

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.

ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОММУТИРУЕМЫХ
СВЧ УСТРОЙСТВ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ
РАБОТЕ ЮУрГУ 11.04.03.2020.589.00 ПЗ

Руководитель работы

_____ Хашимов А.Б.

_____ 2020 г.

Работу выполнил
студент гр. КЭ-224

_____ Габидуллин Т.Р.

_____ 2020 г.

Нормоконтролер

_____ Юнгайтис Е.М.

_____ 2020 г.

Челябинск 2020 г.

АННОТАЦИЯ

Габидуллин Т. Р. Динамическое моделирование коммутируемых СВЧ устройств. – Челябинск: ЮУрГУ, ВШЭЖН; 2020, 100 с. 34 ил., библиогр. список – 37 наим., 8 прил., презентация.

В данной работе была разработана динамическая модель четырехрядного фазовращателя с шагом дискретизации 22.5 градуса. Также были рассчитаны диаграммы направленности фазированной антенной решетки из 32 одинаково ориентированных в пространстве равноамплитудных синфазных излучателей, расположенных эквидистантно вдоль прямой линии.

В ходе выполнения работы был произведен литературный обзор существующих типов фазовращателей, переключающих элементов и способов их расчета. Для реализации модели в виде программного продукта была освоена технология визуально-ориентированного программирования.

В результате моделирования было продемонстрировано влияние неисправностей переключающих элементов на фазо-частотные и амплитудно-частотные характеристики фазовращателя. Также было продемонстрировано влияние искаженных форм фазового распределения излучателей антенной решетки на диаграмму направленности. Произведен анализ полученных результатов.

					ЮУрГУ11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.		Габидуллин			Динамическое моделирование коммутируемых СВЧ устройств	Лит.	Лист	Листов
Пров.		Хашимов					7	100
Реценз.		Федосик				ЮУрГУ		
Н.контр.		Юнгайтис				Кафедра КиПР		
Утверд.		Войтович						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	10
1 БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ ОБЗОР	
1.1 Типы ФВР СВЧ диапазона.....	12
1.2 Методы расчета ФВР.....	14
1.3 Дискретный ФВР. Основные элементы.....	15
1.4 Полупроводниковый рпн-диод. Характеристики и параметры.....	18
1.5 ФВР в составе ФАР.....	22
2 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ	
2.1 Основные понятия моделирования.....	26
2.2 Технологии моделирования.....	27
2.3 Моделирование методом матриц рассеяния.....	30
3 МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕКУЩЕГО ЦИКЛА	
3.1 Обзор технологии визуально-ориентированного программирования.....	33
3.2 Обзор рынка технологий визуально-ориентированного программирования.....	34
3.3 Формулировка требований к среде разработки.....	35
4 АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КОММУТИРУЕМЫХ СВЧ УСТРОЙСТВ	
4.1 Основные проблемы и постановка задачи.....	38
4.2 Моделирование дискретного ФВР.....	38
4.3 Моделирование вносимого импеданса рпн-диода.....	43
4.4 Моделирование ФАР.....	46
5 РАСЧЕТ КОММУТИРУЕМЫХ СВЧ УСТРОЙСТВ	
5.1 Расчет характеристик рпн-диода.....	50

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		8

5.2	Расчет дискретного ФВР, в условиях исправности pin-диодов.....	55
5.3	Расчет дискретного ФВР, в условиях неисправностей pin-диодов.....	66
5.4	Расчет ДН ФАР для различных состояний ФВР.....	69
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	81
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	82
 ПРИЛОЖЕНИЯ		
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	86
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	87
	ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	88
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	89
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	90
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	91
	ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	96
	ПРИЛОЖЕНИЕ И.....	98

ВВЕДЕНИЕ

Класс управляющих СВЧ устройств, предназначенных для управления амплитудой и фазой СВЧ сигнала, находит широкое применение в радиолокации, связи, навигации, измерительных устройствах и других областях науки и техники. Самым массовым из управляющих устройств являются фазовращатели.

Фазовращателем (ФВР) называется устройство, которое используют для изменения фазы проходящей через него электромагнитной волны. Конструктивно ФВР представлять собой блочную структуру коммутирующих между собой одноразрядных ФВР. Каждый блок ФВР может иметь разнообразные реализации в зависимости от дискретности фазовой задержки, ее природы и принципа управления.

На сегодняшний день наиболее популярным типов ФВР СВЧ диапазона являются дискретные ФВР, управляемые pin-диодом. Полупроводниковый pin-диод обладает высокой стабильностью и точностью установки фазы, быстродействием, имеет малые габариты и вес. Для проектирования ФВР необходимо разработать функциональную схему с переключающими диодами, которая будет обеспечивать требуемую дискретность фазовой задержки при минимально вносимых потерях [1, 2].

Точность формирования фазы волны имеет большое значение при формировании диаграмм направленности (ДН) фазированных антенных решеток (ФАР). Нарушение распределения амплитуд и фаз электромагнитной волны в отдельных излучателях приводит к нарушению ДН, что влечет за собой различные радиолокационные ошибки. Основной причиной неправильного формирования фазы ФВР является сбой переключающих элементов.

Развитие аналитических методов анализа и расчета СВЧ устройств с использованием современной техники и программного обеспечения, позволяет осуществить разработку ФВР в виде коммутируемых СВЧ модулей.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						10
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Одним из способов расчета СВЧ устройств и оптимизации их разработки как динамической системы является моделирование с применением пакета MATLAB Simulink.

Пакет расширения Simulink системы MATLAB является интерактивно-программным комплексом, который предназначен для математического моделирования линейных и нелинейных динамических систем и устройств, представленных своей функциональной блок-схемой. Данная среда разработки позволяет проводить моделирование как в частотной, так и во временной области. Инструменты расширения Simulink дают возможность применения событийного управления блоками моделей.

Целью данной работы является в разработка динамической модели четырехрядного ФВР, которая будет воспроизводить ситуации неправильной работы переключающих элементов. Также необходимо смоделировать работу ФАР при возникновении неисправностей переключающих элементов в составе ФВР. Данные модели позволят провести влияния неисправностей переключающих элементов ФВР на формирование фазо-частной (ФЧХ) и амплитудно-частотной (АЧХ) характеристик, а также влияние распределения амплитуд и фаз на ДН ФАР в случаях возникновения неисправностей переключающих элементов в одном или нескольких ФВР, подключенных к излучателям ФАР.

1. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ ОБЗОР

1.1. Типы ФВР СВЧ диапазона

Классификация ФВР имеет обширную номенклатуру, так как существует большое количество параметров ФВР и вариантов конструкторского исполнения. ФВР принято классифицировать по типу управления, принципу осуществления поворота фазы, способу включения в тракт, а также по характеру изменения фазы.

Существует два основных принципа действия ФВР. Первый основан на изменении геометрической длины линии тракта. Второй принцип действия ФВР, основан на изменении параметров заполняющей волновод среды, в следствие чего происходит изменение длины волны в волноводе λ . По характеру вносимого сдвига различают дискретные и плавные ФВР. Дискретные ФВР вносят фазовый сдвиг с некоторым шагом. Такие ФВР также называются ступенчатыми. Плавные ФВР вносят фазовый сдвиг, который представляет из себя непрерывную функцию управляющего воздействия (тока или напряжения). Конструктивно ФВР можно реализовать в виде волновода или в виде монолитного интегрального исполнения, в зависимости от рабочей частоты ФВР. Преимуществом волноводных ФВР по сравнению с монолитными устройствами является значительно большая передаваемая мощность и более низкий уровень вносимых потерь [3]. Недостатком дискретных ФВР является их малая разрядность – серийно выпускаемые дискретные ФВР имеют разрядность не более шести. [4].

Для повышения разрядности используют аналого-цифровые ФВР. Схема аналого-цифрового ФВР может быть реализована в виде проходного ФВР с использованием моста Ланге, в плечи которого включены фазосдвигающие ячейки. В качестве активных элементов используются МДП-варикапы. Каскадирование фазосдвигающих ячеек осуществляется по Т-схеме [4, 5]. Нужно отметить, что цена дискрета ФВР зависит от разрядности цифро-

										Лист
										12
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ					

аналогово преобразователя (ЦАП). Так, для 8-ми разрядного преобразователя существует 256 состояний и цена дискрета будет $1,4^\circ$. Таким образом, при увеличении разрядности ЦАП уменьшается цена дискрета ФВР. Но с увеличением количества дискретов, растет время установки состояния ФВР. Использование микроконтроллера со встроенным цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) позволяет повысить скорость управления фазой. При этом необходимо учитывать диапазон управляемых напряжений микроконтроллера [6].

Как уже было сказано, существуют конструкции ФВР, которые основаны на изменении параметров заполняющей волновод среды, так называемые диэлектрические ФВР [7]. В отличие от поглощающих аттенюаторов, диэлектрические ФВР не имеют поглощающего слоя на диэлектрических пластинах. В качестве диэлектрика как правило подбирается материал с малым значением тангенса угла потерь $tg \delta$ и большим значением диэлектрической проницаемости ϵ . Принцип действия диэлектрических ФВР заключается в том, что при прохождении волны в среде с изменяющейся диэлектрической проницаемостью, происходит изменение фазовой скорости волны. Фазосдвигающую пластина при этом необходимо располагать параллельно вектору \vec{E} рабочей волны. При такой конфигурации, приближая диэлектрическую пластину к оси волновода, можно добиться получения фазового сдвига до нескольких сотен градусов.

Одним из активно развивающихся механизмов регулировки характеристик ФВР заключается в формировании гибридных слоистых структур из ферритовых и сегнетоэлектрических материалов [8, 9]. Принцип действия ферритовых ФВР заключается в изменении магнитной проницаемости участка ферритовой среды в волноводе в результате действия магнитного поля. Изменение фазы проходящей волны происходит в следствии изменения магнитной проницаемости феррита, которая в свою очередь меняет коэффициент фазы волны. Такой метод обеспечивает совместную электрическую и магнитную

регулировку рабочей частоты ФВР и фазового набега СВЧ сигнала в нем. Преимуществами магнитноуправляемых ферритовых пленочных ФВР являются широкий диапазон перестройки их рабочих частот и сравнительно низкие вносимые потери [10].

Существуют ФВР, в которых поворот фазы проходящей волны происходит в следствие поворота плоскости поляризации. Такой тип ФВР позволяет проводить высокочастотную регулировку фазового сдвига проходящей волны. Конструктивно, такое устройство представляет собой последовательное соединение отрезков круглых волноводов, содержащих диэлектрические пластины. Пластины имеют длину в четверть- и полдлины волны. На выходе ФВР волна сохраняет поляризацию, заданную на входе. Но фаза волны оказывается сдвинутой по отношению ко входному на некоторый угол. Таким образом осуществляется фазовый сдвиг проходящего сигнала

1.2. Методы расчета ФВР

Устройства типа ФВР относятся к линейным устройствам, которые способны работать в различных промежуточных состояниях. Благодаря свойству линейности, при анализе ФВР можно применять методы анализа линейных цепей.

В большом количестве случаев, для сложных управляющих устройств можно осуществить деление условными границами на отрезки регулярных линий и нерегулярных участков, таких как тройники, изгибы и скачки ширины полосковых проводников. Данные участки линий необходимы для соединения между собой элементарных многополюсников. В отличие от многополюсников классической теории цепей, многополюсники СВЧ устройств принято характеризовать волновыми матрицами. К волновым матрицам относятся цепные матрицы $[A]$, матрицы рассеяния $[S]$ и матрицы передачи $[T]$. Элементы данных матриц имеют наглядный физический смысл и могут быть определены

										Лист
										14
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ

расчетным путем или экспериментально с помощью векторного анализатора или других измерительных устройств.

Таким образом, основная цель проектирования управляющего устройства типа ФВР заключается в нахождении коэффициента отражения или коэффициента передачи для устройств отражательного или проходного типа соответственно. Для расчета ФВР Необходимо определить внешние параметры $2N$ -полюсника по известным параметрам элементарных многополюсников, из которых состоит устройство. Для этого необходимо знать, как осуществлено соединение между элементарными многополюсниками.

1.3. Дискретный ФВР. Основные элементы

Дискретные ФВР – это управляющие устройства, которые часто применяются в ФАР. Данный факт определяет совокупность предъявляемых к ним требований. Такие управляющие устройства характеризуются большим числом параметров. Для различных управляющих устройств в составе ФАР можно выделить следующие параметры: число различных фазовых состояний; фазовый сдвиг; стабильность фазового сдвига; рабочая полоса частот; потери; число управляющих элементов; мощность, потребляемая по цепям управления. Схема устройства и его конструктивное исполнение определяет основные параметры устройства. Для дискретного ФВР основными параметрами являются минимальный сдвиг фазы и число управляющих элементов. Также для ФВР определяют коэффициент стоячей волны (КСВ) входа и выхода, уровень допустимой мощности и точность отсчета фазы.

Для управления какого-либо параметра используется линейный двуполусник – ключ. Ключ имеет два различных состояния, которым соответствуют некоторые значения сопротивления ключа, в идеальном случае 0 или ∞ . Перевод ключа из одного состояния в другое осуществляется с помощью внешнего управляющего воздействия. Функцию ключа в ФВР выполняет pin-

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		15

диод. Помимо рin-диодов, в качестве управляющих элементов используются управляемые МЭМС-переключатели [11]. ФВР на основе МЭМС демонстрируют более низкие потери по сравнению с рin-диодами [12].

Важным элементом дискретных ФВР является выключатель. Выключателем называется линейный четырехполюсник, имеющий два различных состояния, в одном из которых он является идеально пропускающим, во втором – идеально отражающим. Выключатель образуется последовательным или параллельным подсоединением ключа в линию передачи.

Таким образом, дискретный ФВР представляет собой линейный двух- или четырехполюсник, содержащий выключатели, в котором в результате воздействия управляющего сигнала на один или несколько ключей происходит скачкообразное изменение набега фазы электромагнитной волны без изменения ее амплитуды. Минимальный фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ называется ее дискретом. Управление фазовым сдвигом осуществляется в диапазоне от 0 до 2π с дискретом $\Delta\varphi$. Число различных фазовых состояний ФВР определяется формулой (1.1).

$$p = \frac{2\pi}{\Delta\varphi}, \quad (1.1)$$

где $\Delta\varphi$ – минимальный фазовый сдвиг.

Различают проходные и отражательные дискретные ФВР. Проходной ФВР представляет собой линейный согласованный по входу четырехполюсник без потерь, в котором воздействие управляющего сигнала на ключи приводит к дискретному изменению набега фазы проходящей электромагнитной волны.

Отражательный ФВР представляет собой линейный двухполюсник без потерь, в котором воздействие управляющего сигнала на ключи приводит к дискретному изменению фазы отраженной электромагнитной волны. Для работы отражательного ФВР необходимо устройство, развязывающее вход и выход. В качестве такого устройства выбираются направленные ответвители (НО) или циркуляторы. Основными критериями при выборе схемы ФВР являются

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						16
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

требования по собственному затуханию, быстродействие переключения фазы и уровень допустимой мощности.

Наибольшую популярность получила схема отражательного ФВР с применением трехдецибельного НО (рисунок 1.1). Сигнал, поступающий на вход 1 НО, снимается с выхода 2. Выходы 3 и 4 нагружены на отражающие ФВР, которые состоят из управляющих pin-диодов и закорачивающих штырей. Сигнал, поступающий на вход 1 трехдецибельного НО, делится поровну между его выходами 3 и 4. Отраженные сигналы, вышедшие с отражающих ФВР, складываются на выходе 2.

Рисунок 1.1 – Эквивалентная схема одного звена ФВР с трехдецибельным НО: 1 – НО; 2 – согласующая линия; 3 – pin-диоды; 4 – сечение отсчета фазы; 5 – сечение подключения диодов

Для создания дискретных ФВР, работающих в диапазоне сантиметровых и миллиметровых электромагнитных волн используются микрополосковые линии передачи. Печатная плата с микрополосковыми линиями передачи состоит из диэлектрического слоя, на одной стороне которого расположена прямоугольная металлическая полоска в качестве проводника, и металлического экрана на другой стороне. Диэлектрическая проницаемость пространства над полосковой линией, в качестве которого обычно выступает воздух, меньше диэлектрической проницаемости подложки. Так как СВЧ диапазон требует использование материалов с малыми потерями и, соответственно, с малым

										Лист
										17
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ					

значением тангенса угла потерь $tg \delta$, то для материала в качестве подложки наиболее часто используют фторопласты, керамику, политилен, поликор и др.

Среди методов нанесения полосковых линий на подложку самыми распространенными являются тонкопленочные или толстопленочные технологии. Полосковые линии получили широкое распространение из-за малых габаритов и, соответственно, малой массы. Платы на полосковых линиях создаются с применением печатного монтажа, благодаря чему может быть организована автоматизация процесса производства.

1.4. Полупроводниковый рin-диод. Характеристики и параметры

Для переключения мощности, проходящей по СВЧ тракту, используются коммутационные диоды. Коммутационные диоды делятся на нерезонансные и резонансные. Эффект переключения диода достигается за счет изменения его сопротивления при подаче на него прямого и обратного напряжений [13]. В нерезонансных переключательных устройствах используется свойство диода, которое заключается в том, что при прямом смещении диода, величина активного дифференциального сопротивления является малой, а в случае обратного смещения диода, активное дифференциальное сопротивление сильно возрастает.

Основное требование, которое предъявляется к конструкции коммутационного диода, являются минимальная индуктивность его выводов и маленькая емкость корпуса диода. Емкость диода иногда компенсируют дополнительной индуктивностью. В результате специально принятых мер переключающее устройство может обладать практически активным сопротивлением в рабочем диапазоне частот.

Для создания р-n перехода рin-диода используется метод ионного легирования, который обеспечивает высокую воспроизводимость электрических

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		18

параметров диодов. Этот метод позволяет создавать рiп-диоды с толщиной i-области от 20 до 50 мкм [14].

На рисунке 1.2 представлена конструкция компланарного рiп-диода. При подаче прямого смещения происходит инжекция неосновных носителей из р- и n-областей в i-область. В результате чего рiп-диод приобретает активное сопротивление, измеряемое единицами или долями Ом. При нулевом или отрицательном смещении i-область становится запирающим слоем с очень маленькой емкостью (единицы или доли пикофарад) и малыми активными потерями (единицы или доли Ом). Наличие толстого i-слоя позволяет применять рiп-диоды при больших СВЧ-мощностях, вплоть до нескольких ватт в режиме непрерывной генерации.

Рисунок 1.2 – Конструкция компланарного рiп-диода

Модель рiп-диода, используемая при проектировании управляющих устройств, представляется параметрами эквивалентной схемы (рисунок 1.3): При подаче управляющего напряжения прямой полярности, малое сопротивление перехода шунтирует емкость C_d . В результате образуется параллельный колебательный контур, состоящий из индуктивности L_S и емкости $C_{корп}$, имеющий на резонансной частоте большое сопротивление. В результате СВЧ сигнал беспрепятственно проходит по тракту. При подаче управляющего сигнала обратной полярности сопротивление перехода резко увеличивается и возникает последовательный резонанс. Таким образом, изменяя полярность

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						19
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

управляющего сигнала на диоде, можно создавать параллельный или последовательный резонанс и коммутировать СВЧ мощность. Для уменьшения емкости диода на практике используется закороченный на конце индуктивный шлейф, который параллельно подключается к диоду [15].

Рисунок 1.3 – Эквивалентная схема pin-диода

Помимо pin-диодов в качестве переключателей часто используются полевые транзисторы с затвором Шоттки. Эквивалентные схемы для полевых транзисторов с затвором Шоттки как правило более сложные [16, 17]. Но эти схемы могут быть пересчитаны и приведены к эквивалентной схеме pin-диода. Поэтому, именно схемы pin-диода используются при анализе различных вариантов построения переключателей.

При проектировании переключателей на pin-диодах следует учитывать, что мощность, рассеиваемая в полупроводниковых элементах, не должна превышать максимально допустимую мощность рассеивания, которая определяется максимальным перегревом полупроводниковой структуры. Для кремниевых pin-диодов максимальный перегрев полупроводниковой структуры лежит в пределах до 150–180 °С [18]. Увеличение площади поперечного сечения и толщины полупроводниковой структуры pin-диода приводит к увеличению максимально допустимой мощности рассеивания. Однако, увеличение

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		20

поперечных размеров полупроводникового элемента и уменьшение толщины i -слоя увеличивает емкость полупроводниковой структуры, которая ограничивает верхнюю граничную частоту переключающего устройства.

Для компенсации реактивного емкостного сопротивления рпн-диода, параллельно можно подключить индуктивность для получения параллельного колебательного контура. Однако, на практике оптимизированное включение переключающего элемента последовательно в линию передачи, в большинстве случаев, не используется. Объясняется это двумя факторами. Во-первых, подключение параллельной индуктивности достаточно сложно реализовать, а к рпн-диоду практически невозможно, из-за необходимости подачи на него управляющего напряжения. Во-вторых, оптимизированное включение носит резонансный характер и возможно только на одной частоте, при отклонении от которой развязка резко уменьшается.

При параллельном включении возможности компенсации емкости переключающего элемента значительно расширяются. Первый способ компенсации выглядит таким образом: переключающий элемент включается между двумя последовательными высокоомными отрезками линии передачи, которые имеют индуктивный характер и образуют с емкостью Т-образный фильтр низких частот. Второй способ компенсации был предложен в работе [19]. Переключающий элемент подключается в точку подключения одного из короткозамкнутых шлейфов полосового фильтра с четвертьволновыми связями. Данный шлейф укорачивается, волновое сопротивление увеличивается и он образует с емкостью рпн-диода параллельный колебательный контур с добротностью равной исходному шлейфу. Третий способ компенсации предложен в работе [17]. Рпн-диод подключается в точку подключения одного из шлейфов структуры с разомкнутыми шлейфами. Перечисленные способы компенсации параллельной емкости являются широкополосными и определяются выбранной структурой [20].

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		21

В работе [18] приводится пример проектирования переключателя с последовательным включением рпн-диодов в линию передачи. Для подачи управляющих токов на диоды используются высокоомные четвертьволновые короткозамкнутые шлейфы. Переключатели с последовательным включением рпн-диодов достаточно просто реализуются на полосковых линиях передачи, но основным недостатком является то, что развязка в закрытых каналах значительно уменьшается с ростом частоты. Применение рпн-диодов с малой емкостью и включение нескольких рпн-диодов в каналах приводит к увеличению ослабления в открытом канале и снижению уровня коммутируемой мощности.

Таким образом, чем большую емкость полупроводниковой структуры может компенсировать схема переключающего устройства, тем меньше ослабление в открытых каналах, больше развязка и более высокий уровень коммутируемой СВЧ мощности можно получить в этом устройстве

1.5. ФВР в составе ФАР

Одним из самых важных применений твердотельных ФВР является направление радиолокации с помощью ФАР. В таких системах могут быть использованы дискретные ФВР, которые включены последовательно с каждым излучателем ФАР. Направление фазового фронта излучения устанавливается путем изменения времени задержки от источника сигнала до элементов решетки.

ФАР представляет собой антенну, концентрирующую энергию в узком конусе, называемом главным лучом антенны. Концентрация энергии достигается использованием системы большого числа излучателей, расположенных определенным образом в пространстве. Распределение амплитуд и фаз электромагнитной волны в отдельных излучателях подчиняется закону, который задается управляющим устройством так, чтобы суммарное излучение от всех излучателей концентрировалось в направлении главного луча.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						22
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Для задания фазы в цепь каждого излучателя включается ФВР. Использование дискретных ФВР приводит к некоторым особенностям формирования луча антенны и изменяет параметры ФАР по сравнению с параметрами антенны с плавным изменением фазового набега в ее раскрыве. Параметры ФАР зависят от дискрета фазового сдвига $\Delta\varphi$, который в свою очередь определяет число разрядов ФВР в соответствии с формулой (1.1). От числа разрядов зависит число ключей в ФВР и его конструкция. Из теории антенн следует, что наличие фазовой ошибки приводит к увеличению уровня бокового излучения согласно формуле (1.2) [21, 22]:

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_0^2 + \varepsilon_d^2}, \quad (1.2)$$

где ε_0 – уровень бокового излучения (боковых лепестков) антенны при заданном амплитудном распределении и идеальном плоском фазовым фронтом в раскрыве; ε_d – уровень дополнительного бокового излучения, возникающего в результате фазовых ошибок. Максимальный уровень дополнительного бокового излучения определяется средним квадратическим значением фазовых ошибок [21]:

$$\varepsilon_d = 0,5\delta\varphi. \quad (1.3)$$

Фазовые ошибки в раскрыве ФАР складываются из трех основных составляющих: систематическая ошибка задания фазы ФВР; систематическая ошибка, связанная с дискретностью задания фазы в раскрыве ФАР; случайная ошибка задания фазы ФВР.

Систематическая ошибка ФВР как правило возникает в каждом разряде ФВР в следствие потерь в линиях передачи. Причинами данных потерь являются неоднородности в местах сочленения различных элементов, а также

неидеальности развязки мостовых устройств [13]. Для m -разрядного дискретного ФВР систематическая ошибка имеет вид:

$$(\delta\varphi_{\text{сист}})^2 = \frac{\pi^2}{3 \cdot 2^{2m}}. \quad (1.4)$$

Случайная фазовая ошибка зависит от конкретного способа выполнения ФВР, т.е. его схемы, конструкции и технологии. При этом, для каждого ФВР можно выбрать ряд значимых параметров, разброс которых определяет случайную фазовую ошибку. Наибольшее влияние на величину случайной фазовой ошибки оказывает разброс емкости рpn-диодов, разброс диэлектрической проницаемости подложки, а также разброс электрической длины линии передачи [23, 24]. Случайная ошибка ФВР определяется формулой:

$$(\delta\varphi_{\text{сл}})^2 = \frac{4\pi^2 q^2}{3}, \quad (1.5)$$

где q – весовой коэффициент.

Полная фазовая ошибка $\delta\varphi_{\Sigma}$ определяется суммой систематической $\delta\varphi_{\text{сист}}$ и случайной $\delta\varphi_{\text{сл}}$:

$$\delta\varphi_{\Sigma} = \sqrt{(\delta\varphi_{\text{сист}})^2 + (\delta\varphi_{\text{сл}})^2}. \quad (1.6)$$

Из формул (1.4) и (1.5) легко видеть, что систематическая ошибка быстро уменьшается с увеличением числа разрядов, а случайная ошибка, определяемая главным образом старшими разрядами ФВР, может быть достаточно большой и определять полную ошибку.

Выводы по разделу один

В данной главе был проведен библиографический обзор научной литературы, касающийся проектирования ФВР и их использования в составе ФАР.

В ходе анализа литературы было установлено, что существует много реализаций конструкции ФВР. Для проектирования ФАР, в зависимости от точности задания направления главного луча, могут применяться ФВР с непрерывным или дискретным поворотом фазы. Среди дискретных ФВР наибольшую популярность получила конструкция с трехдецибельным НО и управляющими рin диодами.

Для правильной работы ФВР особое внимание следует уделить вопросу, касающемуся выбора переключателя мощности – рin-диода. Установлено, что рin-диод может вносить существенный вклад в поворот фазы проходящей волны, которая зависит от индуктивности его выводов и емкости корпуса. Для уменьшения влияния рin-диода на поворот фазы используется подключение дополнительных подстроечных шлейфов и индуктивностей.

Систематические и случайные фазовые ошибки ФВР могут оказывают влияние на диаграмму направленности ФАР. Уменьшения уровня систематических ошибок можно добиться увеличением числа разрядов ФВР. Случайные ошибки устранить невозможно.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		25

2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2.1. Основные понятия моделирования

Под процессом моделирование можно понимать замещение исследуемого объекта (оригинала) его условным образом, описанием или другим объектом, именуемым моделью и обеспечивающим адекватное с оригиналом поведение в рамках некоторых допущений и приемлемых погрешностей.

В зависимости от способа реализации все модели можно разделить на два обширных класса: физические модели и математические модели. Физические модели предполагают, как правило, реальное воплощение тех физических свойств оригинала, которые интересуют исследователя. Под физическим моделированием понимается исследование объектов и явлений на физических моделях, когда изучаемый процесс воспроизводят с сохранением его физической природы или используют другое физическое явление, аналогичное изучаемому [25, 26]. Математические модели представляют собой формализованные описания объекта или системы с помощью некоторого абстрактного языка, например, в виде совокупности математических соотношений или схемы алгоритма. Если математическая модель служит для имитации поведения какого-либо реального объекта во времени, то она называется имитационной моделью.

Явления, системы и их модели могут быть нестационарными и стационарными. Нестационарные модели характеризуются зависимостью их параметров от времени. У стационарных моделей такой зависимости нет.

Одним из классификационных признаков моделируемой системы является мощность множества состояний моделируемой системы. По этому признаку системы делят на статические и динамические. Система называется статической, если множество ее состояний содержит один элемент. Если состояний больше одного, или они могут изменяться во времени, система

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		26

называется динамической. Процесс смены состояний называется движением системы.

Динамические системы могут обладать дискретным или непрерывным множеством состояний. Динамические системы с дискретным множеством состояний характеризуются тем, что в любой момент времени можно однозначно определить, в каком именно состоянии находится система. Если это определить невозможно, то система относится к системе с непрерывным множеством состояний

Модели обладают рядом свойств, от которых зависит успех их применения в практике моделирования. Наиболее важными являются такие характеристики, как адекватность, степень сложности и предсказательность. Адекватность характеризует степень соответствия модели исследуемому реальному объекту. Степень сложности отображает количество свойств объекта, которые описывает модель (чем больше свойств, тем сложнее объект). Предсказательность – это способность модели дать новые знания об исследуемом объекте, спрогнозировать его поведение или свойства. Также необходимо учитывать трудоемкость разработки модели – она должна быть приемлемой для имеющегося времени и программных средств.

2.2. Технологии моделирования

Одним из самых распространенных подходов моделирования на сегодняшний день является математическое моделирование с применением электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Такой подход называется комплексным моделированием. Общая тенденция такого моделирования заключается в уменьшении времени моделирования, а также в осуществлении исследований в реальном времени.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						27
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Технология моделирования предполагает выполнение следующих действий:

- 1) постановка цели моделирования;
- 2) проектирование концептуальной модели;
- 3) формализация модели;
- 4) программная реализация модели;
- 5) планирование экспериментов;
- 6) осуществление плана эксперимента;
- 7) анализ результатов моделирования.

При построении моделей используется системный подход, представляющий собой методологию решения сложных задач, в основе которой лежит рассмотрение объекта как системы, функционирующей в некоторой среде.

Если моделируемый объект является достаточно сложным, то он может быть разделен на подсистемы, представляющие собой части объекта, удовлетворяющие следующим свойствам [27]:

- 1) каждая подсистема является функционально независимой частью объекта. Подсистемы связаны между собой и могут обмениваться информацией друг с другом;
- 2) каждая подсистема может обладать уникальными свойствами, которые не совпадают со свойствами остальной системы;
- 3) каждая из подсистем обладает свойством делимости до уровня элементов.

В целом, систему определяется как представление объекта в виде набора подсистем, элементов и связей между ними.

На этапе программной реализации модели и составления плана экспериментов необходимо определить методы решения задач моделирования.

Существуют три основные группы методов:

- 1) графические методы. Данные методы позволяют проводить оценочные суждения, основываясь на построении и анализе графиков;

- 2) аналитические методы. Для оценочного метода необходимо получить строгое решение корректно поставленной математической задачи в виде аналитического выражения. Такой метод пригоден только для узкого круга задач;
- 3) численные методы. Данный тип методов основывается на применении различных алгоритмов численного приближения. Чаще всего данные методы применяются для решения задач, описываемых в виде дифференциальных уравнений в частных производных, где решения не существуют в виде элементарных функций.

Любая математическая модель обладает некоторой погрешностью решения. Существует множество причин погрешностей решения. Среди основных можно выделить следующие: погрешность модели; погрешность измерений; погрешность метода; вычислительная погрешность.

Погрешность модели возникает из-за того, что математическая модель не точным описанием реального процесса или объекта, а лишь некоторым его приближением. Погрешность измерений возникает в следствие того, что исходные данные являются неточными и представляют собой результаты экспериментов. Погрешность метода является следствием того, что для решения реальных задач очень часто используются приближенные методы решения. Вычислительная погрешность заключается в том, что при выполнении различных операций, ЭВМ осуществляет округления.

При проектировании модели необходимо проводить промежуточный контроль правильной работы модели. Существует множество способов контроля. Одним из них является анализ размерности. Суть контроля заключается в том, что физические размерности взаимодействующих объектов модели должны быть согласованы между собой. Другой способ заключается в оценке порядка и характера зависимости какой-либо величины. При этом величины малого порядка могут быть исключены из анализа как несущественные, что часто способствует упрощению модели и ее оптимизации.

					<i>Лист</i>
					<i>29</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>	

11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ

Следует проводить регулярное сравнение экспериментальных данных и данных, полученных в результате моделирования. Также необходимо проводить исследование и оценку предельных случаев. Результаты моделирования в предельных значениях не должны противоречить физическому смыслу моделируемого объекта.

Математическая задача называется корректной, если она удовлетворяет трем требованиям:

- 1) решение задачи существует при любых входных данных;
- 2) решение задачи единственно;
- 3) решение задачи непрерывно зависит от входных данных, но при этом может обладать устойчивостью по отношению к малым возмущениям входных данных.

2.3. Моделирование методом волновых матриц

Существенным недостатком матриц классической теории цепей, таких как матрицы сопротивлений $[Z]$, проводимостей $[Y]$ и передачи $[A]$, является невозможность померить экспериментально параметры этих матриц. В технике СВЧ измеряемыми величинами являются не сопротивления и проводимости, а комплексные коэффициенты отражения и передачи. Для их характеристики вводятся волновые матрицы рассеяния $[S]$ и матрицы передачи $[T]$ [28].

Основным методом расчета волновых матриц многополюсников в диапазоне СВЧ является метод декомпозиции [28, 29]. Суть данного метода заключается в том, что исходную схему многополюсника сложной структуры необходимо разбить на совокупность более простых блоков, для которых матрицы параметров заранее известны или легко вычисляются. Примером такого подхода, существенно облегчающего процесс вычислений, является представление исходной схемы многополюсника в виде каскадного соединения многополюсников. В таком случае матрица передачи исходного

											Лист
											30
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата							

11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ

многополюсника определяется как произведение матриц передачи объединяемых многополюсников. В случае необходимости, от матрицы передачи можно легко перейти к матрице рассеяния по известным соотношениям [28].

Таким образом, математическую модель СВЧ-устройства можно определить как систему алгебраических уравнений, которые связывают величины падающих и отраженных волн на выходе многополюсника.

									<i>Лист</i>
									31
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>	<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>				

Выводы по разделу два

В данном разделе был проведен анализ основных принципов моделирования. Установлен порядок действий, который необходимо проделать для построения модели.

В ходе анализа было установлено, что разрабатываемая модель будет относиться к типу математической динамической модели. Методы моделирования будут аналитические и графические. Выбор аналитического метода обусловлен тем, что для моделирования устройств СВЧ существует теория волновых матриц, которая хорошо изучена и обладает важным свойством декомпозиции, что позволят моделировать сложные системы с большим количеством внутренних взаимосвязей. Возможность построения различных графиков зависимостей и диаграмм направленности позволяет использовать графический метод анализа результатов моделирования в качестве основного.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						32
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

3. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕКУЩЕГО ЦИКЛА

3.1. Обзор технологии визуального-ориентированного программирования

Визуально-ориентированное программирование – это технология создания программ для ЭВМ, которая заключается в манипулировании графическими объектами вместо написания текста программы. При этом существует возможность комбинации визуально-ориентированного и объектно-ориентированного программирования. В отличие от языков низкого, среднего и высокого уровня, где программирование носит линейный, последовательный характер, визуальное программирование оперирует разветвленными в пространстве рабочей среды структурами типа блок-схем. Элементами блок-схем являются заранее разработанные подпрограммы и функции с унифицированным автоматическим интерфейсом. При необходимости, программист можем создавать собственные блок-схемы с уникальными свойствами. Главное преимущество визуального программирования заключается в создании программ на уровне алгоритмов, а не программного кода.

Визуально-ориентированное программирование является четвертым по счету поколением языков программирования. Основным отличием от языков программирования третьего поколения, является наличие событийной парадигмы. Суть данной парадигмы заключается в том, что выполнение программы происходит не от начала входа данных до их выхода, а блоками кода, которые запускаются в результате некоторого инициирующего события и заканчиваются либо новым внешним событием, либо внутренним. Отсюда следует, что программа, написанной в визуальной среде программирования имеет характер разветвлённой цепи программных модулей, последовательность выполнения которых определяется внешним событием. Данная парадигма хорошо сочетается с работой современного программного обеспечения, которое

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						33
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

осуществляет взаимодействие с другими программами и человеком интерактивным образом.

3.2. Обзор рынка технологий визуально-ориентированного программирования

На сегодняшний день существует множество сред разработки, базирующихся на принципах визуально-ориентированного программирования. Наиболее популярными из них являются MATLAB Simulink, LabVIEW, Simintech и VisSim. Существуют и другие среды разработки с наличием технологии визуально-ориентированного программирования, но их распространение не столь велико.

Среда разработки MATLAB была создана корпорацией The MathWorks в 1984 году. Популярность MATLAB в области инженерных вычислений обусловлена ориентацией на матричные вычисления с программной реализацией параллельных вычислений и упрощенными способами задания циклов. Среда разработки MATLAB сочетает в себе средства работы с многомерными массивами, большими матрицами и разнообразными типами данных. Расширение Simulink, обеспечивает блочное имитационное моделирование различных систем и устройств с применением современной технологии визуально-ориентированного программирования [30].

LabVIEW – это среда разработки для выполнения программ, написанных на графическом языке программирования «G», которая была разработана фирмой National Instruments в 1986 году. Данный язык программирования был основан на архитектуре потоков данных. Последовательность выполнения операторов в таких языках определяется не порядком их следования, а наличием данных на входах этих операторов. Операторы, не связанные по данным, выполняются параллельно в произвольном порядке. Идеологически LabVIEW

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						34
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

ориентирована на решение задач, связанных с обработкой данных и с автоматизацией технических процессов и научных исследований.

VisSim – визуальный язык программирования, разработанный в 1989 году компанией Visual Solutions. Данный язык предназначен для моделирования динамических систем и разработки программ для встроженных микропроцессоров. Программная среда VisSim также широко применяется в разработке систем управления и цифровой обработки сигналов. Среди инструментов проектирования имеются блоки для арифметики, булевых и трансцендентных функций, а также цифровые фильтры, передаточные функции. VisSim находит свое применение в моделировании аэрокосмических, биологическая, электрических систем. Есть возможность анализа тепловых процессов в различных устройствах.

SimInTech – система автоматизированного проектирования логико-динамических систем. Описание входных и выходных соотношений осуществляется в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений. SimInTech наиболее часто используется при проектировании алгоритмов управления, их отладки. Также присутствует возможность генерации исходного кода на языке Си для дальнейшего применения на программируемых контроллерах.

3.3. Формулировка требований к среде разработки

Перечисленные в предыдущем подразделе среды разработки могут быть использованы для динамического моделирования СВЧ устройств. Для выбора конкретной среды необходимо ввести дополнительные критерии.

В качестве дополнительных критериев для среды разработки можно выделить следующие:

1) Сравнительная пригодность языка программирования для данной задачи;

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						35
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

- 2) Наличие набора инструментов для проведения инженерных расчетов;
- 3) Поддержка аппаратной реализации;
- 4) Возможность создания систем реального времени;
- 5) Удобный графический интерфейс.

Перечисленным выше критериям наиболее полным образом соответствует среда разработки MATLAB с расширением Simulink. Дополнительным преимуществом данной среды разработки можно выделить возможность генерации кода C/C++ из программного кода MATLAB, что позволяет интегрировать разработанные программные продукты на различные микропроцессорные системы. Расширение Simulink с дополнением Simulink Design Verifier позволяет проводить верификацию разработанного программного продукта согласно установленным требованиям. Также, в программе подготовки специалистов кафедры КиПР присутствуют дисциплины, в которых проводится изучение среды разработки MATLAB и демонстрируются различные возможности применения данного языка для решения инженерных и исследовательских задач.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						36
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Выводы по разделу три

В данном разделе был произведен обзор технологии визуально-ориентированного программирования, а также самых популярных сред разработки, которые поддерживают данную технологию.

В ходе рассмотрения различных сред разработки, было установлено, что наиболее подходящей средой разработки, удовлетворяющей всем поставленным требованиям, является программный комплекс MATLAB с расширением Simulink.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		37

4. АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КОММУТИРУЕМЫХ СВЧ УСТРОЙСТВ

4.1. Основные проблемы и постановка задачи

Разрабатываемое устройство является блочным дискретным ФВР, который должен производить поворот фазы с шагом в 22.5° в частотном диапазоне 0,64-0,96 ГГц. ФВР должен обладать 4 разрядами на 22.5° , 45° , 90° , 180° . Такой набор ФВР дает возможность реализовать модуль с выбранным дискретным шагом.

Для переключения мощности, проходящей по СВЧ тракту, используются коммутационные рpn-диоды. Эффект переключения достигается за счет изменения сопротивления диода при подаче на него прямого и обратного напряжений [31]. Каждый разряд ФВР имеет два рpn-диода, которые, в зависимости от управляющего сигнала, могут находиться в двух состояниях: открытом и закрытом (1 – диод открыт, 0 – диод закрыт).

Таким образом один разряд ФВР может находиться в 4 различных состояниях: оба диода открыты; оба диода закрыты; правый диод закрыт, левый открыт; левый диод закрыт, правый открыт. Комбинируя этот набор с учетом различных состояний рpn-диодов можно получить значения 256 различных конфигураций ФВР.

4.2. Моделирование дискретного ФВР

На начальном этапе моделирования необходимо составить функциональную схему ФВР. Количество фазовых состояний и величина дискрета фазы являются определяющими параметрами при проектировании схемы ФВР. В случае, если разность в двух состояниях ФВР разность фаз превышает 90° , то для уменьшения потерь на переотражения используются мостовые схемы [32, 33].

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						38
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Электрическая функциональная схема одного разряда моделируемого ФВР без элементов цепей подачи управляющего напряжения показана на рисунке 4.1.

Рисунок 4.1 – Схема функциональная одного разряда ФВР:
1 – 3 дБ НО; 2 – одноступенчатые отражательные ФВР

ФВР состоит из 3 дБ двухшлейфного НО и двух одинаковых одноступенчатых отражательных ФВР. Каждый отражательный ФВР выполнен на рiп-диоде, который, в зависимости от управляющего сигнала, может находиться в закрытом или открытом состоянии. Мощность, поступающая на вход ФВР (плечо 1) делится пополам между плечами 3 и 4, в которые включены отражательные ФВР, отражается от них и поступает на выход (плечо 2). При переходе рiп-диода из закрытого состояния к открытому происходит изменение фазы отраженного сигнала за счет прохождения шлейфа, подключенного к диоду.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						39
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Запишем матрицу рассеяния трехдецибельного НО:

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & i \\ 0 & 0 & i & 1 \\ 1 & i & 0 & 0 \\ i & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Обозначим $S_{\alpha\beta} = -\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}$, $S_{\beta\alpha} = -\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}$.

Система из двух шлейфов длинами l_1 , l_2 описывается матрицей рассеяния [34]:

$$S_{\beta\beta} = \begin{bmatrix} e^{-i2\theta_1} & 0 \\ 0 & e^{-i2\theta_2} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

где $\theta_i = kl = \frac{2\pi}{\lambda} l_i$ – поворот фазы отраженной волны для i -го шлейфа.

Тогда матрица рассеяния ФВР будет иметь вид:

$$S_{\alpha\alpha} = S_{\alpha\beta} S_{\beta\beta} S_{\beta\alpha} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e^{-i2\theta_1} - e^{-i2\theta_2} & i(e^{-i2\theta_1} + e^{-i2\theta_2}) \\ i(e^{-i2\theta_1} + e^{-i2\theta_2}) & e^{-i2\theta_2} - e^{-i2\theta_1} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Будем рассматривать ситуацию, когда длины шлейфов совпадают $l_1 = l_2 = l_{ш}$, соответственно $\theta_1 = \theta_2 = \theta$.

Так как диоды могут быть в открытом или закрытом состоянии, то ФВР может иметь 4 различные конфигурации: когда оба диода открыты, когда оба диода закрыты, когда левый диод открыт, а правый открыт и когда правый диод открыт, а левый закрыт. Матрица рассеяния для каждой конфигурации ФВР будет иметь свой вид.

В случае, когда оба диода открыты, матрица рассеяния будет иметь вид:

$$S_{\alpha\alpha}^I = \begin{bmatrix} 0 & ie^{-i2\theta} \\ ie^{-i2\theta} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

В случае, когда оба диода закрыты, матрица рассеяния будет имеет вид:

$$S_{\alpha\alpha}^{II} = \begin{bmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Из формулы (4.5) видно, что в случае, когда оба диода закрыты, поворот фазы будет равен 90° . Данный поворот возникает за счет НО в составе ФВР.

В случае, когда левый диод закрыт, а правый открыт, матрица рассеяния будет иметь вид:

$$S_{\alpha\alpha}^{III} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 - e^{-i2\theta} & i(1 + e^{-i2\theta}) \\ i(1 + e^{-i2\theta}) & e^{-i2\theta} - 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

В случае, когда правый диод закрыт, а левый открыт, матрица рассеяния будет иметь вид:

$$S_{\alpha\alpha}^{IV} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e^{-i2\theta} - 1 & i(1 + e^{-i2\theta}) \\ i(1 + e^{-i2\theta}) & 1 - e^{-i2\theta} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Для того, чтобы ФВР обеспечивал повороты фазы от 0° до 360° с дискретом $22,5^\circ$ проектируется схема блочного ФВР в виде каскадного соединения четырех одноразрядных ФВР. Функциональная схема блочного ФВР приведена на рисунке 4.2. Каждый ФВР обеспечивает поворот фазы на заданный угол в зависимости от длины коммутируемого шлейфа. Для каждого ФВР длины шлейфов подобраны таким образом, чтобы обеспечивать поворот фазы на углы $22,5^\circ$, 45° , 90° и 180° .

Каскадный способ построения ФВР позволяет осуществить отдельное проектирование и оптимизацию каскадов СВЧ устройства. Для передачи СВЧ сигнала от одного каскада к другому используются разделительные конденсаторы C_p .

						11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			41

Рисунок 4.2 – Схема каскадного соединения четырех ФВР

Для того, чтобы получить матрицу рассеяния каскадного соединения четырех ФВР, необходимо перейти от матриц рассеяния к матрицам передачи по известным формулам [35]. Далее полученные матрицы передачи перемножаются между собой и результирующая матрица передачи переводится обратно к матрице рассеяния, для возможности удобного анализа ФЧХ и АЧХ.

Для расчета длин коммутируемых шлейфов ФВР рассмотрим элемент матрицы рассеяния $S_{12} = e^{i(\frac{\pi}{2}-2\theta)}$ матрицы $S_{\alpha\alpha}^I$. Приравнявая фазу $\frac{\pi}{2} - 2\theta$ значениям $\pi, \pi/2, \pi/4$ и $\pi/8$, получим необходимую длину шлейфа для каждого разряда ФВР. Для разряда на $22,5^\circ$ $l_{ш} = \frac{3\lambda}{32}$; для разряда на 45° $l_{ш} = \frac{\lambda}{16}$; для разряда на 90° $l_{ш} = \frac{\lambda}{2}$; для разряда на 180° $l_{ш} = \frac{3\lambda}{8}$.

Модель Simulink описанного ФВР представлена в приложении А. Данная модель состоит из 4 вариативных подсистем (Variant subsystem), каждая из которых отвечает за определенный разряд ФВР. В каждой вариативной подсистеме находится 4 обычные подсистемы, в которых реализованы матрица рассеяния $S_{\alpha\alpha}^I, S_{\alpha\alpha}^{II}, S_{\alpha\alpha}^{III}$ и $S_{\alpha\alpha}^{IV}$. Далее, полученные матрицы рассеяния от каждой вариативной подсистемы поступают в блок MATLAB-функции «S to T», которая пересчитывает матрицы рассеяния в матрицы проводимости. Программный код данной функции приведен в листинге Е.5 приложения Е. После расчета матрицы передачи перемножаются между собой, и результирующая матрица передачи

пересчитывается обратно в матрицу рассеяния с помощью MATLAB-функции «T to S». Программный код данной функции приведен в листинге Е.6 приложения Е. После получения результирующей матрицы рассеяния каждый ее элемент поступает на блок «S to Ampl and Phase», который рассчитывает амплитуду и фазу элемента матрицы рассеяния. Схема Simulink вариативной подсистемы приведена в приложении Б. Схемы Simulink для подсистем с матрицами рассеяния приведены в приложениях В-Д. Управление вариативной подсистемой осуществляется с помощью двузначного кода из нулей и единиц. Первый символ кода определяет состояние левого диода ФВР, второй символ определяет состояние правого диода ФВР. Единица означает, что диод открыт, а ноль – что диод закрыт. Таким образом, управление четырьмя вариативными подсистемами осуществляется восьмизначным кодом из нулей и единиц.

Для моделирования матриц рассеяния ФВР использовались базовые элементы блоков математических операций (Math operation), различные подсистемы (Subsystems) и MATLAB-функции (MATLAB function). Задание конфигурации ФВР и управление моделью осуществлялось с помощью скрипт-функций (Script function). Программные коды скрипт-функций, а также MATLAB-функций приведены в приложении Е.

4.3. Моделирование вносимого импеданса pin-диода

Для моделирования вносимого импеданса pin-диода использовалась следующая эквивалентная схема (рисунок 4.3) [36]:

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ	Лист 43

Рисунок 4.3 – Эквивалентная схема pin-диода

Коэффициент отражения диода рассчитывался по формуле:

$$\Gamma_d = \frac{R_d + jX_d + jz_0 \operatorname{tg}(\beta l_{\text{ш}}) - z_0}{R_d + jX_d + jz_0 \operatorname{tg}(\beta l_{\text{ш}}) + z_0}, \quad (4.8)$$

где z_0 – волновое сопротивление, $l_{\text{ш}}$ – длина коммутируемого шлейфа, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, λ – длина волны.

При этом для открытого диода:

$$R_d = \frac{R_{\text{от}}}{(1 - \omega^2 L_d C_d)^2}, \quad (4.9)$$

где $R_{\text{от}}$ – сопротивление открытого диода, $\omega = 2\pi$ – круговая частота, L_d – индуктивность корпуса диода, C_d – емкость корпуса диода.

$$X_d = \omega L_B + \frac{\omega L_d}{1 - \omega^2 L_d C_d}, \quad (4.10)$$

где L_B – индуктивность внешних выводов диода.

Для закрытого диода:

									Лист
									44
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					

11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ

$$R_d = \frac{R_{\text{зак}}}{\left(1 - \omega C_d \left(\omega L_d - \frac{1}{\omega C_j}\right)\right)^2}, \quad (4.11)$$

где $R_{\text{зак}}$ – сопротивление закрытого диода, C_j – емкость перехода закрытого диода.

$$X_d = \omega L_B + \frac{\omega L_d - \frac{1}{\omega C_j}}{1 - \omega C_d \left(\omega L_d - \frac{1}{\omega C_j}\right)} \quad (4.12)$$

где L_B – индуктивность внешних выводов диода.

Фазовый сдвиг, вносимый диодом, вычислялся по формуле:

$$\Delta\varphi = 2\arctg(\omega Z_c C_d) \quad (4.13)$$

где Z_c – волновое сопротивление коммутируемого шлейфа, C_d – емкость диода.

Параметр качества диода вычисляется по формуле:

$$K_d = \frac{R_{d \text{ зак}} + jX_{d \text{ зак}}}{R_{d \text{ от}} + jX_{d \text{ от}}} \quad (4.14)$$

Модель Simulink pin-диода представлена в приложении Ж. Данная модель состоит из подсистемы Phase_diode, которая рассчитывает поворот фазы, вносимого диодом, а также MATLAB-функции diode, которая рассчитывает коэффициент отражения диода. Программный код MATLAB-функции diode приведен в приложении Ж.

Для моделирования был взят диод со следующими характеристиками (Таблица 1):

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						45
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Таблица 1. Характеристики моделируемого pin-диода

Название	Величина
Волновое сопротивление линии, Ом	50
Сопротивление открытого диода, Ом	1
Сопротивление закрытого диода, Ом	6
Индуктивность корпуса, нГн	1
Емкость корпуса, пФ	0.2
Индуктивность внешних выводов, нГн	1
Емкость закрытого перехода, пФ	0.1

4.4 Моделирование ФАР

Для моделирования ФАР была взята дискретная система из 32 одинаково ориентированных в пространстве равноамплитудных синфазных излучателей, расположенных эквидистантно вдоль прямой линии. В качестве элементарных излучателей были взяты вибраторы с рефлекторами с вертикальной поляризацией. Высота над рефлектором равна $\lambda/4$, длина плеча вибратора равна $\lambda/4$. Рабочая частота равна 800 МГц. На излучатели поступает сигнал с линейным фазовым распределением в диапазоне от 0 до 720° с дискретом 22.5° .

Расстояние между излучателями необходимо выбрать таким образом, чтобы минимизировать проявление дифракционных лепестков у множителя решетки. Существует следующая оценочная формула для такого расстояния [37]:

$$N_{\text{мин}} \leq \left(\frac{d}{\lambda}\right) + \frac{1}{2}, \quad (4.15)$$

где $N_{\text{мин}}$ – количество минимумов множителя решетки. Согласно расчетам [37], при расстоянии между излучателями $d = 0.5\lambda$, множитель решетки не имеет боковых лепестков, при $d = 0.75\lambda$ множитель решетки имеет два боковых лепестка, при $d = 2\lambda$ множитель решетки имеет четыре боковых лепестка. Возьмем расстояние между излучателями равное 0.65λ .

Множитель решетки при синфазном питании элементов имеет вид:

$$F_{\Sigma}(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} Nd \sin(\theta)\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} d \sin(\theta)\right)} \quad (4.16)$$

ДН ФАР определяется как произведение ДН одиночного излучателя на множитель решетки [31]:

$$E = Af_0(\theta) \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} Nd \sin(\theta)\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} d \sin(\theta)\right)}, \quad (4.17)$$

где A – амплитудный множитель, $f_0(\theta)$ – ДН элементарного излучателя, d – расстояние между излучателями, N – число излучателей.

Изображение ДН элементарного излучателя приведена на рисунке 4.4.

Рисунок 4.4 – ДН излучателя вертикальной поляризации с рефлектором

									Лист
									47
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					

11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ

Программный код MATLAB-функции расчета ДН ФАР приведена в приложении И. В данной программе линейное фазовое распределение формируется с помощью цикла со счетчиком «for», где в качестве переменной взят номер излучателя. На каждой итерации осуществляется расчет фазы и амплитуды модели ФВР. Задавая различные конфигурации ФВР, можно моделировать ситуации, когда один или несколько диодов в составе ФВР отказали. В таком случае амплитудное и фазовое распределение нарушается, что влечет за собой изменение ДН. Сравнивая ДН с различными амплитудными и фазовыми распределениями можно анализировать влияние отказов ФВР на ДН ФАР.

					<i>Лист</i>
					11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>	48

Выводы по разделу четыре

В данном разделе были построены математические модели ФВР, рin-диода и ФАР.

Для ФВР была построена каскадная схема из четырех блоков. Каждый блок представляет собой ФВР из 3 дБ двухшлейфного НО и двух одинаковых одноступенчатых отражательных ФВР. Приведен расчет длин коммутируемых шлейфов, необходимых для поворота фазы на заданный угол. Также был произведен формульный расчет матриц рассеяния для случаев, когда управляющие рin-диоды работают в открытом или закрытом состояниях.

Для управляющего рin-диода была составлена эквивалентная схема, а также приведены формулы, по которым осуществлялся расчет коэффициента отражения и фазового сдвига, вносимого диодом.

В качестве моделируемой ФАР была взята дискретная система из 32 одинаково ориентированных в пространстве равноамплитудных синфазных излучателей, расположенных эквидистантно вдоль прямой линии. Каждый излучатель представляет собой вертикальный вибратор с рефлектором.

Данные математические модели были реализованы в виде программы в среде разработки MATLAB с расширением Simulink.

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>	<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i> 49

5. РАСЧЕТ КОММУТИРУЕМЫХ СВЧ УСТРОЙСТВ

5.1. Расчет характеристик рin-диода

Для анализа влияния рin-диодов в составе ФВР на ФЧХ и АЧХ, необходимо рассмотреть коэффициент отражения открытого и закрытого рin-диода в диапазоне частот 0,64-0,96 ГГц. Согласно формуле (4.8) коэффициент отражения рin-диода зависит от длины коммутируемого с диодом шлейфа. Соответственно, для блоков ФВР с различными дискретами фазы, коэффициент отражения рin-диода будет различаться.

На рисунке 5.1 представлены графики коэффициентов отражения для открытого рin-диода со следующими длинами коммутируемых шлейфов: $l_{ш} = \frac{3\lambda}{8}$, $l_{ш} = \frac{\lambda}{2}$, $l_{ш} = \frac{3\lambda}{32}$, $l_{ш} = \frac{\lambda}{16}$. Данные длины шлейфов используются в блоках ФВР с дискретом фазы на угол π , $\pi/2$, $\pi/8$, $\pi/16$.

										Лист
										50
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ					

Рисунок 5.1 – Графики коэффициентов отражения открытого pin-диода от частоты в случае, когда длина шлейфа отражательного ФВР $l_{ш} = \frac{3\lambda}{8}$ (синяя линия), $l_{ш} = \frac{\lambda}{2}$ (красная линия), $l_{ш} = \frac{\lambda}{16}$ (желтая линия), $l_{ш} = \frac{3\lambda}{32}$ (фиолетовая линия)

Из рисунка 5.1 видно, что в зависимости от длины шлейфа, с которым коммутирует pin-диод, коэффициент отражения меняется. С увеличением длины шлейфа коэффициент отражения увеличивается. Для длин шлейфов, равных 0.5λ , 0.0625λ и 0.09375λ с увеличением частоты коэффициент отражения линейно убывает, а для длины шлейфа, равного 0.375λ , коэффициент отражения возрастает с увеличением частоты. Наклон коэффициента отражения для всех четырех случаев примерно одинаков и равен 0.001 на 100 МГц. Для более детального анализа построим графики зависимости коэффициента отражения pin-диода для длин шлейфов от 0.4λ до 0.45λ с интервалом 0.1λ .

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		51

На рисунке 5.2 изображены графики коэффициента отражения открытого рin-диода от частоты для длин шлейфов в промежутке от 0.4λ до 0.45λ .

Рисунок 5.2 – Графики коэффициентов отражения открытого рin-диода от частоты для различных длин шлейфов отражательного ФВР

Из рисунка 5.2 можно сделать вывод, что коэффициент отражения открытого рin-диода для длин шлейфов в диапазоне от 0.4λ до 0.45λ приобретает нелинейный характер. При этом, существует некоторая длина шлейфа, достигая которой, зависимость коэффициента отражения открытого рin-диода от частоты меняет свой знак. Коэффициент отражения для данных длин шлейфов не превышает значения 0.02.

Отметим, что на центральной частоте $f_0 = 800$ МГц для длины шлейфа равной 0.09375λ , коэффициент отражения равен 0.0083; для длины шлейфа равной 0.0625λ , коэффициент отражения равен 0.0108; для длины шлейфа

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		52

равной 0.5λ , коэффициент отражения равен 0.0154; для длины шлейфа равной 0.375λ , коэффициент отражения равен 0.0165;

Рассмотрим поведение коэффициента отражения для закрытого рin-диода. На рисунке 5.3 показаны графики зависимости коэффициента отражения закрытого рin-диода от частоты для разных длин шлейфов.

Рисунок 5.3 – Графики коэффициентов отражения для закрытого диода в случае, когда длина шлейфа отражательного ФВР $l_{ш} = \frac{3\lambda}{8}$ (синяя линия), $l_{ш} = \frac{\lambda}{2}$ (красная линия), $l_{ш} = \frac{\lambda}{16}$ (желтая линия), $l_{ш} = \frac{3\lambda}{32}$ (фиолетовая линия)

На рисунке 5.3 видно, что в случае закрытого рin-диода коэффициент отражения изменяется нелинейным образом, однако очень незначительно. Для

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		53

всех длин коммутируемых шлейфов коэффициент отражения закрытого рin-диода равен примерно единице.

График зависимости параметра качества диода от частоты показан на рисунке 5.4.

Рисунок 5.4 – График параметра качества диода в случае, когда длина шлейфа отражательного ФВР $l_{ш} = \frac{3\lambda}{8}$, $l_{ш} = \frac{\lambda}{2}$, $l_{ш} = \frac{\lambda}{16}$, $l_{ш} = \frac{3\lambda}{32}$ (линии совпадают)

На рисунке 5.4 видно, что параметр качества рin-диода не зависит от длины шлейфа отражательного ФВР, с которым он коммутирует. На центральной частоте $f_0 = 800$ МГц параметр качества диода равен 23.8.

									Лист
									54
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ				

5.2. Расчет дискретного ФВР, в условиях исправности рiп-диодов

Под ФВР с исправными рiп-диодами подразумеваются конфигурации ФВР, при котором оба диода каждого разряда ФВР либо открыты, либо закрыты (диоды работают без отказов).

Для анализа зависимости ФЧХ для каждого разряда ФВР были смоделированы следующие конфигурации ФВР: 1) когда открыты рiп-диоды только для разряда ФВР на угол π ; 2) когда открыты рiп-диоды только для разряда ФВР на угол $\pi/2$; 3) когда открыты рiп-диоды только для разряда ФВР на угол $\pi/4$; 4) когда открыты рiп-диоды только для разряда ФВР на угол $\pi/8$. Полученные графики приведены на рисунке 5.5.

Рисунок 5.5 – Графики ФЧХ для разрядов ФВР на угол π (синяя линия), угол $\pi/2$ (красная линия), угол $\pi/4$ (желтая линия) и угол $\pi/8$ (фиолетовая линия)

										Лист
										55
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ					

Из рисунка 5.5 что ФЧХ для всех разрядов ФВР имеет линейную зависимость. Так как с увеличением длины коммутируемого шлейфа увеличивается вносимая ими индуктивность, то для разряда ФВР на угол $\pi/2$, где используются коммутируемые шлейфы с наибольшей длиной, наклон ФЧХ имеет наибольшую величину, равную 47° на 100 МГц. Для разрядов ФВР на углы $\pi/4$ и $\pi/8$ наклон имеет наименьшую величину, равную 9.5° и 11° на 100 МГц соответственно. Для разряда ФВР на угол π наклон равен 36° на 100 МГц. На центральной частоте $f_0 = 800$ МГц угол поворота фазы соответствует своему номинальному значению для всех разрядов ФВР.

Также в результате расчетов было установлено, что в отсутствии влияния индуктивности диодов амплитуда проходящего сигнала равняется единице на всем диапазоне рассматриваемых частот.

Для анализа поведения ФВР при коммутации сразу нескольких разрядов ФВР рассмотрим 4 конфигурации: 1) когда диоды разряда ФВР на угол π закрыты, остальные открыты; 2) когда диоды разряда ФВР на угол $\pi/2$ закрыты, остальные открыты; 3) когда диоды разряда ФВР на угол $\pi/4$ закрыты, остальные открыты; 4) когда диоды разряда ФВР на угол $\pi/8$ закрыты, остальные открыты.

На рисунке 5.6 представлены графики зависимости ФЧХ проходящего сигнала для перечисленных выше случаев без учета индуктивности диодов.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						56
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Рисунок 5.6 – ФЧХ для четырех различных конфигураций ФВР

На рисунке 5.6 видно, что с увеличением частоты, поворот фазы ФВР линейно убывает. Причем в зависимости от длины коммутируемого шлейфа, убывание происходит с разной скоростью. Так, когда диоды разряда ФВР на угол $\pi/2$ закрыты, а остальные открыты (красная линия), то скорость изменения фазы самая маленькая. Это объясняется тем, что в данной конфигурации ФВР задействованы шлейфы с наименьшими длинами, равными 0.0625λ .

Если для разрядов ФВР на углы $\pi/4$ и $\pi/8$ диоды закрыты, то скорость изменения фазы наиболее высокая (желтая и фиолетовая линии на рис. 6). В данном случае в повороте фазы участвуют отражательные ФВР с наибольшими длинами коммутируемых шлейфов, равными 0.5λ и 0.25λ

Таким образом, из приведенных графиков можно сделать вывод, что чем больше суммарная длина коммутируемых шлейфов в ФВР, тем выше скорость изменения фазы от частоты.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						57
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Отметим, что на центральной частоте $f_0 = 800$ МГц для вышеперечисленных случаев поворот фазы равен соответственно 157.5° , 247.5° , 292.5° и 315° .

На рисунках 5.7-5.10 приведены ФЧХ для четырех конфигураций ФВР: 1) когда открыты рип-диоды только одного разряда ФВР; 2) когда открыты рип-диоды двух разрядов ФВР; 3) когда открыты рип-диоды трех разрядов ФВР; 4) когда открыты рип-диоды четырех разрядов ФВР. Для анализа влияния индуктивности диодов на ФЧХ, приведены ФЧХ с учетом индуктивности диодов и без учета индуктивности диодов.

Рисунок 5.7 – ФЧХ для случая открытых рип-диодов разряда ФВР на угол $\pi/8$

На рисунке 5.7 видно, что с индуктивностью диода возрастает скорость изменения поворота фазы от частоты. На центральной частоте $f_0 = 800$ МГц величина отстройки фазы равна 5.75° . Наклон ФЧХ без учета индуктивности

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		58

равен 9° на 100 МГц. С учетом индуктивности наклон резко увеличивается и становится равен 31° на 100 МГц. Отсюда можно сделать вывод, что индуктивность рпн-диода оказывает серьезное влияние на ФЧХ ФВР.

Рисунок 5.8 – ФЧХ для случая открытых рпн-диодов разрядов ФВР на углы $\pi/8$ и $\pi/4$

В случае, когда открыты рпн-диоды для разрядов ФВР на угол $\pi/8$ и на угол $\pi/4$ на центральной частоте $f_0 = 800$ МГц величина отстройки фазы равна 11.51° .

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						59
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Рисунок 5.9 – ФЧХ для случая, когда открыты рpn-диоды для разрядов ФВР на угол $\pi/8$, на угол $\pi/4$ и на угол $\pi/2$

Наклон ФЧХ при коммутации трех разрядов ФВР увеличился и стал равным 122° на 100 МГц. При этом на краевых частотах ФЧХ приобретает более нелинейный характер, чем в случае, когда открыты диоды только для двух разрядов ФВР. На центральной частоте $f_0 = 800$ МГц величина отстройки фазы равна 17.25° .

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						60
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Рисунок 5.10 – График зависимости поворота фазы от частоты, когда открыты рin-диоды для разрядов ФВР на угол $\pi/8$, на угол $\pi/4$, на угол $\pi/2$ и на угол π

В случае, когда открыты рin-диоды для разрядов ФВР на угол $\pi/8$, на угол $\pi/4$, на угол $\pi/2$ и на угол π на центральной частоте $f_0 = 800$ МГц величина отстройки фазы равна 27.9° . Наклон ФЧХ стал равным 216° на 100 МГц. Из рисунков 5.7-5.10 видно, что с увеличением количества открытых рin-диодов, участвующих в повороте фазы, влияние их индуктивности на ФЧХ растет. Для поворота фазы на угол 337.5° , величина отстройки фазы на 27.9° может оказаться неприемлемым. Для ее компенсации используется закороченный на конце индуктивный шлейф, который параллельно подключается к диоду. Корректировка индуктивности диода производится путем изменения длины шлейфа.

На рисунке 5.11 представлены графики зависимости амплитуды сигнала от частоты для четырех конфигураций ФВР: когда открыты рin-диоды только

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		61

одного разряда ФВР; когда открыты рiп-диоды двух разрядов ФВР; когда открыты рiп-диоды трех разрядов ФВР; когда открыты рiп-диоды четырех разрядов ФВР.

Рисунок 5.11 – Графики зависимости АЧХ для случаев, когда открыты рiп-диоды только одного разряда ФВР (синяя линия); когда открыты рiп-диоды двух разрядов ФВР (красная линия); когда открыты рiп-диоды трех разрядов ФВР (желтая линия); когда открыты рiп-диоды четырех разрядов ФВР (фиолетовая линия)

На рисунке 5.11 видно, что на центральной частоте $f_0 = 800$ МГц для всей четырех конфигураций ФВР амплитуда равна единице. Однако по мере отклонения частоты от центральной, амплитуда начинает нелинейно убывать. Причем при отклонении центральной частоты в сторону больших частот, убывание амплитуды происходит быстрее, чем при отклонении центральной частоты в сторону меньших частот.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						62
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Известно, что генерируемая частота генератора может иметь отклонение от первоначального значения. Характеристика стабильности частоты генератора определяется отношением $\Delta f/f$, где Δf – величина отклонения частоты, f – первоначальное значение.

На рисунках 5.12-5.15 приведены ФЧХ для разных отношений $\Delta f/f$. Для примера рассматривается конфигурация ФВР с открытыми диодами для разрядов ФВР на угол $\pi/8$, на угол $\pi/4$ и на угол $\pi/2$.

Рисунок 5.12 – График зависимости поворота фазы от частоты при $\Delta f/f=0.0063$

При соотношении $\Delta f/f=0.0063$ отклонение поворота фазы на центральной частоте от номинального значения достигает 7° .

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						63
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Рисунок 5.13 – График зависимости поворота фазы от частоты при $\Delta f/f=0.0156$

При соотношении $\Delta f/f=0.0156$ отклонение поворота фазы на центральной частоте от номинального значения достигает 15° .

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		64

Рисунок 5.14 – График зависимости поворота фазы от частоты при $\Delta f/f=0.0313$

При соотношении $\Delta f/f=0.0313$ отклонение поворота фазы на центральной частоте от номинального значения достигает 32° .

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		65

Рисунок 5.15 – График зависимости поворота фазы от частоты при $\Delta f/f=0.0625$

На рисунках 5.12-5.15 видно, что с увеличением нестабильности частоты генератора, величина фазового шума ФВР увеличивается пропорционально. При соотношении $\Delta f/f=0.0625$ отклонение поворота фазы на центральной частоте от номинального значения может достигать 75° , что недопустимо для правильного ФВР в составе фазированных антенн.

5.3. Расчет дискретного ФВР, в условиях неисправностей pin-диодов

Под неисправностью pin-диода подразумевается ситуация, когда по каким-либо причинам pin-диод остался в закрытом состоянии при подаче управляющего напряжения.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						66
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Для анализа неисправностей рpn-диодов, рассмотрим конфигурации ФВР, при которых для каждого звена ФВР сначала неисправен левый диод, а затем правый диод.

На рисунке 5.16 представлены графики зависимости поворота фазы от частоты в условиях отказов рpn-диодов.

Рисунок 5.16 – Графики поворота фазы от частоты в условиях неисправности рpn-диодов

На рисунке 5.16 видно, что в случае неисправности диодов поворот фазы смещается от заданного значения. При этом вне зависимости от того, правый или левый диод неисправен, поворот фазы проходящей волны смещается на одну и ту же величину. Это объясняется тем, что элемент S_{21} матриц рассеяния $S_{\alpha\alpha}^{III}$ (4.6) и $S_{\alpha\alpha}^{IV}$ (4.7) имеет одинаковый вид.

Для дискрета ФВР на угол $22,5^\circ$ поворот фазы в при неисправности диода равен 148° . Для дискрета ФВР на угол 45° поворот фазы в при неисправности диода равен 130° . Для дискрета ФВР на угол 90° поворот фазы в при

									Лист
									67
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ				

неисправности диода не изменяется. Это объясняется тем, что если в формулу (4.6) или в формулу (4.7) за место θ подставить 90° , то матрица рассеяния будет иметь следующий вид:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.1)$$

что совпадает с матрицей рассеяния (4.5), которая соответствует случаю, когда оба диода закрыты.

Для дискрета ФВР на 180° поворот фазы в при неисправности диода равен 46° .

Неисправности диодов также оказывают влияние на АЧХ. На рисунке 5.17 представлены графики АЧХ в случае отказов рпн-диодов.

Рисунок 5.17 – Графики АЧХ в условиях неисправности рпн-диодов

На рисунке 5.17 видно, что так же как и для поворота фазы, амплитуда проходящей волны не зависит от того, какой диод находится в закрытом

состоянии. Зависимость амплитуды от частоты для разрядов ФВР на $22,5^\circ$ и 45° имеют линейный характер и слабо изменяются от частоты. На центральной частоте $f_0 = 800$ МГц амплитуда равна 0,54 для разряда ФВР на $22,5^\circ$ и 0,55 для разряда ФВР на 45° .

Для разряда ФВР на 90° в случае когда один диод закрыт, а другой открыт, АЧХ имеет такой же характер, как и в случае, когда оба диода открыты.

Для разряда ФВР на 180° амплитуда проходящего сигнала увеличивается с возрастанием частоты. На центральной частоте $f_0 = 800$ МГц амплитуда равна 0,707, то есть мощность проходящей волны уменьшилась ровно в два раза.

5.4 Расчет ДН ФАР для различных состояний ФВР

Расчет ДН будет производиться в декартовых координатах в линейном и логарифмическом масштабе с нормированным главным максимумом. Диапазон построения ДН будет от минус 45° до плюс 45° . В качестве исследуемых параметров будут взяты такие характеристики, как направление главного лепестка, уровень боковых лепестков и ширина главного лепестка по уровню половинной мощности.

Для анализа влияний неисправностей ФВР, которые проявляются в виде отказа одного из pin-диодов, на ДН будут рассмотрены следующие ситуации: 1) все ФВР исправны; 2) четвертый ФВР неисправен, остальные исправны; 3) четвертый и восьмой ФВР неисправны, остальные исправны; 4) четвертый, восьмой, двадцать второй ФВР неисправны, остальные исправны; 5) четвертый, восьмой, двадцать второй и двадцать седьмой ФВР неисправны, остальные исправны. Таким образом можно будет оценить, как количество неисправных ФВР влияет на ДН ФАР.

ДН для случая, когда все ФВР работают исправно приведена на рисунке 5.18

									Лист
									69
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ				

Рисунок 5.18 – ДН в линейном масштабе в случае исправных ФВР

В случае исправных ФВР направление главного лепестка составляет 5.5° . Ширина главного лепестка на уровне половинной мощности равно 2.2° . Можно сказать, что моделируемая антенна является узконаправленной. ДН в логарифмических масштабах представлена на рисунке 5.19.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						70
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Рисунок 5.19 – ДН в логарифмическом масштабе в случае исправных ФВР

Из рисунка 5.19 можно установить, что уровень боковых лепестков составляет минус 17 дБ, что является хорошим показателем для узконаправленной антенны.

Рассмотрим ситуацию, когда неисправен четвертый ФВР. ДН для данного случая приведена на рисунке 5.20.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		71

Рисунок 5.20 – ДН в линейном масштабе в случае, когда неисправен четвертый ФВР

На рисунке 5.20 видно, что ДН изменило свою структуру. Уровень боковых лепестков стал выше, а главный лепесток уже не достигает нулевого излучения. Направление главного лепестка и его ширина на уровне половинной мощности не изменилось.

ДН в логарифмических масштабах представлена на рисунке 5.21.

									<i>Лист</i>
									72
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>	<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>				

Рисунок 5.21 – ДН в логарифмическом масштабе в случае, когда неисправен четвертый ФВР

Уровень боковых лепестков стал минус 15.4 дБ, что является приемлемым результатом.

Рассмотрим ситуацию, когда неисправны четвертый и восьмой ФВР. ДН для данного случая приведена на рисунке 5.22.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		73

Рисунок 5.22 – ДН в линейном масштабе в случае, когда неисправны четвертый и восьмой ФВР

На рисунке 5.22 видно, что структура ДН изменилась: уровень дальних боковых лепестков повысился, а ближние боковые лепестки наоборот немного уменьшились. Направление главного лепестка и его ширина на уровне половинной мощности не поменялись.

На рисунке 5.23 приведен график ДН в логарифмическом масштабе.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		74

Рисунок 5.23 – ДН в логарифмическом масштабе в случае, когда неисправны четвертый и восьмой ФВР

На рисунке 5.24 приведен график ДН в линейном масштабе для случая, когда неисправны четвертый, восьмой и двадцать второй ФВР в ФАР.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		75

Рисунок 5.24 – ДН в линейном масштабе в случае, когда неисправны четвертый, восьмой и двадцать второй ФВР

На рисунке 5.24 видно, что уровень боковых лепестков в области положительных углов значительно возрос. Ширина главного лепестка на уровне половинной мощности немного увеличилась и стала равной 2.75° . Направление главного лепестка не изменилось.

На рисунке 5.25 приведена ДН для данного случая в логарифмических координатах.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						76
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Рисунок 5.25 – ДН в логарифмическом масштабе в случае, когда неисправны четвертый, восьмой и двадцать второй ФВР

Из рисунка 5.25 можно установить, что уровень боковых лепестков в области положительных углов составляет минус 9.8 дБ. Данный уровень бокового излучения уже может оказывать влияние на правильность работы позиционирования объекта и создавать дополнительные помехи.

Рассмотрим ситуацию, когда неисправны 4 ФВР в системе из 32 ФВР с излучающими элементами ФАР: четвертый, восьмой, двадцать второй и двадцать седьмой. На рисунке 5.26 приведена ДН для данного случая.

						<i>Лист</i>
					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	77
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

Рисунок 5.26 – ДН в линейном масштабе в случае, когда неисправны четвертый, восьмой, двадцать второй и двадцать седьмой ФВР

На рисунке 5.26 видно, что уровень боковых лепестков увеличился. Появился пик в районе 35° . Направление главного лепестка сместилось и стало равным 5.75° .

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		78

Рисунок 5.27 – ДН в логарифмическом масштабе в случае, когда неисправны четвертый, восьмой, двадцать второй и двадцать седьмой ФВР

Из приведенной на рисунке 5.27 ДН видно, что уровень боковых лепестков, в случае когда неисправны четыре ФВР, стал равным минус 8.13 дБ. При таком уровне велика вероятность начать фиксировать посторонние объекты.

Полученные ДН показывают, что возникновение хотя бы одного неисправного диода в составе ФВР оказывает влияние на работу всей ФАР. Неисправность четырех ФВР в системе из 32 излучателей является критичной. Таким образом, осуществление мониторинга состояния ФВР является важным аспектом, который необходимо учитывать при проектировании радиолокационных систем.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ	Лист 79

Выводы по разделу пять

В данном разделе на основе разработанных моделей ФВР и ФАР были получены характеристики pin -диода в открытом и закрытом состояниях, АЧХ и ФЧХ ФВР, а также ДН ФАР в случаях нормальной работы ФВР и в условиях неисправностей pin -диодов.

Расчет коэффициентов отражения переключающего диода показал, что в зависимости от длины коммутируемого шлейфа, коэффициент отражения открытого pin -диода меняется. Для закрытого диода коэффициент отражения слабо зависит от длины коммутируемого шлейфа и почти равен единице на всем диапазоне частот.

В зависимости от разряда ФВР, в следствии различной длины коммутируемого шлейфа, наклон ФЧХ меняется. Также установлено, что индуктивность pin -диода увеличивает величину отстройки фазы и придает нелинейность ФЧХ и АЧХ ФВР. При уменьшении стабильности частоты генератора появляется фазовый шум ФВР.

Для ФЧХ и АЧХ проходящего через ФВР сигнала отказ pin -диодов вносит существенное искажение. Причем вне зависимости от того, правый или левый диод находится в неисправном состоянии, ФЧХ и АЧХ имеют одинаковый вид.

Анализ ДН ФАР для случаев работы с неисправными pin -диодами в составе ФВР показал, что с увеличением количества ФВР с неисправными pin -диодами увеличивает уровень бокового излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была разработана модель блочного четырехразрядного ФВР с дискретом фазы 22.5° . Также была смоделирована работа ФАР в условиях неисправностей управляющих элементов – рpn-диодов, в составе фазозадающих ФВР.

Моделирование ФВР производилось методом волновых матриц рассеяния. Программная реализация модели была осуществлена с применением технологий визуально-ориентированного программирования в среде разработки MATLAB Simulink.

В результате моделирования было показано:

- 1) с увеличением длины коммутирующего шлейфа коэффициент отражения открытого рpn-диода увеличивается и начинает приобретать нелинейный характер в зависимости от частоты. Коэффициент отражения закрытого рpn-диода слабо зависит от длины коммутирующего шлейфа;
- 2) увеличение разрядности ФВР увеличивает наклон ФЧХ, но не влияет на АЧХ;
- 3) увеличение индуктивности рpn-диода увеличивает разницу угла поворота фазы от номинального значение на центральной частоте и придает нелинейный характер ФЧХ и АЧХ ФВР;
- 4) при возникновении неисправностей рpn-диодов в составе ФВР, ФЧХ и АЧХ существенно искажаются;
- 5) при работе ФВР с неисправными диодами у ДН ФАР увеличивается уровень бокового излучения. Чем больше количество ФВР с неисправными диодами, тем сильнее увеличивается уровень бокового излучения ФАР.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						81
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kumar, J., Basu, B., & Talukdar, F. A. (2019). Modeling of a PIN diode RF switch for reconfigurable antenna application. *Scientia Iranica*, 26, 1714–1723.
2. Chaouche, Y. B., Bouttout, F., Messaoudene, I., Pichon, L., Belazzoug, M., Génie, L. De, France, I. De. (2016). Design of Reconfigurable Fractal Antenna using Pin Diode Switch for Wireless Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 31–34.
3. Parners, M., & Vendik, O. (2015). P-i-N diode phase shifter in waveguide structure. *Microwave and Optical Technology Letters*, 55(11), 2562–2568.
4. Efimov, A. G., Kuptsov, E. O., Martynova, V. P., Spiridonov, A. B., & Surin, Y. V. (2018). Precision Analog-to-Digital Phase Shifter with Phase 0–360° Change of L-Range. *Proceedings of Universities. Electronics*, 23(3), 285–292.
5. Микрополосковый фазовращатель на основе МДП варакторов / Е.Н. Егоров, Л.К. Жохов, Ю.В. Лебедев и др. // Специальная электроника. Сер. 10. – 1979. – Вып. 2 (6).
6. Лепёхина Т.А., Николаев В.Н. Вопросы синхронизации активного имитатора радиомишеней для испытаний радиолокаторов с синтезированной апертурой // Проблемы разработки перспективных микрои наноэлектронных систем – 2016: сб. тр. / Под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2016. – Ч. 1. – С. 236–239.
7. Patent US 2018/0210147 A1, CPC G02B 6/124. Broadband multifunctional efficient meta - gratings based on dielectric waveguide phase shifters/ Khorasaninejad, M., Capasso, F.; Applicants and Inventors: President and fellows of Harvard college, Cambridge , MA (US). – № 15/745,925; Filed: Aug. 18, 2016; Pub. Date: Jan. 18, 2018.
8. Adam, J. D., Davis, L. E., Dionne, G. F., Schloemann, E. F., & Stitzer, S. N. (2002). Ferrite devices and materials. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3), 721–737.

					<p style="margin: 0;"><i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i></p>	<p style="margin: 0;"><i>Лист</i></p>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		82

9. Nan, C.-W., Bichurin, M. I., Dong, S., Viehland, D., & Srinivasan, G. (2008). Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions. *Journal of Applied Physics*, 103(3), 031101.
10. Xu, M., Zhao, H., Ostrikov, K., Duan, M. Y., & Xu, L. X. (2009). Effect of doping with Co and/or Cu on electronic structure and optical properties of ZnO. *Journal of Applied Physics*, 105(4), 043708.
11. Кочемасов В.Н., Майстренко А.П. СВЧ-переключатели на основе МЭМС // СВЧ-электроника. 2016., № 1 73–77.
12. Pillans B., Eshelman S., Malczewski A., Ehmke J., Goldsmith C. Ka-Band RF MEMS Phase Shifters. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*. Vol. 9. No. 12. December 1999.
13. Гарвер (1973). Широкополосные фазовращатели на полупроводниковых диодах. *Зарубежная радиоэлектроника*, 11, 97–113.
14. See, J. H., Md Arshad, M. K., & Fathil, M. F. M. (2017). ESD improvement in P-i-N diode through introducing a lighter and deeper anode junction. *International Journal of Nanoelectronics and Materials*, 10(2), 157–172.
15. Карлин, В. Э. 180-градусный СВЧ фазовращатель на микрополосковых линиях. – Препринт ИЯФ СО РАН 98-10. Новосибирск, 1998.
16. Орлов, О. С. (1986). Выключатели СВЧ на полевых транзисторах с затвором Шоттки. *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. Вып. 3*, 50–54.
17. Петров И.А. (2011) Многоканальные СВЧ-переключатели с полупроводниковыми элементами на основе широкополосных согласующих структур. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Т. 14. № 4*, 60–66
18. Неганов, В. А., & Петров, И. А. (2015). Физика волновых процессов и радиотехнические системы СВЧ-устройств с полупроводниковыми элементами. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы, Т18., № 3*, 89–95.

					11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ	Лист
						83
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

19. Ficher R.F. Broadband Microwave Diode switches // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1965. Vol. MTT-13. № 5. P. 706–709.
20. Петров И.А. Частотные свойства реактивных симметричных четырехполосников на основе шлейфных структур / Электронный журнал «Журнал радиоэлектроники». М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 2014, № 1. 21 с.
21. Вендик, О. Г. (1965). Антенны с немеханическим движением луча. Москва, *Сов. Радио*.
22. Хижа, Г. С., Вендик И. Б., Серебрякова Е.А. (1984). СВЧ фазовращатели и переключатели. Москва, *Радио и связь*.
23. Вайсблат, А. В. (1975). Прогнозирование параметров и процента выхода полупроводниковых фазовращателей при их производстве. *Антенны*, 21, 112-119.
24. Кузнецов, В. И., Хижа, Г. С. (1975). Анализ фазовых ошибок дискретного широкополосного рпн-диодного фазовращателя. *Известия ЛЭТИ*, 165, 53–57.
25. Гультияев, А. В. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс – СПб.: Питер, 2000. – 432 с
26. Шалыгин, А. С. Прикладные методы статистического моделирования – Л.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
27. Кумунжиев, К. В. Теория систем и системный анализ: учебное пособие – Ульяновск: УлГУ, 2003. – 240 с.
28. Сазонов Д. М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1981. – 295 с.
29. Альтман Дж. Устройства сверхвысоких частот: пер. с англ. / под ред. И.В. Лебедева. – М.: Мир, 1968. – 487 с.
30. Дьяконов В. И. (2013). Simulink самоучитель. Москва, *ДМК Пресс*.
31. СВЧ устройства на полупроводниковых диодах. Проектирование и расчет / Под ред. И.В. Мальского, Б.В. Сестрорецкого. М.: Сов. радио, 1969. 217 с.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		84

32. Сигорский В.П., Петренко А.И. Алгоритм анализа электронных схем. М.: Сов. радио, 1976. 97 с.
33. Мишустин Б.А. Синтез реактивного многополюсника по заданной матрице рассеяния // Изв. высш. уч. завед. Радиофизика. 1968. Т. XI, № 12. С. 128
34. Maloratsky, L. G. (2004). RF and Microwave Integrated Circuits. Oxford, Elsevier.
35. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.
36. Бова, Н. Т., Ефремов Ю. Г. (1984). Микроэлектронные устройства СВЧ. Киев, Техника.
37. Французов А. Д. Основы расчета и конструирования излучающих устройств: учебное пособие – Челябинск: ЧПИ, 1981. – 66 с.

					<i>11.04.03.2020.589.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		85