

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

АВИАЦИОННЫЙ ФАКУЛЬТЕТ ТАШКЕНТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ А.Р. БЕРУНИ

КАФЕДРА «ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И АЭРОПОРТОВ»

# КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по предмету: «Радиолокационное оборудование ВС»

на тему:

**Разработка и проектирование антенного устройства**

Выполнил:

Алиев А.

Проверил:

доц. Халилова П.Ю.

Ташкент 2016

## Перечень условных обозначений и сокращений

ДН — диаграмма направленности;  
КПД — коэффициент полезного действия;  
НПЛ — несимметричная полосковая линия;  
СВЧ — сверх высокие частоты;  
ЭВМ — электронно-вычислительная машина;  
ЧХ — частотная характеристика

## Содержание

	Стр.
Введение	6
1 Разработка антенны	7
1.1 Анализ технического задания и обоснование выбора антенны	7
1.2 Расчёт поля излучения спиральной антенны	9
1.3 Приближённый расчёт спиральной антенны	11
1.4 Расчёт ДН спиральной антенны	14
1.5 Расчёт согласующего четвертьволнового трансформатора	15
2 Проектирование СВЧ устройства	17
2.1 Проектирование антенного переключателя	17
2.1.1 Выбор типа диода	17
2.1.2 Расчёт основных параметров диодного выключателя	19
2.1.3 Расчёт диодного выключателя	21
2.1.4 Конструкторское выполнение антенного переключателя	25
2.2 Расчёт частотных характеристик и настройка антенного переключателя на ЭВМ	26
3 Расчёт направленного ответвителя мощности	30
3.1 Выбор типа направленного ответвителя	30
3.2 Расчёт направленного ответвителя с электромагнитной связью	32
Заключение	35
Список использованных литературных источников	36

## Введение

Неотъемлемыми составными частями современных радиотехнических средств являются антенные системы и обслуживающие их тракты СВЧ.

Основной целью изучения дисциплины “Антенны и устройства СВЧ” является усвоение теоретических понятий, расчётных методов и принципов конструирования современных антенных систем и трактов их питания, включая подготовку к пользованию существующими и разрабатываемыми системами автоматизированного проектирования.

Совершенствование и развитие антенн и устройств СВЧ в настоящий период оказались тесно связанными со следующими ключевыми событиями: выходом человека в космическое пространство, немислимым без соответствующего радиотехнического обеспечения; бурным прогрессом вычислительной техники на основе достижений интегральной технологии; быстрым освоением области миллиметровых волн и волн оптического диапазона; созданием технологии полосковых, микрополосковых и волоконно-оптических линий передачи, что привело к миниатюризации и улучшению качественных показателей трактов СВЧ и соответствующих антенн.

Широкое распространение получила реализация фазированных антенных решёток с быстрым электрическим сканированием луча, создание развёртываемых в космосе остронаправленных зеркальных антенн и решёток, предназначенных для глобальных систем радиосвязи и радиовещания и для систем исследования природных ресурсов Земли.

В данной работе разработано и спроектировано антенное устройство, обеспечивающее поочерёдное подключение антенны к передатчику и к приёмнику. В режиме передачи оно обеспечивает отвлечение части мощности от генератора.

## 1 Разработка антенны

### 1.1 Анализ технического задания и обоснование выбора антенны

Антенны относятся к пассивным компонентам радиосистем, и в конструктивном отношении они представляют сочетание проводников и магнитодиэлектриков. Наряду с выполнением основных функций излучения и приёма радиоволн современные антенны выполняют важнейшие функции пространственной фильтрации радиоканалов, обеспечивая пеленгацию источников радиоизлучения и радиолокационных целей.

Качество функционирования антенн описывается рядом радиотехнических, конструктивных, эксплуатационных и экономических характеристик и параметров. Конструктивное выполнение антенн и достижимые значения параметров существенно зависят от диапазона применяемых радиоволн. Различают антенны длинных и средних волн, коротковолновые антенны, антенны УКВ, диапазона СВЧ, антенны оптических волн.

Классификацию антенн обычно проводят по способу формирования излучаемого поля, выделяя следующие четыре класса антенн:

1 Излучатели небольших размеров ( $l \leq \lambda$ ) для диапазона частот 10кГц — 1ГГц.

2 Антенны бегущей волны размерами от  $\lambda$  до  $10 \cdot \lambda$  и более для диапазона частот 3МГц — 10ГГц.

3 Антенные решётки размерами от  $\lambda$  до  $100 \cdot \lambda$  и более для частот 3МГц — 30ГГц

4 Апертурные антенны размерами от  $\lambda$  до  $1000 \cdot \lambda$  для диапазона частот 100МГц — 100ГГц и выше.

Заданная антенна должна создавать поле с круговой поляризацией в диапазоне частот 4,3 ГГц — 4,7 ГГц с максимальной шириной диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях  $55^\circ$  и уровнем боковых лепестков не более 10дБ.

В частотном отношении подходят все классы антенн, кроме излучателей небольших размеров, но поле с круговой поляризацией излучения обеспечивают лишь немногие из перечисленных выше классов антенн (например, антенны бегущей волны). К антеннам бегущей волны относятся спиральные, диэлектрические, директорные, импедансные антенны, а также антенны “вытекающей волны”. Эти антенны реализуют режим осевого излучения и выполняются на основе замедляющих систем, способных поддерживать поверхностные волны. Возбуждение антенны бегущей волны осуществляется с одного конца, а режим бегущей волны обеспечивается надлежащим выбором параметров замедляющей системы и очень редко — применением согласующих нагрузок на

противоположном конце. Возбуждение само распространяется вдоль излучающей системы от одного конца к другому, и поэтому такие антенны часто называют также антеннами последовательного питания. Уникальным свойством этих антенн являются малые размеры поперечного сечения излучающей системы. Это позволяет размещать невыступающие антенны бегущей волны на гладкой поверхности корпусов летающих объектов.

На частотах 300МГц и выше широкое применение находят цилиндрические спиральные антенны (рисунок 1), излучающие поле с круговой поляризацией в направлении оси.

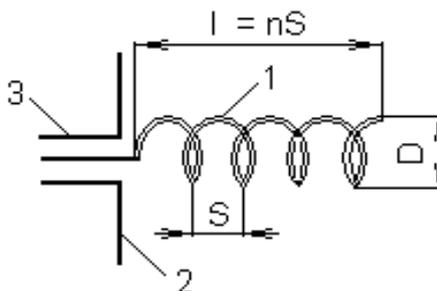


Рисунок 1 — Профиль спиральной цилиндрической антенны

Антенна состоит из проволочной спирали 1 длиной несколько  $\lambda$  при диаметре витка, примерно равным  $\lambda/\pi$ . Один конец спирали остаётся свободным, а другой соединён с внутренним проводником коаксиальной линии 3. Внешний проводник коаксиальной линии присоединяется к металлическому экрану 2. Цилиндрическая спираль, показанная на рисунке 1, может быть охарактеризована следующими размерами: длиной витка  $L$ , шагом  $S$ , длиной  $l$  ( $l = n \cdot S$ , где  $n$  — число витков) и диаметром  $D$ . Направленные свойства антенны зависят от соотношения между её размерами и длиной волны.

1. Когда длина волны существенно превосходит диаметр витков спирали ( $\lambda > 6D$ ), каждый виток можно приближённо принять за плоскую элементарную рамку. При этом антенну можно рассматривать как совокупность плоских рамок и электрических диполей, оси которых параллельны оси спирали. Диаграмма направленности такой антенны в плоскости, совпадающей с осью спирали, имеет вид восьмёрки, а в плоскости, перпендикулярной оси спирали, представляет собой окружность. Ввиду того, что сопротивление излучения оказывается малым и к.п.д. получается низким, спиральные антенны малых размеров, как правило, на практике не используются.

2. Когда длина волны становится примерно равной длине витка ( $l \approx L$ ), картина распространения волны вдоль провода спирали качественно меняется. Фазовая скорость распространения волны  $v_{\phi}$ , ранее примерно равная скорости света  $c$ , резко падает до значения примерно  $(0,7 - 0,8)c$ , а

при дальнейшем укорочении волны плавно растёт, снова приближаясь к скорости света. При достаточно большой длине антенны в проводе спирали возникает режим, близкий к режиму бегущих волн. Если при этом шаг спирали лежит в пределах от  $0,15$  до  $0,3\lambda$ , то максимум ДН оказывается ориентированным вдоль оси спирали, поле в направлении оси спирали обладает поляризацией близкой к круговой, а в других направлениях поляризация поля получается эллиптической. Входное сопротивление антенны оказывается достаточно большим (примерно  $150\text{Ом}$ ) и почти чисто активным. Такой режим работы называется режимом осевого излучения и именно он будет рассмотрен в данном курсовом проекте.

3. При дальнейшем укорочении волны ( $\lambda < 2D$ ), излучение вдоль оси спирали падает, но возникают два максимума под острыми углами к оси спирали.

## 1.2 Расчёт поля излучения спиральной антенны

Полагая для приближённого анализа, что амплитуда бегущей волны вдоль провода спирали не меняется, ДН спиральной антенны можно представить произведением ДН одиночного витка на множитель решётки.

В области малых значений угла  $\theta$  выражение для ДН одиночного витка с бегущей волной можно приближённо записать в виде:

$$F_{1\theta}(\theta) \approx \cos(\theta) \quad (1)$$

$$F_{1\varphi}(\theta) \approx \cos(\theta), \quad (2)$$

где  $F_{1\theta}(\theta)$  — нормированная ДН меридиональной составляющей поля;

$F_{1\varphi}(\theta)$  — нормированная ДН азимутальной составляющей поля.

Из формул (1), (2) видно, что одиночный виток характеризуется слабой направленностью и концентрация излучаемой энергии вдоль оси спирали получается, очевидно, за счёт близкого к синфазному сложения полей витков в этом направлении.

Поэтому можно считать, что ДН спирали определяется множителем решётки:

$$f_n(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{n}{2} \cdot [(k \cdot S \cdot \cos(\theta)) - \psi]\right]}{\sin\left[\frac{1}{2} \cdot (k \cdot S \cdot \cos(\theta))\right]} \quad (3)$$

где  $n$  — число витков;

$S$  — расстояние между соседними витками;

$\theta$  — угол, отсчитываемый от оси спирали;

$\psi$  — сдвиг по фазе между точками в соседних витках.

В режиме осевого излучения сложение полей отдельных витков в направлении оси спирали должно быть близким к синфазному. Для того чтобы это могло иметь место, ток в каждом последующем витке должен отставать по фазе от тока в предыдущем на угол:

$$\Psi = (2 \cdot \pi / \lambda) \cdot S + 2 \cdot \pi \quad (4).$$

Сдвиг по фазе между токами в соседних витках можно представить формулой:

$$\Psi = (2 \cdot \pi / \lambda_{\text{сп}}) \cdot L, \quad (5)$$

где  $\lambda_{\text{сп}}$  — длина волны в проводе спирали.

Приравняв выражения (4) и (5), получим условие синфазного сложения полей вдоль оси спирали в виде:

$$S/\lambda + 1 = L/\lambda_{\text{сп}}, \quad (6)$$

откуда

$$L = (S + \lambda) / \xi, \quad (7)$$

где  $\xi = \lambda / \lambda_{\text{сп}}$  — коэффициент укорочения волны.

Так как в цилиндрических спиральных антеннах  $\xi$  имеет значение от 1 до 1,4, то длина витка  $L$  в режиме осевого излучения должна быть примерно равной длине волны  $\lambda$ .

С учётом (5) и (7) формулу (3) можно привести к виду:

$$F_n(\theta) = \frac{\sin \left[ \frac{n \cdot k}{2} \cdot (\xi \cdot L - S \cdot \cos(\theta)) \right]}{n \cdot \sin \left[ \frac{k}{2} \cdot (\xi \cdot L - S \cdot \cos(\theta)) \right]} \quad (8).$$

Тогда ДН спиральной антенны, равная произведению ДН одиночного витка на множитель решётки определится выражением:

$$F(\theta) := \frac{\sin \left[ \frac{n \cdot k}{2} \cdot (\xi \cdot L - S \cdot \cos(\theta)) \right]}{n \cdot \sin \left[ \frac{k}{2} \cdot (\xi \cdot L - S \cdot \cos(\theta)) \right]} \cdot \cos(\theta) \quad (9)$$

Для расчёта других электрических параметров рекомендуется пользоваться формулами, полученными в результате экспериментов:

$$(2\theta_{0,5})^0 = \frac{52}{\frac{L}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{n \cdot S}{\lambda}}}, \quad (10)$$

где  $2\theta_{0,5}$  — ширина ДН антенны по уровню половинной мощности, в град.

$$D = 15 \cdot \left( \frac{L}{\lambda} \right)^2 \cdot n \cdot \frac{S}{\lambda} \quad (11).$$

$$R_{\text{вх}} \approx 140 \cdot L / \lambda, \quad (12)$$

где  $R_{\text{вх}}$  — входное сопротивление антенны.

Формулы (8) — (11) справедливы, если число витков  $n > 3$ , углы подъёма спиралей  $\alpha$  лежат в пределах от  $12^\circ$  до  $16^\circ$ , а  $L/\lambda$  меняется от 0,75 до 1,3.

### 1.3 Приближённый расчёт спиральной антенны

При приближённых расчётах длину витка  $L$  принимают равной расчётной длине волны  $\lambda_0$ .

Зная диапазон частот в которых должно работать проектируемое устройство можно рассчитать диапазон длин волн и среднюю длину волны по следующим формулам:

$$\lambda_{\text{min}} = c / f_{\text{max}} \quad (13),$$

$$\lambda_{\text{max}} = c / f_{\text{min}}, \quad (14)$$

где

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad \text{— скорость света.}$$

$$\lambda_0 = (\lambda_{\text{min}} + \lambda_{\text{max}}) / 2 \quad (15).$$

Подставляя в формулы (13), (14) и (15) исходные данные получим:

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{4,7 \cdot 10^9 \text{Гц}} = 0,064 \text{м} = 64 \text{мм},$$

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{4,3 \cdot 10^9 \text{Гц}} = 0,07 \text{м} = 70 \text{мм},$$

$$\lambda_0 = \frac{0,064 \text{м} + 0,07 \text{м}}{2} = 0,067 \text{м} = 67 \text{мм}.$$

Откуда длину витка  $L$  также примем равной 67мм.

Шаг спирали в режиме осевого излучения выбирают из диапазона

$$S = (0,15 \text{ — } 0,3) \cdot \lambda_0 \quad (16).$$

Возьмём  $S = 0,15 \cdot \lambda_0 = 0,15 \cdot 0,067 \text{м} = 0,01 \text{м} = 10 \text{мм}$ .

Коэффициент укорочения волны  $\xi$  примем равным 1,2.

Рабочий диапазон должен лежать в пределах:

$$0,7L \leq \lambda \leq 1,3L \quad (17).$$

Подставляя в (17) расчётные данные, проверим правильность выбора конструктивных параметров антенны.

$$0,7 \cdot 0,067 \leq \lambda \leq 1,3 \cdot 0,067$$

$0,0469 \leq 0,07 \leq 0,0871$ , что удовлетворяет заданному диапазону длин волн.

Диаметр экрана выбирается в пределах:

$$D_3 = (1,0 \text{ — } 1,6) \cdot l, \quad (18)$$

где  $l$  — длина спирали.

$$l = n \cdot S \quad (19)$$

Подставляя в формулу (10) имеющиеся и расчётные данные (ширину ДН по уровню половинной мощности  $2\theta_{0,5}$ , длину витка  $L$ , значение максимальной длины волны  $\lambda_{\max}$ ), определим количество витков спиральной антенны:

$$55^0 = \frac{52^0}{\frac{0,067\text{м}}{0,07\text{м}} \cdot \sqrt{\frac{n \cdot 0,01\text{м}}{0,067\text{м}}}},$$

откуда  $n \approx 7$ .

Тогда согласно формулам (18) и (19):

$$l = 7 \cdot 0,01\text{м} = 0,07\text{м} = 70\text{мм},$$

$$D_3 = 1,3 \cdot 0,07\text{м} = 0,091\text{м} = 91\text{мм}.$$

Диаметр витка  $D$  рассчитываем по формуле (11):

$$D = 15 \left( \frac{67\text{мм}}{70\text{мм}} \right)^2 \cdot 7 \cdot \frac{10\text{мм}}{70\text{мм}} = 14\text{мм}$$

Эскиз антенны приведён на рисунке 2.

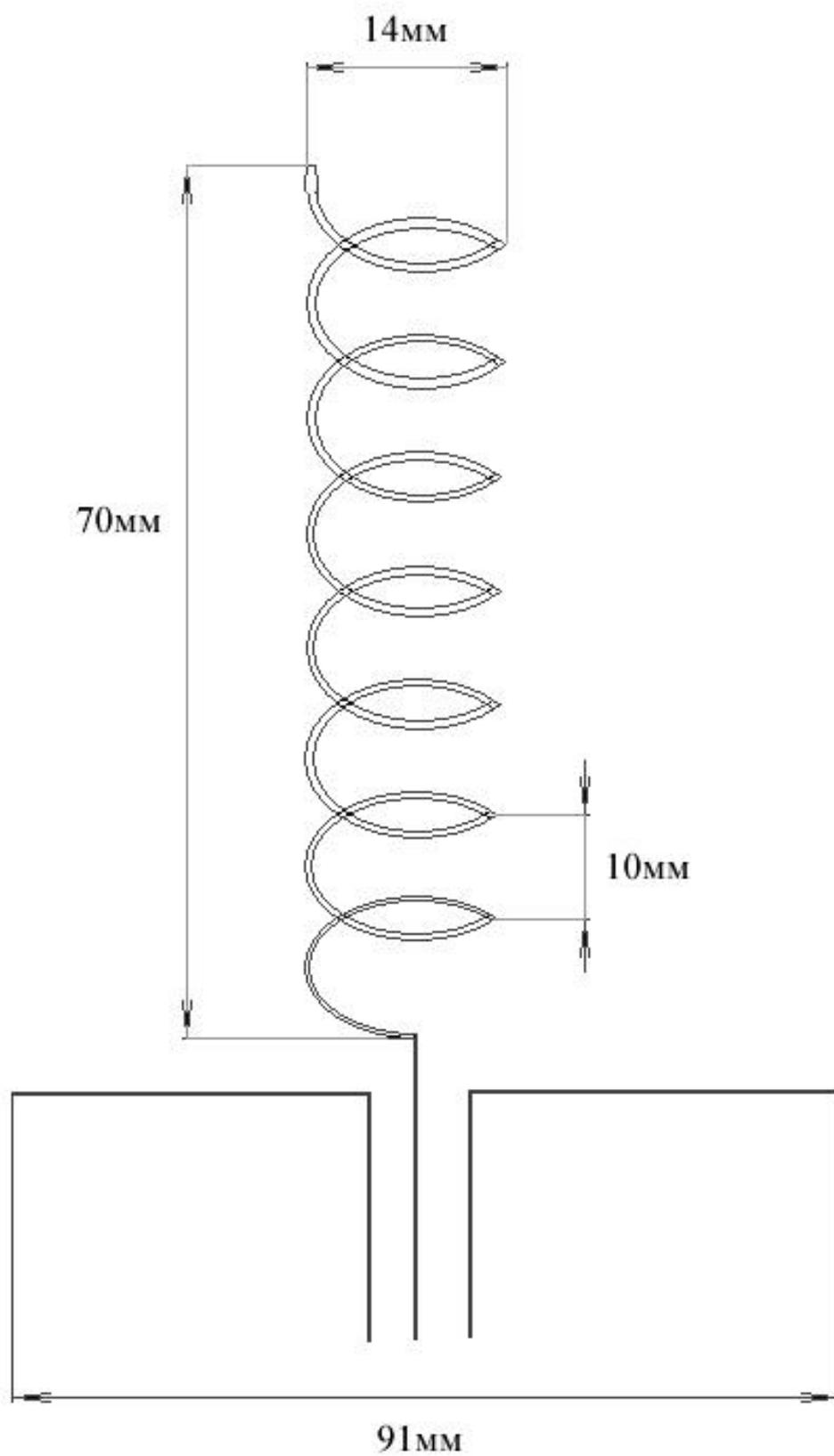


Рисунок 2 - Эскиз спиральной цилиндрической антенны

### 1.4 Расчёт ДН спиральной антенны

ДН спиральной антенны определяем по формуле (9). Все построения проводим с помощью пакета программ Mathcad Professional. На рисунке 3 ДН (пронормированная) спиральной антенны.

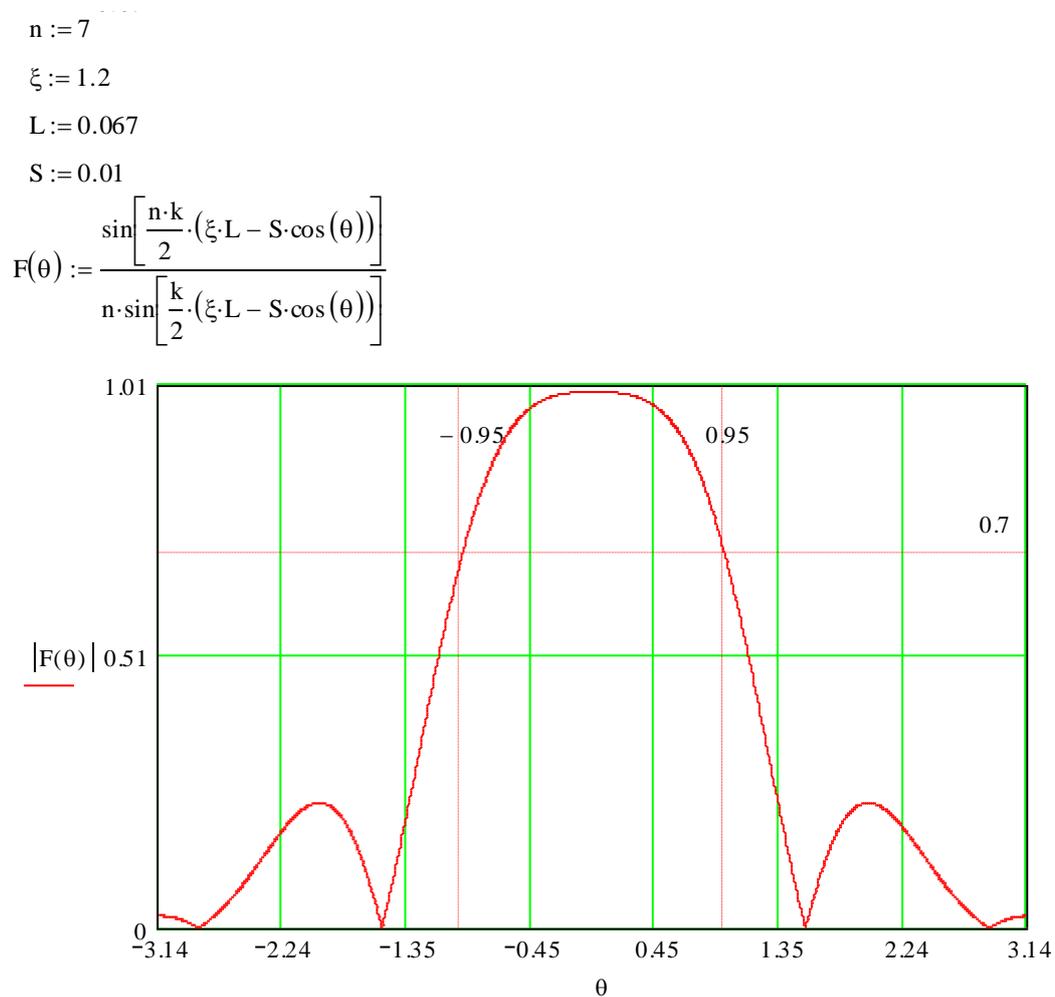


Рисунок 3 — ДН спиральной антенны

## 1.5 Расчёт согласующего четвертьволнового трансформатора

Так как выходное сопротивление спиральной антенны 150 Ом, а волновое сопротивление тракта, оговоренное в техническом задании, равно 50 Ом, то необходимо устройство, согласующее эти сопротивления. Этим устройством может служить четвертьволновый трансформатор. Он должен обеспечить на входе КСВ = 1, при частотах от 4,3 ГГц до 4,7 ГГц. Тогда волны напряжения и тока распространяются только в одном направлении — от генератора к нагрузке (или от антенны к нагрузке). Линия полностью согласована с нагрузкой и работает в наивыгоднейшем режиме.

В качестве фидерной трансформирующей линии из коаксиального кабеля выберем кабель типа РК-50-9-12 с волновым сопротивлением  $50 \pm 2$  Ом. Для него коэффициент укорочения длины волны в линии  $n$  равен 1,23.

Эскиз устройства трансформирующего выходное сопротивление спиральной антенны приведено на рисунке 4.

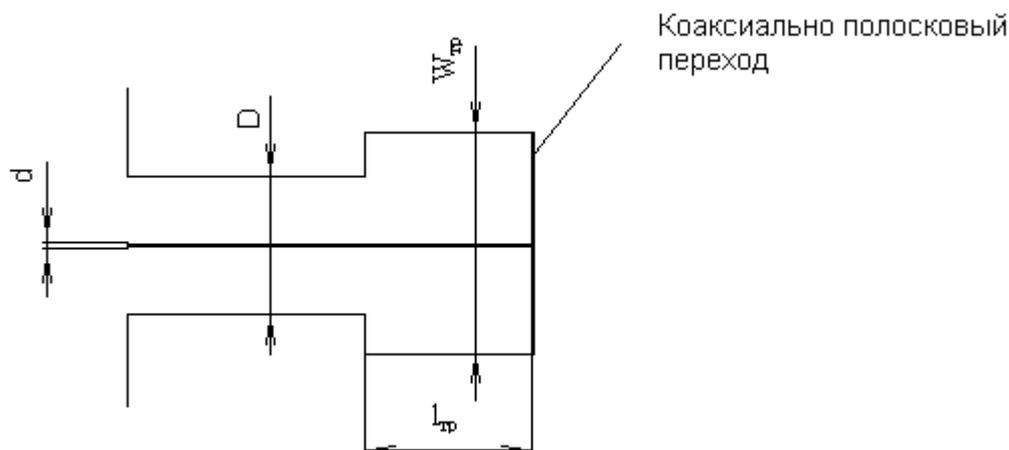


Рисунок 4 — Эскиз четвертьволнового согласующего трансформатора  
Сопротивление согласующего четвертьволнового трансформатора можно вычислить по формуле:

$$z_{\text{тр}} = \sqrt{z_{\text{вх}} \cdot z_{\text{н}}}, \quad (20)$$

где  $z_{\text{вх}}$  — входное сопротивление антенны, равное 150 Ом;  
 $z_{\text{н}}$  — сопротивление тракта, на которое должна быть нагружена антенна.

Подставляя необходимые для расчёта данные в формулу (20), получим:

$$z_{\text{тр}} = \sqrt{150 \cdot 50} = 86,60 \text{ Ом}$$

Длина трансформирующей коаксиальной линии находится по следующей формуле:

$$l_{\text{тр}} = \frac{\lambda_{\text{к}}}{4}, \quad (21)$$

где  $\lambda_k$  — длина волны в кабеле;

$$\lambda_k = \frac{\lambda_0}{n}, \quad (22)$$

где  $\lambda_0$  — средняя длина волны на которой работает устройство в воздухе;

$n$  — коэффициент укорочения длины волны в линии, равен 1,23.

Подставляя необходимые данные в формулу (21), получим:

$$l_{\text{тр}} = \frac{67}{4 \cdot 1,23} = 13,618 \text{ мм}$$

Ширина трансформирующей коаксиальной линии находится по следующей формуле:

$$W_{\text{тр}} = \frac{D - d \cdot e^{\frac{z_{\text{тр}} \cdot \sqrt{\epsilon_r}}{94,7}}}{\frac{z_{\text{тр}} \cdot \sqrt{\epsilon_r}}{e^{94,7}} - 1}, \quad (23)$$

где  $D$  — внешний диаметр коаксиальной линии на входе антенны  $D = 20,2 \pm 0,8$  мм;

$d$  — диаметр внутреннего проводника на входе антенны

$d$  можно определить используя формулу:

$$Z_{\text{в}} = 138 \log\left(\frac{D}{d}\right) \quad (24).$$

Откуда

$$d = \frac{20}{\frac{150}{10^{138}}} = 1,637 \text{ мм}$$

$\epsilon$  — диэлектрическая постоянная изоляции,  $\sqrt{\epsilon} = n = 1,23$

Подставляя в формулу все необходимые данные, получим:

$$W_{\text{тр}} = \frac{20 - 1,6e^{\frac{86,6031,23}{94,7}}}{\frac{86,6031,23}{94,7} - 1} = 120,74 \text{ мм}$$

## 2 Проектирование СВЧ устройства

Задача данного курсового проекта — спроектировать антенное устройство, которое должно обеспечивать поочерёдное подключение антенны к передатчику и к приёмнику. В режиме передачи устройство должно обеспечивать направленное ответвление части мощности от генератора. Таким образом, разработка СВЧ устройства разбивается на два подраздела. В данном случае — это разработка переключателя, обеспечивающего поочерёдное подключение антенны к передатчику и к приёмнику, и разработка направленного ответвителя, обеспечивающего направленное ответвление части мощности от генератора.

Функциональная схема СВЧ-устройства показана на рисунке 5.

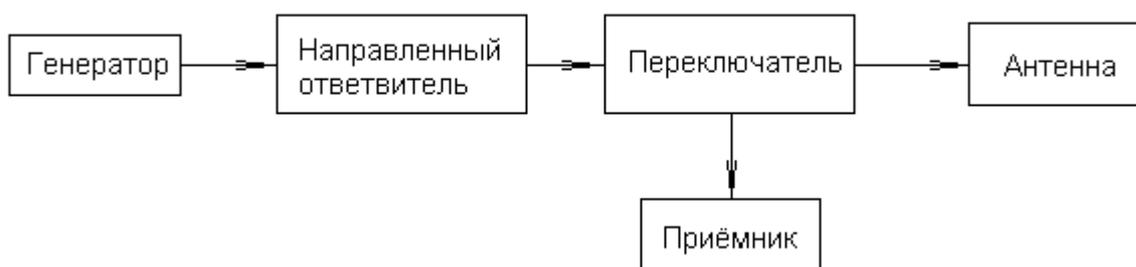


Рисунок 5 — Функциональная схема СВЧ-устройства

### 2.1 Проектирование антенного переключателя

#### 2.1.1 Выбор типа диода

В антенных переключателях, в устройствах защиты приёмника и т. д. применяются диодные выключатели. Поэтому задача проектирования антенного переключателя сводится к задаче разработки диодного выключателя. Они представляют собой четырёхполюсники, характеризующиеся двумя режимами: режимом пропускания, когда СВЧ сигнал почти беспрепятственно поступает через выключатель в нагрузку, и режимом запирающего, когда сигнал значительно ослабляется. В качестве управляющего элемента (ключа) используется переключающий диод в двух крайних состояниях (открытом и закрытом), управляемый внешним источником.

Основными параметрами выключателей являются: ослабление в режиме пропускания  $L_{\text{п}}$ , дБ; ослабление в режиме запирающего  $L_{\text{з}}$ , дБ; рабочая полоса частот  $2\Delta f/f_0$ , в пределах которой  $L_{\text{п}}$  не более, а  $L_{\text{з}}$  не менее заданного значения; время переключения  $\tau$ , мкс, определяемое в основном временем перехода диода из открытого в закрытое состояние; максимальная рассеиваемая СВЧ-мощность: импульсная  $P_{\text{и}}$  и непрерывная  $P$ , Вт; допустимый коэффициент стоячей волны (КСВ) в режиме пропускания  $K_{\text{сп}}$  и запирающего  $K_{\text{сз}}$ .

В выключателях, выполненных по гибридно-интегральной технологии, преимущественно используются бескорпусные переключающие диоды, эквивалентная схема которых показана на рисунке 6.

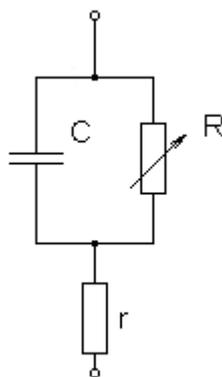


Рисунок 6 — Эквивалентная схема бескорпусной конструкции pin-диодов

Простейшие выключатели содержат один диод, включенный в линию последовательно или параллельно. Их эквивалентные схемы показаны на рисунках 7 и 8.

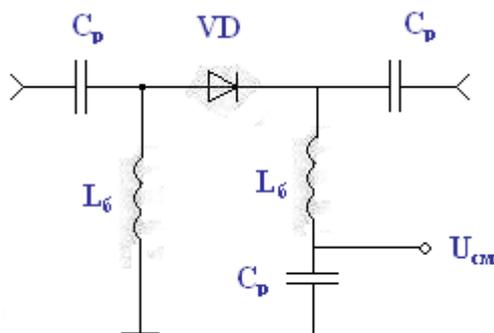


Рисунок 7 — Цепь подачи управляющего тока при последовательном включении диода в линию

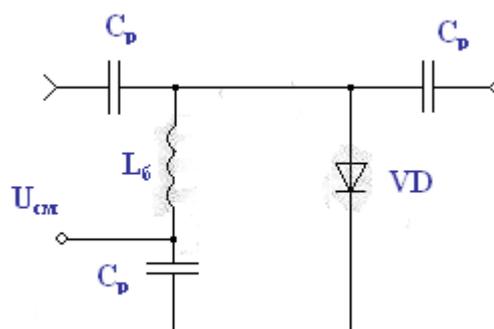


Рисунок 8 — Цепь подачи управляющего тока при параллельном включении диода в линию

При подаче прямого смещения на диод его сопротивление становится малым (диод открыт). Если при этом диод включен параллельно, линия им будет закорачиваться на землю, произойдет отражение мощности от диода. Только незначительная её часть попадет на выход. Выключатель будет находиться в режиме запираения. Последовательно включенный диод в открытом состоянии

является небольшим препятствием для распространяющейся волны, и выключатель находится в режиме пропускания.

При подаче на диод обратного напряжения смещения диод закрыт, его сопротивление велико. В случае параллельного включения он оказывает незначительное влияние на распространяющиеся волны (режим пропускания), а при последовательном включении он размыкает линию и большая часть мощности отражается (режим запираения).

В данной работе будет применено параллельное включение диода, так как использование последовательной схемы включения ограничено из-за ограниченности частотного диапазона (сверху) в связи со значительным уменьшением  $L_3$ . В случае же параллельного включения диода  $L_3$  не зависит от частоты.

На основании данных технического задания, пользуясь справочником, выберем один или несколько типов диодов, удовлетворяющих требованиям ТЗ по диапазону частот, быстродействию, мощности, диапазону температур и т. д.

Исходя из всего выше сказанного, выберем диод типа 2A503A. Все необходимые по нему данные помещены в таблицу 1.

Таблица 1 — Характеристики диода типа 2A503A

Тип	$R_{пр}$ , Ом	$R_{обр}$ , Ом	$\tau$ , мкс	$C_d$ , пФ
2A503A	3,3	1500	60	0,435

### 2.1.2 Расчёт основных параметров диодного выключателя

Определим проводимость ёмкости диода  $\omega C$  в заданном диапазоне частот.

На средней частоте:

$$g_0 = \omega_0 C = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,435 \cdot 10^{-12} \cdot 4,5 \cdot 10^9 = 0,0123 \text{ Сим.}$$

На нижней граничной частоте:

$$g_{\min} = \omega_{\min} C = 2 \cdot \pi \cdot f_{\min} \cdot C = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,435 \cdot 10^{-12} \cdot 4,3 \cdot 10^9 = 0,0117 \text{ Сим.}$$

На верхней граничной частоте:

$$g_{\max} = \omega_{\max} C = 2 \cdot \pi \cdot f_{\max} \cdot C = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,435 \cdot 10^{-12} \cdot 4,7 \cdot 10^9 = 0,0128 \text{ Сим.}$$

Проверим, является ли проводимость диода чисто реактивной. Для этого необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$1/\omega C \ll R_{обр} \quad (25)$$

$$1/0,0123 \text{ Сим} = 81 \text{ Ом} \ll 1500 \text{ Ом};$$

$$1/0,0117 \text{ Сим} = 85,5 \text{ Ом} \ll 1500 \text{ Ом};$$

$$1/0,0128 \text{ Сим} = 78,1 \text{ Ом} \ll 1500 \text{ Ом.}$$

Таким образом, можем считать проводимость закрытого диода чисто реактивной.

Если для закрытого диода выполняется выше оговоренное условие, т. е. проводимость диода чисто реактивна, то ослабление вносимое этим диодом можно рассчитать по формуле:

$$L_{\text{п1}} = 10 \log \left[ 1 + \left( \frac{\omega \cdot C \cdot Z_{\text{в}}}{2} \right)^2 \right] \quad (26).$$

Подставляя все необходимые данные в формулу (26), получим:

$$L_{\text{п1}} = 10 \log \left[ 1 + \left( \frac{2 \cdot 3.144 \cdot 5 \cdot 10^9 \cdot 0.435 \cdot 10^{-12} \cdot 50}{2} \right)^2 \right] = 0.39 \text{дБ}$$

Ослабление, вносимое диодом в режиме пропускания меньше заданного (3,5 дБ), что вполне нас устраивает.

В режиме запирания параллельный диод открыт, его проводимость велика активна:

$$y = g_0 = Z_{\text{в}}/R_{\text{пр}} = 50/3,3 = 15,15 \quad (27).$$

Ослабление, вносимое диодом в режиме запирания можно определить по формуле:

$$L_{\text{з1}} = 10 \log \left[ \frac{(|2 + y|)^2}{4} \right] \quad (28).$$

Подставляя все необходимые данные в формулу (28), получим:

$$L_{\text{з1}} = 10 \log \left[ \frac{(|2 + 15.15|)^2}{4} \right] = 18.66 \text{дБ}$$

Из графика видно, что данный диод в режиме запирания включенный параллельно в цепь не сможет обеспечить заданного уровня ослабления, которое по ТЗ составляет 40дБ.

Рассчитаем КСВ выключателя в режиме пропускания и запирания по формуле:

$$K_{\text{с}} = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|}, \quad (29)$$

где  $S_{11}$  — коэффициент отражения со стороны входа при полном согласовании по входу:

$$S_{11} = \frac{-y}{2 + y} \quad (30)$$

$y$  — проводимость диода или в режиме запирания, определённая нами ранее по формуле (27), или проводимость диода в режиме пропускания, которую можно определить по формуле:

$$y = z_{\text{в}}/R_{\text{обр}} = 50 \text{ Ом} / 1500 \text{ Ом} = 0,033. \quad (31)$$

Подставляя в формулу (30) необходимые данные, определим коэффициенты отражений со стороны входа в режиме запирания и отражения.

В режиме запирания:

$$S_{11} = \frac{-15.15}{2 + 15.15} = -0.883$$

В режиме пропускания:

$$S_{11} = \frac{-0.033}{2 + 0.033} = -0.016$$

Тогда КСВ в режиме запираия:

$$K_c = 16,1.$$

В режиме пропускания:

$$K_c = 1.$$

### 2.1.3 Расчёт диодного выключателя

Для расчета диодного выключателя будем использовать схему аттенуатора, показанную на рисунке 10.

Так как выключатель с одним диодом не удовлетворяет требованиям ТЗ по ослаблению в режиме запираия, увеличим количество диодов. Ориентировочно количество диодов можно определить, пользуясь выражением:

$$N \approx L_{3n}/L_{31}, \quad (32)$$

где  $L_{3n}$  — минимальное ослабление в антенном переключателе в режиме запираия, 40дБ;

$L_{31}$  — ослабление, вносимое одним диодом, рассчитанное ранее по формуле (28).

$$N = 40 \text{ дБ}/18,665 \text{ дБ} \approx 3.$$

При параллельном включении диодов максимальное ослабление в режиме запираия получается при расстояниях между диодами, определяемых выражением:

$$l = \lambda_v/4, \quad (33)$$

где  $\lambda_v$  — длина волна в линии:

$$\lambda_v = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{67}{\sqrt{5}} = 29,963 \text{ мм}$$

$\epsilon_r$  — диэлектрическая проницаемость материала подложки.

В качестве материала МПЛ выберем диэлектрик марки СТ-5. Все необходимые данные по нему приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Характеристика органического диэлектрика марки СТ - 5

Марка диэлектрика	$\epsilon_r$	$\text{tg}\delta \cdot 10 \exp(-4)$	Пробивное напряжение, МВ/м	Плотность, г/см <sup>3</sup>
СТ-5	5,0±0,25	9	21	1,45...1,65

Сополимер стирола с  $\alpha$ -метилстиролом, наполненный двуокисью титана. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon \approx 5$ , цвет оранжевый. Материал

металлизуется медной фольгой в процессе прессования либо электрохимическим способом. Прочность сцепления фольги с диэлектриком при прессовании — не менее 300 Н/м, при электрохимическом способе 200Н/м. Материал допускает все виды механической обработки, выдерживает технологические воздействия при изготовлении полосковых схем, хорошо склеивается с другими материалами данной группы и металлами. Допускает пайку при температуре 140° С в течение 4 с, водопоглощение 0,1% (за 24 ч.), диапазон рабочих температур -60...+95° С.

Толщину подложки выберем равной 2 мм.

Толщину основного проводящего слоя также выбирают в зависимости от частоты. На практике как в СПЛ так и НПЛ достаточно выполнить проводник, толщина которого в 2...5 раз больше толщины скин-слоя для данного материала. В нормах конструирования для полосковых плат, работающих в диапазоне 2...8 ГГц толщина проводника должна быть не менее бмкм. Выберем толщину металлизации (t) равной 0,01мм.

Тогда

$$l = 29,963\text{мм}/4 = 7,5\text{мм}.$$

Ослабление, вносимое диодами в режиме запираия можно определить по формуле:

$$L_{3N} = N \cdot L_{31} + (N-1) \cdot 6 \quad (34).$$

$$L_{3N} = 3 \cdot 18,665 + (3-1) \cdot 6 = 67,1 \text{ дБ}.$$

Вычислим ослабление в режиме пропускания по формуле:

$$L_{п.п} = 10 \log \left[ \left( 1 + \frac{N \cdot y}{2} \right)^2 \right], \quad (35)$$

где  $y$  — проводимость диода в режиме пропускания, найденная ранее по формуле (31).

Подставляя все необходимые данные в формулу (35), получим:

$$L_{п.п} = 10 \log \left[ \left( 1 + \frac{3 \cdot 0,033}{2} \right)^2 \right] = 0,41 \text{ дБ}$$

Определим ширину НПЛ, используя следующую формулу:

$$\frac{\omega}{h} = \frac{1}{r} - \frac{2 \cdot \left( \ln \left( \frac{\pi}{r} - 2 \cdot \ln(2) \right) + 1 \right)}{\pi}, \quad (36)$$

$$\text{где } r = \frac{Z_B \cdot \sqrt{\epsilon_r}}{120 \cdot \pi} = \frac{50 \cdot \sqrt{5}}{120 \cdot 3,14} = 0,297 \quad (37).$$

Подставляя необходимые данные в формулу (36), получим:

$$\omega = \left[ \frac{1}{r} - \frac{2 \cdot \left( \ln \left( \frac{\pi}{r} - 2 \cdot \ln(2) \right) + 1 \right)}{\pi} \right] \cdot h = \left[ \frac{1}{0,297} - \frac{2 \cdot \left( \ln \left( \frac{3,14}{0,297} - 2 \cdot \ln(2) \right) + 1 \right)}{3,14} \right] \cdot 2 = 2,635 \text{ мм}$$

Теперь необходимо выбрать и рассчитать размеры элементов схемы подачи управляющего напряжения.

Эквивалентная схема параллельного включения диода преобразуется к виду (рисунок 9).

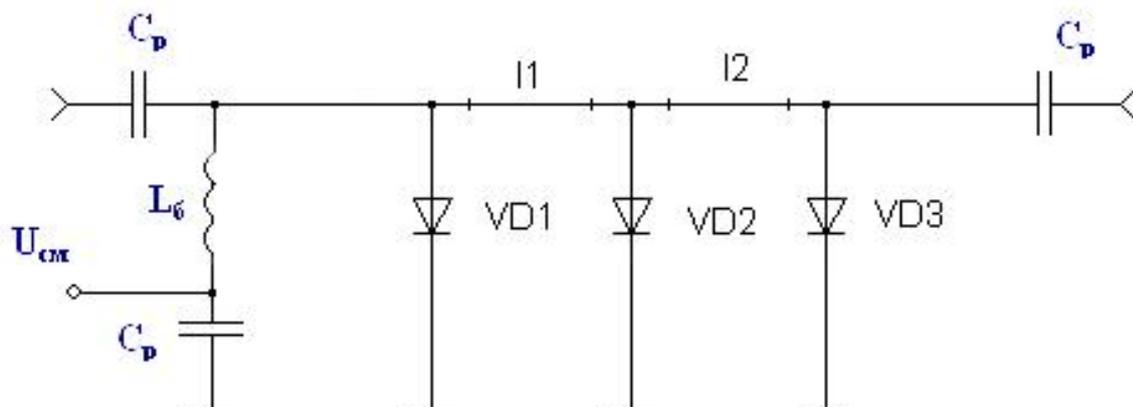


Рисунок 9 — Цепь подачи управляющего тока при параллельном включении диодов

Блокировочные индуктивности  $L_б$  предназначены для замыкания цепи управления диодами по постоянному току. Чтобы  $L_б$  не шунтировала линию СВЧ, её сопротивление должно быть существенно больше волнового сопротивления линии, то есть должно выполняться условие:

$$2 \cdot \pi \cdot f_{\min} \cdot L_б \gg Z_B, \quad (38)$$

где  $f_{\min}$  — минимальная частота рабочей полосы устройства.

т. е.

$$L_б > \frac{Z_B}{2 \cdot \pi \cdot f_{\min}} > \frac{50}{2 \cdot 3.144 \cdot 310^9} > 1.851 \times 10^{-9} \text{ Гн}$$

Выберем катушку индуктивности с  $L = 0,47 \text{ нГн}$ .

Конденсаторы  $C_б$  должны иметь малое сопротивление для СВЧ сигналов, т. е. должно выполняться условие:

$$z_B \gg 1 / (2 \cdot \pi \cdot f_{\min} \cdot C_б) \quad (39).$$

С другой стороны  $C_б$  не должна быть слишком большой, чтобы постоянная времени цепи оставалась достаточно малой, т. е. чтобы:

$$\tau_B \ll T, \quad (40)$$

где  $T$  — период управления.

$$\tau_B = \sqrt{L_6 \cdot C_6}$$

$$C_6 > \frac{1}{2 \cdot 3.144 \cdot 310^9 \cdot 50} > 7.4 \times 10^{-13} \text{ Ф}$$

Разделительные ёмкости, осуществляющие развязку соседних каскадов по току управления, должны иметь малое сопротивление в заданном СВЧ-диапазоне, чтобы не мешать распространению СВЧ-колебаний, т. е. должно выполняться условие:

$$Z_B \gg 1 / (2 \cdot \pi \cdot f_{\min} \cdot C_p), \quad (41)$$

Обычно

$$C_p = C_6 = \frac{20 \dots 30}{2 \cdot \pi \cdot f_{\min} \cdot Z_B} \quad (42)$$

Допустим:

$$C_p = C_6 = \frac{25}{2 \cdot 3.144 \cdot 310^9 \cdot 50} = 1.851 \times 10^{-11} \text{ Ф}$$

Выберем конденсаторы  $C_p = C_6 = 10$  пФ.

В заданном диапазоне частот применяются плоские конденсаторы. На рисунке 10 показан пример конструкции плоского конденсатора, подключённого к параллельному диоду. Конденсатор образован экранным слоем платы 7, диэлектрической плёнкой 4 и пластиной подставки 5.

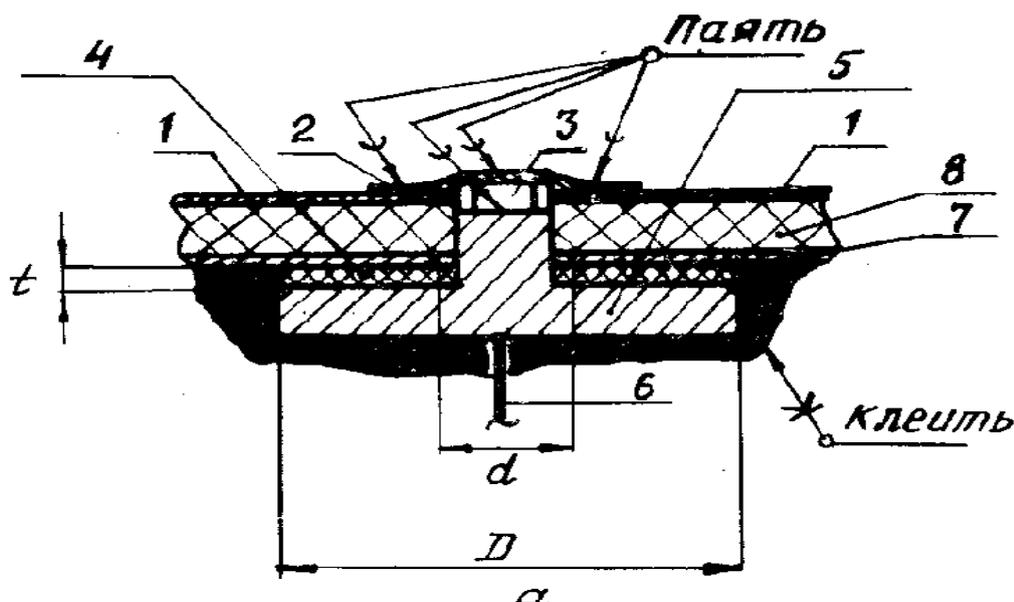


Рисунок 10 — Подключение к диоду плоского конденсатора

На рисунке 10:

- 1 — полосковый проводник линии;
- 2 — перемычка;
- 3 — диод;
- 4 — диэлектрик конденсатора;
- 5 — подставка для диода, образующая одну обкладку конденсатора  $C_6$ ;
- 6 — провод, подводящий управляющий ток;
- 7 — экранный слой платы МПЛ;
- 8 — диэлектрическая подложка.

В качестве  $L_6$  широко используется отрезок четвертьволновой короткозамкнутой линии (шлейф). Для расширения рабочей полосы частот шлейфа необходимо повышать его волновое сопротивление, т. е. уменьшать ширину проводника. При этом следует помнить, что понижается допустимый уровень мощности, пропускаемый устройством. Находят применение полусосредоточенные элементы, образованные отрезками полосковых линий длиной менее  $\lambda_v/4$  и имеющие свойства сосредоточенных емкостей или индуктивностей в относительно небольшом диапазоне частот.

#### 2.1.4 Конструкторское выполнение антенного переключателя

Очевидно, что в данном курсовом проекте будет рассмотрен двухканальный переключатель с параллельным включением диодов. Он представляет собой совокупность выключателей и характеризуется теми же параметрами. Расчёт многодиодного выключателя был произведён нами ранее (см. 2.1.1-2.1.3).

Электрическая схема двухканального переключателя с параллельным включением диодов показана на рисунке 11.

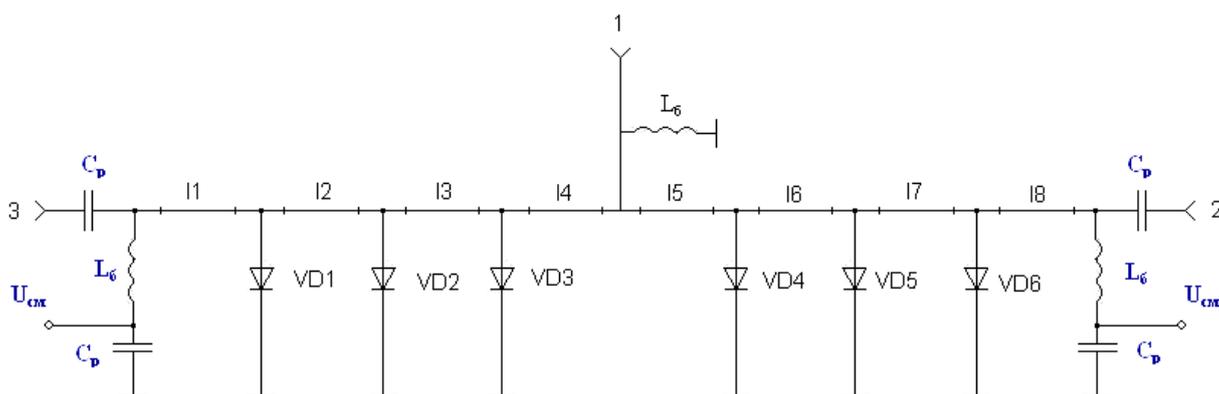


Рисунок 11 — Электрическая схема двухканального переключателя с параллельным включением диодов

Если диоды  $VD4$ ,  $VD5$ ,  $VD6$  закрыты, то работает канал 1-2, а канал 1-3 отключен. Длины линий от точки разветвления каналов до первого диода в каждом канале (14, 15) должны быть равны  $\lambda_v/4$ . В этом случае открытый диод

канала 1-3, например, VD3, не будет шунтировать канал 1-2, поскольку входное сопротивление четвертьволнового отрезка линии, нагруженного на малое сопротивление открытого диода, велико. Закрытый канал 1-3 условно можно представить короткозамкнутым четвертьволновым шлейфом. Для расширения рабочей полосы частот переключателя в точках разветвления помещаются отрезки линий длиной  $\lambda_v/4$  с пониженным волновым сопротивлением  $z_r$ .

Сборочный чертёж устройства приведён в приложении А данной работы. Чертёж печатной платы — в приложении Б.

## **2.2 Расчёт частотных характеристик и настройка антенного переключателя на ЭВМ**

Расчёт частотных характеристик и настройку ПФ будем производить с помощью пакета прикладных программ Mirowave Office.

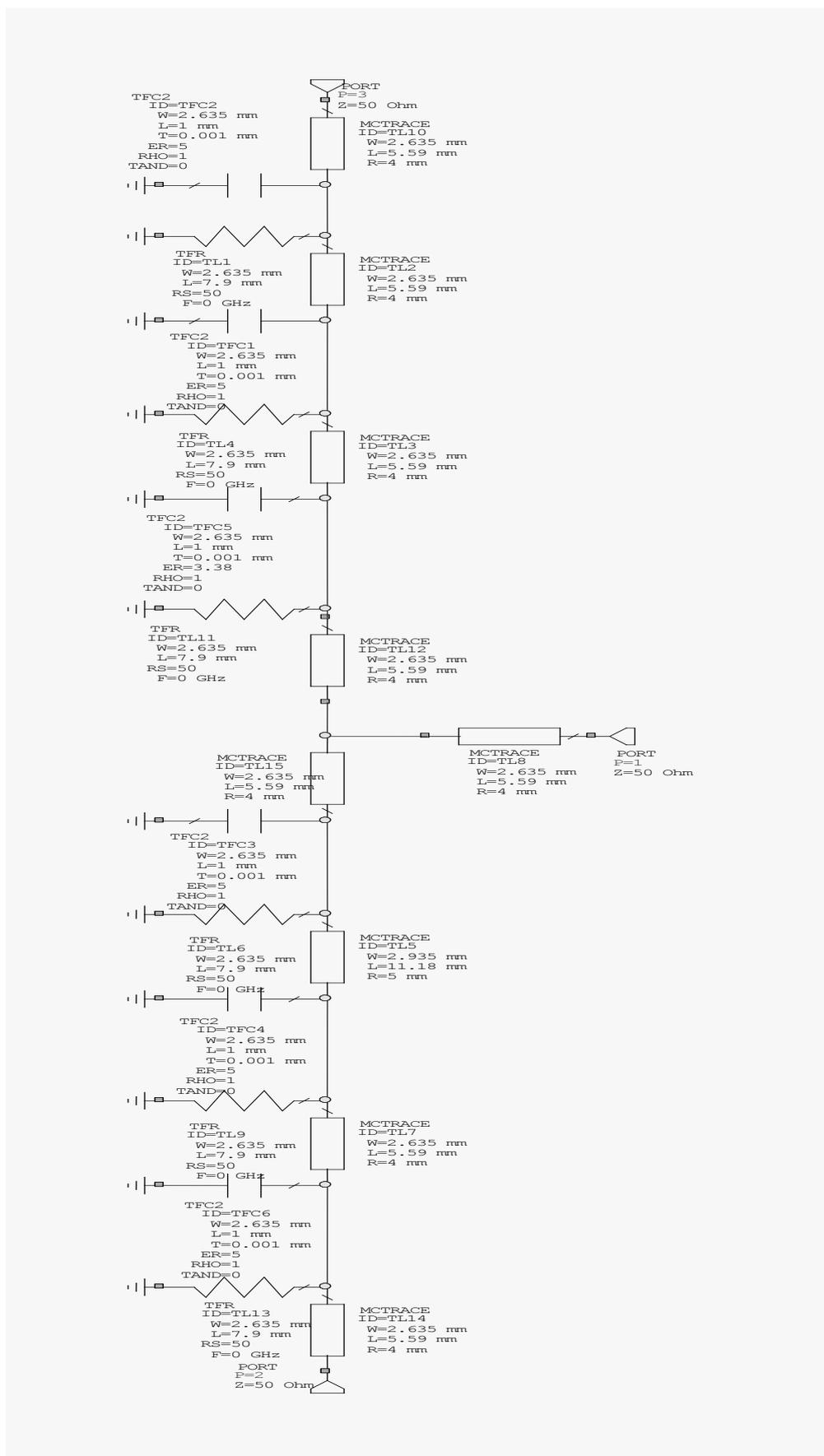


Рисунок 12 — Схема диодного переключателя (до оптимизации)

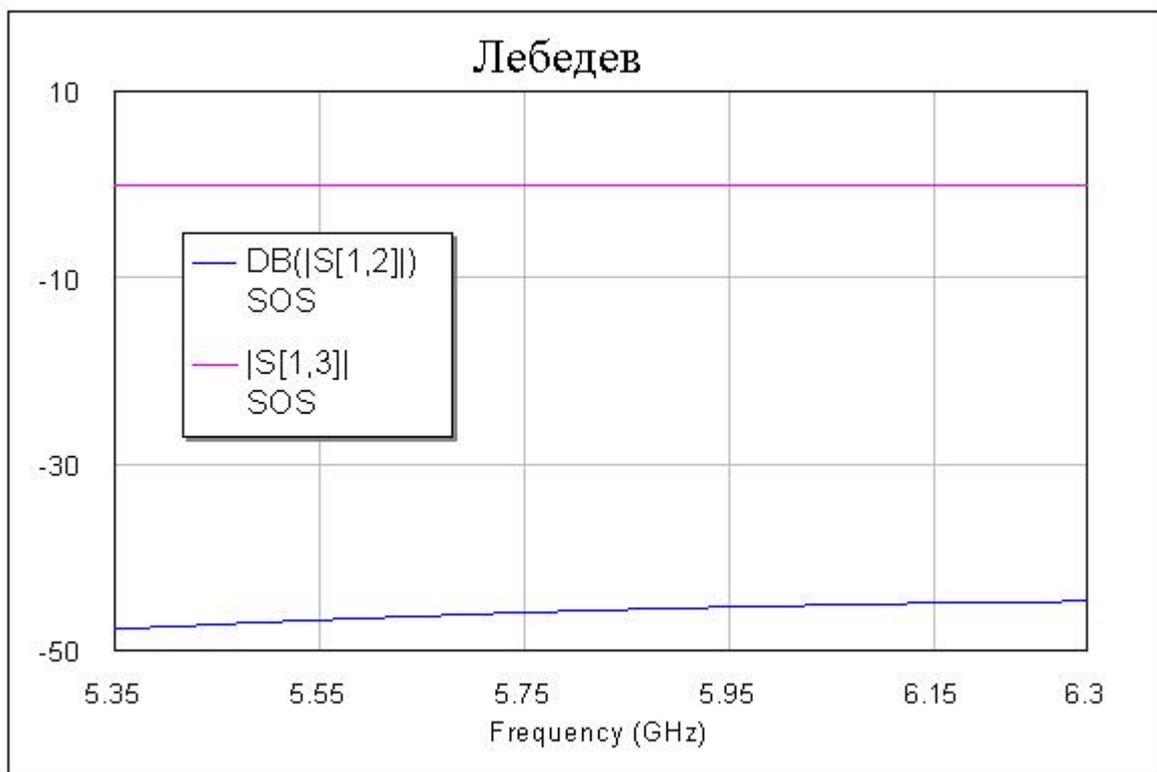


Рисунок 13 — Частотная характеристика диодного переключателя (до оптимизации)

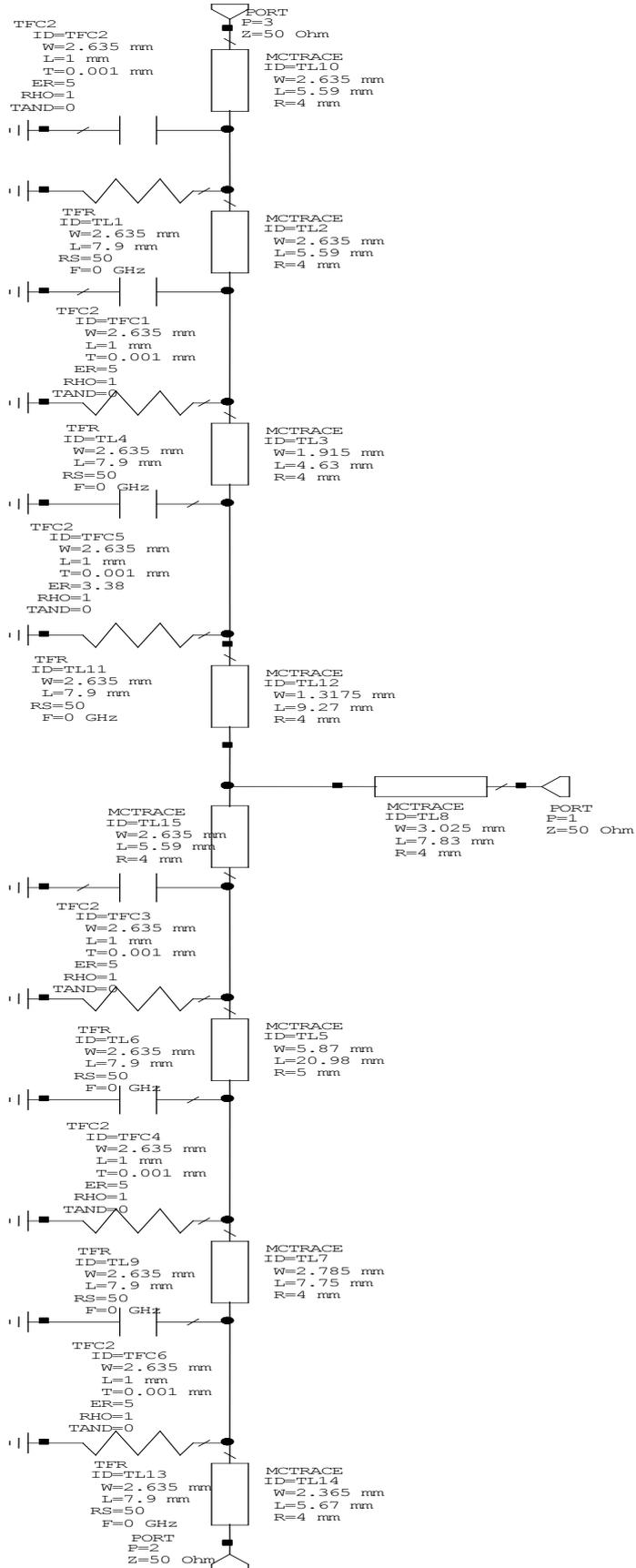


Рисунок 14 — Схема диодного переключателя (после оптимизации)

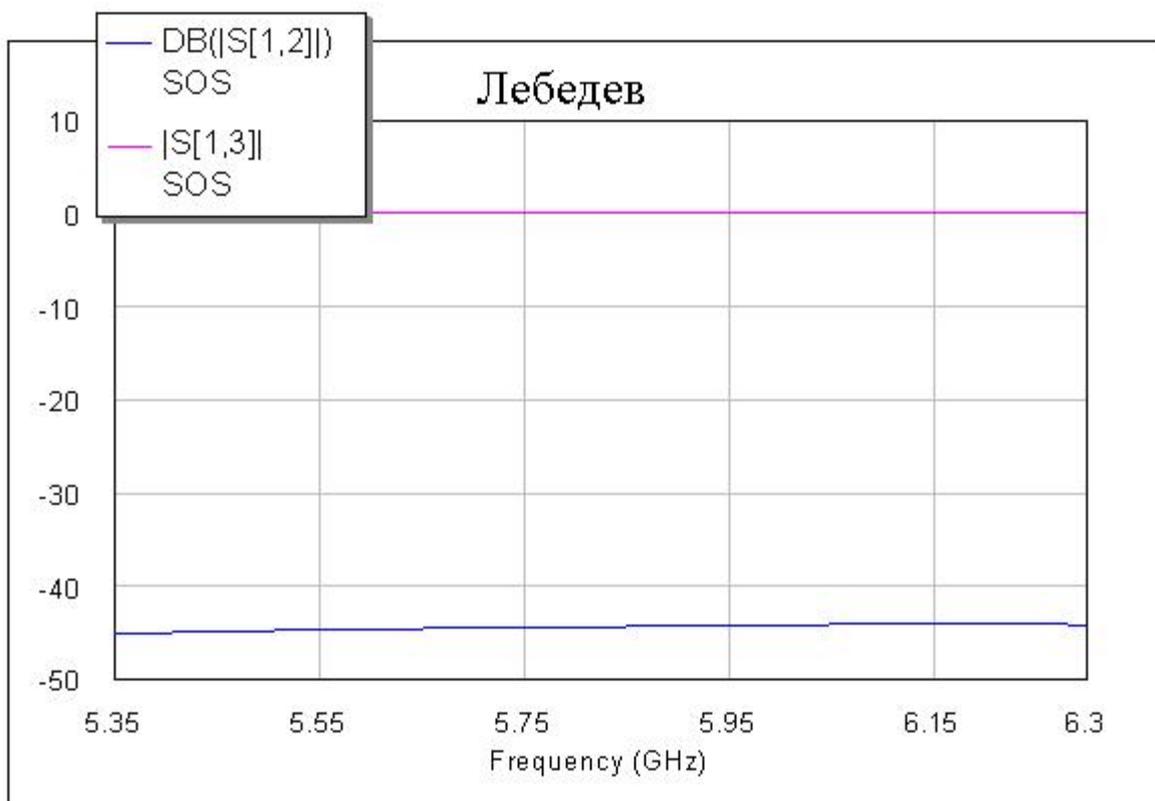


Рисунок 15 — Частотная характеристика диодного выключателя (после оптимизации)

### 3 Расчёт направленного ответвителя мощности

#### 3.1 Выбор типа направленного ответвителя

Полосковые направленные ответвители представляют собой четырёхплечие взаимные устройства (восьмиполюсники), предназначенные для направленного отбора части СВЧ мощности из одного (основного) канала в другой (дополнительный). Его структурная схема приведена на рисунке 16.

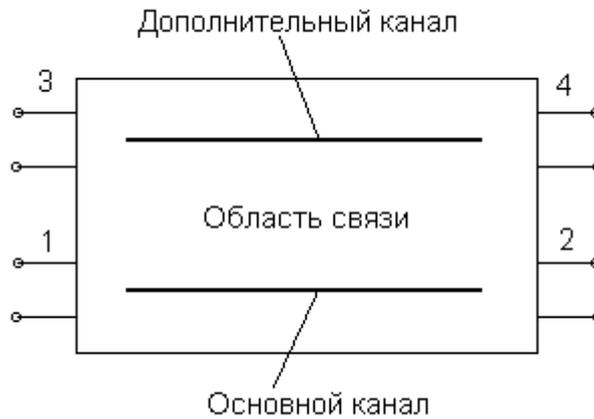


Рисунок 16 — Функциональная схема направленного ответвителя

Для характеристики свойств реальных направленных ответвителей используют следующие параметры.

Рабочее затухание, или выраженное в децибелах отношение мощностей на входе и выходе основного канала:

$$C_{12} = 10 \cdot \lg(P_1/P_2) \quad (43).$$

Переходное ослабление (связь), или отношение мощности  $P_1$  на входе основного канала к мощности  $P_3$ , существующей на выходе рабочего плеча дополнительного канала (дБ):

$$C_{13} = 10 \cdot \lg(P_1/P_3) \quad (44).$$

Развязка, или отношение мощности  $P_1$  на входе основного канала к мощности  $P_4$ , существующей на выходе развязанного плеча дополнительного канала (дБ):

$$C_{14} = 10 \cdot \lg(P_1/P_4) \quad (45).$$

Направленность, или отношение мощностей на выходе рабочего и развязанного плеча дополнительного канала (дБ):

$$C_{34} = 10 \cdot \lg(P_3/P_4) \quad (46).$$

Коэффициент деления мощности, или отношение мощностей на выходе рабочих плеч основного и дополнительного каналов (дБ):

$$C_{23} = 10 \cdot \lg(P_2/P_3) = C_{13} - C_{12} \quad (47).$$

Неравномерность связи  $\Delta C_{13}$  по условию не должна превышать  $\pm 0,5$  дБ.

По степени связи полосковые направленные ответвители делятся на два типа: а) с сильной связью (связь меньше 10 дБ); б) со слабой связью (связь

больше 10дБ). Очевидно, что в данной работе будет использоваться направленный ответвитель со слабой связью.

По виду связи между основным и дополнительным каналом полосковые направленные ответвители делятся на три типа: а) с распределённой электромагнитной связью; б) со связью шлейфного типа; в) с емкостной связью.

Так как шлейфные направленные ответвители применяются, как правило, для получения сильной связи, а направленные ответвители с емкостной связью предназначены для симметричных полосковых волноводов на частотах ниже 4 ГГц, то в данной работе будет использован направленный ответвитель с распределённой электромагнитной связью.

Наибольшее распространение среди направленных ответвителей со слабой электромагнитной связью получили ответвители с боковой связью (рисунок 17). Они чаще всего выполняются на основе СВЧ методов печати как на симметричных, так и на несимметричных полосковых волноводах.

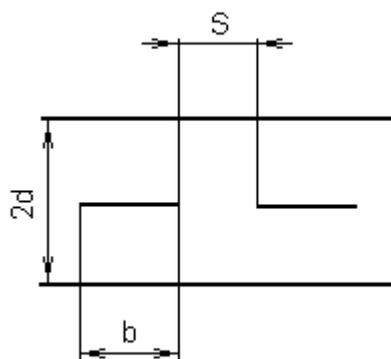


Рисунок 17 — Поперечное сечение полоскового направленного ответвителя с боковой связью на симметричном полосковом волноводе

### 3.2 Расчёт направленного ответвителя с электромагнитной связью

По рассчитанной ранее величине переходного ослабления  $C_{13}$  определим амплитудный коэффициент связи  $k_{св}$  пользуясь следующей формулой:

$$C_{13} = 10 \log \left[ (k_{св})^{-2} \right] \quad (48).$$

Откуда

$$k_{св} = \sqrt{\frac{1}{\frac{C_{13}}{10^{10}}}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{14}{10^{10}}}} = 0.2$$

Найдём характеристические сопротивления чётного  $Z_{oe}$  и нечётного  $Z_{oo}$  типов колебаний по формулам:

$$Z_{oe} = Z \cdot \sqrt{\frac{1 + k_{св}}{1 - k_{св}}} \quad (49),$$

$$Z_{oo} = Z \cdot \sqrt{\frac{1 - k_{св}}{1 + k_{св}}} \quad (50),$$

где  $Z$  — сопротивление входных и выходных плеч направленного ответвителя, по условию равное 50 Ом.

Подставляя в формулы (48) и (49) расчётные необходимые для расчёта данные, получим:

$$Z_{oe} = 50 \sqrt{\frac{1 + 0.2}{1 - 0.2}} = 61.23 \text{ Ом},$$

$$Z_{oo} = 50 \sqrt{\frac{1 - 0.2}{1 + 0.2}} = 40.82 \text{ Ом}.$$

Используя полученные ранее значения для характеристических сопротивлений и для выбранной конфигурации направленного ответвителя, вычислим его геометрические размеры, исходя из следующих соотношений:

$$\frac{S}{d} = \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left[ \coth \left[ \frac{94.15\pi \cdot k_{св}}{\sqrt{\varepsilon} \cdot Z \cdot \sqrt{1 - (k_{св})^2}} \right] \right] \quad (51)$$

$$\frac{b}{d} = \frac{188.3}{\sqrt{\varepsilon} \cdot Z_{oe}} - \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left[ 2 \cdot \left[ 1 + e^{\frac{-188.3\pi \cdot k_{св}}{\sqrt{\varepsilon} \cdot Z \cdot \sqrt{1 - (k_{св})^2}}} \right] \right] \quad (52)$$

где  $d$  — толщина диэлектрической подложки, выбранная нами ранее, равная 2 мм;

$\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды ( $\varepsilon = 5$ ).

Подставляя необходимые для расчетов данные в формулы (51) и (52), получим:

$$S = 2 \cdot \left( \frac{2}{3.14} \cdot \ln \left( \coth \left( \frac{94.153 \cdot 140.2}{\sqrt{5} \cdot 50 \cdot \sqrt{1 - 0.2^2}} \right) \right) \right) = 0.90 \text{ мм}$$

$$b = 2 \cdot \left[ \frac{188.3}{\sqrt{5} \cdot 61.237} - \frac{1}{3.14} \cdot \ln \left[ 2 \cdot \left( 1 + e^{\frac{-188.33 \cdot 14 \cdot 0.2}{\sqrt{5} \cdot 50 \cdot \sqrt{1-0.2^2}}} \right) \right] \right] = 2.123 \text{ мм}$$

Определим длину области связи направленного ответвителя по следующей формуле:

$$l = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \sqrt{\varepsilon}}, \quad (53)$$

$$l = \frac{0.05}{4 \cdot \sqrt{5}} = 5.59 \times 10^{-3} \text{ м} = 5.6 \text{ мм}$$

## **Заключение**

Результатом данной работы стало спроектированное антенное устройство, обеспечивающее поочерёдное подключение антенны к передатчику и к приёмнику. В режиме передачи устройство должно обеспечивать отвлечение части мощности от генератора.

В результате выполнения курсового проекта были закреплены теоретические знания, полученные при изучении курса «Радиолокационные оборудование ВС», а также получены практические навыки работы со справочным материалом.

### Литературы

1. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: Учеб. для радиотехнич. спец. вузов. — М.: Высш. шк., 1988. — 432 с.: ил.
2. Р. А. Вечканова, Н. М. Галдина, Ю. Н. Лавро, И. А. Петров  
Проектирование СВЧ-выключателей и переключателей на полупроводниковых диодах: Методические указания к выполнению курсовых проектов. — Куйбышев: КуАИ., 1985. — 25с.: ил.
3. Конструирование и расчёт полосковых устройств: Учебник под редакцией И. С. Ковалёва. — М.: Советское радио, 1974.  
Справочник по расчёту и конструированию СВЧ полосковых устройств С. И. Бахарев, В. И. Вольман, Ю. Н. Либ и др.; Под ред. В.И. Вольмана. — М.: Радио и связь, 1982. — 328с., ил.
4. Справочник радиолюбителя-конструктора. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1978. 752 с. с ил.