой. Данные факт существенно расширяет объем задач и позволяет повысить точность измерений с помощью специальной цифровой обработки данных.

В данном руководстве [2] анализ линейных, нелинейных и дискретных цепей под воздействием гармонических периодических и негармонических, апериодических и дискретных колебаний рассматривается с единой точки зрения. Он также содержит материалы, относящиеся к аналоговым и дискретным устройствам, которые являются частью оборудования для радиосвязи и проводной связи: аналоговые и дискретные электрические фильтры, корректоры, генераторы, нелинейные преобразователи.

В этой книге [3] обсуждаются все вопросы проектирования печатных плат для высокоскоростных цифровых устройств, а также описывается современная и перспективная элементная основа с учетом электрофизических параметров печатных плат и линий передачи. Рассмотрены методы, используемые для анализа помех в цифровых узлах. Кроме того, уделено внимание проектированию шин питания и заземления как отдельных участков, так и плат в целом. А также вопросы, касающиеся трассировки дифференциальных пар, которые на данный момент широко используются в печатных платах. С точки зрения электромагнитной совместимости рассматриваются излучение печатных плат и их чувствительность к электромагнитным помехам. В качестве обобщения, приводятся некоторые аспекты САПР печатного устройств, а также их влияние на конечную технологичность печатной платы.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>12</i>

В этой работе [4] были рассмотрены методы проектирования прототипов фильтров. Особенностью этой технологии является то, что в процессе проектирования в качестве входных данных используются требования по величине подавления помех. Классификация рассматриваемых фильтров зависит от аппроксимации амплитудно-частотных характеристик.

Эта книга [5] направлена на изучение переходных процессов, возникающих в соединениях, и анализ взаимодействия между этими процессами и элементами схемы. Алгоритм и программа были разработаны с использованием пакета математического программного обеспечения для расчета помех отражения, вызванных влиянием различных электрофизических параметров линии связи и ее нагрузки.

В данной книге [6] описаны СВЧ устройства, в состав которых входят длинные линии, рассмотрение которых строится на элементах с сосредоточенными параметрами при помощи эквивалентных схем. В дополнение к основному материалу, в книге приводится ряд программных средств, позволяющих осуществлять анализ сложных цепей СВЧ.

В данном пособии [7] автор описывает способы борьбы с шумом, возникающим в электронных цепях. Также, приведены примеры практического применения схем для минимизации нежелательных помех, создаваемых различными источниками. Исследованы практические принципы формирования слоев многослойных печатных плат с точки зрения электромагнитных излучений создаваемых сигнальными линиями.

В статье [8] представлены актуальные способы формирования высокочастотных сигналов. Рассмотрены различные вави цифровых синтезаторов. Приведен практический пример формирования прямого цифрового синтеза с системой фазовой автоподстройки частоты.

Также в статье описана одна из проблем, связанных с генерацией колебаний требуемой частоты, при помощи использования взаимозаменяемого кварцевого генератора. Рассмотрен метод получения сетки частот путем

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>13</i>

колебаний кварцевого генератора, вследствие преобразования колебаний опорного генератора.

Системы, построенные на основе ФАПЧ, имеют ряд преимуществ, позволяющих формировать сетку частот в широком диапазоне, где в качестве опорной частоты используется частоты опорного генератора, которая в свою очередь определяет шаг сетки частот.

Синтез колебаний ЦВС реализуется в результате вычисления фазового кода и значений выборок функций косинуса и синуса для преобразования в аналоговую форму. Полоса частот ЦВС зависит от частоты цифрового модуля, а шаг, в свою очередь, от емкости драйвера.

В пособии [9] рассмотрены базовые принципы, которые стоит учитывать при разработке высокочастотных устройств. Здесь приводятся схемы приемопередающей аппаратуры построенной на ЦВС, описан принцип действия этих схем и элементов входящих в них.

Особое внимание уделено функциональным узлам, таким как: фильтры, усилители, смесители, генератора и другие. Так же, отдельным главам посвящены вопросы, связанные с синфазными и противофазными ответвителями, согласующими трансформаторами и другие.

Приводятся результаты анализа пассивных устройств и приведены рекомендации по их проектированию. Рассмотрены режимы работы различных усилителей, с описанием характеристик, позволяющих произвести качественную оценку их параметров в широком диапазоне частот

Книга [10] рассматривает линии передачи СВЧ диапазона и элементы с сосредоточенными параметрами, а также резонаторы, цепи согласования импедансов, ответвители, фильтры, активные и пассивные, твердотельные устройства, генераторы, усилители, детекторы и смесители, схемы управления СВЧ, умножители и делители частоты. В пособии приводится описание S – параметров матрицы рассеяния, передаточные функции: Бесселя, Баттерворта, Чебышева, Гаусса и др.

Синтезаторы частот развивались с течением времени, и в этой книге [11] представлен обзор устоявшихся и недавно разработанных методов. Книга охватывает все аспекты проектирования, включая практические реализации схем. В первой главе представлены прямые аналоговые, прямые цифровые и иные методы сравниваются с точки зрения производительности, сложности схемы и учета стоимости. Вторая глава продолжается обзором ключевых строительных блоков с точки зрения их практического использования в синтезаторах СВЧ частот. Основное внимание уделяется тому, как нежелательные сигналы (пики и фазовый шум) генерируются, а затем распространяются через компоненты синтезатора. Обсуждаются генераторы, умножители частоты, делители, смесители, фазовые детекторы и сложные интегральные схемы. Третья глава посвящена конструкционным принципам, используемым для построения синтезаторов СВЧ частот. Она начинается с краткого обзора теории линий передачи, типов линий, характеристического импеданса, потерь, разрывов и эффектов связи, СВЧ материалов, а также распределенных и сосредоточенных элементов.

Простая однопетлевая схема синтезатора ФАПЧ, проанализированная в четвертой главе, демонстрирует различные ограничения и компромиссы. В главе 5 рассматриваются различные варианты дизайна для достижения различных целей производительности, таких как быстрая скорость переключения, низкий фазовый шум и точное разрешение. Проектные компромиссы анализируются и дополняются обзором дробных N, DDS, частотного смещения, многоконтурных и других схем. В пятой главе также освещаются такие важные аспекты проектирования, как начальное получение частоты, контроль блокировки, выбор генератора, фильтрация гармоник и расширение частоты. Основная функция любого синтезатора частот - доставлять стабильный и чистый сигнал. Однако внутри любого синтезатора имеется множество схем, которые могут нести несколько функций и использоваться повторно для расширения функциональности без значительного

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>15</i>

увеличения стоимости. В качестве заключения, приводятся заметки о расширенных параметрах конструкции, которые касаются синхронизации частоты, сложного управления частотой и мощностью, а также различных функций модуляции.

В статье [12] освещены вопросы, связанные с оптимизацией фазовых шумов в спектроанализаторах. Проанализированы характеристики фазового шума на примере современных генераторов и анализаторов спектра. Также, уделено внимание получению характеристик различных источников шума при использовании анализатора SK4-BELAN 240/280 в частотном диапазоне от 3,3 до 24 ГГц.

Теоретическая и практическая сложность проектирования различных электронных устройств, оборудования и систем, характеризующихся высокими скоростями обработки и передачи данных, была подробно рассмотрена в книге [13]. В высокоскоростных цифровых цепях, которые образуют аппаратную основу современных высокоскоростных электронных устройств, короткие фронты обрабатываемых и передаваемых сигналов могут вызывать множество неблагоприятных последствий. В большинстве случаев эти эффекты не проявляются в устройствах с «низкой» и «средней» производительностью, но по мере увеличения скорости обработки и скорости передачи данных они фактически становятся преградой в современных системах передачи информации и телекоммуникаций. Данное пособие рассматривает основные теоретические и практические аспекты проектирования высокоскоростного электронного оборудования от уровня системы высокого уровня до уровня базовых элементов и плат.

Синтезатор частоты является ключевым структурным элементом практически любой микроволновой системы тестирования и измерения, связи или мониторинга. Синтезаторы бывают разных форм - от крошечного чипа ФАПЧ до настольного генератора сигналов.

В этой статье [14] представлен обзор технологий и методов проектирования СВЧ-синтезаторов с особым акцентом на «блочные» модули синтезатора. Статья начинается с общих требований и спецификаций, после чего следует обзор основных архитектур синтезаторов. Прямые аналоговые, прямые цифровые и косвенные методы сравниваются с точки зрения производительности, сложности схемы и влияния на стоимость. В качестве примера рассматривается петля ФАПЧ для демонстрации наиболее важных аспектов процесса проектирования от общей блок-схемы и выбора компонентов до схемы, компоновки платы, сборки и тестирования. Компромиссные решения в дизайне дополнительно анализируются и дополняются подробным обзором самых передовых решений для синтезаторов, включая цифровой вычислительный синтезатор и многопетелевые схемы.

В книге [15] рассмотрены принципы построения высокочастотных усилителей. Приведены способы согласования усилителей с использованием номограммы Вольперта – Смита а также при помощи несимметричной полосковой линии передачи. Описаны параметры транзисторов и рассмотрены методы расчета с использованием элементов матрицы рассеяния.

Учебное пособие [16] знакомит с теорией линий передач (полосковых, микрополосковых, щелевых, копланарных, и дифференциальных пар), а также приводится расчет элементов тракта линии передачи, устройств на ферритах, мостовых устройств и проектирования сверхвысокочастотных устройств. Рассмотрены микрополосковые антенные решетки с элементами резонаторного типа, вибраторные антенны и другие системы излучения, реализуемые на печатной плате.

В этой серии статей [17] подробно рассматриваются проблемы ЕМС, а также материалы, посвященные отдельным компонентам ведущих мировых производителей.

Фильтры ЭМП являются первым препятствием для электромагнитных помех. Хотя существует множество предложений, проблема их выбора не так

проста, как может показаться на первый взгляд. В разделе «Фильтр ЭМП» описаны методы, способствующие разработке таких устройств.

Статьи в разделе «Пассивные компоненты» посвящены компонентам, которые ограничивают скачки напряжения и защищают входной каскад от электростатического разряда. Их выбор очень важен для нормальной работы системы.

Экранирование и правильная топология печатной платы необходимы для соответствия требованиям стандарта ЭМС. В двух разделах об испытаниях, описываются статьи о том, как тестировать отдельные компоненты и устройства, предназначенные для отладки конечной системы.

В разделе «Разработка и проектирование» кратко описаны материалы, которые дают представление о выборе компонентов, устойчивых к внешнему шуму, а также способы реализации преобразователей с низким уровнем шума.

В данной книге [18] рассматривается совокупность правил и методов проектирования электронного оборудования, обладающего высокой помехоустойчивостью и электромагнитной совместимостью. Также, здесь приведены практические советы по методам обнаружения и устранения помех, проводного и печатного монтажа компонентов и цепей, правилам заземления, экранированию и фильтрации нежелательных помех. В пособии приводится множество иллюстрации с практическими расчетами.

3 АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

3.1 Общие сведения и принцип работы ВАЦ

Векторные анализаторы цепей предназначены для измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения (элементов матрицы рассеяния) многополосников. Он находит широкое применение в различных областях, в том числе, при проверке, настройке и разработке различных радиотехнических устройств, как в промышленности, так и в исследовательских лабораториях.

Анализаторы включают в себя измерительный блок, и оснастку, к которой относятся измерительные кабели и переходы, а также средства калибровки. Измерительный блок обеспечивает формирование тестового сигнала в широком диапазоне частот и мощностей с последующим измерением падающего (прошедшего через исследуемое устройство) и отражённого от его входов сигналов, с преобразованием частоты и последующей цифровой обработкой.

Принцип работы анализатора основан на измерении отношения амплитуды и фазы сигнала источника, по отношению к сигналу, прошедшему или отраженному от исследуемого устройства. Итоговый расчет и отображение результатов измерений S-параметров выполняет ЭВМ. Связь с ЭВМ осуществляется через USB-интерфейс.

Конструктивно, в одном корпусе анализатора цепей находятся: генераторы испытательного и гетеродинного сигналов, аттенюаторы регулировки мощности, направленные ответвители, многоканальный приёмник, блок управления на базе цифрового сигнального процессора (ЦСП) и блок питания (БП). Структурная схема для четырехпортового ВАЦ приведена на рисунке 3.1.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>19</i>

Рисунок 3.1 – Структурная схема четырехпортового ВАЦ

3.2 Сравнение прибора с зарубежными аналогами

На сегодняшний день, на рынке представлены несколько компаний, занимающихся разработкой и производством векторных анализаторов цепей. Среди них можно выделить компании, занимающие лидирующие позиции в данной отрасли – Keysight Technologies и Rohde & Schwarz.

В целях сравнения характеристик приборов Rohde & Schwarz можно рассмотреть серию R&S®ZNA, в которой представлены 2-х и 4-х портовые анализаторы, имеющие частотный диапазон от 10 МГц до 43,5 ГГц. Данная серия приборов представляет собой готовое устройство с дисплеем и органами управления, размещенными непосредственно в самом корпусе прибора. Также, в модели R&S®ZNA43 может быть предусмотрена опция для прямого доступа к каналам.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		20

R&S®ZNA оснащен четырьмя внутренними фазокогерентными источниками, позволяющими осуществлять независимое управление частотой сигнала на каждом порту, а также выполнять фазовые измерения на смесителях. Прибор имеет два внутренних гетеродина (LO), многоканальную архитектуру приемной части, импульсные модуляторы и обеспечивает широкие возможности запуска и синхронизации.

Таблица 3.1 – Краткая спецификация приборов Rohde&Schwarz серии R&S®ZNA

Количество измерительных портов	R&S®ZNA26	2 или 4
	R&S®ZNA43	
Диапазон частот	R&S®ZNA26	от 10 МГц до 26,5 ГГц
	R&S®ZNA43	от 10 МГц до 43,5 ГГц
Полоса пропускания ПЧ		от 1 Гц до 1,5 МГц
Динамический диапазон	R&S®ZNA26 и R&S®ZNA43	
	от 10 МГц до 30 МГц	>86 дБ
	от 30 МГц до 100 МГц	>103 дБ
	от 100 МГц до 500 МГц	>117 дБ
	от 500 МГц до 1 ГГц	>126 дБ
	от 1 ГГц до 16 ГГц	>129 дБ
	от 16 ГГц до 20 ГГц	>127 дБ
	от 20 ГГц до 30 ГГц	>123 дБ
	от 30 ГГц до 40 ГГц	>117 дБ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ

Лист

21

Количество измерительных портов	R&S®ZNA26	2 или 4
	R&S®ZNA43	
Пределы допускаемой относительной погрешности установки частоты выходного сигнала	—	$\pm 1 \times 10^6$
Время измерений, (201 точка, 10 ГГц частота, полоса 200 МГц, фильтр ПЧ 1МГц.		< 2,5 мс

Для сравнения, серия приборов ENA от Keysight Technologies способна предложить приборы, в составе которых находятся от 2 до 4 измерительных портов, рабочим диапазоном частот от 9 кГц до 18 ГГц, и широким динамическим диапазоном, вплоть до 135 дБ.

Таблица 3.2 – Краткая спецификация приборов Keysight Technologies серии ENA

Модель	Диапазон частот	Динамический диапазон (дБ) на частотах 3/20 ГГц при полосе ПЧ 10 Гц.	Максимальная мощность (дБм) на частотах 3/20 ГГц.	Уровень собственного шума (дБм) на частотах 3/20 ГГц при полосе ПЧ 10 Гц.	Время измерений, (тип.) (201 точка, 1 цикл свипир., коррекция выкл.)
E5080A	от 9 кГц до 4.5 ГГц от 9 кГц	135	+15	-130	2 мс (полоса ПЧ 500 кГц)

Модель	Диапазон частот	Динамический диапазон (дБ) на частотах 3/20 ГГц при полосе ПЧ 10 Гц.	Максимальная мощность (дБм) на частотах 3/20 ГГц.	Уровень собственного шума (дБм) на частотах 3/20 ГГц при полосе ПЧ 10 Гц.	Время измерений, (тип.) (201 точка, 1 цикл свипир., коррекция выкл.)
	до 6.5 ГГц				
	от 9 кГц до 9ГГц				
E5072A	от 30 кГц до 4.5 ГГц	123	+16	-117	3 мс (полоса ПЧ 500 кГц)
	от 30 кГц до 8.5 ГГц				
E5071C	от 100 кГц до 8.5 ГГц	123	-123	+10	3 мс (полоса ПЧ 500 кГц)
E5063A	от 100 кГц до 8.5 ГГц	117	-127	0	9 мс (полоса ПЧ 300 кГц)
	от 100 кГц до 18 ГГц				

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ

Лист

23

Таблица 3.3 – Краткая характеристика приборов PLANAR серии COBALT

Модель	Диапазон частот	Динамический диапазон при полосе пропускания фильтра ПЧ 1 Гц, дБ свыше 1 МГц	Максимальная мощность (дБм)	Уровень собственного шума (дБм) свыше 1 МГц.	Время измерений, (тип.) (1601 точка, 1 цикл свипир., частота ПЧ 1 МГц.)
2 портовые приборы					
C1205	от 100 кГц до 4.8 ГГц	<153	+10	-143	33,3
C1207	от 100 кГц до 7 ГГц	<158	+15	-143	33,3
C1209	от 100 кГц до 9 ГГц	<158	+15	-143	33,3
C1214	от 100 кГц до 14 ГГц	<143	+10	-133	40,8
C1220	от 100 кГц до 9 ГГц	<143	+10	-133	33,3
4 портовые приборы					
C1409	от 100 кГц до 9 ГГц	<158	+15	-143	33,3
C1420	от 100 кГц до 9 ГГц	+10	+10	-133	40,8

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ

Лист

24

3.3 Краткие сведения о модуле

Модуль генератора гетеродинного сигнала предназначен для формирования колебаний вспомогательной частоты, необходимых для работы приемника, в результате смещения с частотой испытательного сигнала для получения промежуточной частоты (ПЧ).

СЧ

Рисунок 3.2 – Структурная схема генератора

Для формирования частоты генератора гетеродинного сигнала используется опорный генератор с фазовой автоподстройкой по частоте от внутреннего либо внешнего опорного генератора частотой 10 МГц, который конструктивно расположен на плате. Генератор гетеродинного сигнала включает в себя широкополосный генератор, управляемый напряжением (ГУН). Управление частотой ГУНа осуществляется с помощью схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которая построена на базе микросхемы целочисленного синтезатора частот (Integer-N). Для получения мелкого шага установки частоты между опорным генератором и синтезатором установлен цифровой вычислительный синтезатор (ЦВС). Получение диапазона рабочих частот осуществляется посредством умножения или деления базового диапазона ГУНа с последующей фильтрацией побочных составляющих спектра выходного сигнала (рисунок 3.2).

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		25

Управление уровнем мощности выходного сигнала осуществляется при помощи программируемого аттенюатора, который входит в систему автоматической регулировки мощности.

3.4 Технические требования

1. 1 Диапазон рабочих частот: от 15,55 до 9015,45 МГц.
1. 2 Высокочастотные разъемы: тип разъемов – SMA; количество выходов – 4; импеданс – 50 Ом.
1. 3 Минимальный шаг установки частоты: 1МГц.
1. 4 Уровень выходной мощности: от 0 дБм до 4 дБм.
1. 5 Относительный уровень гармонических составляющих спектра выходного сигнала в диапазоне частот, не более: минус 25 дБн.
1. 6 Относительный уровень негармонических составляющих спектра выходного сигнала, не более: 30 дБн.
1. 7 Уровень фазового шума в диапазоне частот 2400 – 4800 при отстройке на 15 МГц: минус 130 дБн/Гц.
1. 8 Величина развязки между каналами: не менее 80 дБ.
1. 9 Частота опорного генератора: 1360 МГц.
1. 10 Уровень мощности выходного сигнала опорного генератора на нагрузке 50 Ω : 0 ± 2 дБм.
1. 11 Интерфейс управления: LVDS.
1. 12 Напряжения питания: +3,8 В; +6,5 В; +30 В.
1. 13 Потребляемая мощность: не более 7 Вт.
1. 14 Время непрерывной работы, не менее: 16 ч.
1. 15 Температура окружающего воздуха: от плюс 5 °С до плюс 40 °С.
1. 16 Относительная влажность воздуха при температуре 25 °С, не более: 90 %.
1. 17 Атмосферное давление: от 70 кПа до 106,7 кПа.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		26

4 СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

При разработке радиоэлектронного устройства проектирование начинается с создания структурной схемы. Благодаря схеме, представленной в упрощённом виде, удается на ранней стадии выявить ошибки при проектировании и охарактеризовать требования, предъявляемые к тем или иным узлам устройства, а также задать требования к входным и выходным сигналам, проанализировать возможную реализацию.

Структурная схема позволяет рассмотреть принцип работы устройства. В ней показаны основные функциональные части (блоки), их назначение и взаимосвязи между ними.

Схемы, приведенные ниже, состоят из условных графических обозначений (УГО), где функциональная составляющая каждого блока отражена в действующем стандарте [23].

4.1 Активные элементы цепи

4.1.1 Опорный генератор

Опорный генератор (рисунок 4.1) построен на базе целочисленного синтезатора ADF4106. Данный синтезатор может применяться для радиочастотных приемников, передатчиков, в анализаторах сигнала, для реализации функции гетеродина с целью повышения или понижения частоты. Контур фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) представляет собой систему обратной связи, объединяющую управляемый напряжением генератор (ГУН) и фазовый компаратор, соединенные таким образом, что генератор поддерживает постоянный фазовый угол относительно опорного сигнала. Синтезатор частоты позволяет генерировать множество выходных частот, кратных частоте опорного сигнала. Импульсы на выходе ФЧД фильтруются и интегрируются

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		27

для генерации напряжения. Это напряжение позволяет управлять внешним ГУН для увеличения или уменьшения выходной частоты.

Синтезатор частот работает в режиме ФАПЧ, где фазочастотный детектор ФЧД сравнивает частоту опорного генератора с частотой обратной связи с выхода ГУН.

Частота масштабируется с использованием счетчиков. В используемом синтезаторе ADF4106 используется внешний фильтр и ГУН. Входной опорный (R) счетчик уменьшает опорную входную частоту до частоты $F_{PFD} = F_{ref}/R$; а счетчик обратной связи N уменьшает выходную частоту для сравнения с масштабированной опорной частотой в ФЧД. В равновесном состоянии эти две частоты равны, а выходная частота равна $N \times F_{PFD}$. Счетчик обратной связи представляет собой предделитель со счетчиками A и B ($N = BP + A$, где P-значение предделителя).

ГУН преобразует подаваемое напряжение настройки в выходную частоту. Чувствительность может резко изменяться во всем частотном диапазоне ГУН, что в свою очередь может привести к нестабильности цикла. В общем случае, чем ниже чувствительность настройки ГУН, тем лучше уровень фазового шума. Фазовый шум синтезатора будет преобладать при меньших смещениях от несущей частоты. Чем выше смещение от несущей частоты, тем больше преобладает шум от ГУН.

Самым распространенным типом петлевых фильтров является интегратор третьего порядка. Полоса пропускания петлевого фильтра должна составлять 1/10 от частоты ФЧД (расстояние между каналами). Увеличение пропускной способности контура приведет к сокращению времени блокировки, но пропускная способность фильтра никогда не должна быть больше ФЧД/5, чтобы избежать значительного увеличения риска нестабильности. Полоса пропускания фильтра контура может быть удвоена путем удвоения либо частоты ФЧД, либо тока подкачки заряда. Увеличение или уменьшение программируемого тока накачки заряда является одним из способов

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		28

компенсации изменений в полосе пропускания контура, вызванные изменением напряжения.

Петлевой фильтр: существует множество различных типов петлевых фильтров. Однако наиболее распространенным является интегратор третьего порядка. В общем случае полоса пропускания петлевого фильтра должна составлять $1/10$ частоты PFD (расстояние между каналами). Увеличение пропускной способности контура приведет к сокращению времени блокировки, но пропускная способность фильтра никогда не должна быть больше $PFD/5$, чтобы избежать значительного увеличения риска нестабильности.

ADF4106 представляет собой целочисленный синтезатор с диапазоном рабочих частот вплоть до 6 ГГц, и имеет низкий уровень фазового шума порядка - 223 дБн/Гц. Он включает в себя малошумящий цифровой фазочастотный детектор, программируемый делитель опорной частоты, прецизионную схему накачки заряда программируемые счетчики А и В, а также предделитель с переключаемым модулем (P/P+1). Счетчики А (6-битный) и В (13-битный) совместно с предварительным делителем с переключаемым модулем (P/P+1) образуют делитель обратной связи N ($N = BP+A$). Также, 14-битный счетчик опорной частоты (счетчик R) позволяет управлять частотой сигнала REFIN на входе фазочастотного детектора.

В качестве опорного генератора используется источник с низким уровнем шума, работающий на частоте 10 МГц. ГУН – это диэлектрический резонатор, тактовая частота которого зависит от управляемого напряжения. В качестве буфера используется каскад на BFR520T, который обеспечивает требуемый сигнал обратной связи. Входной буфер также реализован на BFR520T.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		29

Рисунок 4.1 – Структурная схема опорного генератора

4.1.2 Цифровой вычислительный синтезатор

Прямой цифровой синтез – это метод создания аналогового сигнала, обычно синусоидального, путем генерирования изменяющегося во времени сигнала в цифровой форме и последующего выполнения цифро-аналогового преобразования. Поскольку операции в устройстве цифрового вычислительного синтезатора (ЦВС) в основном цифровые, то это является следствием быстрого переключения между выходными частотами, точное разрешение по частоте и работа в широком спектре частот. ЦВС программируются с помощью высокоскоростного последовательного периферийного интерфейса (SPI), и для генерации простых синусоидальных колебаний, для которых требуется только наличие опорной частоты.

Основными компонентами ЦВС являются: фазовый аккумулятор, средство преобразования фазы в амплитуду (цифровой код) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Эти блоки представлены на рисунке 4.2.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>30</i>

Рисунок 4.2 – Структурная схема ЦВС

ЦВС генерирует синусоидальный сигнал с заданной частотой. Частота зависит от двух переменных: частоты опорного генератора и двоичного кода, запрограммированного в регистре частот.

Для получения мелкого шага по частоте используется ЦВС, реализованный на AD9540. В качестве опорной частоты используется частота опорного генератора, равная 1360 МГц. Точность выходной частоты определяется частотой опорного генератора.

4.1.3 Основной генератор

Основной генератор построен на микросхеме синтезатора ADF4159 с дробным коэффициентом деления и функцией модуляции, который обладает полосой 13 ГГц и способен генерировать как высокочастотные, так и низкочастотные колебания. Он имеет 25-разрядный фиксированный модуль, обеспечивающий разрешение установки частоты менее 1 Гц.

ADF4159 включает в себя малошумящий цифровой фазочастотный детектор, программируемый делитель опорной частоты и прецизионную схему накачки заряда. Программируемый дробный коэффициент деления N реализуется при помощи дробного интерполятора на основе Σ - Δ модулятора, а

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>31</i>

его значение определяется содержимым регистров INT и FRAC. Структурная схема основного генератора, изображенная на рисунке 4.3, включает в себя синтезатор ADF4159, широкополосный активный контурный фильтр и ГУН. Активный фильтр ФАПЧ построен на операционном усилителе ОРА211, который работает при напряжении питания +30 В, что позволяет управлять частотой ГУНа в широком диапазоне. Полосу пропускания фильтра можно менять путем переключения вентиля ADG779. Буферный каскад реализован на BFR520T.

Рисунок 4.3 – Структурная схема основного генератора

4.1.4 Смеситель частот

Для получения сетки высокостабильных частот (рисунок 4,4) в диапазоне от 15,55 МГц до 600 МГц, используется преобразователь частоты, реализованный на микросхеме LTC5560. Он формирует на выходе спектр комбинационных частот. Для формирования сигнала гетеродина используется синтезатор ADF4106 с ФАПЧ, с ГУН KSV – 5V1790, который имеет диапазон перестройки от 1700 МГц до 1880 МГц. В качестве опорной частоты синтезатора используется частота опорного генератора, деленная на четыре.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		32

Рисунок 4.4 – Структурная схема переносчика частоты

4.1.5 Умножители и делители частоты

Для увеличения или уменьшения колебаний гармонического сигнала применяются умножители и делители частот. Главным достоинством их применения является возможность переноса по частоте без использования сигнала вспомогательной частоты. Преобразование осуществляется на элементе с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), в качестве которого, например, может выступать диод. Нелинейное устройство изменяет форму колебаний на входе, благодаря чему в спектре выходного сигнала появляются частоты, кратные частоте входного сигнала. Основными критериями при выборе нелинейных устройств являются: вносимые потери, уровень фазового шума, уровень гармонических искажений и величина изоляции.

4.2 Пассивные элементы цепи

4.2.1 Фильтры

Для подавления нежелательных помех и выделения полезной составляющей спектра гармонического сигнала используется ряд фильтров,

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		33

среди которых фильтры на элементах с сосредоточенными параметрами и фильтры на резонаторах (пьезокерамика).

Вследствие квантования и нелинейности ЦАП в системах прямого цифрового синтеза существует большое количество побочных сигналов, распределенных в полосе Найквиста. Для фильтрации паразитных составляющих сигнала применяется полосовой фильтр. На рисунке 4.5 приведена полоса пропускания полосового фильтра.

Рисунок 4.5 – График полосы пропускания полосового фильтра

Поскольку сигнал, формируемый опорным генератором, является широкополосным, то для получения необходимой полосы частот требуется выделить полезный сигнал путем фильтрации нежелательных частот. Весь частотный диапазон фильтров условно можно разделить на полосу пропускания и полосу заграждения, между которыми располагаются переходные области. В полосе пропускания затухание фильтра минимально, а в полосе заграждения – максимально. Для перекрытия требуемого диапазона частот применяется несколько фильтров с разной полосой пропускания. Разделение диапазонов

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		34

частот происходит за счет применения фильтров нижних частот (ФНЧ) и фильтров верхних частот (ФВЧ). К основным требованиям, предъявляемым к фильтрам, можно отнести малые вносимые потери и высокую крутизну частотной характеристики, обеспечивающие очень высокую чувствительность и избирательность.

4.2.2 Атенюаторы и корректоры

Фиксированные аттенюаторы представляют собой четырехполюсники, служащие для изменения уровня подводимой мощности в тракте. Также аттенюаторы широко применяются для изоляции (развязки) и согласования узлов и элементов тракта в широкой полосе частот. К основным характеристикам аттенюатора можно отнести коэффициент стоячей волны (КСВ) по входу и выходу и ослабление, вносимое аттенюатором в тракт, которое можно записать следующим образом:

$$A = 10 \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}} \quad (1)$$

Обычно аттенюаторы выполняют в виде Т – образных или П – образных схем (рисунок 4.6):

Рисунок 4.6 – Типовые схемы резистивных аттенюаторов

В теории, аттенюаторы, построенные на элементах с сосредоточенными параметрами, обеспечивают постоянный уровень ослабления A и КСВ во всех

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		35

диапазонах СВЧ. На практике, данное суждение верно лишь в случае, когда размеры реальных аттенюаторов меньше $(0,1-0,3)\cdot\lambda$, где λ – длина волны, соответствующая верхней граничной частоте рабочей полосы. Эмпирически подтверждено, что аттенюаторы, выполненные по П – образной схеме, имеют лучше характеристики по сравнению с Т – образными.

Корректирующие цепи (или корректоры) относятся к категории цепей, которые находят свое применение в радиооборудовании для уменьшения искажения сигналов, проходящих через них, либо в устройствах автоматического регулирования, следящих системах и т. п. для обеспечения необходимых статических и динамических характеристик.

Цепи коррекции могут быть реализованы путем применения различных схемотехнических решений посредством комбинации пассивных элементов, таких как катушки индуктивности, конденсаторы и резисторы.

Искажения, возникающие при прохождении сложных сигналов, можно разделить на два вида: частотные и фазовые. Первые характерны в случаях неравномерного усиления и ослабления различных колебаний частот, иными словами – амплитудно-частотной характеристикой цепи, вторые же – благодаря опережению или отставанию по фазе колебаний различных частот, то есть неравномерностью группового времени распространения сигнала.

Амплитудный корректор представляет собой четырехполюсник, который включается каскадно с цепью. Его главная цель состоит в том, чтобы дополнить амплитудно-частотную характеристику цепи или ее рабочее затухание до величины, постоянной во всем рабочем диапазоне частот.

Пассивные амплитудные корректоры, как правило, строят по типу симметричного Т – перекрытого четырехполюсника (рисунок 4.7).

Рисунок 4.7 – Схема амплитудного корректора

Сопротивления Z_1 и Z_2 выбираются обратными, таким образом, чтобы:

$$Z_1 \cdot Z_2 = R_0 \quad (2)$$

Если вход четырехполюсника нагрузить на сопротивление R_0 , то его входное сопротивление будет равно сопротивлению нагрузки.

Передаточная функция будет иметь следующий вид:

$$H_k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_0}{Z_1 + R_0} \quad (3)$$

Таким образом, ослабление, вносимое корректором, можно записать следующим образом:

$$A_k = 20 \lg \frac{1}{H_k} \quad (4)$$

На практике широко используются звенья амплитудных корректоров первого и второго порядка. Корректоры первого порядка содержат в себе по одному реактивному элементу в Z_1 и Z_2 , а корректоры второго порядка по два реактивных элемента.

4.2.3 Коммутаторы

Коммутаторы, применяемые в приемо-передающих трактах СВЧ, используются для амплитудных манипуляций высокочастотных колебаний. Схемы коммутации могут быть построены на диодах, а также КМОП

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		37

транзисторах. Диодные коммутаторы отличает способность к высокому запирающему высокократотного сигнала в неактивном канале, что в свою очередь препятствует попаданию сигнала в тракт, а также малыми потерями на проход, высоким быстродействием и возможностью коммутации сигналов, имеющих высокий уровень мощности.

В состав коммутатора входят цепи управления построенным напряжением, в составе которых содержатся индуктивные элементы, целью которых является подавление высокократотного сигнала в цепи управления, а также блокировочные конденсаторы для предотвращения попадания постоянного напряжения в высокократотный сигнальный тракт.

4.3 Расчет уровней мощности блоков структурной схемы

Проведем предварительный расчет уровней и разработаем структурную схему модуля генератора гетеродинного сигнала.

Генератор

В соответствии с техническим заданием выходная мощность всех четырех каналов должна быть равной 0...3 дБм, частотный диапазон от 15,55...9000 МГц.

Основной генератор выполнен на основе синтезатора ADF4159 и внешнего ГУНа, диапазон частот которого лежит в диапазоне 2400...4800 МГц. Уровень выходной мощности генератора равен 5 дБм.

Для получения диапазона частот 1200...2400 МГц используется делитель НМС432 с коэффициентом деления $\div 2$. Допустимый уровень входной мощности, для частот от 4000...8000 МГц не должен превышать -3 дБм.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		38

Поскольку уровень входной мощности с учетом потерь на ключе равен $P_{in} = 4$ дБм, для ослабления входного уровня мощности используется аттенюатор.

Таблица 4.1

UPG2163	Атт.	НМС432	Атт	TQR369181	UPG2163	LFCN2250+
-1 дБ	-9 дБ	- 2 дБ	-7 дБ	+15 дБ	-1 дБ	-1 дБ

Для получения требуемого уровня мощности для заданного диапазона частот, используется усилитель TQR369181. Поскольку данный усилитель имеет точку децибельной компрессии на уровне 14 дБм, для получения заданных характеристик необходимо ослабить уровень входного сигнала.

Таким же образом формируется диапазон частот 600 ... 1200 МГц.

Таблица 4.2

UPG2163	Атт.	НМС432	Атт.	TQR369181	LFCN1000+	UPG2163
- 1 дБ	- 9 дБ	- 2 дБ	-8 дБ	+ 15 дБ	-1 дБ	-1 дБ

Таблица 4.3

UPG2163	Корр.	RFSA2033	TQR369181	UPG2163	LFCN*	UPG2163
- 1 дБ	- 3 дБ	- 9 дБ	+ 15 дБ	- 1 дБ	-1 дБ	- 1 дБ

Для диапазона частот 15.55...600 МГц:

Таблица 4.4

UPG21 63	UPG21 63	Атт .	LTC551 0	BFR520 Т	Атт .	LFL216 00	UPG21 63	LFCN44 00
- 1 дБ	- 1 дБ	-9 дБ	+ 2 дБ	+ 10 дБ	- 5 дБ	-1 дБ	- 1 дБ	- 1 дБ

Таблица 4.5

UPG2163	Атт.	TQP369185	HMC189	GSA606
- 1 дБ	- 6 дБ	+19 дБ	-15 дБ	+ 12 дБ
SKY13298	HFCN*	Атт.	LFCN*	SKY13298
- 1 дБ	- 1 дБ	- 4 дБ	- 1 дБ	- 1 дБ

Предусилитель выполнен на усилителе GSA606.

Выходной каскад

Для обеспечения требуемого уровня выходной мощности и развязки между каналами принято решение использовать 4 каскада усиления построенных на усилителях LEE – 19+.

Таблица 4.6

Частота, ГГц	Коэф. передачи, дБ	Изоляция, дБ	P1dB, дБм
0.1	12.1	17.25	13.98
1	12	17.27	13.81
2	12.1	17.16	13.90
4	12	16.77	13.52
8	10.6	15.58	14.13

Для коррекции АЧХ каскадов используется аттенюатор – корректор с величиной ослабления 11,5 дБ. Таким образом, суммарная величина изоляции будет равна:

$$I_{\Sigma} = 17,5 + 11,5 + 17,5 + 11,5 + 17,5 + 11,5 + 17,5 = 104,5 \text{ дБ}$$

5 КОНСТРУКТОРСКИЙ РАЗДЕЛ

5.1 Разработка конструкции печатного узла

Под конструкцией печатного узла (ПУ) понимается печатная плата (ПП) с установленными на ней компонентами. Печатная плата, в свою очередь, предназначена для электрического соединения элементов схемы между собой. В данной работе будет рассмотрена многослойная печатная плата (МПП), состоящая из нескольких слоев проводящего рисунка, которые разделены между собой изоляционными слоями.

Проектирование печатного узла осуществляется в несколько этапов.

1. Анализ технического задания на изделие или печатный узел, которое является основанием для разработки.
2. Выбор конструкции печатного узла.
3. Выбор компоновки структуры печатного узла, выбор типа и способов монтажа электрорадиоэлементов (ЭРЭ).
4. Выбор типа конструкции печатной платы.
5. Выбор способа изготовления и материала печатной платы.
6. Размещение ЭРЭ.
7. Трассировка печатной платы.
8. Составление конструкторской документации (КД) на изделие.

Реализация пунктов 6-8 осуществляется при помощи систем автоматизированного проектирования (САПР). В данной работе в качестве САПР для разработки ПП применена система P-CAD 2002. Выбор данной системы в качестве среды разработки обусловлен тем, что данный программный продукт применяется на предприятии-изготовителе.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>41</i>

5.1.2 Выбор типоразмера печатной платы

На начальном этапе разработки печатной платы требуется решить ряд вопросов, связанных с выбором типоразмера печатной платы, так как это является опорной точкой для последующих этапов проектирования ПУ.

Габаритные размеры печатного узла в данном случае выбраны, с одной стороны, исходя из конструкции шасси; с другой стороны – исходя из себестоимости изготовления печатной платы, поскольку непосредственное увеличение габаритов приводит в итоге к большей стоимости изделия.

Отклонение от прямоугольной формы и создание пазов во внешнем контуре приводит к повышенным производственным расходам и неполному использованию исходных материалов. Размеры ПП должны соответствовать ГОСТ 10317-72, в котором рекомендовано 74 типа плат с соотношением сторон от 1 к 1 до 2 к 1. Максимальная ширина не должна превышать 500 мм. Рекомендуемая толщина в мм: 0,8; 1; 1,5; 2; 2,5; 3.

5.1.3 Структура слоев печатной платы

Выбор структуры слоев многослойной печатной платы (МПП) имеет крайне важное значение при проектировании печатного узла и проводится с целью обеспечения целостности сигналов и электромагнитной совместимости (ЭМС). Существует несколько требований, которым должна отвечать структура печатной платы. Во-первых, величина волнового сопротивления всех линий передачи, входящих в состав платы, должна соответствовать величине 50 Ом. Данный тип линий, как правило, реализуются на полосковых и микрополосковых линиях. Во-вторых, полное сопротивление для шин питания и заземления должно быть минимальным. Для реализации этих требований применяется структура печатной платы, состоящая из нескольких слоев. При

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		42

этом главным критерием при проектировании является минимизация помех в шинах питания и заземления и обеспечение требуемых характеристик линии передач.

В данной работе реализована многослойная структура, состоящая из шести металлизированных слоев, которые имеют в своем составе сигнальный слой, потенциальный слой, и слой заземления. Помимо металлизированных слоев, в конструкции печатной платы применяются неметаллизированные слои, выполняющих роль диэлектрика. Структура слоев разрабатываемой печатной платы приведена на рисунке 5.1.

Рисунок 5.1 – Структура слоев печатной платы

Выбор данной структуры печатной платы обусловлен требуемыми электрическими параметрами, которые реализованы в сигнально-потенциальных слоях.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		43

5.1.4 Выбор материала печатной платы

Для производства печатной платы необходимо определиться с выбором материалов, среди которых: материал диэлектрика, материал для печатных проводников и тип защитного покрытия.

В качестве исходного материала выступает диэлектрик, ламинированный с одной или двух сторон медной фольгой. В роли диэлектрика могут выступать листы на основе стеклотканей и эпоксидных смол. Одним из наиболее популярных является FR4. Также применяются листы на основе керамики типа Rogers, которые находят применение при проектировании плат СВЧ и др.

В данной работе в качестве материалы печатной платы был выбран FR4, поскольку он обладает хорошими диэлектрическими свойствами, а также стабильностью характеристик и размеров. FR4 имеет температуру стеклования T_g порядка 140°C . Данная величина характеризует температуру, при которой происходит переход базового материала в «мягкое» состояние. Еще одним важным параметром является диэлектрическая постоянная D_k , которая определяет скорость распространения электрического сигнала в диэлектрике. Значение D_k для FR4 обычно лежит в пределах от 4,2 до 4,9. Величину потерь в диэлектрике определяет такой параметр, как тангенс угла диэлектрических потерь D_f . Он характеризует потери энергии, рассеиваемой в изоляционном материале под воздействием электрического поля. Чем меньше значение данной величины, тем меньше потери сигнала. Данный параметр можно определить, используя следующее соотношение:

$$L = k \left(\frac{f}{c} \right) \cdot D_f \cdot \sqrt{D_k} \quad (5)$$

Структура слоев разрабатываемой печатной платы формируется следующим образом. Внутренние слои платы сформированы из двустороннего ламинированного медью стеклотекстолита (FR4), который носит название «ядро» (англ. «core»). В роли связующего материала выступает диэлектрик, пропитанный термоактивной смолой, который носит название «препрег». В

результате прессования формируется структура многослойной печатной платы (рисунок 5.2).

Рисунок 5.2 – Финишная структура слоев печатной платы

При проектировании многослойной печатной платы выбор толщины во многом определяет ее характеристики. Среди таких характеристик очень важными являются величина волнового сопротивления проводников, размещенных на печатной плате, величина изоляции, а также структура глухих и скрытых отверстий. В качестве проводящего материала используют медную фольгу. Типовые толщины фольги: 12, 18, 35, 70 и 105 мкм. Толщина ламината может составлять от 0,2 мм до 3 мм в зависимости от требуемых параметров печатной платы. Типовыми значениями для двустороннего FR4 являются: 200 мкм, 250 мкм, 360 мкм, 510 мкм. Структура слоев разрабатываемой печатной платы приведена на рисунке 5.3.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	Лист
						45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Рисунок 5.3 – Структура слоев печатной платы, полученная в Altium Disigner

5.1.5 Выбор финишного покрытия

Финишное покрытие – это покрытие из металла, сплава металлов или органики, которое наносится на контактные площадки и другие открытые элементы печатного рисунка для обеспечения паяемости после хранения в различных условиях. Большинство финишных покрытий растворяется в паяльной пасте или печи в процессе пайки и образуется паяное соединение между медью и припоем. Исключением служит иммерсионное золочение, в котором припой растворяет тонкий слой золота и формирует соединение с подслоем никеля.

В данной разработке выбран вариант финишного покрытия иммерсионным золотом, поскольку он имеет ряд важных преимуществ, среди

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		46

которых множественный нагрев, плоская поверхность, которая улучшает качество монтажа, хорошая паяемость, использование компонентов с малым шагом.

5.1.6 Компоновка ИМС на печатной плате

Под компоновкой печатной платы подразумевают процесс, при котором выбирается оптимальный вариант размещения интегральных микросхем и других компонентов. Главным требованием является обеспечение максимально возможной плотности расположения компонентов. В данной работе компоновка печатного узла выполнена при помощи системы автоматизированного проектирования P-CAD. Печатную плату с установленными компонентами принято называть печатным узлом.

Поскольку в данной разработке значительная часть отводится элементам, имеющим планарные выводы, то целесообразно размещать их с обеих сторон платы для формирования оптимального варианты компоновки и уменьшения габаритов печатной платы. Также для минимизации длины соединительных трасс компоненты, размещаемые на печатной плате, группируются между собой по типу принадлежности к той или иной электрической подсистеме. К таким подсистемам можно отнести: систему питания, интерфейсную, аналоговую и цифровую. Проектирование каждой из них требует особого внимания.

Выбор шага масштабируемой сетки напрямую влияет на плотность компоновки. С учетом производственных возможностей размещения компонентов на печатной плате был выбран шаг сетки величиной 0,05 мм. При этом минимальное расстояние между компонентами составило не менее 0,3 мм. От способов размещения компонентов на печатной плате зависят такие факторы, как габаритные размеры, помехоустойчивость и другие. Наличие на плате нескольких генераторов, переносчиков, умножителей и делителей

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		47

частоты ведет к возникновению гармонических и негармонических искажений, наводок, помех со стороны сигнальных линий.

5.1.7 Трассировка печатной платы

Современные САПР располагают функциональными возможностями для автоматической трассировки печатной платы. Данный способ трассировки подходит для несложных проектов с минимумом компонентов, что позволяет, в конечном итоге, получить приемлемую топологию, однако, для больших проектов, такой способ не приемлемый, поскольку, даже с учетом большого набора правил трассировки, невозможно учесть все нюансы, особенно при проектировании всечастотных печатных плат.

Трассировка печатной платы определяет пути протекания токов в слоях металлизации. Токи, протекающие в электрических цепях, всегда протекают по замкнутым траекториям, от источника к нагрузке, образуя при этом замкнутый контур. Поэтому важным фактором при проектировании является контроль импеданса, величина которого определяется следующим соотношением:

$$Z_i = R_i + j \cdot 2\pi f L_i^P \quad (6)$$

где R_i – сопротивление проводника (Ом), L_i^P – величина индуктивности проводника, f – частота тока.

На низких частотах важным параметром является лишь сопротивление R_i , поэтому для лучшего распределения возвратных токов, сигнальные слои принято располагать вблизи сплошного слоя. На высоких частотах, величина импеданса определяется индуктивностью, поэтому большая часть тока сосредоточена в узкой полосе.

Отклонения в распределении тока в замкнутом контуре приводит к увеличению индуктивности самого контура и, как следствие, к нарушению распределяя возвратного тока. Поэтому важным аспектом при трассировке

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

является минимизации индуктивности сигнальных линии, которая может быть достигнута путем отсутствия разрывов в слое протекания возвратных токов и минимизации длины печатных проводников.

Поскольку возможность исключить перекрестия в сигнальных линиях удается не всегда, существует возможность перехода сигнального проводника на другой слой, если использовать переходные отверстия. На рисунке 5.4 представлены пути протекания токов при переходе на другой слой, где черной стрелкой обозначен путь прохождения прямых, а красной – возвратных токов соответственно. Увеличение индуктивности цепи приводит к возникновению шумов и увеличению уровня ЭМИ.

Рисунок 5.4 – Путь протекания возвратного тока при смене сигнального слоя

В случае перехода на другой сигнальный слой допустимыми вариантами могут считаться:

- переход между двумя слоями, у которых существует общий опорный слой;
- переход между двумя слоями, по обоим сторонам которых находится опорный слой;
- переход между двумя слоями, имеющими разный опорный слой, но находящиеся при этом максимально близко от места смены слоя.

5.1.8 Типы глухих и переходных отверстий

Поскольку основой печатного узла является МПП, то важным шагом на начальном этапе проектирование будет определение структуры переходных отверстий (рисунки 5.5 и 5.6). Глухие отверстия являются связующим звеном между внутренними и наружными сигнальными слоями МПП. Скрытые отверстия присутствуют лишь во внутренних слоях, и не имеют электрического соединения с наружными слоями. Существуют ограничения, связанные с количеством и размещением переходных отверстий, поскольку от количества типов переходных отверстий зависит количество циклов наращивания меди. При этом с каждой металлизацией толщина слоя возрастает на 18 мкм.

При размещении переходных отверстий на печатной плате следует учитывать возможность формирования таких промежуточных пакетов, при которых допустимо сквозное сверление и металлизация.

Рисунок 5.5 – Структура переходных отверстий многослойной печатной платы

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>50</i>

Рисунок 5.6 – Структура переходных отверстий разрабатываемой печатной платы

5.2 Волновое сопротивление сигнальных линий печатной платы

5.2.1 Расчет волнового сопротивления

Целостность сигналов, распространяющихся в сигнальной линии, напрямую зависит от величины волнового сопротивления и степени согласования линии между генератором сигнала и нагрузкой. Это зависит не только от геометрии самой линии, но и от правильного подбора номиналов пассивных компонентов.

На данный момент существует множество программ-калькуляторов для расчета волнового сопротивления. В данной работе для расчёте импеданса используется калькулятор CITS25 (рисунок 5.7). Данная программа позволяет проводить расчет импеданса и времени задержки распространения сигнала в линии. Здесь представлены все типовые решения, начиная от микрополосковой линии до дифференциальных пар. Программа позволяет учесть тип диэлектрика и величину металлизации для различных слоев, что позволяет провести более точный расчет.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>51</i>

Параметры необходимые для расчета:

- значение импеданса с допуском (стандартный допуск $\pm 10\%$);
- ширина проводника;
- расстояние между линиями (для дифференциальных сигналов);
- толщина меди;
- толщина диэлектрика до опорной земли;
- расстояние до земляного полигона (для компланарных линий);
- материал диэлектрика.

Особенности расчета:

- толщина меди на внешних слоях увеличивается во время металлизации отверстий на 20-35 мкм; в расчетах используется финишная толщина меди 50 мкм при базовой толщине 18 мкм;
- толщина меди на внутренних слоях уменьшается на 2-3 мкм при подготовке материала под травление; для базовой меди 18 мкм при расчетах используется значение 15-16 мкм;
- паяльная маска уменьшает значение импеданса для внешних слоев;
- диэлектрическая проницаемость для препрега обычно принимает значения 3,7-3,9, а для ядра – 4,2-4,5;
- при расчете учитывается «подтрав» проводников.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		52

Рисунок 5.7 – Интерфейс программы CITS25

Оценить величины волнового сопротивления сигнальных линий можно при помощи значений параметров, показанных на рисунках 5.8-5.10.

Рисунок 5.8 – Микрополосковая линия передачи

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

$$Z_i = \frac{60}{\sqrt{2(\varepsilon_r + 1)}} \ln \left(1 + \frac{4h}{W_{EFF}} (A + B) \right) \quad (7)$$

$$A = \frac{4h}{W_{EFF}} \frac{14 + \frac{8}{\varepsilon_r}}{11} \quad (8)$$

$$B = \sqrt{A^2 + \frac{1 + \frac{1}{\varepsilon_r}}{2} \pi^2} \quad (9)$$

$$W_{EFF} = w + \frac{t}{\pi} \ln \left(\frac{4e}{\sqrt{\left(\frac{t}{h}\right)^2 + \left(\frac{\frac{1}{\pi}}{\frac{w}{t} + 1,1}\right)}} \right) \frac{1 + \frac{1}{\varepsilon_r}}{2} \quad (10)$$

Рисунок 5.9 – Встроенная микрополосковая линия

$$Z_i = Z_0 \frac{1}{e^{\frac{2(b-h)}{h}} + \frac{\varepsilon_r}{e_{EFF}} \left(1 - e^{\frac{2(b-h)}{h}} \right)} \quad (11)$$

$$e_{EFF} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} + 0,04 \left(1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right] & \frac{w}{h} < 1 \\ \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] & \frac{w}{h} < 1 \end{cases} \quad (12)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ

Лист

54

Рисунок 5.10 – Симметричная полосковая линия

$$Z_i = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{4b}{\pi A} & \frac{w}{b} \leq 0,35 \\ \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{w/b}{1-t/b} + \frac{B}{\pi} \right)^{-1} & \frac{w}{b} \geq 0,35 \end{cases} \quad (13)$$

$$A = \frac{w}{2} \left[1 + \frac{t}{\pi w} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t} + 0,51\pi \left(\frac{t}{w} \right)^2 \right) \right] \quad (14)$$

$$B = \frac{2}{1-t/b} \ln \left(\frac{1}{1-t/b} + 1 \right) - \left(\frac{1}{1-\frac{t}{b}} - 1 \right) \ln \left(\frac{1}{\left(1-\frac{t}{b}\right)^2} - 1 \right) \quad (15)$$

5.2.2 Согласование линии передач

Наличие любых неоднородностей, таких как переходные отверстия, изменения ширины проводника, расстояния до опорного слоя изменяют величину импеданса сигнальной линии. Любое изменение волнового сопротивления линии передачи в направлении распространения сигнала влечет за собой изменение амплитуды первичного сигнала и появлению отраженного. Даже при условии, что геометрические параметры, включая материал проводника и диэлектрика, неизменны, а волновое сопротивление постоянно, могут возникать отражения как в самой линии, так и на ее концах, со стороны источника, либо нагрузки.

Действующим способом устранения помех отражения в линии передачи является согласование с помощью установки согласующих резисторов для достижения равенства сопротивления нагрузки и выходного сопротивления линии. Способы согласования можно разделить на согласование по входу и по выходу линии.

В ситуации, когда линия связывает источник сигнала и одну нагрузку, может применяться согласование как со стороны источника, так и со стороны нагрузки, в ином случае – согласование целесообразно применять исключительно со стороны нагрузки.

5.2.2.1 Согласование по входу линии

При данном способе согласования устанавливается согласующий резистор R (рисунок 5.11), сопротивление которого характеризуется следующим соотношением:

$$R = Z_0 - R_s, \quad (16)$$

где Z_0 – сопротивление линии передачи, R_s – величина выходного сопротивления

Рисунок 5.11 – Последовательная схема согласования линии передачи

Преимуществом применения данной схемы согласования является удобство подбора номиналов согласующей цепи R . К основным требованиям можно отнести размещение согласующего резистора, который должен быть расположен максимально близко к выходу источника сигнала. Также волновое сопротивление линии не должно быть меньше, чем сопротивление источника.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		56

Однако данный способ согласования не применим при использовании нескольких нагрузок.

5.2.2.2 Согласование на выходе линии передачи

Одним из способов согласования на выходе линии передачи является размещение согласующего резистора R параллельно нагрузке, поскольку сопротивление нагрузки в большинстве случаев превышает волновое сопротивление линии. Сопротивление согласующего резистора в таком случае определяется следующим соотношением:

$$Z_0 = \frac{R \cdot R_H}{R + R_H} \quad (17)$$

$$R = \frac{Z_0 \cdot R_H}{R_H - Z_0} \quad (18)$$

где Z_0 – сопротивление линии передачи, R_S – величина выходного сопротивления, R_H – сопротивление нагрузки.

При $R_H \gg Z_0$ сопротивление согласующего резистора R равно волновому сопротивлению линии передачи (рисунок 5.12) $R = Z_0$.

Рисунок 5.12 – Параллельная схема согласования линии передачи

Данная схема имеет высокие требования к нагрузочной способности источника сигнала.

5.2.2.3 Параллельная схема по переменному току

Данная схема согласования приведена на рисунке 5.13.

Рисунок 5.13 – Параллельная схема согласования линии передачи по переменному току

Преимущество данной схемы заключается в отсутствии потерь по постоянному току, но наличие емкости C затрудняет выбор оптимального номинала, который напрямую зависит от частоты и скважности передаваемого сигнала.

5.2.2.4 Согласование на выходе линии при помощи делителя напряжения

Данная схема согласования приведена на рисунке 5.14.

Рисунок 5.14 – Схема согласования линии передачи при помощи делителя напряжения

В схеме согласования содержащую резистивную цепочку один из резисторов $R1$ находится между шиной питания и сигнальной линией, а другой

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		58

между сигнальной линией и шиной заземления. Сопротивление нагрузки в таком случае, можно записать следующим образом:

$$R_o = Z_0 = R1 \cdot \frac{R2}{R1 + R2} \quad (19)$$

Сопротивления R1 и R2 должны обеспечивать соответствующие токи I1 и I2 в состоянии логического нуля и единицы. В сравнении со схемой, содержащей один резистор, данная схема создает напряжение смещения на линии.

5.3 Электромагнитная совместимость

Одним из требований, предъявляемых к устройству, является высокая защищенность от внешних источников излучения и обеспечение интенсивности собственного излучения в определенных пределах.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) характеризует степень восприимчивости электрооборудования в условиях электромагнитных полей со стороны окружающей среды. Понятие электромагнитной совместимости можно разделить на две большие группы по способу распространения электромагнитных помех (ЭМП) – индуктивные и кондуктивные. К индуктивным помехам можно отнести помехи, распространяющиеся в непроводящих средах в виде электромагнитных полей, а кондуктивные же, в свою очередь, распространяются по проводникам.

Существует также ряд критериев, которые стоит учесть при проектировании многослойной высокочастотной печатной платы. К ним можно отнести следующие:

- минимизация длин линий высокоскоростных сигналов;
- разделение шин питания и заземления между цифровой и аналоговой частью;
- контроль целостности заземляющих полигонов.

5.3.1 Проектирование шин питания и заземления

Существует два основных правила при проектировании печатных плат:

- сигнальные токи протекают от источника к нагрузке и представляют собой замкнутую петлю;
- путь протекания сигнальных токов лежит через область с наименьшим импедансом.

На высоких частотах протекание сигнального тока происходит по пути с наименьшей индуктивностью, либо через участки имеющие минимальную длину пути возвратных токов. На рисунке 5.15 представлен путь протекания высокочастотного тока от компонента А к компоненту В.

Рисунок 5.15 – Путь протекания высокочастотного тока

Отклонения в распределении тока влечет за собой увеличение индуктивности контура протекания возвратного тока, и, как следствие, к увеличению ЭМИ. Такие отклонения происходят в результате наличие вырезов в опорном слое. Поскольку высокочастотные токи выбирают путь с наименьшей величиной индуктивности, то большая часть возвратного тока будет протекать по узкому пути непосредственно над сигнальной линией. Если

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		60

в полигоне имеются вырезы, то наличие выреза 1 не повлияет на целостность сигнала, в отличие от выреза 2, который в результате увеличения области петли протекания возвратного тока, может приводить к нарушениям в распределении возвратного тока (рисунок 5.16).

Рисунок 5.16 – Путь протекания высокочастотного тока при наличии вырезов в полигоне

На низких частотах путь протекания возвратных токов лежит через область с наименьшей величиной импеданса. Сопротивление полигонов стремится рассеять ток таким образом, чтобы он мог распределиться по большей площади полигона (рисунок 5.17).

Рисунок 5.17 – Распределение возвратного тока на низких частотах

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>61</i>

5.3.2 Экранирование печатного узла

Задача электромагнитного экрана состоит в том, чтобы отводить поток электромагнитной энергии, создаваемый источниками поля от защищаемой области пространства, не допуская попадания его в эту область. Механизм отражающего действия экрана связан непосредственно с возникновением токов и поляризации на поверхности и в толще материала.

Степень ослабления, обеспечиваемая экраном, зависит от нескольких факторов:

- отражение электромагнитной волны от границы воздух-экран;
- поглощение электромагнитной волны в результате прохождения через металлическую стенку экрана;
- повторное отражение электромагнитной волны.

Для количественной оценки величины экранирования приняты значения порядка 100 – 120 дБ. Получить подобные значения весьма затруднительно вследствие наличия неоднородностей в экране, таких как отверстия, щели и т.д.

Выбор материала экрана проводится исходя из обеспечения требуемой эффективности экранирования в рабочем диапазоне частот при соответствующих ограничениях, таких как массогабаритные параметры, обеспечение механической прочности, технологичности конструкции и других. При конструировании печатного узла выбор материалов для экранирования весьма ограничен.

Наличие медной фольги, применяемой для создания печатных плат, выполненной в виде потенциальных слоев, играет роль экрана. На высоких частотах по экрану протекают возвратные токи. Требования, выполнение которых необходимо для эффективной работы экрана в составе линии передач, были приведены выше.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		62

Рисунок 5.18 – Структура печатной платы, разработанной в САПР в Altium Designer

Для эффективной работы массива отверстий в качестве экрана, они должны быть расположены на расстоянии не более $1/10$ минимальной длины волны, которая определяется для максимальной частоты в спектре сигнала. Наличие стенки металлизированных отверстий, также в свою очередь влияет на волновое сопротивление, что следует учитывать при расчетах.

Также для экранирования печатного узла применяются специальные экраны. Наиболее предпочтительными являются экраны на основе меди и медных сплавов.

В совокупности, конструкция печатного узла представляет собой печатную плату с потенциальными слоями, соединенных между собой металлизированными отверстиями, расположенными друг от друга на расстоянии $0,1\lambda$, которые играют роль экрана. Внешний экран, в свою очередь, соединен с экранирующим слоем платы. Соединительные разъемы также экранированы и соединены с экранирующим слоем платы.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		63

6 МЕТОДИКА ПО НАСТРОЙКЕ МОДУЛЯ

6.1 Подготовка печатной платы

Подключить к LO1409 плату питания VP1209 и плату управления VY1220. Плату управления подключить к плате питания и к компьютеру (USB). Плату питания к источнику +12В. На плату LO1409 подходят следующие питания: +6.5В, +30В, +4В. Подать на LO1409 опорную частоту 10 МГц с платы управления. Запустить программу S2VNA под сервисом. Включить питание. Проверить подводимые напряжения к плате LO1409.

6.2 Настройка опорного генератора

Проверить выходную частоту опорного генератора, совпадает ли она со значением $f_{оп} = 1360$ МГц. Проверить обрабатывает ли петля ФАПЧ после внешнего воздействия (восстанавливает ли генератор гармонический сигнал после срыва).

Проверить границы диапазона работы ФАПЧ. Проверка осуществляется замыканием выхода фильтра ФАПЧ на +5 В и на «землю». Границы должны отстоять на приблизительно равном расстоянии от центра, примерно $1360 \pm (15-18)$ МГц. Если границы смещены, то следует подстроить увеличением емкости, параллельных резонатору, конденсаторов (примерно до $1p2$). Пример подстройки границ диапазона ФАПЧ приведен на рисунке 6.1.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		64

Рисунок 6.1 – Подстройка границ диапазона ФАПЧ

6.3 Настройка выходного уровня мощности

Подключить измеритель мощности к выходу OUT1. В программе S2VNA предварительно выбрать тип измерителя мощности по пути «Система→ Настройки→ Настройки измерителя мощности». Установить: диапазон 0-9 ГГц, количество точек 201, в клетке 1 дБ. По пути «Система→ Сервис→ Изм. мощности», выбрать пункт «Измерить Порт1». Программа произведет измерение мощности на выходе канала OUT1. Контролировать параметры: уровень мощности не ниже 0 дБм (для LO1409 и LO1409), неравномерность не более 4 дБ. Проверить на наличие разрывов («ступенек») графика. Пример показан на рисунках 6.2 и 6.3.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		65

Рисунок 6.2 – Разрыв графика мощности

Рисунок 6.3 – Разрыв графика мощности

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

Для подавления возбуждения можно применить следующее: прикрепить поглотитель на компоненты, в области расположения которых возбуждение возникает (обычно это умножитель), варьировать постоянную времени петли АРМ (рисунок 6.4).



Рисунок 6.4 – Конденсатор цепи, задающей постоянную времени АРМ

Сохранить измерение: «Индикация→ Данные→ Память». Разомкнуть петлю АРМ, замкнув контакты, указанные на рисунке 6.5. Измерить мощность как указано в пункте 4.б. Разница между графиком разомкнутой и замкнутой петли АРМ не менее 1-2 дБ.

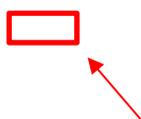


Рисунок 6.5 – Место размыкания петли АРМ

При необходимости произвести подстройку добавлением емкости (0,1-0,2 пФ) в места, указанные на рисунке 6.6.

Рисунок 6.6 – Допайка емкости

Подключить анализатор спектра к выходу платы OUT1. В программе S2VNA установить: количество точек 10001, фильтр 300 Гц. В полосе 9 ГГц смотреть не гармонические помехи. Уровень помех должен быть не хуже 30 дБн. Смотреть устойчивость выходного сигнала к самовозбуждению. Наблюдать в режиме росчерка частоты.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		68

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был спроектирован печатный узел модуля генератора гетеродинного сигнала для четырехпортового векторного анализатора цепей. Данный векторный анализатор не уступает по характеристикам в сравнении с зарубежными аналогами, при этом стоимость данного прибора существенно ниже.

В ходе разработки был произведен выбор элементной базы с учетом требуемых характеристик прибора и разработана структурная схема модуля. Проведены расчеты уровней выходной мощности блоков структурной схемы, геометрических параметров микрополосковых и копланарных линий передачи, величина волнового сопротивления которых соответствует 50 Ом. Рассмотрены схемы согласования линии передачи и спроектирована топология печатного узла с учетом минимизации паразитных параметров.

Одним из важных критериев, предъявляемых к печатному узлу, выступает требование к габаритным размерам печатной платы, которые не должны превышать 164×108 мм, для размещения модуля внутри прибора. При разработке были выбраны необходимые тип и структура слоев печатной платы. В качестве оптимального варианта с точки зрения электромагнитной совместимости, была выбрана структура, состоящая из шести металлизированных слоев, разделенных между собой слоем диэлектрика. В качестве материала печатной платы было принято решение об использовании фольгированного диэлектрика FR4, применение которого обеспечивает стабильность характеристик. Для обеспечения хорошей паяемости припоями, соответствующими RoHS, был сделан выбор в пользу иммерсионного золота в качестве финишного покрытия. Также данное покрытие обеспечивает повторяемость характеристик печатных плат, увеличение коррозионной стойкости, высокой устойчивости к многократному термоциклированию, отсутствию ограничений по минимальному диаметру металлизации отверстий.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		69

Для повышения плотности компоновки и уменьшения габаритных размеров печатного узла применяются глухие отверстия. Слои сплошной металлизации, размещенные на внешней стороне и имеющие соединение с потенциалом земли, выполняют функцию экрана для уменьшения паразитных связей между проводниками печатной платы.

Для отладки готовых модулей была написана методика, в которой приведены основные операции для настройки рабочих режимов модуля, для получения требуемых выходных характеристик. Требования, предъявляемые в техническом задании, были полностью учтены. Результатом проектирования печатного узла является комплект конструкторской документации, приведенный в приложении к выпускной квалификационной работе.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>70</i>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хибель М. Основы векторного анализа цепей / М. Хибель. - пер. с англ. С.М. Смольского, под. ред. У. Филлип. -М.: Издательский дом МЭИ, 2009. - 500 с.: ил.
2. Бакалов В. П. Основы анализа цепей: Учебное пособие для вызов/ Журавлева О.Б., Крук Б.И. - 2-е изд., стереотип. - М.: Горячая Линии - Телеком, 2014. - 592 с.: ил.
3. Кечиев Л. Н. Проектирование печатных плат, для цифровой быстродействующей аппаратуры /Л.Н. Кечиев — М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. - 616 с.: ил.
4. Кечиев Л. Н. Помехоподавляющие фильтры. Методы проектирования / Бобков А.Л., Степанов П. В. - М.: Московский государственный институт электроники и математики, 1999 г., 36 с.
5. Алешин А. В. Расчет помех отражения в линиях связи быстродействующих цифровых устройств/ Кечиев Л. Н., Леонид Николаевич, Тумковский С. Р., Шевчук А. А. : Учеб. пособие - М. : МИЭМ, 2002. - 86 с. : ил
6. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1990. - 288 с.: ил
7. Отт. Г. Методы подавления шумов и помех в электронных схема/ Г.Отт. - М.: Мир, 1979г. -318с.
8. Кочемасов В. Цифровые вычислительные синтезаторы – применение в системах синтеза частот и сигналов / А.Голубков, Н.Егоров, к.т.н., А.Черкашин, к.т.н., А.Чугуй // Электроника. - 2014. - №8(00140). -С.171-179.
9. Рэд Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике/ Э. Рэд. - пер. с нем. С.Н. Шибалова, Ю. А. Лурье — М.: «МИР», 1990. - 254 с.: ил.
10. Bahl I. Microwave Solid State Circuits Design/ Bhartia P.- 2003. - P.906

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>71</i>

11. Chenakin A. Frequency Synthesizers: From concept to produce// Norwood, MA 2011, 209p.
12. Бельчиков С. Фазовый шум: как спустится ниже -120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц в диапазоне частот до 14 ГГц// Компоненты и технологии. – 2009. -№5. – С.139 – 146.
13. Белоус А.И. Основы конструирования высокоскоростных электронных устройств/ В.А. Солодуха, С.В. Шведов - М.: «Техносфера», 2017 – 872 с.: ил.
14. Chenakin A. Building a Microwave Frequency Synthesizer// Hight Frequency Electronics, 2008, pp. 50 – 57.
15. Carson R. Hight – Friquency Amplifiers// John Wiley & Sons, New York, NY 1982, 304p.
16. Проектирование полосковых устройств СВЧ: Учебное пособие. - Ульяновск, 2001. - 123с.
17. Кураев И. Применение помехоподавляющих фильтров//Сборник статей Электромагнитная совместимость в электронике – 2018, С.52 – 57.
18. Barnes J. Electronic System design: interference and noise control techniques. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1987, 203p.
19. Артым А. Д., Электрические корректирующие цепи и усилители, М. – Л., Энергия 1965, 420 с.
20. Тютюков С.А. Практические рекомендации по разработке печатных плат., 2018, - 112 с.:ил.
21. Ott, Henry W. Electromagnetic compatibility engineering, Wiley, 2009.
22. Vogan E. Signal and power integrity – simplified, 2nd ed., Pearson 2010.
23. ГОСТ 2.737 – 68. Обозначения условные графические в схемах. – М.: Стандартиформ, 2010. – 13 с.
24. ГОСТ 29180 – 91. Приборы СВЧ. Усилители малошумящие. – М.: Изд – во стандартов, 2000. – 12 с.
25. ГОСТ 2.755 – 87. Обозначения условные графические в электрических

схемах. Устройства коммутации и контактные соединения. . – М.: Изд – во стандартов, 2005. – 20 с.

26. ОСТ4 ГО.070.015 Сборочные единицы радиоэлектронной аппаратуры. Общие технические условия., 1992. – 9 с.

27. ГОСТ 23752 – 79. Платы печатные. Общие технические условия. – М.: Изд – во стандартов, 1991. – 33 с.

28. ГОСТ 23221 – 78. Модули СВЧ, блоки СВЧ. – М.: Изд – во стандартов, 1980. – 33 с.

					<i>11.04.03.2020.601.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		73