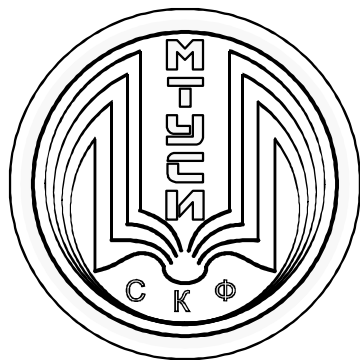


МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ  
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Северо-Кавказский филиал  
ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Московский технический университет связи и информатики»



Кафедра «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Методические указания  
к выполнению практических занятий по дисциплине

**Антенно-фидерные устройства**

(для студентов по направлению подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные  
технологии и системы связи квалификации «бакалавр»)

Ростов-на-Дону  
2022

УДК

Составители: доцент кафедры ИТСС Борисов Б.П.,  
профессор кафедры ИТСС Жуковский А.Г.

Методические указания предназначены для обеспечения проведения практических занятий со студентами направления подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, квалификации «бакалавр».

Пособие обеспечивает получение практических навыков по основополагающим вопросам изучаемой дисциплины.

Объем методического пособия определен программой по дисциплине «Антенно-фидерные устройства» для студентов очной, очно-заочной и заочной форм обучения.

Рецензент: Доцент кафедры ИТСС, к.т.н., доцент Ершов В.В.

Методическое пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры ИТСС «28» ноября 2022 г. Протокол № 4.

© СКФ МТУСИ, Борисов Б.П., Жуковский А.Г., 2022 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

1	Организация и проведение практических занятий	4
2	Практическое занятие № 1 Тема: «Построение диаграммы направленности полуволнового вибратора»	6
3	Практическое занятие № 2 Тема: «Расчет энергетики радиолинии»	14
4	Практическое занятие № 3 Тема: «Построение диаграммы направленности параболической антенны»	24
5	Практическое занятие № 4 Тема: «Расчет рупорно-параболических антенн»	25
6	Практическое занятие № 5 Тема: «Применение волноводных и рупорных излучателей»	26
7	Практическое занятие № 6 Тема: «Влияние амплитудного распределения на диаграмму направленности антенной решетки»	27
8	Практическое занятие № 7 Тема: «Расчет диаграммы направленности фазированной антенной решетки»	28
9	Практическое занятие № 8 Тема: «Элементы волноводного тракта»	29

## ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

### Цели практических занятий:

- помочь обучающимся систематизировать, закрепить и углубить знания теоретического характера;
- научить студентов приемам решения практических задач, способствовать овладению навыками и умениями выполнения расчетов, графических и других видов заданий;
- научить их работать с книгой, служебной документацией и схемами, пользоваться справочной и научной литературой;
- формировать умение учиться самостоятельно, т.е. овладевать методами, способами и приемами самообучения, саморазвития и самоконтроля.

**Практические занятия** — метод репродуктивного обучения, обеспечивающий связь теории и практики, содействующий выработке у студентов умений и навыков применения знаний, полученных на лекции и в ходе самостоятельной работы.

Практические занятия играют важную роль в выработке у студентов навыков применения полученных знаний для решения практических задач совместно с преподавателем.

Структура практических занятий:

1. Вступление преподавателя – 5мин.
2. Ответы на вопросы студентов по неясному материалу – до 10 мин. вначале и далее по мере необходимости.
3. Практическая часть – до 160 мин.
4. Заключительное слово преподавателя – до 5мин.

Практические занятия представляют собой занятия по решению различных прикладных задач, теоритический материал для которых был дан на лекциях. В итоге у каждого обучающегося должен быть выработан определенный профессиональный подход к решению каждой задачи и интуиция. На практические занятия выносятся четыре задачи. Преподаватель стремится к тому, чтобы занятие давало целостное представление о предмете и методах изучаемой дисциплине, причем методическая функция выступает здесь в качестве ведущей.

## Список рекомендованной литературы:

1. Регламент радиосвязи Международного союза электросвязи. 2012 г. Международный союз электросвязи (ITU).
2. Г.П. Катунин, Г.В. Мамчев, В.П. В.Н. Попантонопуло, Шувалов; Телекоммуникационные системы и сети: Учебное пособие. В 3 томах. Том 2 – Радиосвязь, радиовещание, телевидение под ред. профессора В.П. Шувалова –М.: Горячая линия - Телеком, 2014.
3. В.В. Величко, Г.П. Катунин, В.П. Шувалов; Основы инфокоммуникационных технологий. Учебное пособие для вузов под ред. профессора В.П. Шувалова - М.: Горячая линия – Телеком, 2009.
4. Андрусевич Л.К., Ищук А.А., Телешева А.Н. Антенно-фидерные устройства [Электронный ресурс]: методические указания по курсовому проектированию. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2013.
5. Виноградов А.Ю., Кабетов Р.В., Сомов А.М. Устройства СВЧ и малогабаритные антенны [Электронный ресурс]: учебное пособие - М.: Горячая линия - Телеком, 2012.
6. Г.А. Ерохин, О.В. Чернов, Н.Д. Козырев, В.Д. Кочержевский Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн Издательство: М.: Горячая Линия – Телеком, 2007.
7. Л.Я. Кантор Спутниковая связь и вещание: Справочник Издательство: М.: Радио и связь, 1997.

## Практическое занятие № 1

Тема: Построение диаграммы направленности полуволнового вибратора

Постановка задачи:

1. Изучить конструкцию полуволнового вибратора.
2. Построить диаграмму направленности полуволнового вибратора.

### Краткие теоретические сведения

Радиосвязь реализуется с помощью различного вида радиоканалов, когда передача информации осуществляется с помощью радиоволн, распространяющихся в свободном пространстве. Основные достоинства радиосвязи:

- быстрота развертывания системы связи;
- возможность работы с мобильными абонентами;
- возможность широковещательного режима.

Радиоканал (рисунок 1) это канал связи, в котором передача информации осуществляется с помощью радиоволн. Включает среду распространения радиоволн и устройства преобразования электрических сигналов в электромагнитное излучение (радиопередающее устройство) и электромагнитное излучение в электрические сигналы (радиоприёмное устройство).



Рисунок 1 – Радиоканал в системе радиосвязи

Антенна — устройство, предназначенное для излучения или приёма радиоволн. Антенны в зависимости от назначения подразделяются на приёмные, передающие и приёмопередающие. Антенна в режиме передачи преобразует энергию поступающего от радиопередатчика электромагнитного колебания в распространяющуюся в пространстве электромагнитную волну. Антенна в режиме приёма преобразует энергию падающей на антенну электромагнитной волны в электромагнитное колебание, поступающее в радиоприёмник. Таким образом, антенна является преобразователем подводимого к ней по фидеру электромагнитного колебания (переменного электрического тока, канализированной в волноводе электромагнитной волны) в электромагнитное излучение и наоборот.

Все категории сетей связи используют радиоканалы. В радиоканалах распространяются электромагнитные волны в диапазоне от 3 кГц до 3000 ГГц.

Конструкция симметричного полуволнового вибратора (рисунке 1) содержит металлические (токопроводящие) элементы, соединённые электрически (непосредственно или через линию питания — фидер) с радиопередатчиком или с радиоприёмником. В режиме передачи переменный электрический ток, создаваемый источником (например, радиопередатчиком), протекающий по токопроводящим элементам такой антенны, в соответствии с законом Ампера порождает в пространстве вокруг себя переменное магнитное поле. Это меняющееся во времени магнитное поле, в свою очередь, не только воздействует на породивший его электрический ток в соответствии с законом Фарадея, но и создаёт вокруг себя меняющееся во времени вихревое электрическое поле. Это переменное электрическое поле создаёт вокруг себя переменное магнитное поле и так далее — возникает взаимосвязанное переменное электромагнитное поле, образующее электромагнитную волну, распространяющуюся от антенны в пространство. Энергия источника электрического тока преобразуется антенной в энергию электромагнитной волны и переносится электромагнитной волной в пространстве. В режиме приёма переменное электромагнитное поле падающей на антенну волны наводит токи на токопроводящих элементах конструкции антенны, которые поступают в нагрузку (фидер, радиоприёмник). Наведённые токи порождают напряжения на входном

импедансе приёмника. Его длина полуволнового вибратора равна половине длины волны излучаемых им электромагнитных волн.

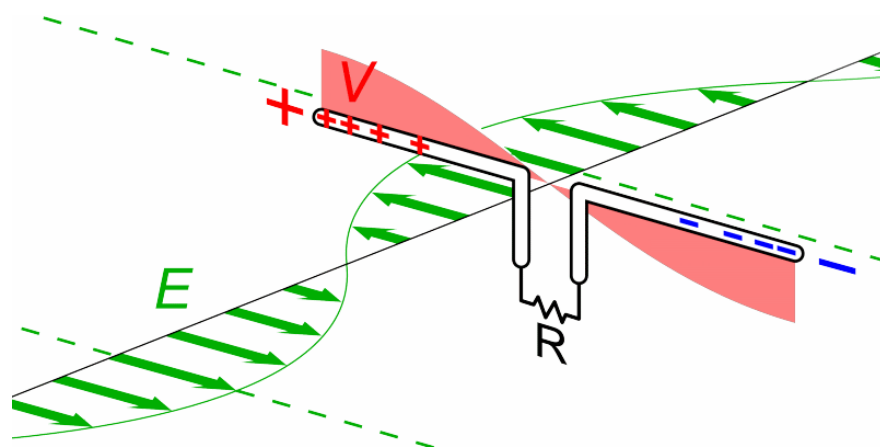


Рисунок 1 - Симметричный полуволновый вибратор

Почти все антенны коротковолнового и ультракоротковолнового диапазона представляют собой комбинации из полуволновых вибраторов.

Электромагнитное излучение, создаваемое вибратором, обладает свойствами направленности и поляризации. Вибратор как двухполюсник обладает входным сопротивлением (импедансом). Он преобразует в электромагнитную волну лишь часть энергии источника; остальная энергия расходуется в виде тепловых потерь. Для количественной оценки перечисленных и ряда других свойств антенна описывается набором радиотехнических и конструктивных характеристик и параметров, в частности:

- диаграмма направленности (ДН);
- ширина ДН по заданному уровню;
- уровень боковых лепестков (УБЛ); коэффициент рассеяния
- тип поляризации и поляризационная диаграмма;
- коэффициент направленного действия (КНД);
- коэффициент усиления (КУ);
- входное сопротивление;
- резонансная частота;
- рабочая полоса частот (по качеству согласования);
- входной импеданс антенны;
- коэффициент стоячей волны (КСВ) в линии передачи;



- максимальная допустимая мощность на входе антенны (средняя, импульсная);
- коэффициент полезного действия (КПД);
- действующая высота;
- эффективная изотропно излучаемая мощность (характеристика системы антенна + радиопередатчик);
- масса, координаты центра масс, момент инерции;
- габаритные размеры, максимальный радиус разворота
- устойчивость к внешним воздействиям (климатическим, механическим и др.);
- надежность, долговечность (срок службы, назначенный ресурс и др.).

Фактически электрическая и геометрическая длины вибратора равны только в том случае, когда проводник становится бесконечно тонким. Скорость распространения (отшнуровывания) электромагнитных волн от проводника несколько меньше, чем скорость распространения света. В связи с этим, особенно на концах антенны, возникает емкостный ток, который эквивалентен увеличению длины антенны. Поэтому действительная длина вибратора (геометрическая длина) должна быть несколько уменьшена по отношению к его электрической длине. В действительности коэффициент укорочения трудно точно определить, так как на него влияют высота подвеса антенны, окружающие предметы (дома, деревья) и т. д. В УКВ диапазоне, кроме того, коэффициент укорочения зависит и от отношения  $\lambda/d$ .

На рисунке 2 изображена зависимость коэффициента укорочения ( $k$ ) полуволнового вибратора в УКВ диапазоне от длины волны и диаметра провода вибратора.

Пример. Требуется найти геометрическую длину вибратора (полуволнового) для частоты 144 МГц диаметром 25 мм.

Частота 144 МГц соответствует длине волны приблизительно 208 см. Отсюда получаем соотношение  $208 \text{ см} : 2,5 \text{ см} = 80$ . По графику рисунке 2 находим, что отношению  $\lambda/d = 80$  соответствует коэффициент укорочения  $k = 0,90$ . Таким образом, требуемая длина вибратора равна  $(\lambda/2) \cdot k = (208/2) \cdot 0,90 = 93,6 \text{ см}$ .

Следует отметить, что часто применяемая для расчета УКВ вибраторов упрощенная формула

$$l[\text{м}] = 141/f[\text{МГц}]$$

не учитывает влияние отношения  $\lambda/d$  и поэтому дает только приблизительные значения.

В коротковолновом же диапазоне, где отношение  $\lambda/d$  больше 5000 ( $f < 30$  МГц), упрощенные формулы

$$l[\text{м}] = 142,2/f[\text{МГц}] \text{ или}$$

$$l[\text{м}] = 142200f[\text{кГц}].$$

вполне удовлетворяют всем требованиям практики для полуволновых вибраторов.

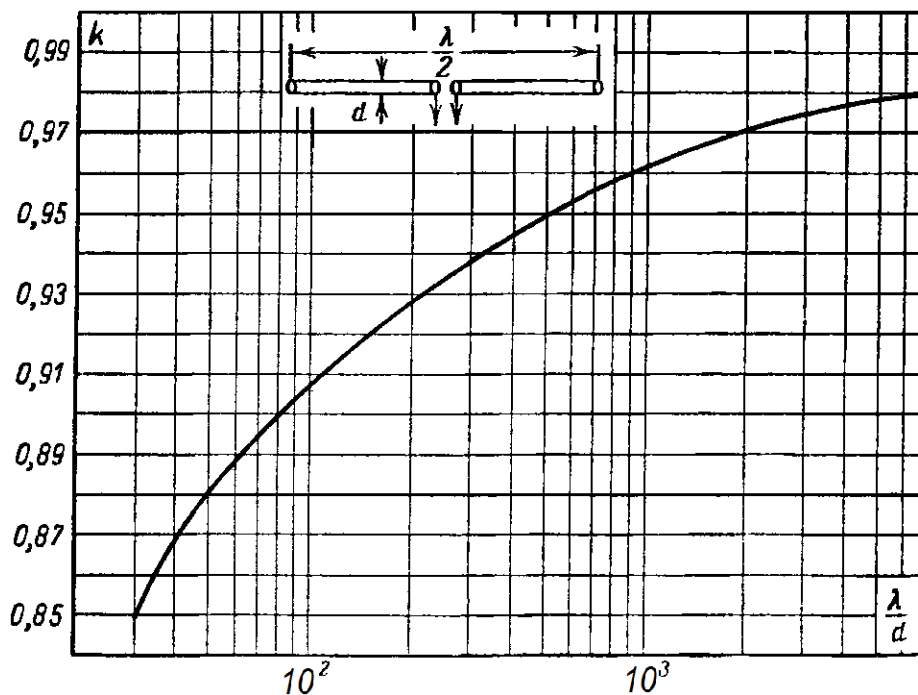


Рисунок 2 - Коэффициент укорочения ( $k$ ) полуволнового вибратора в зависимости от отношения  $\lambda/d$

Сопротивлением излучения вибратора называется активное эквивалентное сопротивление, на котором рассеивается мощность, равная мощности излучения вибратора при равенстве токов в вибраторе и в сопротивлении. При помощи сопротивления излучения определяется потребление мощности вибратором. Для того чтобы сравнивать друг с другом различные вибраторы, сопротивление излучения относится к току в пучности. В случае резонанса сопротивление излучения настроенного вибратора и сопротивление потерь в сумме составляют активное входное сопротивление или сопротивление на зажимах вибратора. Обычно

сопротивление потерь значительно меньше сопротивления излучения. Сопротивление излучения зависит от расположения вибратора по отношению к Земле и окружающим предметам, а также от ее геометрических размеров.

При известной излучаемой мощности  $P_{\text{изл}}$  и максимальном значении тока  $I_{\text{макс}}$  сопротивление излучения может быть рассчитано по формуле

$$R_{\text{изл}} = P_{\text{изл}} / I_{\text{макс}}^2.$$

Так как питание полуволновых вибраторов производится в пучности тока (геометрическом центре), то, следовательно, входное сопротивление равно сопротивлению излучения.

Теоретически входное сопротивление полуволнового вибратора 73 ом, но это значение определено в предположении, что проводник бесконечно тонкий (отношение  $\lambda/d = \infty$ ) и антенна расположена бесконечно высоко над Землей.

В диапазоне КВ и УКВ диаметр провода вибратора редко бывает меньше 2 мм, при этом входное сопротивление равно от 60 до 65 ом.

Кривая рисунка 3 показывает зависимость входного сопротивления полуволнового вибратора от отношения  $\lambda/d$ .

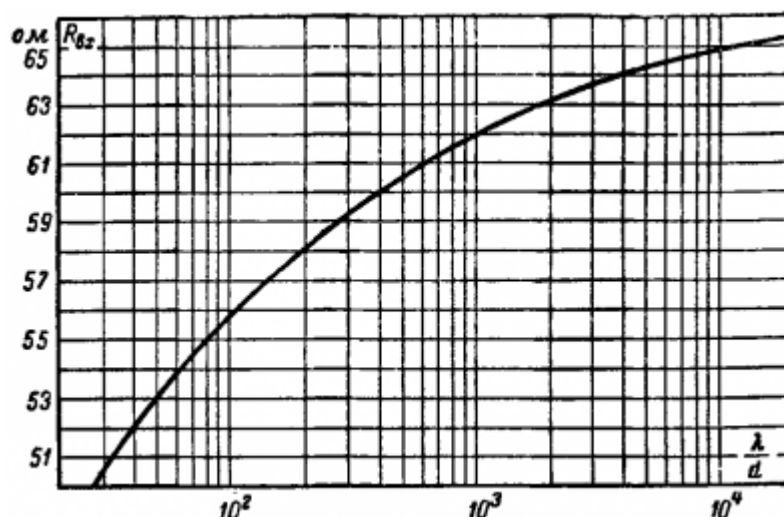


Рисунок 3 - Входное сопротивление полуволнового вибратора в зависимости от отношения  $\lambda/d$

Электромагнитные волны распространяются от вибратора со скоростью света, но распределение излучения по всем направлениям происходит неравномерно. У всех антенн в определенных направлениях имеются максимумы, а в других — минимумы

излучения. Для того чтобы полностью изобразить диаграмму направленности излучения, ее необходимо построить в трехмерном пространстве. На практике, однако, оказывается достаточным рассматривать сечения диаграммы направленности горизонтальной и вертикальной плоскостями.

Диаграмма направленности симметричного вибратора рассчитывается по формуле:

$$f^{\text{норм}}(\theta) = \frac{\cos(kl \cos(\theta)) - \cos(kl)}{\sin(\theta)(1 - \cos(kl))}$$

где  $k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$ ;

$\theta$  - угол, отсчитываемый от оси вибратора.

Излучаемая мощность характеризуется сопротивлением излучения. Сопротивление излучения тонкого симметричного вибратора, отнесенное к току в пучности, в зависимости от  $l/\lambda$  имеет вид (рисунок 4)

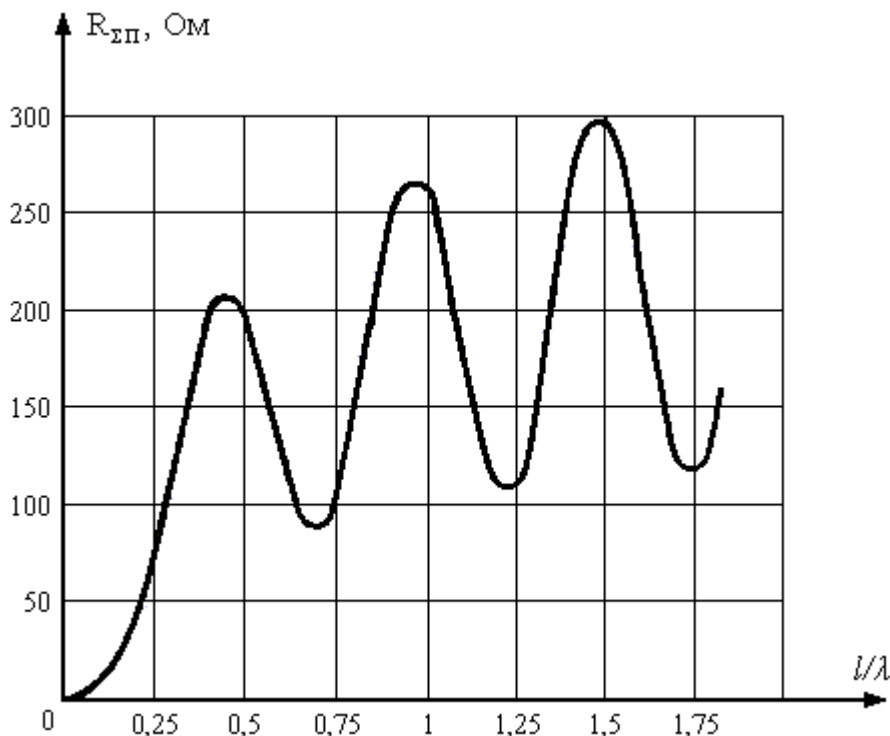


Рисунок 4 – Зависимость сопротивления излучения

Сопротивлением излучения антенны называется активное эквивалентное сопротивление, на котором рассеивается мощность, равная мощности излучения антенны при равенстве токов в антенне и в сопротивлении. При помощи сопротивления излучения определяется потребление мощности антенной. Для того чтобы сравнивать друг с другом различные антенны, сопротивление излучения относится к току в пучности. В случае резонанса сопротивление излучения настроенной антенны и сопротивление потерь в сумме составляют активное входное сопротивление или сопротивление на зажимах антенны. Обычно сопротивление потерь значительно меньше сопротивления излучения. Сопротивление излучения зависит от расположения антенны по отношению к Земле и окружающим предметам, а также от ее геометрических размеров.

#### Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Тему, постановку задачи.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Диаграмма направленности полуволнового вибратора.
4. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Основные элементы конструкции полуволнового вибратора.
2. Представьте распределение тока на полуволновом вибраторе.
3. Назовите отличительные признаки дальней, промежуточной и ближней зон излучения.
4. Что такое коэффициент направленного действия антенны?
5. Что такое коэффициент усиления антенны?
6. В каких плоскостях строится диаграмма направленности.
7. Как соотносятся физическая и действующая длины симметричного вибратора?

## Практическое занятие № 2

Тема: Расчет энергетики радиолинии

Постановка задачи:

Выполнить расчет энергетики радиолинии.

Краткие теоретические сведения

Расчет и обоснование энергетических параметров станций: мощности передатчика, затухания в АФТ, коэффициента усиления антенны, реальной (пороговой) чувствительности приемника или его шумовых параметров, требуемого запаса уровня СВЧ-радиосигнала на интервале является основной целью энергетического проектирования линии связи.

Улучшить энергетику радиолинии можно за счет:

- увеличения мощности передатчика;
- увеличения коэффициентов усиления антенн;
- повышения чувствительности приемника.

Увеличение мощности передатчика влечет за собой увеличение энергопотребления, а также массы и габаритов передатчика. Кроме того, увеличение мощности передатчика в условиях Релеевского канала малоэффективно, так как расстояние в этом случае растет пропорционально третьей, а то и четвертой степени мощности, то есть для увеличения расстояния в два раза потребуется увеличить мощность в 8 -16 раз! Так же трудно рассчитывать на увеличение энергетического потенциала линии за счет увеличения коэффициентов усиления антенн. Антенны, предназначенные для мобильных применений, должны иметь малые габариты, поэтому сложно получить от них высокое усиление.

По указанным причинам повышение чувствительности приемника – это самый лучший путь повышения энергетического потенциала радиолинии. Очевидный путь повышения чувствительности приемника состоит в снижении коэффициента шума активных приборов входного устройства (NF) и потерь в пассивных элементах (в

первую очередь, фильтрах) на его входе. Современные транзисторы и микросхемы позволяют реализовать входные устройства с очень низким уровнем теплового шума, но эффективность такого пути также ограничена. При дальнейшем снижении NF над ним начинают превалировать шумы и помехи со стороны приемной антенны. Дальнейшее уменьшение влияния шумов и помех возможно только за счет уменьшения полосы пропускания радиоканала.

Другой эффективный путь повышения чувствительности приемника в условиях многолучевого режима распространения сигнала – это выбор схемы приемника, позволяющей осуществить разделенный прием (Antenna Diversity). Даже при приеме только на две антенны выигрыш по отношению сигнал/шум составляет 7-8дБ, что равносильно увеличению мощности передатчика в 5-6 раз.

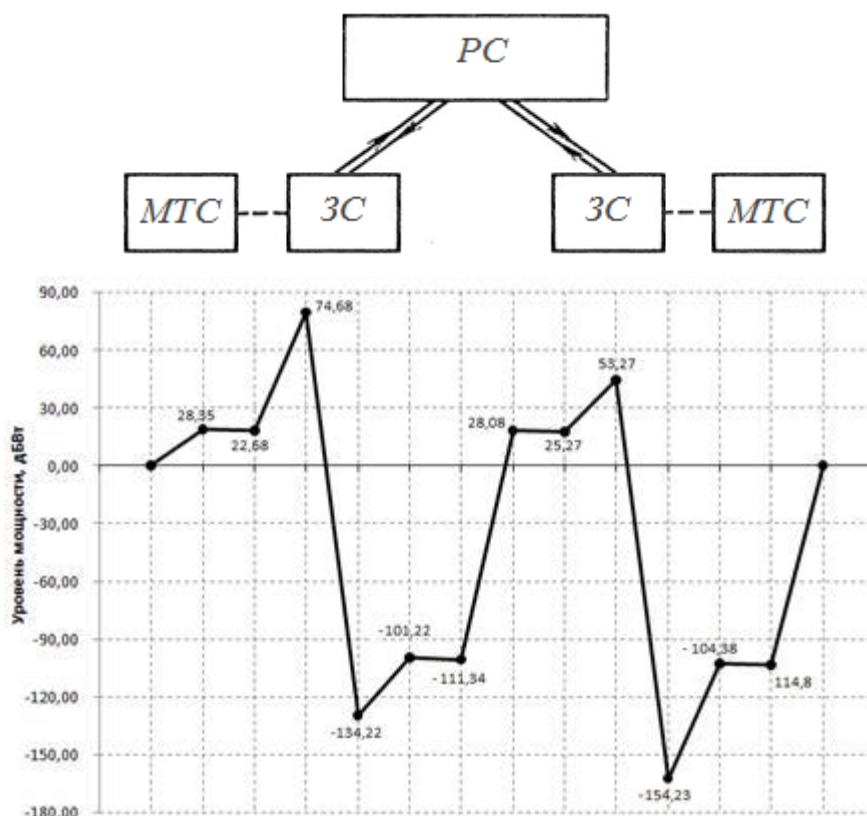


Рисунок 1 - Структурная схема и диаграмма уровней сигнала для линии "ЗС-РС-ЗС"

На рисунке 1 приведена структурная схема и диаграмма уровней сигнала для линии "ЗС-РС-ЗС". В энергетическом смысле оба участка напряженные и неравнозначные: первый — из-за стремления уменьшить мощность передатчика

земной станции и относительно низкой чувствительности приемника ретранслятора, второй — из-за ограничений на массу, габариты и энергетику ретранслятора, т.е. ограничения на мощность бортового передатчика.

Для участка ЗС-РС мощность сигнала на входе бортового приёмника можно определить из первого уравнения передачи

$$P_{\text{прм}}^E = P_{\text{прд}}^З - \Delta W_{\text{АВТпрд}}^З + G_{\text{Апрд}}^З - W_0^{З-E} - W_{\text{доп}}^{З-E} + G_{\text{Апрм}}^E - \Delta W_{\text{АВТпрм}}^E, \text{ [дБ]}. \quad (1)$$

Аналогично для участка РС-ЗС

$$P_{\text{прм}}^З = P_{\text{прд}}^E - \Delta W_{\text{АВТпрд}}^E + G_{\text{Апрд}}^E - W_0^{E-З} - W_{\text{доп}}^{E-З} + G_{\text{Апрм}}^З - \Delta W_{\text{АВТпрм}}^З, \text{ [дБ]}, \quad (2)$$

где  $\Delta W_{\text{АВТ}} = 10 \lg \left( \frac{1}{\eta_{\text{прд}}} \right)$  и  $\Delta W_{\text{АВТ}} = 10 \lg \left( \frac{1}{\eta_{\text{прм}}} \right)$  — потери в антенно-волноводном

тракте передачи и приёма земной станции или бортового ретранслятора соответственно;

$\eta_{\text{прд}}$ ,  $\eta_{\text{прм}}$  — коэффициенты передачи по мощности антенно-волноводного тракта передачи и приёма соответственно;

$W_{\text{доп}}$  — дополнительное затухание радиосигнала на участке ЗС-РС (РС-ЗС).

Потери в антенно-волноводном тракте зависят от его конструкции и диапазона рабочих частот. Обычно при расчетах принимают  $\Delta W_{\text{АВТпрм}}^З = 0,5 \dots 1,0 \text{ дБ}$ ,  $\Delta W_{\text{АВТпрд}}^E = 2 \dots 3 \text{ дБ}$ ,  $\Delta W_{\text{АВТпрд}}^E = \Delta W_{\text{АВТпрм}}^E = 1 \dots 2 \text{ дБ}$  [7].

Для оценки энергетического потенциала передающей станции (ретранслятора) спутниковой связи вводят понятие эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (ЭИИМ):

$$P_{\text{прдЭ}} = P_{\text{прд}} + G_{\text{Апрд}} - \Delta W_{\text{АВТпрд}}, \text{ [дБ]}. \quad (3)$$

Полное затухание радиосигналов в линиях спутниковой связи определяется потерями в свободном пространстве  $W_0$  и дополнительными потерями  $W_{\text{доп}}$ , обусловленными особенностями функционирования систем спутниковой связи:

$$W = W_0 + W_{\text{доп}}, \text{ [дБ]}. \quad (4)$$

Потери энергии радиоволн при распространении в свободном пространстве определяются в соответствии с выражением



$$W_0 = 20 \lg \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot R_n}{\lambda} \right), \text{ [дБ]}, \quad (5)$$

где  $R_n$  — наклонная дальность на участках радиолинии КС, определяемая как

$$R_n = \sqrt{R_s^2 + (R_s + H)^2 - 2 \cdot (R_s + H) \cdot R_s \cdot \cos \rho}, \quad (6)$$

где  $R_s = 6371 \text{ км}$  — радиус Земли (при её аппроксимации сферой);

$H$  — высота орбиты ИСЗ (для геостационарной орбиты  $H=35875 \text{ км}$ , для высокоэллиптических орбит  $H$  - высота апогея);

$\rho$  — топоцентрический параметр, который может быть определен из выражения

$$\cos \rho = \cos \varphi_{pc} \cos \Delta \lambda \cos \varphi_{zc} + \sin \varphi_{pc} \sin \varphi_{zc} \quad (7)$$

где  $\varphi_{pc}$  — географическая широта под спутниковой "точки";

$\varphi_{zc}$  — географическая широта земной станции;

$$\Delta \lambda = \lambda_{zc} - \lambda_{pc};$$

$\lambda_{zc}$  — географическая долгота ЗС;

$\lambda_{pc}$  — географическая долгота под спутниковой "точки".

При расчете энергетических параметров сети спутниковой связи  $R_n$  следует выбрать максимальным для заданной зоны обслуживания. Для выполнения этого условия из исходных данных выберем географические координаты ЗС и РС таким образом, чтобы ЗС находилась на максимальном расстоянии от подспутниковой "точки" для заданной зоны обслуживания. Имеем  $\varphi_{pc} = 50^0$ ,  $\lambda_{pc} = 10^0 \text{ в.д.}$

Дополнительное затухание радиосигнала на участках радиолинии КС  $W_{\text{доп}}$  зависит от многих факторов, проявляющихся независимо друг от друга и может быть представлено в виде суммы:

$$W_{\text{доп}} = W_a + W_\delta + W_n + W_{\pi}, \quad (8)$$

где  $W_a$  — затухание в атмосфере без осадков;

$W_\delta$  — затухание в осадках;

$W_n$  — затухание, учитывающее неточность наведения антенн;

$W_{\pi}$  — затухание за счет деполяризации сигнала в среде распространения.

Затухание в атмосфере без осадков  $W_a$  определяется главным образом поглощением в тропосфере и имеет ярко выраженный частотно-зависимый характер с резонансными пиками на частотах 22 и 165 ГГц (для водяных паров) и 60 и 120 ГГц (для кислорода). Очевидно, что длина пути радиосигнала в атмосфере зависит не только от эквивалентной толщины атмосферы, но и от угла места антенны земной станции и высоты ЗС над уровнем моря  $H_{zc}$ .

Потери энергии радиосигнала в атмосфере без осадков не зависят от времени (имеют место в течение 100% времени работы радиолинии) и определяются по графикам (рис. 3.1) в зависимости от частоты радиосигнала  $f_{pc}$  и угла места антенны ЗС  $\beta^0$  при  $H_{zc} = 0$ .

Угол места антенны  $\beta^0$  зависит от широты и долготы размещения ЗС, а также от положения ИСЗ на орбите. В общем случае угол места может быть определен из выражения

$$\beta^0 = \arctg \frac{\cos \rho - \gamma_0}{\sin \rho}, \quad (9)$$

где  $\gamma_0 = \frac{R_s}{R_s + H}$

Для заданных исходных данных  $\beta^0 = 30,95^0$ . Т.к. на графиках на рисунке 2 нет кривой для получившегося значения угла места, то искать будем для значения  $\beta^0 = 10^0$ , тем самым заранее завысив потери энергии радиосигнала в атмосфере без осадков. Однако неточность составит не более 0,1 дБ, следовательно на точность расчёта не повлияет. Найдём на линии вверх  $W_{aee}$  ( $f_{ee} = 5,5$  ГГц) и вниз  $W_{aen}$  ( $f_{en} = 3,5$  ГГц).

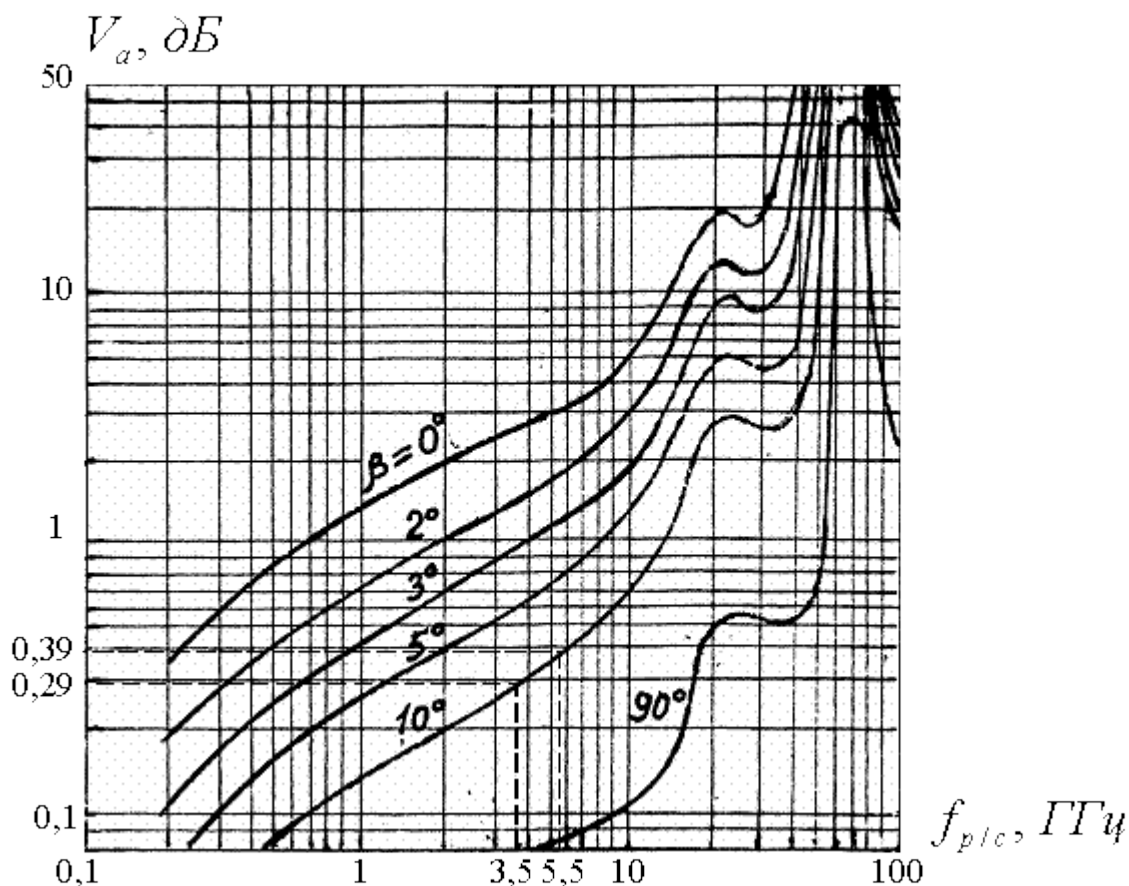


Рисунок 2 - Графики для определения затухания радиосигнала в атмосфере без осадков

Таким образом  $W_{атм} = 0,39 \text{ дБ}$  и  $W_{атм} = 0,29 \text{ дБ}$ .

Затухание сигнала в осадках зависит от вида гидрометеоров (дождь, снег, туман), размеров зоны их выпадения, интенсивности осадков в зоне и т.д. Как указано в [7] расчёты показывают, что в диапазонах частот  $f_{p/c} \leq 10 \text{ ГГц}$  величина затухания радиосигнала в осадках составляет  $W_{\delta} = 1,5 \dots 3 \text{ дБ}$ . Поэтому примем  $W_{\delta} = 3 \text{ дБ}$ .

Дополнительное затухание сигнала за счет неточного наведения антенн ЗС и РС друг от друга  $W_{*}$  обусловлено рефракцией радиоволн, что приводит к образованию угла между истинным и кажущимся направлениями ИСЗ. Угловое отклонение, вызванное рефракцией, составляет несколько десятых долей градуса и может быть скомпенсировано при автоматическом наведении антенн по максимуму

сигнала. При других методах наведения с учетом погрешностей конструкции устройства наведения можно принять  $W_{\alpha} = 1 \text{ дБ}$ .

Поляризационные потери на участках линии КС складываются из потерь, вызванных несогласованностью поляризации, потерь, связанных с эффектом Фарадея, и потерь из-за деполяризации радиоволн в осадках.

Потери, вызванные несогласованностью поляризации имеют существенное значение при использовании на ЗС и РС узконаправленных антенн и применении линейной поляризации. Использование круговой поляризации позволяет эти потери сделать пренебрежимо малыми. Потери, обусловленные эффектом Фарадея, проявляются при использовании сигналов с линейной поляризацией, зависят от частоты и пренебрежимо малы. Потери из-за деполяризации радиоволн при осадках больше характерны для сигналов с круговой поляризацией, носят статистический характер, связанный со статистикой выпадения дождей, и могут оказывать заметное влияние на энергетику систем спутниковой связи на частотах выше 12 ГГц [7].

При использовании на линиях КС круговой поляризации сигналов результирующие поляризационные потери принимают  $W_{\alpha} = 0$ .

Таким образом, получаем ослабление радиосигнала на участке вниз  $W_{\text{вн}} = 199,348 \text{ дБ}$  и на участке вверх  $W_{\text{вв}} = 203,374 \text{ дБ}$ . Хорошо видно, что ослабление на участке вниз меньше, чем на участке вверх на 4 дБ. Такое отличие связано с тем, что радиосигнал на более высоких частотах претерпевает большее затухание, чем на частотах ниже. Именно этим обусловлен тот факт, что для значения частоты радиосигнала на участке РС-ЗС всегда выбирается меньшее значение, чем на участке ЗС-РС. Ведь на борту ИСЗ энергетика жестко ограничена, что сильно оказывает влияние на максимальную выходную мощность передатчика ретранслятора связи.

Усиление антенны  $(G_A)$  земной станции на передачу или на приём можно определить по диаметру зеркала (рефлектора) и длине рабочей волны на участке ЗС-РС  $(\lambda_{\text{З-Б}})$  или на участке РС-ЗС  $(\lambda_{\text{Б-З}})$ :

$$G_{\text{нрм}}^{\text{з}} = 10 \lg \left( \left( \frac{\pi \cdot D}{\lambda_{\text{з-Б}}^{\text{Б-з}}} \right)^2 \cdot \gamma_A \right), \text{ [дБ]}, \quad (10)$$

где  $\gamma_A$  — коэффициент использования поверхности зеркала (КИП) (для однозеркальных  $\gamma_A = 0,6$  для двухзеркальных  $\gamma_A = 0,6 \dots 0,7$ )

Примем КИП (однозеркальная антенна). Из исходных данных  $D = 2,5 \text{ м}$ , следовательно  $G_{\text{нрм}}^{\text{з}} = 40,948 \text{ дБ}$  и  $G_{\text{нрм}}^{\text{з}} = 37,022 \text{ дБ}$ .

Для бортовой антенны обычно задается угол главного лепестка диаграммы направленности  $\Theta_{0,5}^0$ . В этом случае усиление антенны можно определить как

$$G_A^{\text{Б}} = 10 \lg \left( \frac{49000}{(\Theta_{0,5}^0)^2} \cdot \gamma_A \right), \text{ [дБ]}. \quad (11)$$

Для обеспечения связи в пределах заданной зоны (по исходным данным квадрат площадью  $10^0 \times 10^0$ ) на ретрансляторе будем использовать антенну с ШДН  $\Theta_{0,5}^0 = 7^0$ . Её коэффициент усиления составит  $G_A^{\text{Б}} = 27,782 \text{ дБ}$ .

Расчёт энергетического потенциала линии. Введём величину

$$P_{\text{нрм}^{\text{з}}} = P_{\text{нрм}} + G_A^{\text{нрм}} + G_A^{\text{нрм}} - \Delta W_{\text{аэж}}^{\text{нрм}} - \Delta W_{\text{аэж}}^{\text{нрм}}, \quad (12)$$

называемую эквивалентной (эффективной) мощностью передатчика [7], учитывающую влияние всех энергетических параметров интервала на уровень сигнала на входе приёмного устройства.

Разница между эквивалентной мощностью передатчика и реальной чувствительностью приёмника, выраженная в децибелах, называется энергетическим потенциалом станции (системы) [7]

$$M_{\text{з}} = P_{\text{нрм}^{\text{з}}} - P_{\text{нрм}}^{\text{р/ч}}, \text{ [дБ]}. \quad (13)$$

Этот потенциал должен быть достаточным для компенсации полного затухания радиосигнала на участке.

Сведя в выражения (12) и (13) все рассчитанные ранее значения На рисунке 1 приведена структурная схема и диаграмма уровней сигнала для линии "ЗС-РС-ЗС". В энергетическом смысле оба участка напряженные и неравнозначные: первый

— из-за стремления уменьшить мощность передатчика земной станции и относительно низкой чувствительности приемника ретранслятора, второй — из-за ограничений на массу, габариты и энергетику ретранслятора, т.е. ограничения на мощность бортового передатчика.

Для участка ЗС-РС мощность сигнала на входе бортового приёмника можно определить из первого уравнения передачи

$$P_{\text{прм}}^E = P_{\text{крд}}^З - \Delta W_{\text{АВТкрд}}^З + G_{\text{Акрд}}^З - W_0^{З-E} - W_{\text{дон}}^{З-E} + G_{\text{Акрм}}^E - \Delta W_{\text{АВТкрм}}^E \text{ [дБ]}. \quad (14)$$

Аналогично для участка РС-ЗС

$$P_{\text{прм}}^З = P_{\text{крд}}^E - \Delta W_{\text{АВТкрд}}^E + G_{\text{Акрд}}^E - W_0^{E-З} - W_{\text{дон}}^{E-З} + G_{\text{Акрм}}^З - \Delta W_{\text{АВТкрм}}^З \text{ [дБ]} \quad (15)$$

$$\Delta W_{\text{АВТ}} = 10 \lg \left( \frac{1}{\eta_{\text{крд}}^{\text{прм}}} \right)$$

где — потери в антенно-волноводном тракте передачи (приёма) земной станции или бортового ретранслятора;

$\eta_{\text{крд}}^{\text{прм}}$  — коэффициент передачи по мощности антенно-волноводного тракта передачи или приёма;

$W_{\text{дон}}$  — дополнительное затухание радиосигнала на участке ЗС-РС (РС-ЗС).

Потери в антенно-волноводном тракте зависят от его конструкции и диапазона рабочих частот. Обычно при расчетах принимают  $\Delta W_{\text{АВТкрд}}^З = 2 \dots 3 \text{ дБ}$ ,  $\Delta W_{\text{АВТкрм}}^З = 0,5 \dots 1 \text{ дБ}$ ,  $\Delta W_{\text{АВТкрд}}^E = \Delta W_{\text{АВТкрм}}^E = 1 \dots 2 \text{ дБ}$  [1].

Для оценки энергетического потенциала передающей станции (ретранслятора) спутниковой связи вводят понятие эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (ЭИИМ):

$$P_{\text{крдЭ}} = P_{\text{крд}} + G_{\text{Акрд}} - \Delta W_{\text{АВТкрд}}, \text{ [дБ]}. \quad (16)$$

Для участков РС-ЗС и ЗС-РС, получим энергетический потенциал передатчиков РС и ЗС  $M_{\text{ЭкрдРС}} = 210,362 \text{ дБи}$  и  $M_{\text{ЭкрдЗС}} = 205,374 \text{ дБ}$  соответственно.

Для РРЛ энергетику можно рассчитать воспользовавшись сайтом фирмы «Микран»: [http://www.micran.ru/link\\_budget/](http://www.micran.ru/link_budget/).

## Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Тему, постановку задачи.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Рассчитать энергетику радиолиний.
4. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Что определяет энергетику радиолинии?
2. Какие конструктивные элементы АФУ влияют на энергетику радиолинии?
3. Какие характеристики необходимо учитывать при расчете энергетики радиолинии.
4. Типы радиолиний и их краткая характеристика.
5. Рассчитать энергетику спутниковой радиолинии и радиорелейной.

## Практическое занятие № 3

Тема: Построение диаграммы направленности параболической антенны

Постановка задачи:

1. Изучить конструкцию параболической антенны.
2. Построить диаграмму направленности параболической антенны.

.Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Тему, постановку задачи.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Основные характеристики параболической антенны. Диаграмма направленности.
4. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Основные элементы конструкции параболической антенны.
2. Назовите основные законы геометрической оптики.
3. В чем смысл апертурного метода расчета антенн?
4. Как рассчитывается диаграмма направленности плоского излучающего раскрыва?
5. От каких параметров зависит КНД апертурной антенны?
6. Объясните смысл коэффициента использования площади раскрыва антенны.
7. Какова последовательность расчета параболических антенн апертурным методом?
8. Как можно управлять направлением главного лепестка диаграммы направленности параболической антенны?
9. Чем антенна Кассегрена отличается от антенны Грегори?
10. Какие типы облучателей используются в параболических антеннах?



## Практическое занятие № 4

Тема: Расчет рупорно-параболических антенн.

Постановка задачи:

1. Изучить конструкцию и принцип работы рупорно-параболических антенн.
2. Построить диаграмму направленности рупорно-параболических антенн.

Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Тему, постановку задачи.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Расчеты и диаграмму направленности рупорно-параболических антенн.
4. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Что называется эквивалентной шумовой температурой антенны и от чего она зависит?
2. Какой вид фазовых ошибок имеет место в рупорных антеннах?
3. Поясните принцип формирования в рупорных антеннах поля с вращающейся поляризацией.
4. Сформулируйте требования к рупорно-параболической антенне?
5. В чем состоит принцип действия антенны с вынесенным облучателем?
6. Какие способы снижения бокового излучения рупорно-параболических антенн Вам известны?

## Практическое занятие № 5

Тема: Применение волноводных и рупорных излучателей

Задание:

1. Изучить конструкцию волноводных и рупорных излучателей.
2. Провести анализ применения волноводных и рупорных излучателей.
3. Определить основные характеристики волноводных и рупорных излучателей.

Контрольные вопросы (ОПК-2):

1. Что такое оптимальный рупор?
2. Какой вид фазовых ошибок имеет место в рупорных антеннах?
3. Какие два основных типа волн существуют для направляющих систем?
4. Что такое критическая длина волны в закрытых направляющих системах?
5. Где применяются волноводные и рупорные излучатели?
6. Нарисуйте картину силовых линий электрического и магнитного полей для волны  $H_{10}$  прямоугольного волновода.
7. Нарисуйте картину силовых линий электрического и магнитного полей для волны  $H_{11}$  круглого волновода.
8. Какие два метода возбуждения волноводов используются на практике?

Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Тему, постановку задачи.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Основные характеристики волноводных и рупорных излучателей.

Диаграмма направленности.

4. Выводы.

## Практическое занятие 6

Тема: Влияние амплитудного распределения на диаграмму направленности антенной решетки

Постановка задачи:

1. Изучить влияние амплитудного распределения на диаграмму направленности антенной решетки
2. Построить диаграмму направленности ФАР построенную на вибраторах.

Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Тему, постановку задачи.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Конструкция ФАР построенная на вибраторах различного типа.
4. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Что такое сканирование диаграммой направленности?
2. В каких видах антенн возможно эффективное электронное управление диаграммой направленности?
3. Что определяет амплитудное распределение поля в раскрыве антенной решетки?
4. На что влияет амплитудное распределение поля в раскрыве антенной решетки?

## Практическое занятие 7

Тема: Расчет диаграммы направленности фазированной антенной решетки

### Задание

1. Изучить конструкцию параболической фазированной антенной решетки.
2. Построить диаграмму направленности фазированной антенной решетки

### Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Тему, постановку задачи.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Конструкция ФАР построенная на вибраторах различного типа.
4. Выводы.

### Контрольные вопросы:

1. Основные элементы конструкции фазированной антенной решетки.
2. Назовите основные законы электродинамики.
3. Что определяют ДН элементов фазированной антенной решетки?
4. Как рассчитывается диаграмма направленности фазированной антенной решетки?
5. От каких параметров зависит КНД фазированной антенной решетки?
6. Что такое эквидистантная линейная решётка излучателей?
7. Что происходит с уровнем боковых лепестков ДН при увеличении количества излучателей?
8. Как можно управлять направлением главного лепестка диаграммы направленности фазированной антенной решетки?
9. Какие из режимов работы антенной решетки нашли применение на практике?
10. Какие типы облучателей используются в фазированных антенных решетках?

## Практическое занятие 8

Тема: Элементы волноводного тракта

Постановка задачи:

Изучить конструкцию и основные свойства элементов волноводного тракта

Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Тему, постановку задачи.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Конструкции элементов волноводного тракта различного типа.
4. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Каковы основные свойства ферритов на СВЧ?
2. В чем заключается эффект Фарадея?
3. Как осуществляется связь кабеля с волноводом трактам?
4. Какое устройство обеспечивает работу волноводного тракта одновременно в нескольких диапазонах частот?
5. При помощи какого элемента волноводного тракта осуществляется регулировка уровня проходящей мощности?
6. Что представляет собой волноводный тройник?
7. Из каких основных элементов состоит устройство разделения частот?
8. Объясните назначение, устройство и принцип работы фазовращателей?

