

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра автоматики, телемеханики и связи

И. О. ЖИГАЛИН, Д. Д. МЕДВЕДЕВ, С. В. КИСЕЛЕВА

ТРАНСПОРТНЫЕ РАДИОСИСТЕМЫ

Пособие

Гомель 2025

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра автоматики, телемеханики и связи

И. О. ЖИГАЛИН, Д. Д. МЕДВЕДЕВ, С. В. КИСЕЛЕВА

ТРАНСПОРТНЫЕ РАДИОСИСТЕМЫ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области транспорта и транспортной деятельности
в качестве пособия по учебной дисциплине «Транспортные радиосистемы»
для студентов специальностей 1-37 02 04
«Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»
и 6-05-0715-09 «Системы обеспечения движения поездов»*

Гомель 2025

УДК 621.396.93(075.8)
ББК 32.88
Ж68

Рецензенты: Начальник Дорожной лаборатории сети связи и передачи данных Конструкторского-технического центра Белорусской железной дороги *А. Ю. Ковальчук*;
кафедра электроснабжения ГГТУ им. П. О. Сухого (зав. кафедрой – канд. техн. наук, доцент *Т. В. Алферова*)

Жигалин, И. О.

Ж68 Транспортные радиосистемы : пособие / И. О. Жигалин, Д. Д. Медведев, С. В. Киселева; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2025. – 76 с.
ISBN 978-985-891-205-5

Приведены основные параметры антенн, принципы построения, устройство, принцип действия основных антенных устройств.

Рассмотрены варианты создания моделей наиболее распространенных конструкций антенн. Содержится краткое описание программы MMANA и примеры ее использования для расчета параметров антенн.

Предназначено для студентов специализации 1-37 02 04 «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» и специальности 6-05-0715-09 «Системы обеспечения движения поездов».

УДК 621.396.93(075.8)
ББК 32.88

ISBN 978-985-891-205-5

© Жигалин И. О., Медведев Д. Д.,
Киселева С. В., 2025
© Оформление. БелГУТ, 2025

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АВ	– активный вибратор
АР	– антенная решетка
ДН	– диаграмма направленности
КНД	– коэффициент направленного действия
КПД	– коэффициент полезного действия
КСВ	– коэффициент стоячей волны (SWR)
КУ	– коэффициент усиления
НСВ	– несимметричный вибратор
СВ	– симметричный вибратор
СУ	– согласующее устройство
УКВ	– ультракороткие волны
ЭМВ	– электромагнитные волны
ЭМП	– электромагнитное поле

1 ОБЩИЕ СВОЙСТВА РАДИОВОЛН

1.1 Распространение радиоволн

Радиосвязь – это электросвязь, осуществляемая посредством радиоволн [18]. Радиоканал представляет собой комплекс технических средств и среды передачи радиоволн, обеспечивающих функционирование радиосвязи. Радиолиния представляет собой радиоканал, обеспечивающий однонаправленную радиосвязь. Радиосеть, в свою очередь, представляет собой совокупность радиолиний, работающих на одной общей группе частот, доступной всем абонентам.

Радиоволны возбуждаются передающими антеннами и распространяются через различные природные среды, поэтому среда распространения является неотъемлемой частью любой радиолинии или радиосети (рисунок 1.1).

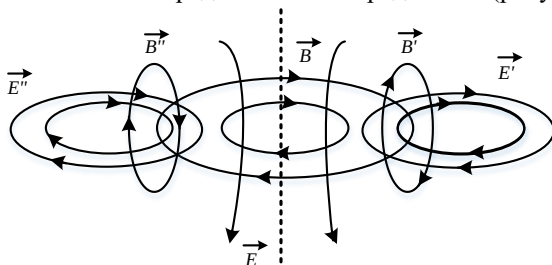


Рисунок 1.1

Согласно принципу Гюйгенса в момент времени t каждый элемент поверхности сферического фронта волны (рисунок 1.2), распространяющегося от первичного источника, можно рассматривать как вторичный источник новой сферической волны [18].

Новый фронт для момента времени $t + \Delta t$ находят как огибающую волновых фронтов от вторичных источников. Процесс передачи электромагнитной энергии от точки A к точке B может быть представлен следующим образом (рисунок 1.3): в пространстве между точками рассматривается участок волнового фронта, созданного первичным источником, в качестве места расположения вторичных (гюйгенсовских) источников.

Каждый вторичный источник создает в точке B поле со своей амплитудой и фазой.

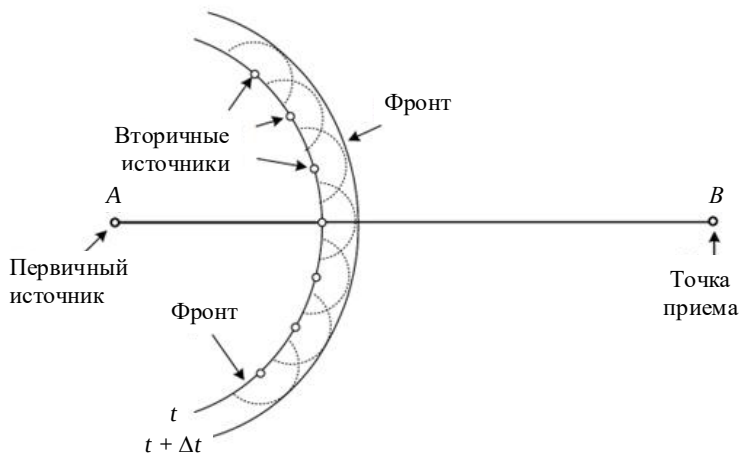


Рисунок 1.2

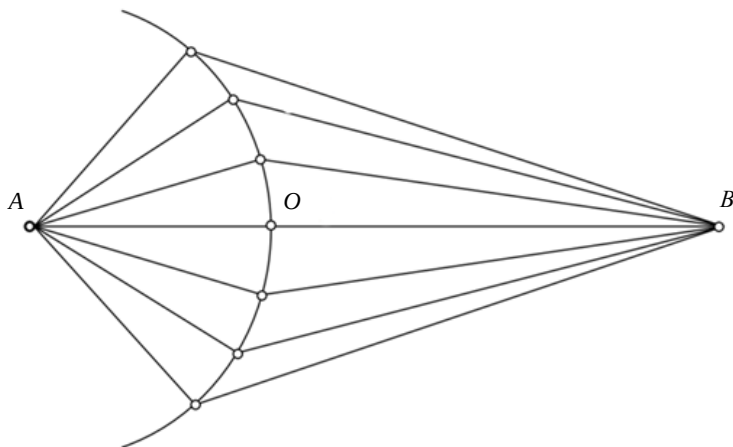


Рисунок 1.3

Радиоволнам присущи [18, 22]:

- *дифракция* – способность радиоволн огибать препятствия, расположенные на пути их распространения;
- *интерференция* – суммирование радиоволн с учетом фазовых соотношений;
- *преломление и отражение* – процессы, которые происходят на границе раздела двух сред с различными параметрами;

– *рефракция* – искривление луча при переходе через среду с плавно изменяющимися параметрами.

На рисунке 1.4 изображено три механизма распространения электромагнитных волн.

При размерах препятствия, меньших или примерно равных длине волны, возникает явление рассеяния, в результате которого исходный сигнал разделяется на несколько менее интенсивных сигналов [12]. Для сверхвысоких частот, применяемых в сотовой связи и беспроводных сетях передачи данных, рассеяние может быть вызвано множеством объектов, таких как фонарные столбы, деревья или дорожные знаки.

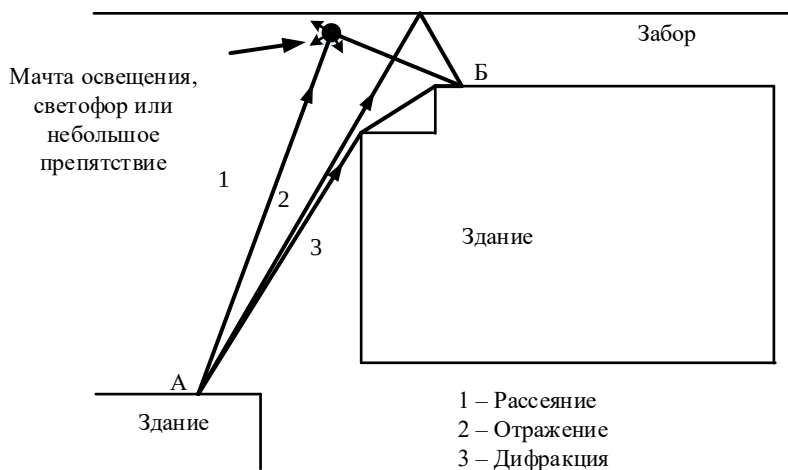


Рисунок 1.4

При столкновении электромагнитной волны с преградой, размеры которой значительно превышают длину волны, происходит ее отражение [12].

На краю объектов, непроницаемых для электромагнитного излучения и имеющих гораздо большие размеры, чем длина волны, наблюдается явление дифракции. Когда радиоволны достигают края такого объекта, они начинают распространяться в разные стороны. В этом случае точку, где возникает дифракция, можно рассматривать как источник излучения. Это позволяет приемнику получать сигнал даже в случае, когда он находится за пределами прямой видимости передатчика.

Рассеяние радиоволн

Рассеяние радиоволн представляет собой образование вторичного излучения, которое порождается неоднородностями в материале, возбуждаемыми первичной волной [21]. Взаимодействие вторичных волн вызывает

появление сложной дифракционной картины распределения рассеянного поля, зависящей от структуры неоднородностей.

Отражение радиоволн

Установим направление лучей с помощью принципа Гюйгенса – Френеля. Пусть AC есть фронт плоской волны, подошедшей к границе MN двух сред в некоторый момент времени (рисунок 1.5). В точке A образуется вторичная сферическая волна, которая распространяется в первой среде с такой же скоростью, как и падающая. За время Δt вторичная волна из точки A распространится на расстояние $AD = BC$. Между точками A и B построены еще две вторичные сферические волны. Построим фронт BD отраженной волны как касательную к вторичной волне в точке D . По построению $ABD = ABC$, соответственно угол BAD равен углу DBA , а следовательно, равны между собой углы падения и отражения волн.

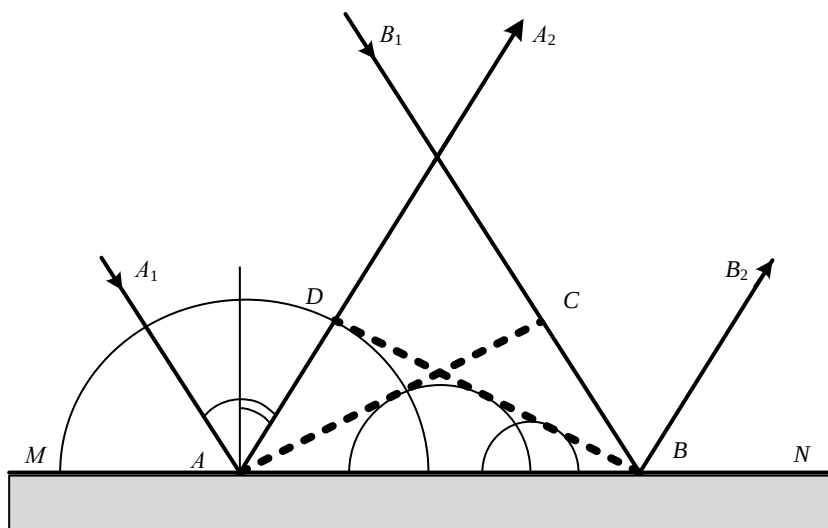


Рисунок 1.5

Дифракция радиоволн

Дифракция волн в узком смысле описывает явление огибания волнами препятствий, в то время как в более широком контексте она характеризует любые отклонения от законов геометрической оптики при распространении волн (рисунок 1.6).

При дифракции волны могут взаимодействовать с различными препятствиями, следуя вдоль поверхностей, проникая через небольшие отверстия и так далее. Например, радиоволны могут преодолеть горизонт без отражения

от ионосферы, а сигнал от мобильной станции может быть получен даже за углом здания.

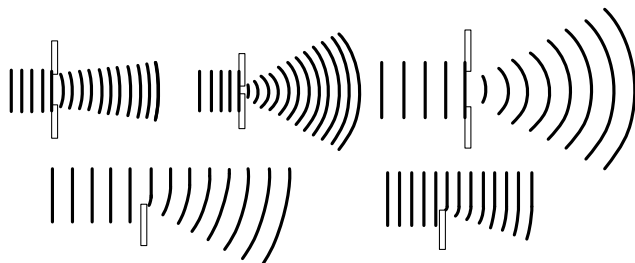


Рисунок 1.6

Распространение в атмосфере

Существуют различные способы распространения радиоволн (рисунок 1.7) [18]:

- только земной радиоволной, распространяющейся вблизи земной поверхности и включающей прямую волну, волну которая отражена от земли, и поверхностную волну (частично огибающую выпуклость земного шара вследствие явления дифракции);
- только пространственным лучом (например, ионосферная волна), однократно или многократно отраженным от слоев атмосферы;
- путем взаимодействия земной радиоволны и пространственного луча.

Каким из этих трех способов радиоволна попадет в приемную антенну, зависит от ее длины, свойств земной поверхности и атмосферы.

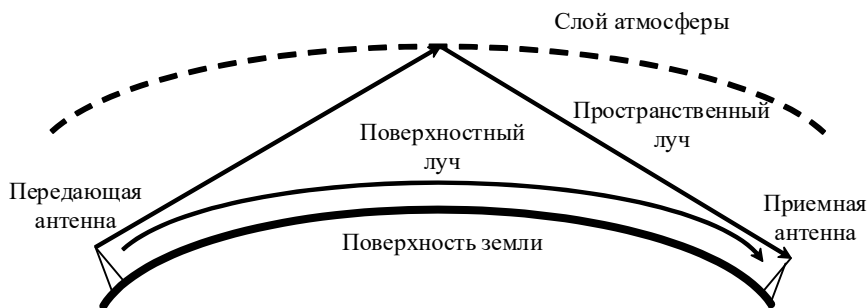


Рисунок 1.7

Атмосфера имеет слоистое строение, показанное на рисунке 1.8 [22].

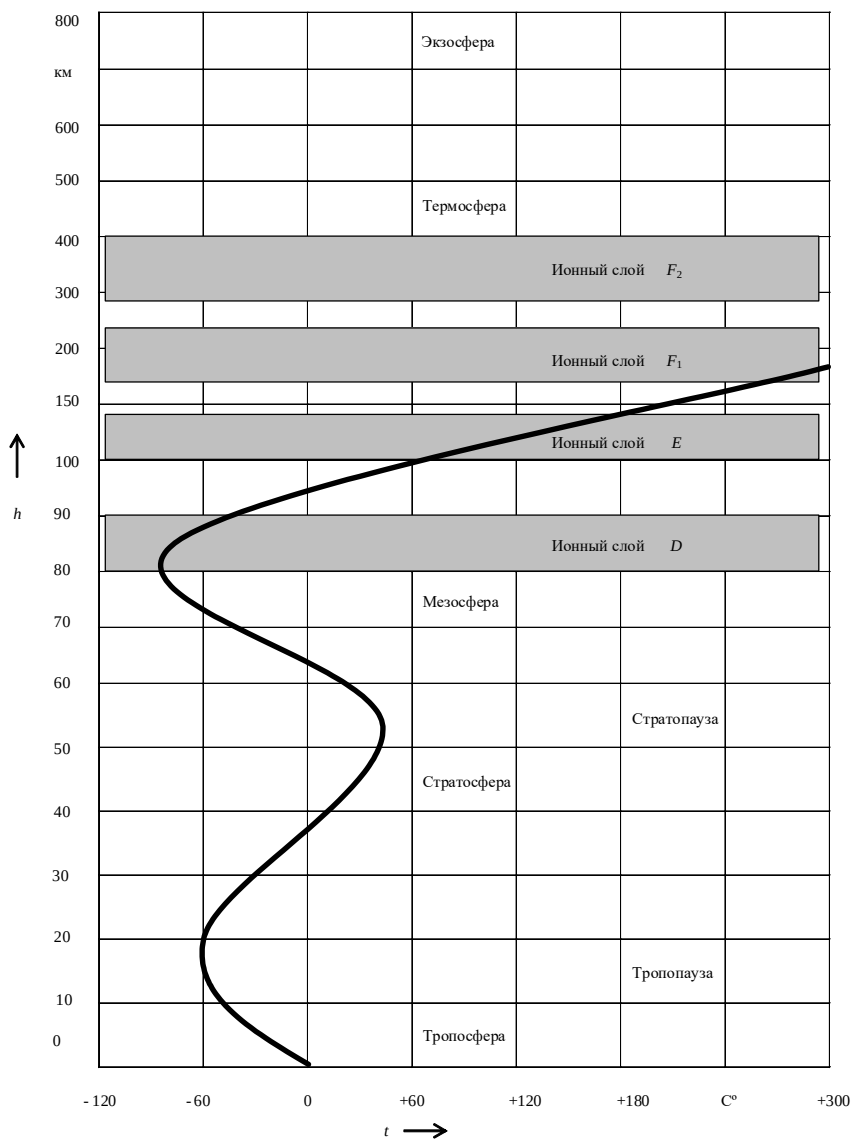


Рисунок 1.8

До высоты 16–18 км над экватором и 8–10 км над полюсами Земли воздух наиболее плотен, здесь сосредоточено $4/5$ всей его массы.

Этот слой называется тропосферой. В его состав входят азот – 78,08 %, кислород – 20,95 %, аргон – 0,93 %, углекислый газ – 0,03 %, а также водород, гелий, ксенон, неон, криптон, радон, иод, озон, метан и др.

В нижних слоях тропосферы присутствуют пыль и различные коллоидные частицы, а над океанами и морями – соли, образовавшиеся в результате испарения.

Над тропосферой находится тропопауза. Для атмосферных пауз характерно отсутствие зависимости температуры от высоты.

Выше до высоты 50 км над полюсами и 55 км над экватором находится стратосфера, над которой расположена стратопауза.

Затем до высоты 55 км над полюсами и 80 км над экватором расположены мезосфера и мезопауза.

Далее до высоты 800 км расположена термосфера, а выше 800 км находится экзосфера.

В термосфере атомы лишаются своих электронных оболочек и превращаются в ионы, которые скапливаются в ионные слои: D (высота 80–90 км), E (100–140 км), F_1 (180–240 км) и F_2 (240–400 км). Эти ионные слои образуют ионосферу. Ионосфера расположена над Землей неравномерно, в высоких широтах электронная концентрация ниже.

Электронная плотность слоев меняется в зависимости от времени суток и года. Область F_1 существует лишь в летние месяцы. В ночные часы области D и F_1 исчезают, а электронная концентрация слоев E и F_2 снижается. Электронная плотность ионосферных слоев, особенно слоя F_2 , меняется от года к году в соответствии с циклами солнечной активности, чей период составляет около 11 лет. В ионосфере временами на высоте 90–110 км появляется так называемый нерегулярный, спорадический слой E_s , который обычно существует от нескольких минут до нескольких часов.

Радиоволны, распространяющиеся в ионосферной среде, приводят свободные электроны в колебательное движение [9]. Сталкиваясь с тяжелыми частицами (ионами и нейтральными молекулами), электроны передают им энергию, полученную от радиоволн (см. рисунок 1.8).

Таким образом, при распространении радиоволн в ионосфере происходит поглощение энергии. При увеличении частоты радиосигнала коэффициент поглощения энергии радиоволны ионосферой уменьшается. Помимо поглощения энергии радиоволны при прохождении через ионосферу подвергаются преломлению и отражению.

Представляя ионосферу в виде слоев с постоянным коэффициентом преломления радиоволн внутри каждого слоя (рисунок 1.9), можно сказать, что радиоволна будет падать на каждый последующий слой под всё более увеличивающимся углом. Этот процесс образует ионосферный или пространственный луч благодаря рефракции.

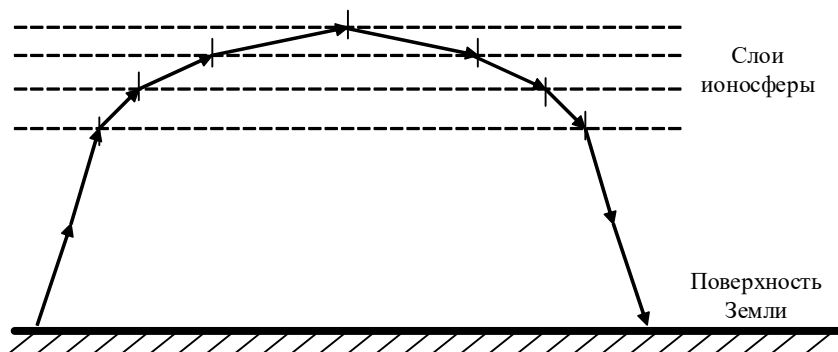


Рисунок 1.9

Волна, отраженная от ионосферного слоя, может отразиться от Земли, затем опять от ионосферы и т. д. (рисунок 1.10), в результате получается сверхдальняя радиосвязь.

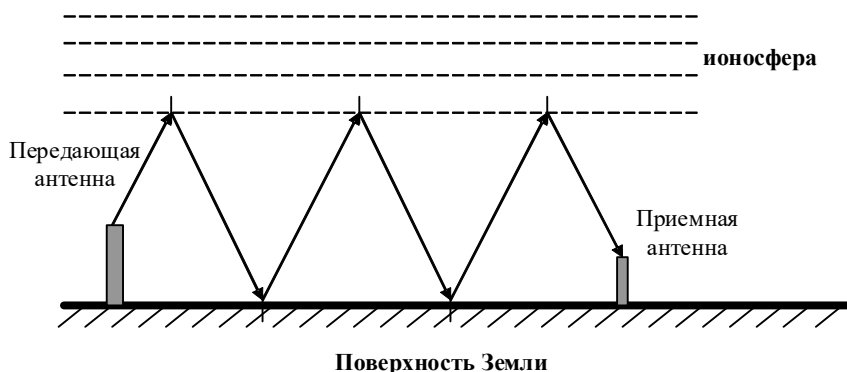


Рисунок 1.10

Чем выше расположен ионный слой отражения, тем дальше распространяется радиосигнал ионосферным лучом.

Километровые и более длинные волны отражаются от нижних слоев ионосферы D или E , гектометровые – от слоя E , декаметровые – от слоев F . Ультракороткие волны (УКВ) проникают сквозь ионосферу, отражаясь только от коллоидных сгустков и временного слоя E_C в периоды повышенной солнечной активности.

Дифракция земной волны на УКВ слаба, поэтому распространение земной волны происходит в пределах прямой видимости [18].

УКВ радиоволны дециметрового диапазона ($10 \text{ см} < \lambda < 1 \text{ м}$, $300 \text{ МГц} < f < 3000 \text{ МГц}$) и более короткие испытывают тропосферное ослабление из-за присутствия в тропосфере капель воды в виде тумана или дождя. Поглощение энергии радиоволн происходит из-за токов поляризации, которые возникают в каждой капле, вызывая тепловые потери, увеличивающиеся с ростом частоты радиосигнала.

Сантиметровые ($1 \text{ см} < \lambda < 10 \text{ см}$, $3 \text{ ГГц} < f < 30 \text{ ГГц}$) и более короткие УКВ радиоволны испытывают добавочное поглощение в молекулах водяного пара (H_2O) и кислорода (O_2) [22]. Это поглощение объясняется наличием постоянных электрических моментов у молекул H_2O и магнитных – у молекул O_2 . Электромагнитное поле радиоволн инициирует колебательные процессы в молекулах, и когда частота волны совпадает с собственной частотой молекул, возникают резонансные явления, приводящие к переходу энергии радиоволн во внутримолекулярную энергию.

1.2 Помехи радиоприему

При передаче радиоволн возможны искажения сигнала из-за воздействия окружающей среды. В приемном устройстве сигнал может быть искажен внутренними шумами тракта приема и электромагнитными воздействиями от внешних источников (помех) [2, 11].

Внешние помехи могут быть вызваны другими радиоустройствами, линиями электропередачи, электрическим транспортом, промышленным и бытовым электрооборудованием, а также различными атмосферными и космическими явлениями (рисунок 1.11). Существуют следующие типы помех:

- 1) помехи от других радиоустройств, работающих на схожих или одинаковых частотах;
- 2) промышленные помехи, вызванные излучением промышленного и бытового оборудования;
- 3) атмосферные помехи, возникающие в результате разрядов молний;
- 4) шумы, обусловленные радиоизлучением Земли;
- 5) шумы от радиоизлучения атмосферных газов и атмосферных осадков;
- 6) шумы космического происхождения.

По месту расположения источника помех относительно приемного устройства радиопомехи подразделяются на внутренние (собственные шумы аппаратуры) и внешние [22].

Внутренние помехи возникают из-за дискретной природы заряженных частиц, которые возникают в результате их теплового движения в компонентах электрических цепей, флуктуаций в распределении тока и рекомбинации в полупроводниковых устройствах, а также других процессов. Для снижения влияния этих помех на полезный сигнал используются методы повышения

качества компонентов колебательных систем, экранирование и применение различных схемных решений.

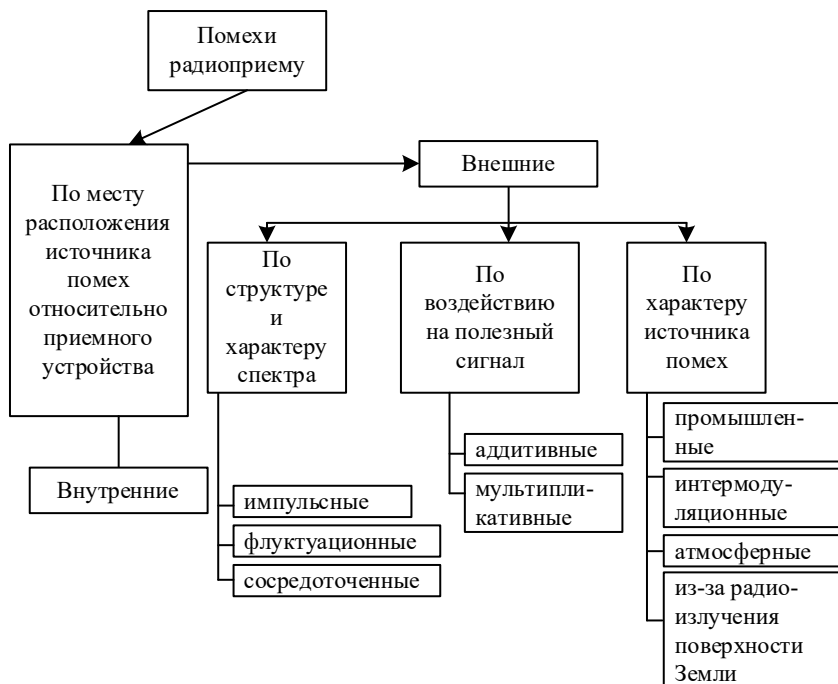


Рисунок 1.11

Внешние помехи в зависимости от спектральных характеристик подразделяются на флуктуационные, импульсные и сосредоточенные.

Флуктуационные помехи представляют собой случайные последовательности коротких импульсов различной формы, амплитуды и продолжительности, которые могут перекрываться во времени. Спектр таких помех на входе радиоприемника обычно достаточно широк.

Импульсные помехи характеризуются значительными паузами между импульсами. При увеличении частоты их амплитуда уменьшается. В диапазонах дециметровых волн и выше их воздействие практически несущественно.

Сосредоточенные помехи занимают узкую полосу частот.

Аддитивные помехи воздействуют на полезный сигнал путем сложения.

Мультипликативные помехи взаимодействуют с полезным сигналом путем умножения, модулируя его.

По характеру источника помехи бывают промышленными, космическими, атмосферными, из-за радиоизлучения поверхности Земли и радиопомехи от других радиосистем (в т. ч. интермодуляционные).

Промышленные помехи обусловлены излучением различных промышленных и бытовых электрических установок. Например, они возникают при включении и выключении агрегатов и сетей, при искрении в пантографах электроподвижного состава, при работе систем зажигания в двигателях внутреннего сгорания и др.

Атмосферные помехи вызваны радиоизлучением атмосферных газов и гидрометеоров, грозowymi разрядами, электризацией частиц (пыли, песчинок, сухого снега и пр.) при их трении друг о друга и об антенну.

Поверхность Земли, как и всякое нагретое тело, является источником электромагнитного излучения в очень широком диапазоне частот. Интенсивность помех, обусловленных *радиоизлучением поверхности Земли*, оценивается яркостной температурой Земли.

Могут быть радиопомехи от других радиосистем и радиоустройств, в т. ч. интермодуляционные. Сущность этих помех и методы борьбы с ними определяются при непосредственном рассмотрении организации работы конкретных транспортных радиосистем.

Различные виды помех имеют особенности, основной из которых является зависимость их интенсивности от частоты. При расчете условий осуществления радиосвязи конкретных радиолиний обычно учитывают не все помехи, а лишь те из них, которые преобладают в заданном диапазоне частот. Кроме того, уровень помех на входе приемника непрерывно меняется вследствие случайных суточных и сезонных изменений параметров атмосферы, поэтому для корректной оценки устойчивости работы радиолинии необходимо учитывать и характер временной зависимости их интенсивности.

В настоящее время интенсивность источников внешних помех принято оценивать либо по величине напряженности электрического поля помехи, либо по яркостной температуре источника шума [2].

2 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АНТЕНН

2.1 Общие сведения

Антенна является неотъемлемой составной частью любого радиотехнического устройства, которое предназначено для передачи или приема информации с помощью радиоволн через окружающее пространство [17, 8].

Передающая антенна предназначена для непосредственного излучения радиоволн. Она решает следующие задачи:

1 Преобразование энергии токов высокой частоты в энергию излучаемых радиоволн. Одним из основных требований, предъявляемых к антеннам, является сохранение закона модуляции (отсутствие искажения передаваемой информации).

2 Пространственное распределение энергии электромагнитного поля.

3 Формирование определенной поляризационной структуры поля.

Классификация антенн:

1 По функциональному назначению: приемные, передающие, приемопередающие.

2 По конструкции и принципу действия: линейные, апертурные, антенные решетки.

Антенны линейного типа характерны тем, что размеры поперечного сечения у них малы по сравнению с длиной волны. Обычно такие антенны выполняются из отрезка провода или нескольких проводов либо в виде стержня.

Апертурные антенны имеют раскрыв (апертуру), через который проходит поток излучаемой (принимаемой) энергии.

В свою очередь линейные и апертурные антенны могут быть представлены как непрерывные системы, состоящие из элементарных излучателей: диполей (вибраторов) Герца, элементарных рамок или источников Гюйгенса.

Антенная решетка (АР) – это совокупность идентичных излучающих (приемных) элементов, расположенных в определенном порядке и питаемых от одного или нескольких когерентных источников.

3 По поляризации: антенны с линейной поляризацией, антенны с вращающейся поляризацией.

4 По полосе пропускания: узкополосные, широкополосные, широкодиапазонные.

Одной из наиболее важных задач при проектировании сетей технологической радиосвязи является обеспечение требуемого радиопокрытия и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. Решение этой задачи

в условиях ограниченности частотного ресурса во многом зависит от оптимальности выбора антенн, используемых как на стационарных, так и на подвижных объектах [4].

Для зонных сетей, как правило, в качестве стационарных антенн целесообразно использовать ненаправленные антенны, а для линейных – антенны с узкой диаграммой направленности (ДН). Но для всех без исключения случаев антенны должны обеспечивать КСВ в заданных пределах и как можно больший коэффициент усиления. «Вид» антенн определяется и частотным диапазоном, в котором они используются (для эффективной работы антенны необходимо, чтобы ее размеры были соизмеримы с длиной волны, излучаемой антенной). Так, длина антенны диапазона ГМВ (длина волны 140 м) должна быть близка к 35 м (четверть длины волны), что не всегда легко обеспечить на практике. В отличие от диапазона ГМВ в диапазоне МВ (длина волны около 2 м) обеспечение размеров антенны, близких к четверти длины волны (50 см), не вызывает затруднений [4].

Поляризационные свойства

Векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ радиоволн, излучаемых антенной в заданном направлении, имеют определенную пространственно-временную ориентацию или, как принято говорить, поляризацию [18]. Поляризационные свойства передающей антенны определяются по поляризации ее поля излучения. В фиксированной точке пространства векторы электромагнитного поля, соответствующие плоской волне, и вектор плотности потока энергии (вектор Пойнтинга $\vec{P}$) связаны соотношением:

$$\vec{P} = [\vec{E}, \vec{H}].$$

Пространственная ориентация тройки векторов, соответствующих формуле, приведена на рисунке 2.1. Так как векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ взаимосвязаны, то обычно при рассмотрении вопросов, относящихся к поляризации радиоволн, ограничиваются рассмотрением одного вектора $\vec{E}$.

Пусть в некоторой точке пространства O , принадлежащей плоскости $Z = \text{const}$, вектор $\vec{E}$ в течение периода колебания от $t = 0$ до $t = T$ остается параллельным фиксированной линии (в данном случае оси X), а значение модуля (длины) вектора в течение периода изменяется в интервале $|\vec{E}|_{\text{max}}, 0$, так как это показано на рисунке 2.1. Волны, обладающие таким свойством, принято называть линейно поляризованными. Плоскость, проходящую через вектор $\vec{P}$ и вектор $\vec{E}$, называют плоскостью поляризации. В случае излучения антенной волн линейной поляризации положение плоскости поляризации в пространстве остается неизменным. Если плоскость поляризации нормальна поверхности земли, то можно говорить о нормальной (или вертикальной) поляризации поля. В том случае, когда плоскость поляризации параллельна

поверхности земли, то речь идет о параллельной (или горизонтальной) поляризации поля.

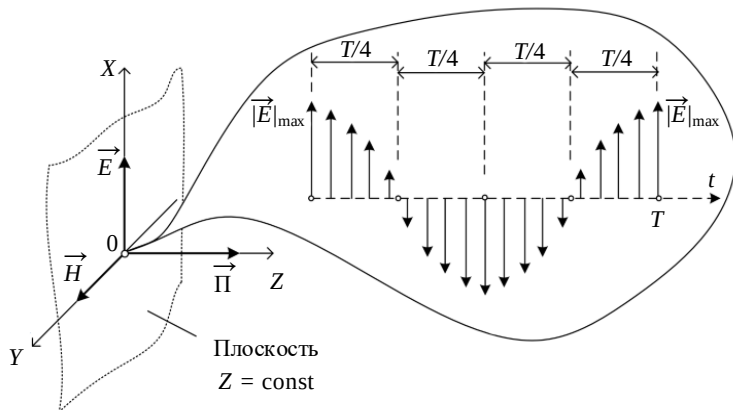


Рисунок 2.1

Рассмотрим другую ситуацию (рисунок 2.2). Пусть в той же точке пространства Z вектор $\vec{E}$ в течение периода колебания совершает полный оборот вокруг направления распространения волны (ось Z), сохраняя свою длину (значение модуля). Радиоволны такого типа называют волнами с круговой поляризацией. В зависимости от направления вращения вектора $\vec{E}$ различают волны с правой и с левой круговой поляризацией. В случае правой круговой поляризации вектор $\vec{E}$ (а вместе с ним и плоскость поляризации) вращается по часовой стрелке (если смотреть вдоль направления распространения волны), а в случае левой круговой поляризации – против часовой стрелки. На рисунке 2.2 направление вращения вектора $\vec{E}$ соответствует правой круговой поляризации [13].

В общем случае (рисунок 2.3) в заданной точке O вектор $\vec{E}$ в течение периода колебания может вращаться (как в случае круговой поляризации) и изменяться по модулю (как в случае линейной поляризации).

Форма линии, описываемая при этом концом вектора $\vec{E}$, представляет собой эллипс, большая ось которого повернута относительно оси X на некоторый угол (см. рисунок 2.3). Волны такого типа принято называть эллиптически поляризованными.

Отношение длины большой оси эллипса к длине его малой оси называется коэффициентом эллиптичности. Известно, что линейно поляризованная волна и волна с круговой поляризацией являются частными случаями эллиптически поляризованной волны.

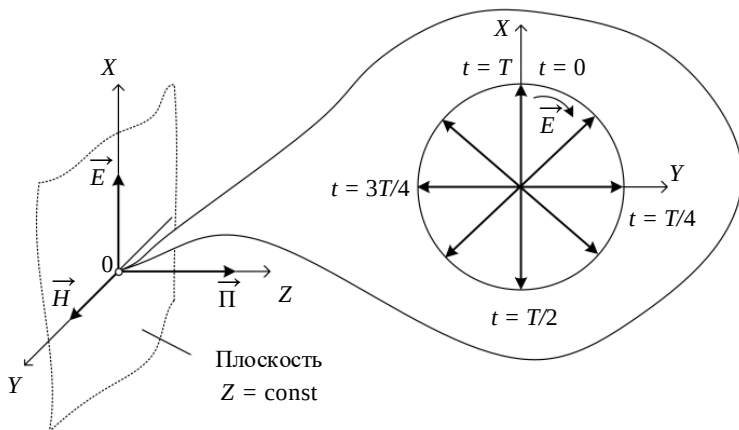


Рисунок 2.2

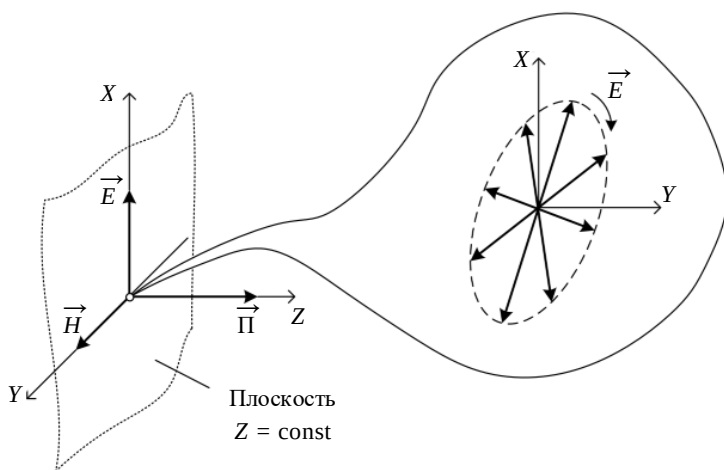


Рисунок 2.3

Линейная поляризация поля излучения обычно используется в системах, когда положение передающей и приемной антенн в пространстве не меняется, а среда не оказывает влияния на ориентацию плоскости поляризации.

2.2 Физический смысл действующей длины антенны

Действующая длина антенны – это такая геометрическая длина линейной антенны с равномерным и синфазным распределением тока вдоль нее, при

которой эта антенна создает на зажимах максимальную ЭДС, равную максимальной ЭДС, созданной реальной антенной с неравномерным и несинфазным распределением тока по длине (рисунок 2.4) [1].

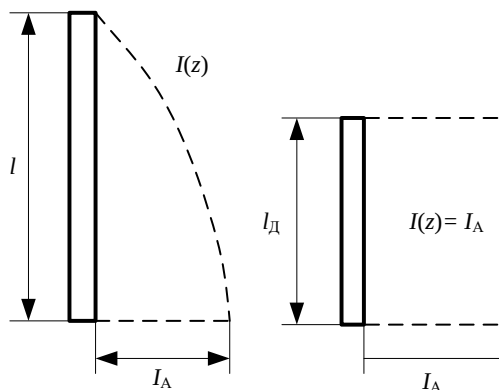


Рисунок 2.4

Закон распределения тока антенны в режиме приема зависит от типа антенны и ее конструктивного исполнения. В общем случае он определяется путем решения электродинамической задачи взаимодействия электромагнитного поля с проводящей поверхностью, имеющей форму и размеры антенны.

2.3 Шумовая температура приемной антенны

Этот параметр вводят только для приемных антенн. Причем его значение является во многом определяющим, если антенна используется в сочетании с высокочувствительным РПУ. В этом случае антенна, по отношению к последнему, выступает не только как генератор сигналов, но и как источник шума (пассивных помех). Под воздействием переменных полей промышленных электро- и радиоустановок, грозových разрядов в атмосфере, а также теплового излучения Земли и источников космического излучения в антенне будет наводиться ЭДС, зависящая от мощности всех внешних помех и их пространственного распределения относительно антенны [17].

Шумовую температуру приемной антенны в значительной степени определяет расположение ДН антенны по отношению к источникам шумов (излучений). Как правило, тепловое излучение Земли и в значительной степени атмосферы воздействует по боковым лепесткам ДН. Если главный лепесток ДН направлен в сторону источников космического излучения (например, в системах космической связи, ионосферной радиосвязи), то шумовая температура антенны значительно увеличивается. Помимо направления

распределение яркостной температуры зависит еще и от диапазона рабочих частот. Определяется яркостная температура по специальным графикам. В общем случае собственные шумы антенны определяются сопротивлением потерь антенны, температуру которого нужно считать равной температуре окружающей среды. При этом можно считать, что если в «поле зрения» антенны нет мощных дискретных источников космического радиоизлучения, то составляющая шумовой температуры за счет космического шума равна примерно 5 К, за счет шумов атмосферы – приблизительно 15 К, за счет приема теплового радиоизлучения Земли по боковым и задним лепесткам ДН – примерно 3 К.

2.4 Согласованность передающей и приемной антенн

Под пространственной согласованностью антенн понимают их взаимное расположение в пространстве, при котором их ДН направлены навстречу друг другу и обеспечивают максимально выигрышную передачу энергии ЭМВ. При этом подразумевается, что одна антенна – передающая, другая – приемная. Очевидно, что при узконаправленных антеннах требование к взаимному расположению антенн должно быть жестким [17].

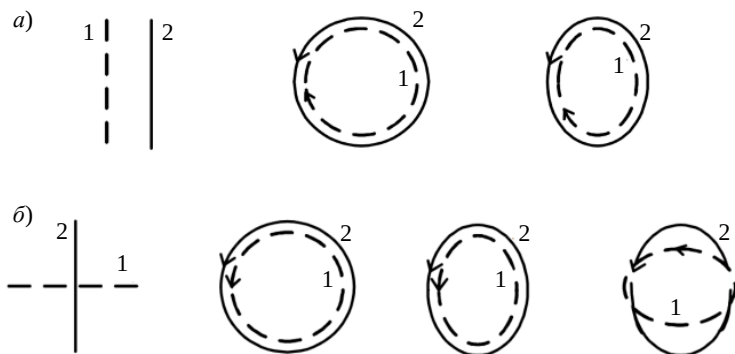
Под частотной согласованностью антенн понимают их способность работать в одинаковом частотном диапазоне. Если антенны работают в разных частотных диапазонах, то частотная согласованность при этом не обеспечивается. Хотя в приемной антенне под воздействием электромагнитного поля с другой частотой (являющегося помеховым) наводится ЭДС, но мощность данного сигнала на входе приемного устройства будет намного меньше из-за плохого согласования антенны с фидерным трактом.

Под поляризационной согласованностью антенн понимают их способность работать с одинаковой поляризацией поля ЭМВ. Исходя из принципа взаимности, поляризационные свойства приемной антенны полностью определяются поляризационными параметрами этой же антенны в режиме передачи. Следовательно, если взять две одинаковые антенны (одну в качестве приемной, а другую как передающую) и расположить их идентично в пространстве, то поляризационная согласованность этих антенн будет достигнута автоматически (рисунок 2.5) [17].

Это позволяет сформулировать следующие условия полной поляризационной согласованности:

- коэффициенты эллиптичности передающей и приемной антенн должны быть равны по модулю;
- углы наклона поляризационных эллипсов передающей и приемной антенн должны быть равны;

– направления вращения векторов поля должны быть встречными, если оба эллипса поляризации рассматриваются со стороны какой-либо одной антенны.



Варианты расположения поляризационных эллипсов передающей (1) и приемной (2) антенн:

a – поляризационно согласованные антенны;

б – поляризационно развязанные антенны

Рисунок 2.5

Для оценки эффективности приема волн любой поляризации вводится коэффициент поляризационной эффективности

$$K_{\text{пз}} = K_{\text{пз}} (K_{\text{э1}}, K_{\text{э2}}, \Delta\gamma),$$

где $K_{\text{э1}}$ и $K_{\text{э2}}$ – коэффициенты эллиптичности антенн; $\Delta\gamma$ – разностный угол наклона эллипсов.

В случае полной поляризационной согласованности, при прочих равных условиях, в приемной линейной антенне ЭМВ будет наводить максимальную ЭДС, а в антенне апертурного типа будет максимальной выходная мощность. И наоборот, подбирая поляризационные свойства антенны под структуру поляризации помеховой ЭМВ, можно существенно ослабить ее воздействие на приемную антенну. Если ЭДС в приемной линейной антенне будет равна нулю (или в антенне апертурного типа – выходная мощность), то говорят о полной поляризационной развязке.

Входное сопротивление антенны Z_a является эквивалентной величиной, определяющей согласование антенны с трактом [19, 23]. В общем случае $Z_a = R_a + iX_a$, где $R_a = R_{\Sigma} + R_n$ – активная составляющая; R_n – сопротивление потерь, характеризующее тепловые потери; R_{Σ} – сопротивление излучения, характеризующее эффект излучения; X_a – реактивная составляющая,

характеризующая отражение от антенны. На рисунке 2.6 представлена эквивалентная схема соединения передатчика, передающего фидера и передающей антенны [13].

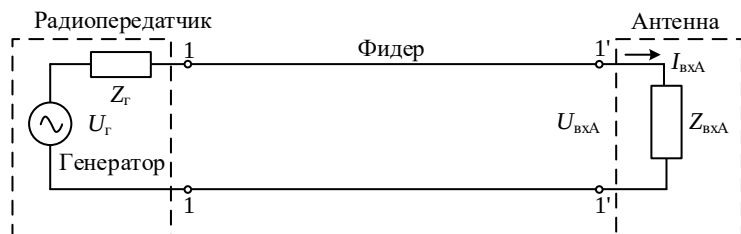


Рисунок 2.6

Обычно коэффициент стоячей волны антенны $K_{СВ} \leq 1,5$, при этом условии $X_a \ll R_a$ и входное сопротивление антенны примерно равно волновому сопротивлению питающего тракта.

Коэффициент стоячей волны (КСВ) – безразмерная величина, характеризующая соотношение падающей и отраженной волн в линии, может меняться от 1 до бесконечности. Это показатель согласованности антенны и передатчика. Чем этот показатель меньше (ближе к 1), тем лучше антенна и передатчик согласованы. Если все элементы в линии передачи идеально согласованы тогда КСВ равен единице, вся энергия при этом «уходит» в нагрузку без отражений.

Эффективная площадь характеризует размер площади, через которую приемная антенна собирает энергию: $S_q = K_n S$, где $K_n < 1$ – коэффициент использования поверхности раскрыва; S – поверхность раскрыва антенны.

При организации радиоканалов применяют направленные антенны, которые позволяют за счет концентрации мощности излучения передающей антенны в направлении приемной антенны существенно увеличить коэффициент полезного действия системы радиосвязи. Степень концентрации мощности, излучаемой антенной в нужном направлении, определяется коэффициентом направленного действия (КНД) антенны [22]. КНД – отношение мощностей излучения направленной и ненаправленной антенн, создающих в данном направлении на одном и том же расстоянии одинаковую напряженность поля. Таким образом, КНД показывает, какой энергетический выигрыш дает применение направленной антенны по сравнению с ненаправленной. Обычно КНД определяется в направлении максимума ДН антенны. Вычисляют КНД антенны по формуле

$$КНД = \frac{4\pi S_q}{\lambda^2}.$$

Под диаграммой направленности (ДН) понимается зависимость амплитуды напряженности электрического поля, создаваемого антенной в точке наблюдения, от направления на эту точку при постоянном расстоянии точки наблюдения до антенны [14]. Для наглядности и простоты графического представления ДН чаще всего изображаются в виде двух плоских кривых в полярной системе координат. Пример диаграмм направленности антенны приведен на рисунке 2.7.

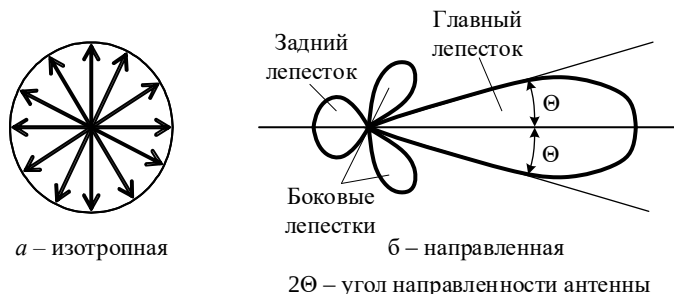


Рисунок 2.7

Диаграмма направленности может иметь несколько направлений максимального излучения (несколько лепестков). Один из них, имеющий наибольшую величину, называется главным. Ширина главного лепестка, являющегося рабочим, характеризует ширину диаграммы направленности. Ширина главного лепестка определяется как угловая величина 2Θ , по точкам половинного спада мощности относительно вершины.

Коэффициент полезного действия (КПД) вычисляют как отношение излучаемой мощности P_{Σ} к полной мощности, подводимой к антенне $P_a = P_{\Sigma} + P_{\Pi}$:

$$\eta = \frac{P_{\Sigma}}{P_{\Sigma} + P_{\Pi}},$$

где P_{Π} – мощность тепловых потерь в антенне.

Коэффициент усиления (КУ) антенны представляет собой произведение КНД на КПД антенны, имеет размерность дБи (dBi) или дБд (dBd): дБи – изотропный децибел (децибел относительно изотропного излучателя), характеризует КНД антенны относительно КНД изотропного излучателя; дБд – децибел относительно полуволнового вибратора (диполя). Характеризует КПД антенны относительно КПД полуволнового вибратора, размещенного в свободном пространстве. Арифметическая разница между дБи и дБд составляет 2,15. Коэффициент усиления антенны определяет, на сколько децибел плотность потока энергии, излучаемого антенной в определенном направлении, больше плотности потока энергии, который был бы зафиксирован в

случае использования изотропной антенны (полуволнового вибратора) (рисунок 2.8).

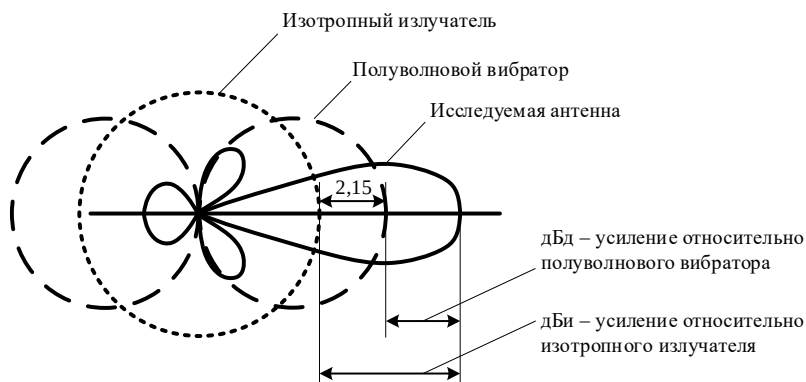


Рисунок 2.8

Поляризационная характеристика – это зависимость амплитуды сигнала в приемной антенне с линейной поляризацией, принимающей электромагнитные волны от рассматриваемой передающей антенны, от угла поворота этой антенны в плоскости, перпендикулярной излучению. Поляризационная характеристика определяется видом поляризации волны. При этом различают линейную, круговую и эллиптическую поляризации [10].

2.5 Общие сведения и типы линейных антенн

Линейной называется антенна, представляющая собой проводник с переменным ВЧ током. При этом поперечный размер проводника намного меньше длины волны.

Многие антенны, особенно диапазонов СВ, КВ и УКВ, представляют собой конструкции, состоящие из определенным образом расположенных в пространстве отрезков проводников. Возбуждение таких антенн и создание поля излучения (наряду с реактивными полями антенны) производится под действием тока, протекающего в антенне.

Линейные антенны классифицируются по следующим признакам [1]:

- по режиму тока в проводнике: с режимом бегущей волны тока и с режимом стоячей волны тока;

- по типу: вибраторные, рамочные, щелевые, проволочные.

На рисунке 2.9 приведена классификация линейных антенн.

Режим стоячих волн существует в проволочных антеннах, нагруженных на согласованную нагрузку. Режим бегущих волн существует в разомкнутых антеннах, к которым относятся как проволочные, так и вибраторные антенны.



Рисунок 2.9

Они в некоторой степени эквивалентны длинным линиям, имеющим узел тока на конце [17].

2.6 Железнодорожные антенно-фидерные устройства

Для работы в радиосетях железнодорожного транспорта применяются антенны различных типов: стационарные – АС; локомотивные – АЛ, АЛП; для автомобилей и других мобильных объектов – АМ; для переносных радиостанций – АП, АРН, АПРМ.

Для обозначения вариантов конструкции и диапазона рабочих частот антенн после букв ставят цифры. Например, антенна АС-1/2: антенна стационарной радиостанции, вариант конструкции – 1, диапазон рабочих частот – 2 (151–156 МГц); антенна АЛ/3: антенна локомотивная, диапазон рабочих частот – 3 (307–308, 343–344 МГц).

Антенна стационарная АС-2/2 приведена на рисунке 2.10. Она выполнена из двух металлических цилиндров 1, соединенных в верхней части трубой-стойкой 2. Металлические цилиндры разделены между собой изолятором 3. Антенна запитывается через 50-омный коаксиальный кабель, введенный в отверстие трубы-стойки. Такая конструкция антенны обеспечивает ее механическую прочность, грозозащищенность и согласование с фидером во всём диапазоне рабочих частот.

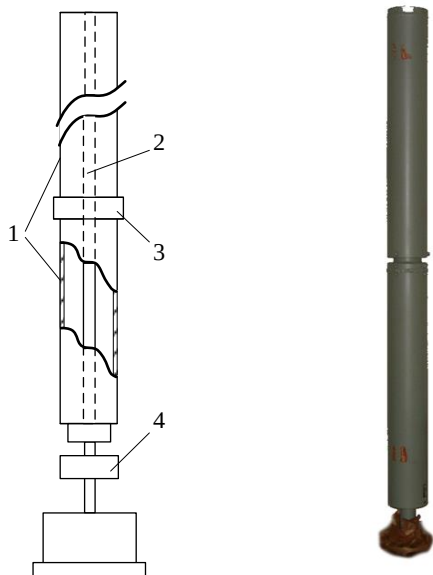


Рисунок 2.10

Высота антенны АС-1/2 составляет 1087 мм, АС-1/3 – 693 мм, АС-5/2 – 3550 мм, АС-5/3 – 1750 мм.

Для возимой двухдиапазонной радиостанции, работающей на частотах второго и третьего диапазонов радиоволн, предназначена дискоконусная антенна АЛП/2,3 (рисунок 2.11).

Антенна представляет собой сварную конструкцию, состоящую из центральной трубы 1, диска 3 и конуса 2, образованного восемью прутками диаметром 10 мм. Излучающими элементами являются соосные вертикальные четвертьволновые трубы разного диаметра, расположенные внутри центральной трубы и закороченные на нее внизу. Питание антенны осуществляется по коаксиальному кабелю, проходящему внутри трубы. Центральная жила кабеля распаяна на внешний цилиндр 1, а оплетка – на диск 3. Поскольку высота антенны около 70 см и антенна запитана в верхней части, то основная часть энергии излучается на высоте, превышающей экранирующие элементы, расположенные на крыше. Этим свойством определяется область применения антенны АЛП/2,3 на подвижных объектах, на крышах которых размещено различное оборудование. Благодаря своей конструкции антенна может эффективно работать как в диапазоне МВ, так и в диапазоне ДМВ (330 МГц).

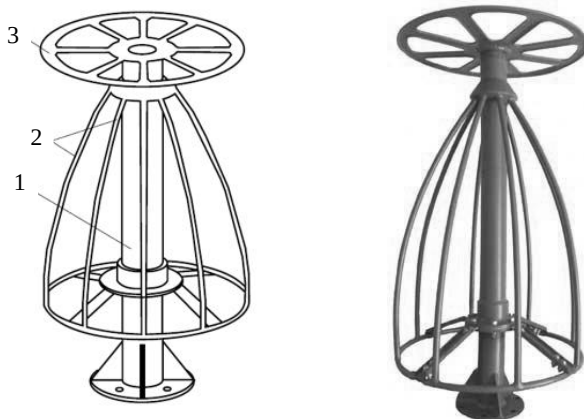


Рисунок 2.11

Локомотивные антенны АЛ представляют собой петлевые несимметричные трехпроводные (АЛ/2) и двухпроводные (АЛ/3) вибраторы.

Антенна АЛ/2 (рисунок 2.12) имеет сварную конструкцию и представляет собой несимметричную трехпроводную антенну с круговой диаграммой направленности.

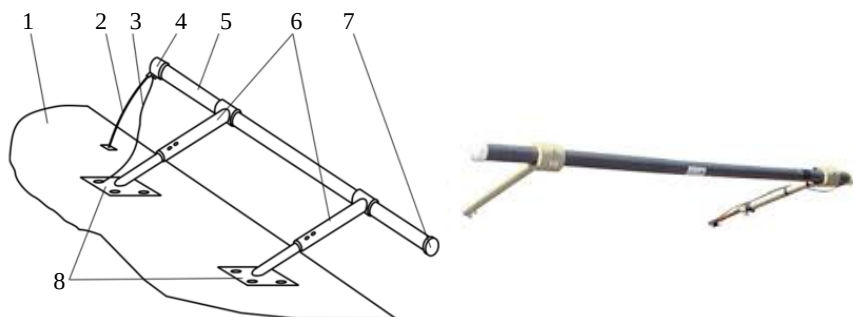


Рисунок 2.12

Проводами служат три вертикальные стойки 1 диаметром 20 и 36 мм. Высота антенны – около 200 мм, поэтому ее желательно использовать на крышах, свободных от экранирующих элементов. Питание подается через правую стойку, опирающуюся на антенный изолятор 3 с высокочастотным разъемом 4. Металлическая пластина 2 длиной 500 мм и шириной 60 мм создает в антенне емкостную нагрузку. Благодаря емкостной нагрузке ток в вертикальной части распределен практически равномерно и действующая высота антенны почти такая же, как у вибратора.

Для уменьшения потерь при передаче и приеме высокочастотного сигнала следует использовать в качестве антенного фидера кабеля с небольшим затуханием.

Широкое применение находит антенна АМК-2В, представляющая собой несимметричный вибратор, намотанный в виде спирали на диэлектрическую трубу (рисунок 2.13). Поскольку в качестве излучателя используется несимметричный вибратор в виде спирали, антенна АМК-2В имеет круговую поляризацию, т. е. ее излучение имеет и вертикально и горизонтально поляризованные составляющие. Коэффициент стоячей волны антенны – не более 2,5. Волновое сопротивление – 50 Ом. Максимальная подводимая к антенне мощность 20 Вт. Длина антенны 2050 мм, высота над металлической поверхностью 0,55–0,9 м.



1 – крыша локомотива; 2 – кабель; 3 – провод заземления; 4 – согласующее устройство; 5 – излучатель, помещенный в диэлектрический корпус; 6 – стойки алюминиевые; 7 – заглушка; 8 – опоры

Рисунок 2.13



Рисунок 2.14

Излучатель 5 с помощью высокочастотного кабеля 2 с одного конца подключен к радиостанции через согласующее устройство 4, второй конец излучателя не нагружен.

Настройка антенны производится изменением высоты излучателя над металлической поверхностью (крышей). При выборе оптимальной высоты излучатель фиксируется в диэлектрических держателях металлических стоек стопорными болтами.

Увеличения коэффициента усиления антенны можно добиться за счет применения излучателя специальной конструкции. Например, дипольная антенна D1 VHF представляет собой петлевой вибратор Пистолькорса (рисунок 2.14).

Оба плеча вибратора выполнены в виде короткозамкнутых шлейфов, длина каждого из них приблизительно равна четверти длины волны. Середина неразрезанной части вибратора является точкой нулевого потенциала, что позволяет в этой точке крепить вибратор к металлической мачте без изоляции. Его основные достоинства – широкая полоса и относительно низкая чувствительность к помехам промышленного происхождения.

Когда связь необходимо обеспечить вдоль протяженного железнодорожного участка, а также в зонных сетях в тех случаях, когда антенна располагается не в центре, а на краю покрываемого радиосвязью участка целесообразно применять направленные антенны. Например, направленные антенны типа «Волновой канал» имеют высокую направленность не только в вертикальной, но и в горизонтальной (рисунок 2.15).

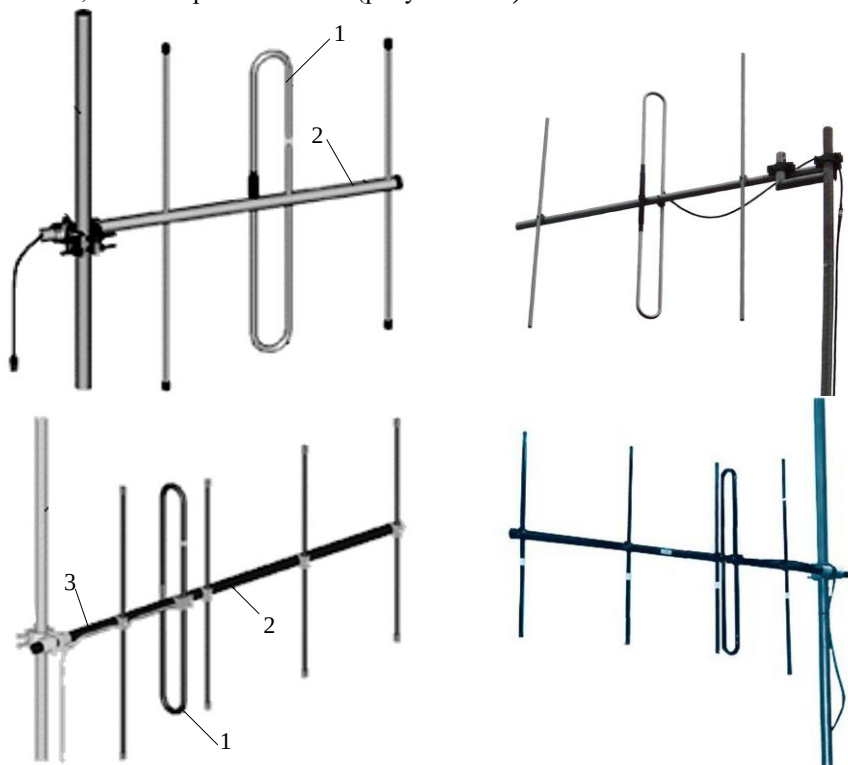


Рисунок 2.15

Петлевой вибратор 1 имеет несимметричное питание, что несколько не ухудшает форму главного лепестка диаграммы направленности. Согласование антенны осуществляется с помощью четверть-волнового трансформато-

ра, размещенного внутри траверсы 2. Петлевой вибратор 1 запитан симметрично, что позволяет крепить кабель 3 снаружи траверсы 2 без риска появления затекания ВЧ токов по поверхности кабеля.

Антенна Y3 VHF (M) – трехэлементная антенна типа «волновой канал». Антенна обладает достаточно широкой полосой рабочих частот благодаря использованию петлевого вибратора в сочетании с симметричной системой запитки.

RADIAL Y5 VHF(L) – базовая антенна с пятью элементами типа «волновой канал» для железнодорожного транспорта и морской радиосвязи (см. рисунок 2.15). Антенна имеет широкую полосу рабочих частот благодаря применению симметричной системы запитки и петлевого вибратора.

Преимуществом антенн Y3 VHF (M) и Y5 VHF (L) является большая допустимая мощность (400 и 200 Вт по сравнению с 100 Вт), однако для сетей технологической железнодорожной радиосвязи, мощности передатчиков которых, как правило, не превышают 20 Вт, это преимущество не играет роли.

3 СИММЕТРИЧНЫЕ ВИБРАТОРЫ

3.1 Общие сведения о симметричных вибраторах

Симметричный вибратор (СВ) – вибратор в виде двух симметрично расположенных в одной плоскости проводников одинаковой длины (l), к примыкающим концам которых подводится фидер. СВ, оси проводников которого располагаются на одной прямой, называют линейным [1, 16].

Электромагнитные волны излучаются проводниками, по которым проходит высокочастотный ток. В закрытом колебательном контуре размеры витков катушки индуктивности обычно значительно меньше рабочей длины волны λ . При таком соотношении практически можно считать, что и каждый виток, и катушка L в целом электромагнитных волн не излучают. Электрическое поле сосредоточено между обкладками конденсатора C и практически не выходит за его пределы (рисунок 3.1).

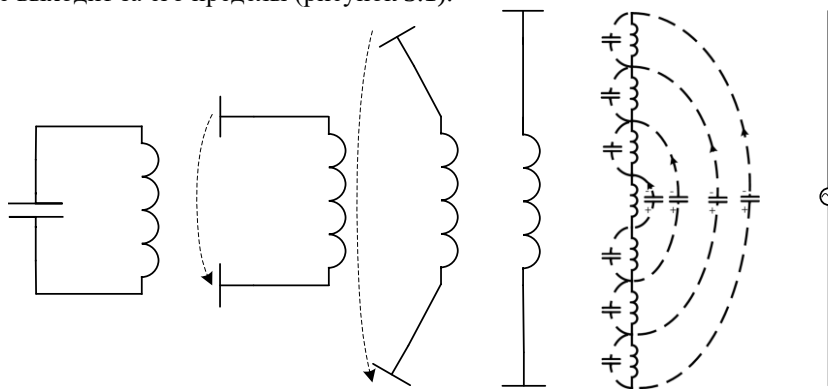


Рисунок 3.1

Но если изменить устройство колебательного контура, раздвинув обкладки конденсатора, тогда токи в его элементах будут иметь одинаковое направление, создаваемые ими радиоволны не будут взаимно уничтожаться, и возможно значительное излучение в пространство [20]. Это достигается превращением замкнутого контура в открытый, т. е. в антенну. Поскольку ток смещения открытого контура охватывает большой объем пространства, становится возможным эффективное излучение электромагнитных волн. В простейшем случае открытый контур представляет собой прямолинейный

проводник, в который встраивают небольшую катушку для связи с генератором или приемником. Антенна, полученная в результате такого превращения, отличается геометрической симметрией и называется симметричным вибратором (диполем). Симметричному вибратору свойственно неравномерное распределение тока и напряжения по его длине. Так, при длине вибратора $< \lambda / 2$ имеет место распределение тока и напряжения, указанное на рисунке 3.2.

Как следует из конструкции СВ, в нем распределение тока является симметричным относительно клемм питания, т. е. амплитуды и фазы тока в сечениях, отстоящих от клемм питания на одинаковую величину, равны.

Для того чтобы соблюдалась электрическая симметрия в такой антенне, необходимо выполнение следующих условий:

- оба плеча СВ по форме и размерам должны быть одинаковыми;
- оба плеча СВ должны занимать одинаковые положения относительно поверхности нулевого потенциала (экрана, поверхности земли);
- питание вибратора должно быть симметричным, т. е. напряжения на клеммах (входных зажимах) должны быть равны по величине и иметь разную полярность (сдвинуты по фазе на 180°).

Обычно размеры СВ определяют по отношению к длине волны. Наиболее распространенным является полуволновой СВ. Распределение тока и напряжения вдоль него изображено на рисунке 3.2.

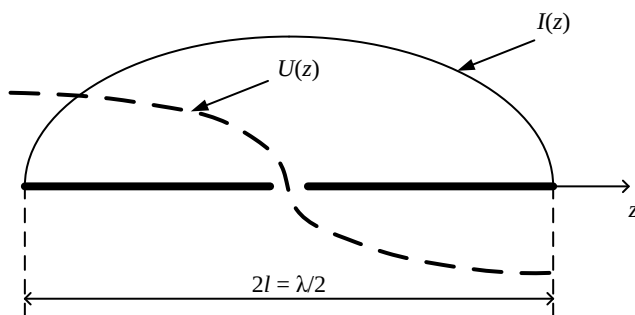


Рисунок 3.2

Для вибраторов различной электрической длины распределение токов будет зависеть от их размеров в длинах волн, что показано на рисунке 3.3.

У реальных вибраторов картина распределения тока вдоль их длины будет несколько иной. Это объясняется как процессом излучения электромагнитной энергии в СВ, так и тем, что погонные параметры у него по длине будут изменяться [1].

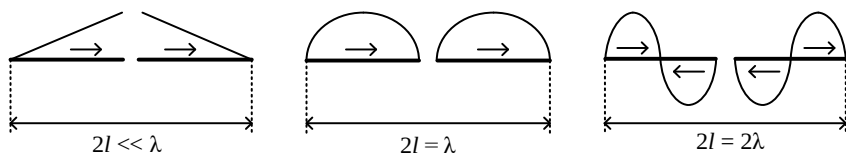


Рисунок 3.3

Графическое изображение ДН симметричного вибратора при различных значениях его длины представлено на рисунке 3.4.

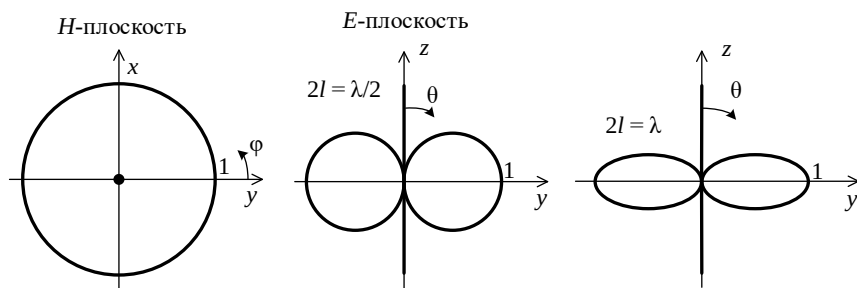


Рисунок 3.4

Вектор E поля, излучаемого СВ, расположен только в плоскости, проходящей через него, следовательно, он излучает электромагнитное поле (ЭМП) линейной поляризации. Положение плоскости поляризации и соответственно вид линейной поляризации задаются положением СВ в пространстве.

3.2 Определение параметров симметричных антенн

Задания:

- 1) выполнить моделирование полуволновой антенны на частоте $10 \cdot N$, МГц (N – номер по журналу) в свободном пространстве, на высоте 20 м и 50 м;
- 2) получить графики частотных зависимостей полуволновой антенны;
- 3) выполнить сравнение ДН при разных соотношениях длины антенны и длины волны ($l / \lambda = 0,5; 1; 1,5; 2$);
- 4) расположить антенну горизонтально над землей на высоте 20 м, выполнить моделирование.

1 На вкладке «Геометрия» [3] отметить пункт «в лямбдах» и задать необходимую частоту (рисунок 3.5).

Частота МГц ☒ в пямбдах

SC EC ☐ Не разрывать

Рисунок 3.5

Задать вертикальный проводник длиной $0,5\lambda$ (рисунок 3.6).

Геометрия Вид Вычисления Диаграмма направленности								
Имя				Частота 50 МГц		☒ в пямбдах		
Проводов 1		Автосегментация: DM1/800 DM2/80		SC/2.0 EC/2		☐ Не разрывать		
No.	X1(w)	Y1(w)	Z1(w)	X2(w)	Y2(w)	Z2(w)	R(w)	Seg
1	0.0	0.0	0.25	0.0	0.0	-0.25	0.000133	-1
след.								

Рисунок 3.6

Перейти на вкладку «Вид» (рисунок 3.7) и задать источник в центре проводника (правой кнопкой на антенне → Добавить источник → в середину провода)

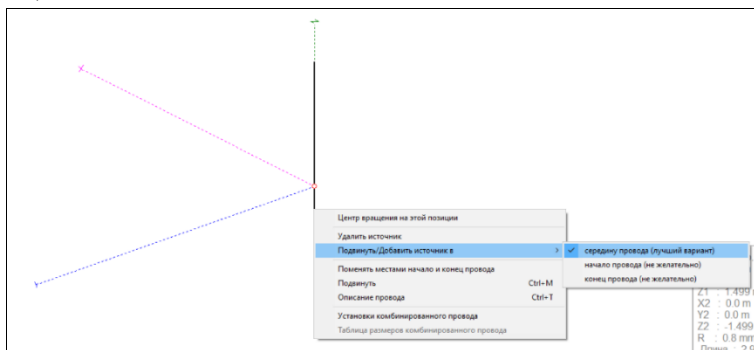


Рисунок 3.7

Перейти на вкладку «Геометрия» (рисунок 3.8) и проверить параметры добавленного источника.

Источников 1			
No.	PULSE	Volt V	Phase dg
1	w1c	10.0	0.0
след.			

Рисунок 3.8

Перейти на вкладку «Вычисления» (рисунок 3.9), выбрать пункт «Свободная земля» и нажать кнопку «Пуск».

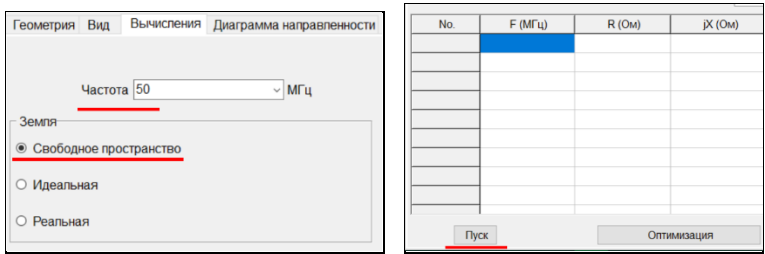


Рисунок 3.9

Перейти на вкладку «Вид» (рисунок 3.10) и проверить распределение тока вдоль антенны.

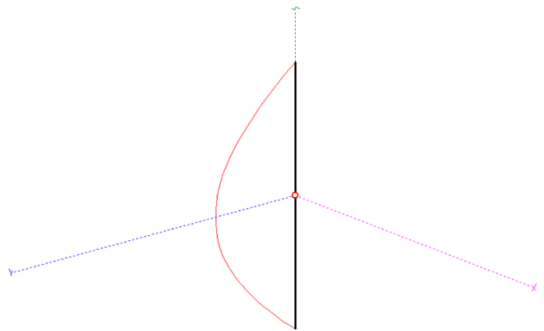


Рисунок 3.10

Перейти на вкладку «ДН» (рисунок 3.11), изучить диаграммы и рассчитанные параметры антенны. Записать значение KCB.

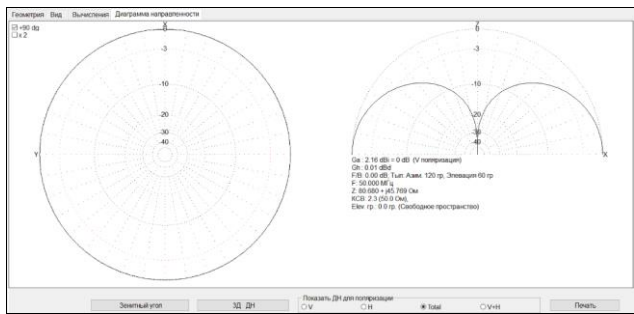


Рисунок 3.11

Нажать кнопку «3Д ДН» и выбрать шаг 5 для вывода трехмерной ДН (рисунки 3.12, 3.13).

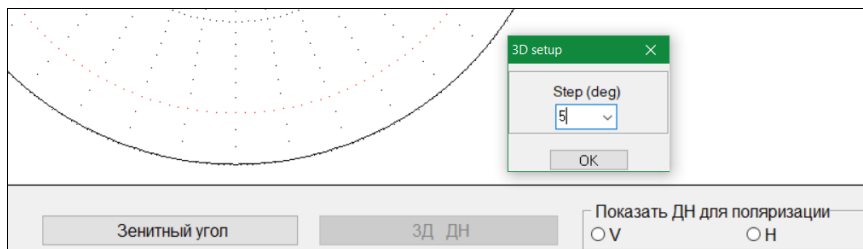


Рисунок 3.12

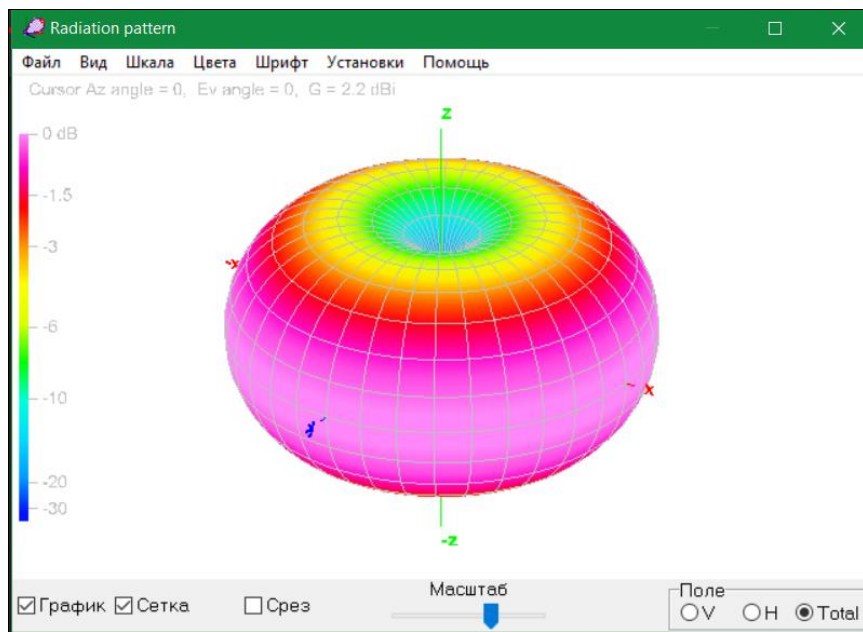


Рисунок 3.13

Выполнить оптимизацию антенны. Перейти на вкладку «Вычисления», нажать кнопку «Оптимизация» (рисунок 3.14). Установить движок КСВ на максимум (крайнее правое положение) выбрать элементы для изменений (Все элементы, т. к. всего один элемент у антенны) и нажать кнопку «Пуск» окна оптимизации.

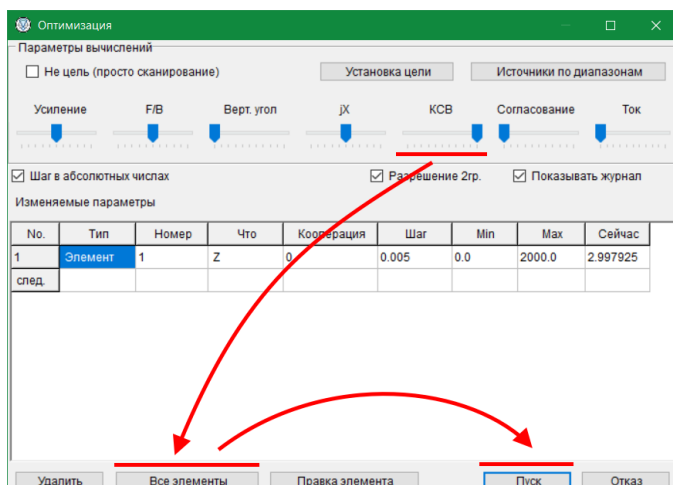


Рисунок 3.14

Выполнить моделирование, перейти на вкладку «ДН», изучить диаграммы и рассчитанные параметры антенны. Сравнить параметры антенны до и после оптимизации.

Перейти на вкладку «Вычисления», выбрать режим земли «Идеальная», задать высоту 20 м (рисунок 3.15) и нажать кнопку «Пуск».

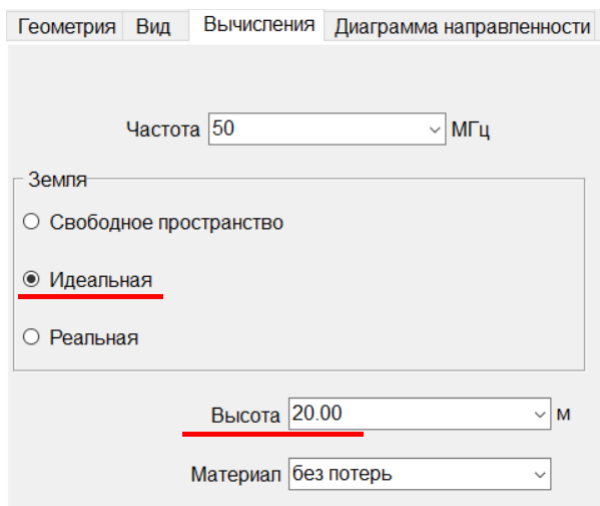


Рисунок 3.15

Перейти на вкладку «ДН», проанализировать изменения в диаграммы направленности (рисунки 3.16, 3.17).

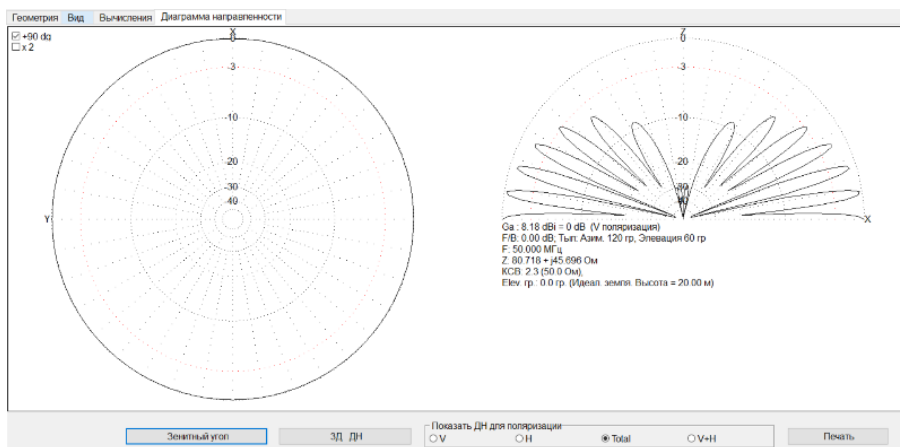


Рисунок 3.16

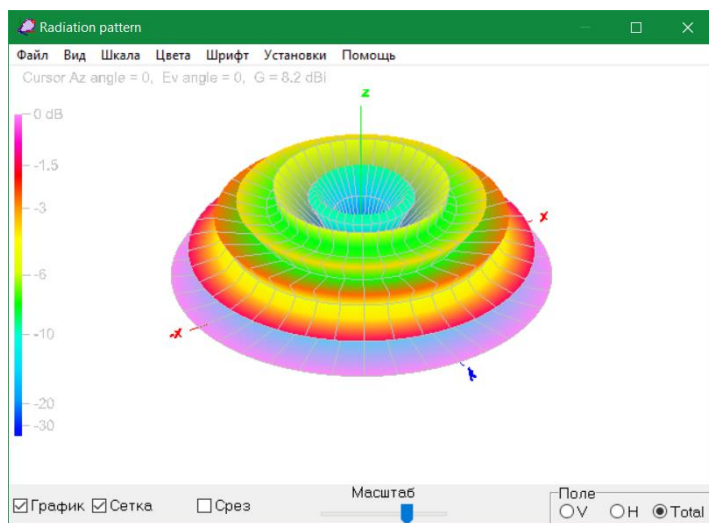


Рисунок 3.17

Повторить моделирование для высоты 50 м.

2 Перейти на вкладку «Вычисления». Провести моделирование в Свободном пространстве. Нажать кнопку «Графики».

Настроить параметры, как на рисунке 3.18 (центральная частота и полоса равны частоте по варианту).

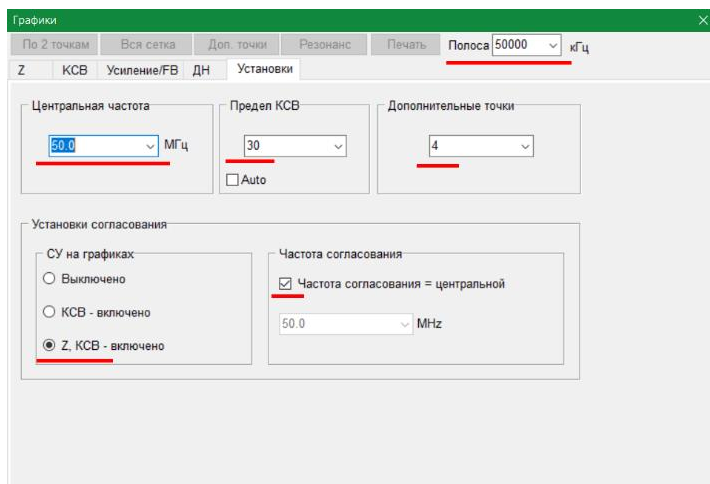


Рисунок 3.18

Перейти на вкладку «КСВ» (рисунок 3.19). Нажать по очереди кнопки «По 2 точкам», «Вся сетка», «Доп. точки». По полученному графику получить полосу пропускания антенны (для КСВ 1,5 и 2).

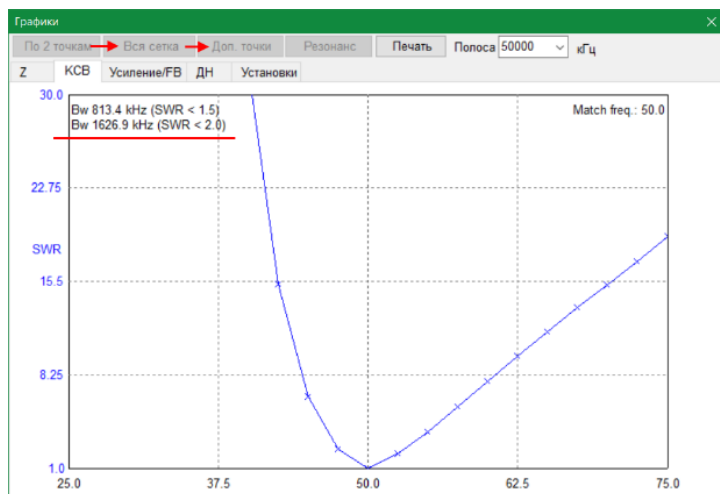


Рисунок 3.19

Получить графики «Z» и «ДН», перейдя на соответствующие вкладки (рисунок 3.20).

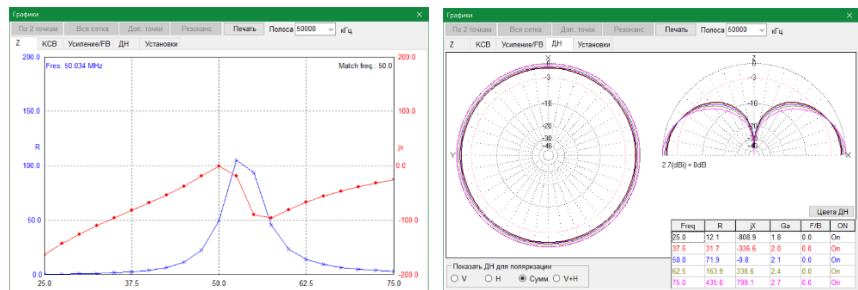


Рисунок 3.20

Получить параметры согласующего устройства для рассчитанной антенны (Инструменты → ВЧ компоненты, вкладка «СУ на LC») (рисунок 3.21).

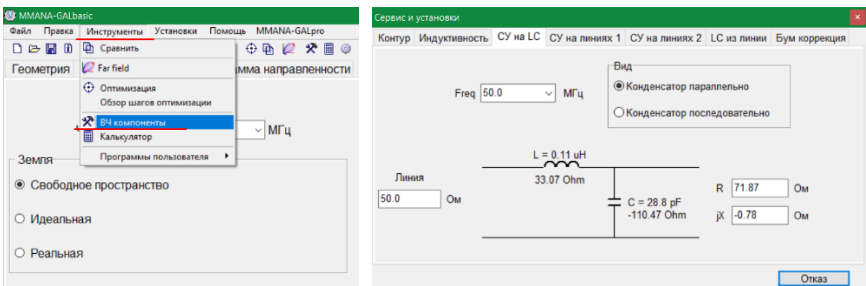


Рисунок 3.21

3 Сохранить ДН для последующих сравнений (Файл → Сохранить ДН (*.tab)).

Перейти на вкладку «Геометрия». Задать соотношение $l / \lambda = 1$ (рисунок 3.22).

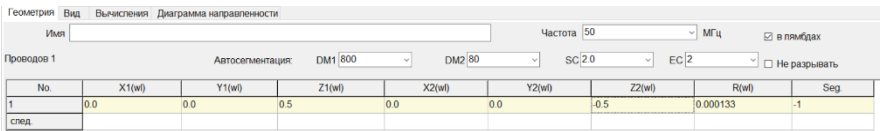


Рисунок 3.22

Провести моделирование в «Свободном пространстве», сохранить ДН (повторить для $l/\lambda = 1,5$ и $l/\lambda = 2$). При изменениях длин антенны обращать внимание на распределение тока в антенне (рисунок 3.23).

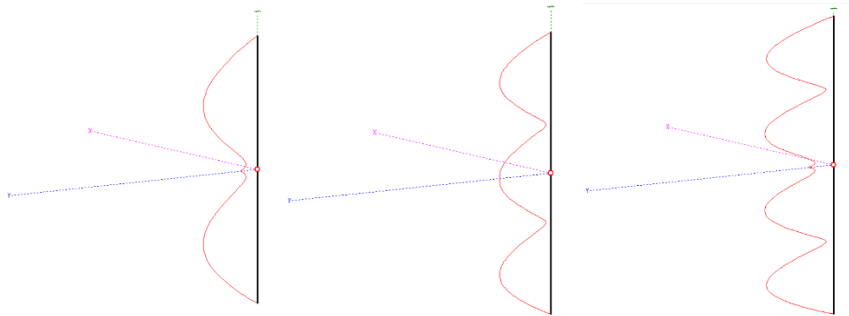


Рисунок 3.23

Выполнить сравнение ДН (Инструменты → Сравнить). С помощью кнопки «Открыть *.tab файл» добавить сохраненные ранее ДН (рисунок 3.24).

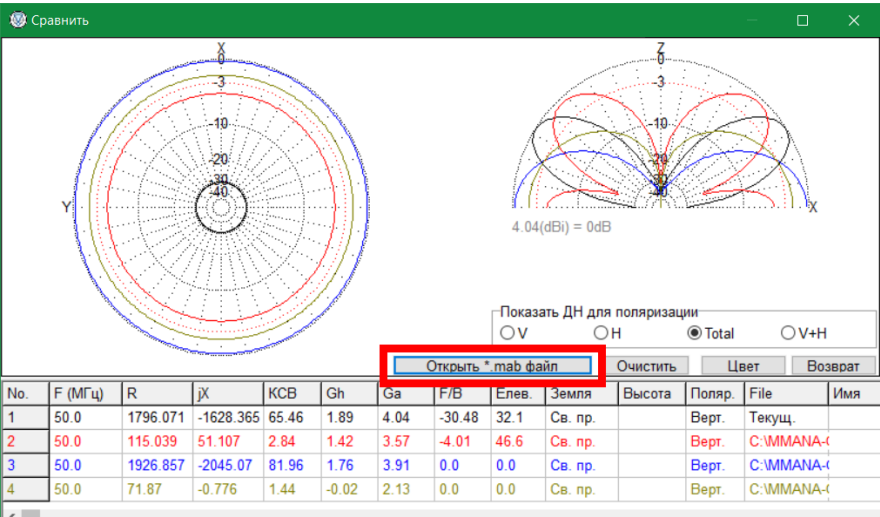


Рисунок 3.24

4 Для изменения положения открыть окно: «Вычисления» → Правка провода → правой кнопкой на антенне → Описание провода (рисунок 3.25). Зенитный угол изменить на 90. Выполнить моделирование антенны (рисунок 3.26).

Описание провода - Wire No.1

Декартовы координаты провода

X1	-0.25000	m	X2	0.25000	m	R	0.000133	mm
Y1	0.00000	m	Y2	0.00000	m	Seg.	-1	
Z1	0.00000	m	Z2	0.00000	m	Сброс изменений		

Полярные координаты провода (длина и углы)

Удерживать на месте

☐ Начало ☒ Середину ☐ Конец

Длина 0.500000 m

Азимутальный угол 0.00 град.

Зенитный угол 90 град.

☒ Не разрывать соединения ☒ lambda Да Отказ

Рисунок 3.25

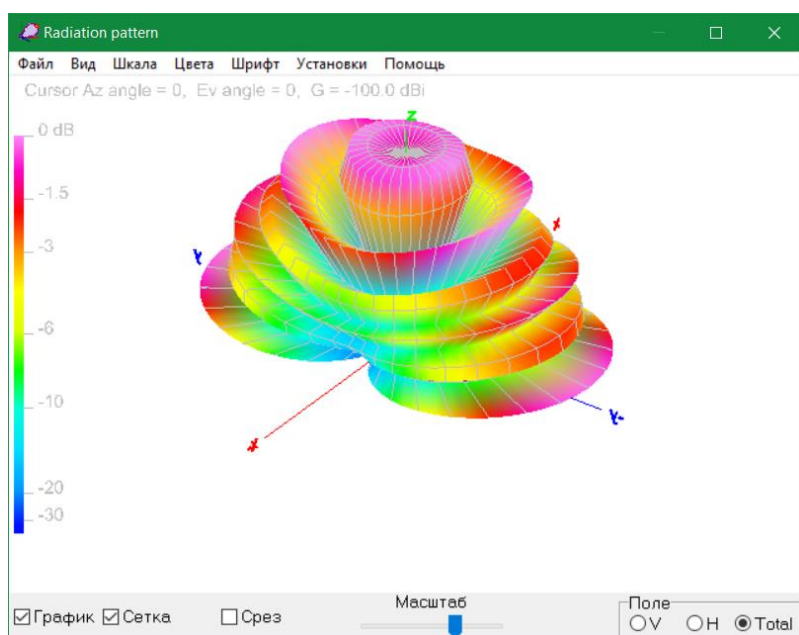


Рисунок 3.26

Сделать вывод по результатам моделирования.

4 НЕСИММЕТРИЧНЫЕ ВИБРАТОРЫ

4.1 Изучение несимметричного вибратора

Несимметричный вибратор (НСВ) – вибратор, располагаемый над проводящей поверхностью, соединяемый одним концом с проводником фидера, второй проводник которого соединяется с проводящей поверхностью, например землей, противовесом антенны или корпусом объекта [1].

Исходя из условий распространения средних, длинных и сверхдлинных волн в этих диапазонах необходимо применять антенны с вертикальной поляризацией, а значит, и вертикального расположения. При этом максимальное излучение антенны должно быть направлено вдоль земной поверхности. Такими свойствами обладают проволочные вертикальные антенны в виде несимметричных вибраторов. Для них земная поверхность имеет в этих диапазонах достаточно высокие проводящие свойства и играет роль экрана.

В диапазонах коротких волн применяют несимметричные стержневые вибраторы (штыри), как правило, совмещенные с экранами.

Таким образом, несимметричная вибраторная антенна – это линейная антенна в виде проводника (штыря), расположенного непосредственно у земли (или металлического экрана) перпендикулярно или наклонно к ее поверхности. По конструкции различают следующие виды НСВ: штыревые; несимметричные петлевые; Г-образные; Т-образные; зонтичные.

Для питания НСВ удобно в качестве линий передачи использовать коаксиальный фидер, соединяя его центральный провод с верхней клеммой вибратора (и генератора), а оплетку – с землей или металлическим экраном.

Метод зеркальных изображений в теории антенн и его применение. Рассмотрим влияние идеально проводящей поверхности бесконечных размеров на поле излучения НСВ, расположенного над ней. Он создает ЭМП только в верхней части полупространства, так как нижнее полностью экранировано проводящей поверхностью (рисунок 4.1). Поле излучения антенны в точке M , расположенной в дальней зоне, определяется как сумма полей, пришедших в эту точку прямым путем 1 и по пути 2 – 2'.

При этом падающая 2 и отраженная 2' волны имеют вблизи поверхности экрана касательные составляющие $E_{\text{т пад}}$ и $E_{\text{т отр}}$, такие, что выполняется идеальное граничное условие.

Метод зеркальных изображений предполагает, что влияние отражающей поверхности можно эквивалентно заменить излучением другого (мнимого)

вибратора, являющегося зеркальным изображением реального [1]. Тогда систему «НСВ – отражающая поверхность» можно заменить на эквивалентный СВ, излучающий только в верхнюю часть пространства.

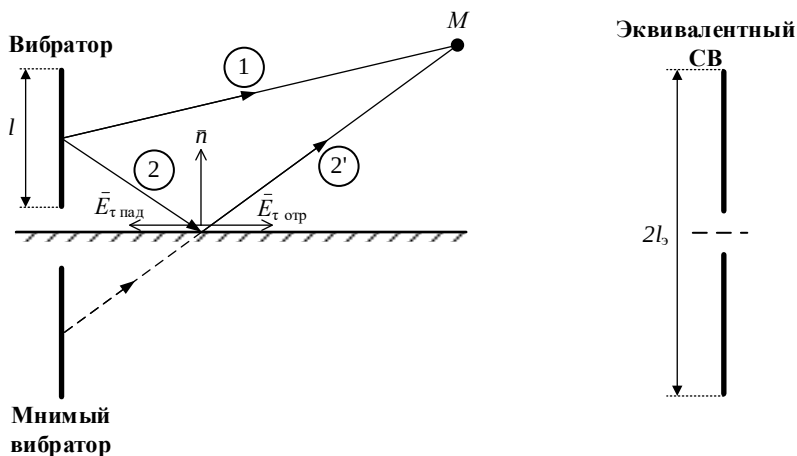


Рисунок 4.1

Данный метод позволяет не только рассчитывать характеристики и параметры НСВ по аналогичным характеристикам и параметрам СВ, но и определять направленные свойства многих антенн, приподнятых над земной поверхностью на высоту h . В этом случае метод зеркальных изображений позволяет рассматривать такую антенну как двухэлементную равноамплитудную антенную решетку (АР) с расстоянием между элементами, равным удвоенному расстоянию от реальной антенны до земной поверхности. Если такая антенна излучает ЭМП вертикальной поляризации, то считают, что она совместно со своим зеркальным изображением образует двухэлементную синфазную антенную решетку. Для антенн с горизонтальной поляризацией ЭМП такая антенная решетка имеет элементы, возбуждаемые противофазно.

ДН несимметричного вибратора для верхнего полупространства полностью соответствует ДН симметричного аналога (рисунок 4.2).

Так как НСВ не излучает энергию в нижнее полупространство, то при одинаковой мощности излучения его КНД оказывается в 2 раза больше по сравнению с КНД эквивалентного СВ.

Для уменьшения высоты при выполнении требования настройки в резонанс (чтобы входное сопротивление было чисто активным) используются антенны с горизонтальной частью [1]. Эта часть антенны в излучении почти не участвует, так как происходит компенсация полей от горизонтального провода и его зеркального изображения, что показано на рисунке 4.3. Такие антенны называют Г-образными. Наличие горизонтальной части выравнивает

распределение тока по вертикальной и тем самым приводит к увеличению действующей длины.

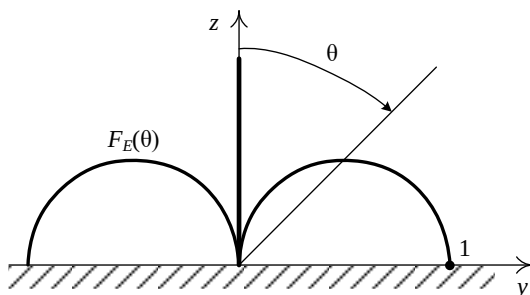


Рисунок 4.2

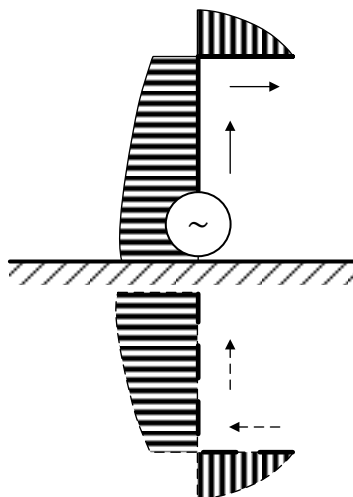


Рисунок 4.3

Применяя длинную и многопроводную горизонтальную часть, можно заметно увеличить действующую длину и сопротивление излучения электрически короткого НСВ, а следовательно, повысить его КПД.

Если с помощью горизонтальных частей не удастся настроить антенну в резонанс, то включают согласующее устройство, которое компенсирует реактивную составляющую входного сопротивления антенны (рисунок 4.4).

Так как при перестройке радиостанций по диапазону реактивность входного сопротивления может быть и по характеру, и по значению различной, то

используют специальные антенно-согласующие устройства, в которых предусмотрена как коммутация различных реактивностей, так и изменение их параметров.

В частности, проводник может иметь коническую форму, а роль экрана может выполнять металлический диск. Такая антенна называется дискоконусной и применяется в качестве антенны наземных УКВ-радиостанций. По способу питания антенна является антенной верхнего типа питания: центральный провод фидера соединен с центром диска, а наружный провод (экран) соединяется с вершиной конуса [1].

При определении характеристик и параметров НСВ при помощи метода зеркальных изображений предполагалось, что проводимость экрана равна бесконечности, а его размеры не ограничены. На практике возможны случаи, когда одно или оба этих условия не выполняются, например на подвижных объектах, где роль экрана играет корпус объекта, имеющий конечные размеры.

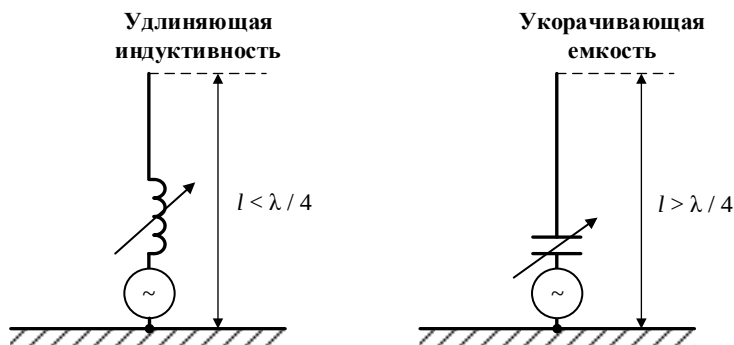


Рисунок 4.4

Так как размеры экрана конечны, то будет происходить затекание токов на его нижнюю поверхность, что приведет к изменению входного сопротивления антенны и искажению формы ее ДН (рисунок 4.5). Изменение входного сопротивления и искажение ДН будет тем меньше, чем больше размеры экрана по сравнению с длиной волны.

На практике часто роль экрана играет земная поверхность. Проводимость верхних слоев почвы при этом нельзя считать бесконечной. Конечная проводимость экрана приводит к тому, что в него проникают электромагнитные волны, что, в свою очередь, приводит к увеличению потерь энергии. Кроме того, вблизи земной поверхности появляется небольшая нормальная составляющая электрического поля, что приводит к искажению ДН антенны и

изменению входного сопротивления антенны. В общем случае для учета этого влияния необходимо в расчетах учитывать реальные параметры поверхности.

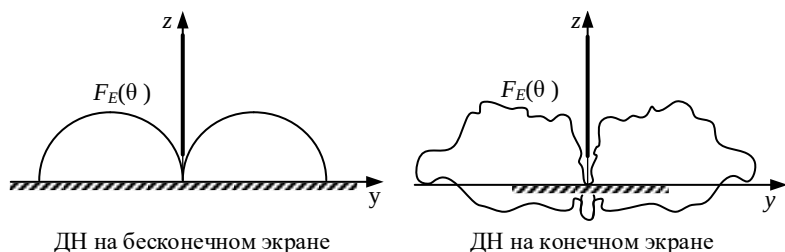


Рисунок 4.5

Для уменьшения влияния конечной проводимости земной поверхности на характеристики и параметры антенны ее нижнюю клемму соединяют с металлическим предметом (заземлением), углубленным до влажных слоев земли. При этом контур тока замыкается через слои, имеющие лучшую проводимость, чем поверхность земли, как это показано на рисунке 4.6, а.

Роль экрана может выполнять «противовес» – система проводов, радиально расходящихся под антенной (рисунок 4.6, б). В этом случае проводимость противовеса не зависит от проводимости почвы и существенно больше ее, поэтому характеристики антенны остаются постоянными в любых погодных условиях.

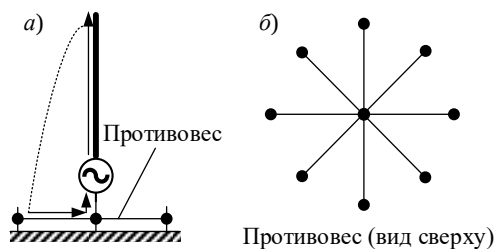


Рисунок 4.6

Применение антенн на подвижном объекте, ориентация которого относительно антенны стационарной радиостанции постоянно меняется, делает невозможным применение направленных антенн в качестве возимых. Поэтому все возимые антенны – ненаправленные. Еще одна особенность возимых антенн, определяющая конструктивные требования к ним, – необходимость размещения антенны на крыше локомотива (или другого железнодорожного

подвижного объекта) вблизи от контактной сети и с обеспечением габарита подвижного состава. По этим причинам антенна должна иметь небольшую высоту, жесткую конструкцию и малую парусность.

4.2 Определение параметров несимметричных вибраторов

Задания:

- 1) выполнить моделирование четвертьволновой антенны на частоте $10 \cdot N$, МГц (N – номер по журналу);
- 2) получить графики частотных зависимостей четвертьволновой антенны;
- 3) выполнить сравнение ДН при разных соотношениях длины антенны и длины волны ($l / \lambda = 0,5; 1; 1,5; 2$);

1 На вкладке «Геометрия» отметить пункт «в лямбдах» и задать необходимую частоту (см. рисунок 3.5).

Задать вертикальный проводник длиной $0,25\lambda$ (рисунок 4.7).

Геометрия Вид Вычисления Диаграмма направленности									
Имя: _____				Частота: 50 МГц		☒ в лямбдах			
Проводов: 1		Автосегментация:		DM1: 800	DM2: 80	SC: 2.0	EC: 2	☐ Не разрывать	
No.	X1(w)	Y1(w)	Z1(w)	X2(w)	Y2(w)	Z2(w)	R(w)	Seg.	
1	0.0	0.0	0.25	0.0	0.0	0.0	0.000133	-1	
след.									

Рисунок 4.7

Перейти на вкладку «Вид» и задать источник на конце проводника (правой кнопкой на антенне → Добавить источник → в конец провода) (рисунок 4.8).

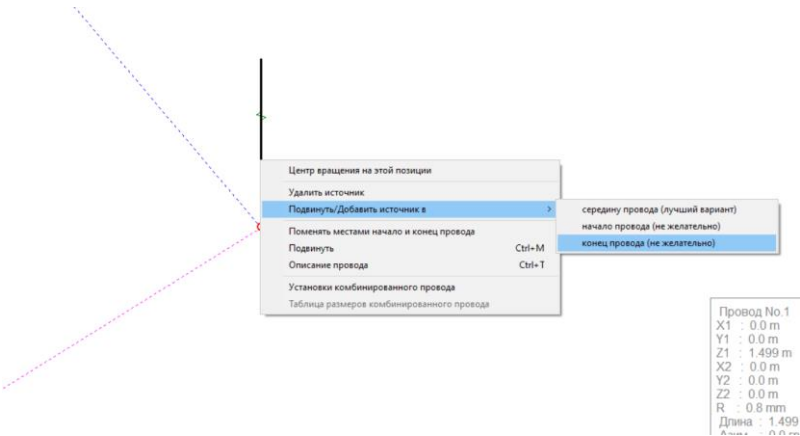


Рисунок 4.8

Перейти на вкладку «Геометрия» и проверить параметры добавленного источника.

Перейти на вкладку «Вычисления», выбрать пункт «Идеальная», Указать высоту «0 м» и нажать кнопку «Пуск» (рисунок 4.9).

Частота 50 МГц

Земля

☐ Свободное пространство

☒ Идеальная

☐ Реальная

Высота 0 м

Материал без потерь

No.	F (МГц)	R (Ом)	jX (Ом)

Пуск Оптимизация

Рисунок 4.9

Перейти на вкладку «Вид» и проверить распределение тока вдоль антенны. Вдоль проводника должно быть распределено четверть длины волны (рисунок 4.10).

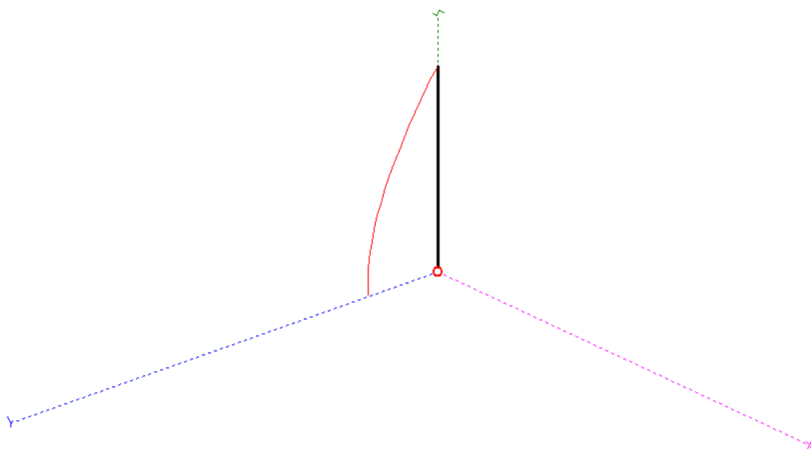


Рисунок 4.10

Перейти на вкладку «ДН», изучить диаграммы и рассчитанные параметры антенны (рисунки 4.11, 4.12). Сравнить диаграммы и параметры с полученными в подразд. 3.2 для полуволновой антенны. Записать значение КСВ.

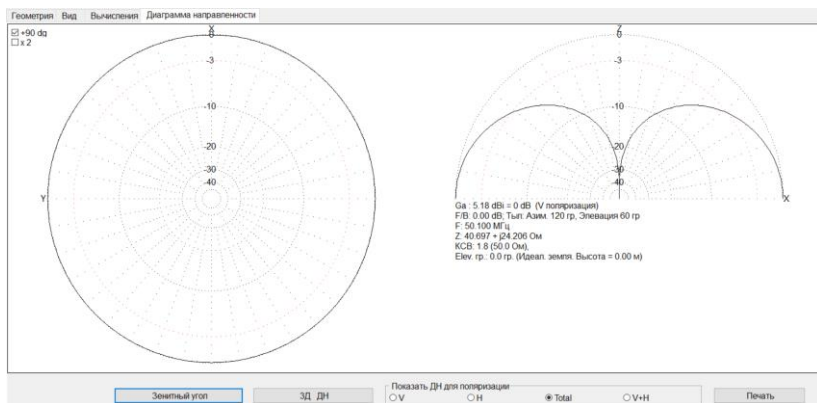


Рисунок 4.11

Нажать кнопку «3Д ДН» и выбрать шаг 5 для вывода трехмерной ДН (см. рисунок 3.12).

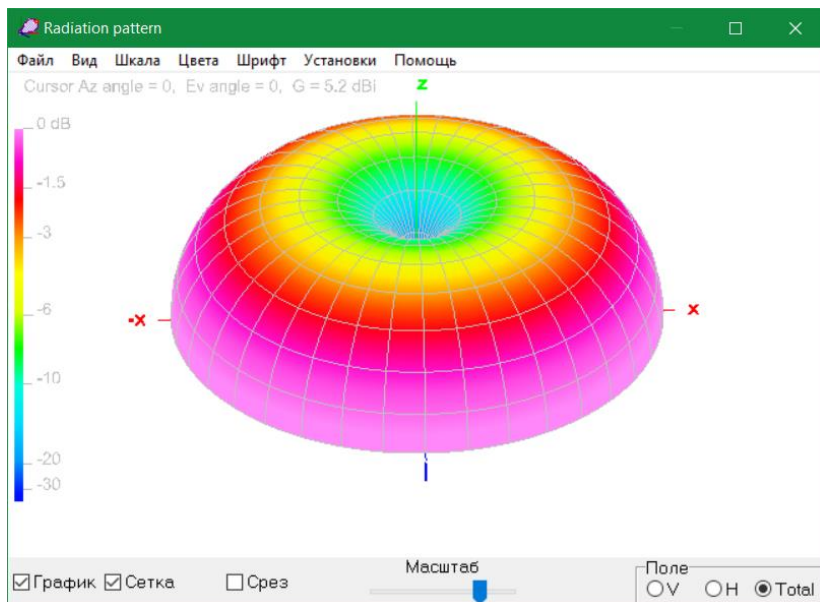


Рисунок 4.12

Выполнить оптимизацию антенны. Перейти на вкладку «Вычисления», нажать кнопку «Оптимизация». Установить движок КСВ на максимум

(крайнее правое положение) выбрать элементы для изменений (Все элементы, т. к. всего один элемент у антенны) и нажать кнопку «Пуск» окна оптимизации (см. рисунок 3.14).

Выполнить моделирование, перейти на вкладку ДН, изучить диаграммы и рассчитанные параметры антенны. Сравнить параметры антенны до и после оптимизации.

2 Перейти на вкладку «Вычисления». Нажать кнопку «Графики».

Настроить параметры, как на рисунке 3.18 (центральная частота и полоса равны частоте по варианту).

Перейти на вкладку КСВ. Нажать по очереди кнопки «По 2 точкам», «Вся сетка», «Доп. точки». По полученному графику получить полосу пропускания антенны (для КСВ 1,5 и 2) (рисунок 4.13).

Получить графики «Z» и «ДН», перейдя на соответствующие вкладки (рисунок 4.14).

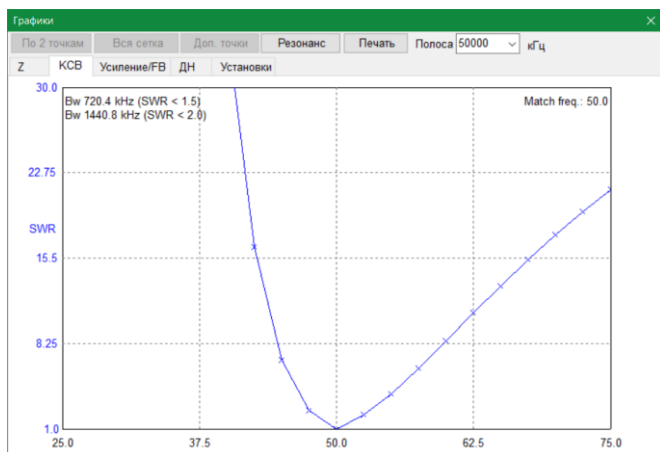


Рисунок 4.13

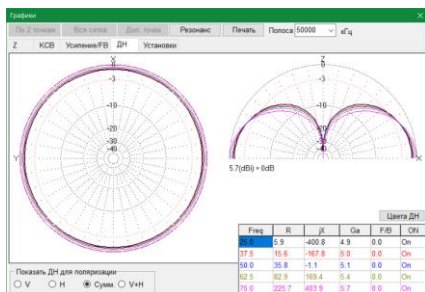
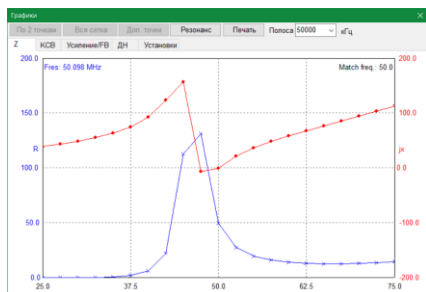


Рисунок 4.14

Получить параметры согласующего устройства для рассчитанной антенны (Инструменты → ВЧ компоненты, вкладка «СУ на LC») (рисунок 4.15).

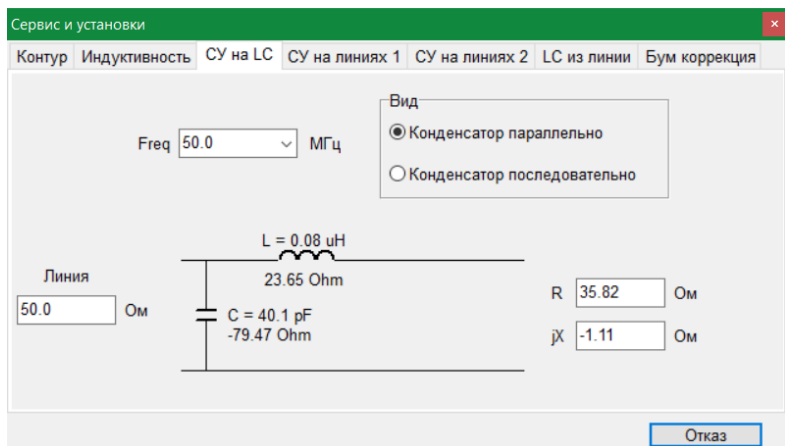


Рисунок 4.15

3 Сохранить ДН для последующих сравнений (Файл → Сохранить ДН).
Перейти на вкладку «Геометрия». Задать соотношение $l / \lambda = 0,5$ (рисунок 4.16).

Геометрия Вид Вычисления Диаграмма направленности									
Имя		Частота		50		МГц		☒ в пикдах	
Проводов 1		Автосегментация		DM1 800		DM2 50		SC 2.0	
								EC 2	
								☐ Не разрывать	
No.	X1(w)	Y1(w)	Z1(w)	X2(w)	Y2(w)	Z2(w)	R(w)	Seg	
1	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.000133	-1	
след.									

Рисунок 4.16

Провести моделирование в «Свободном пространстве», сохранить ДН (повторить для $l / \lambda = 1$ и $l / \lambda = 2$). При изменениях длин антенны обращать внимание на распределение тока в антенне (рисунок 4.17).

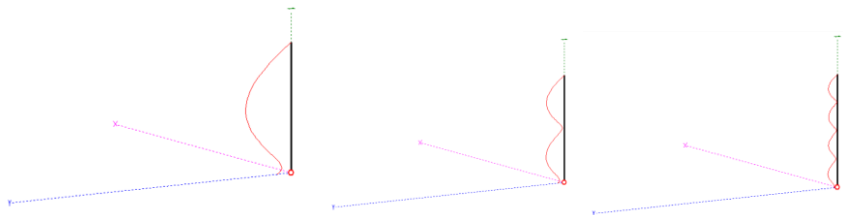


Рисунок 4.17

Выполнить сравнение ДН (Инструменты → Сравнить). С помощью кнопки «Открыть *.tab файл» добавить сохраненные ранее ДН (рисунок 4.18).

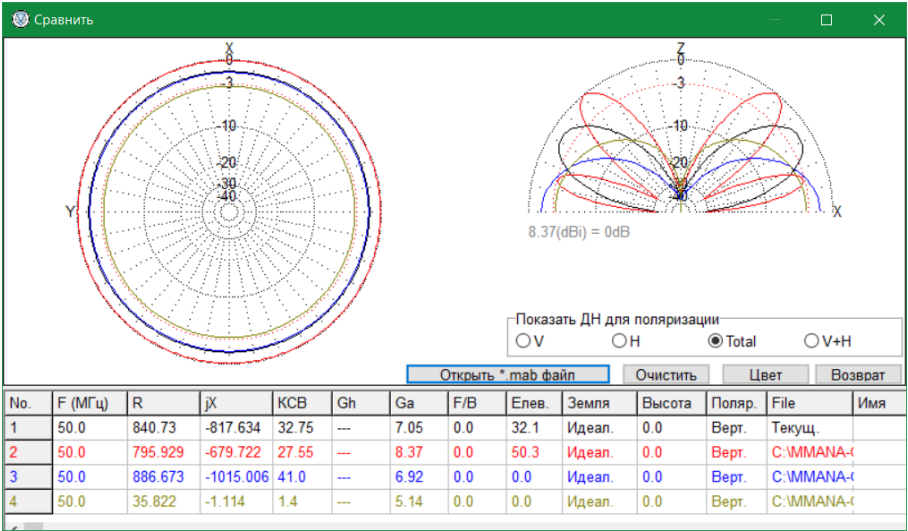


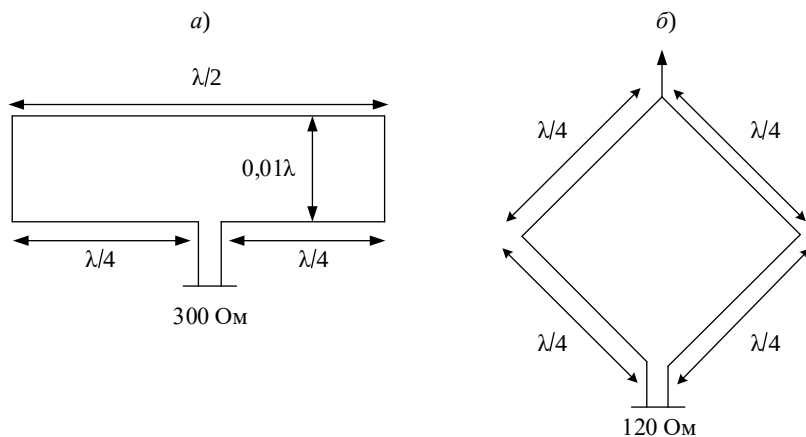
Рисунок 4.18

Сделать вывод по результатам сравнения.

5 РАМОЧНЫЕ АНТЕННЫ

5.1 Теория рамочных антенн

Рамочная антенна является дальнейшим развитием петлевого диполя [19]. Полоса пропускания петлевого диполя шире, чем у обыкновенного диполя в несколько раз (классический петлевой диполь имеет сопротивление излучения, примерно равное 300 Ом), но при этом высокое входное сопротивление (рисунок 5.1, *а*). Важное конструктивное достоинство петлевого вибратора заключается в возможности крепления средней точки его верхней половины непосредственно к металлической мачте без изолятора, поскольку здесь антенна имеет нулевой потенциал [1]. Если увеличить площадь петлевого ди-



поля, то получится рамочная антенна (рисунок 5.1, *б*) [6].

Рисунок 5.1

Рамочная антенна охватывает большее пространство, чем петлевой диполь, в результате этого она имеет коэффициент усиления больше, чем коэффициент усиления простого и петлевого диполя. Как и петлевой диполь, рамочная антенна – симметричная антенна. Так как рамка охватывает большее пространство, чем петлевой диполь, то входное сопротивление его ниже и составляет около 120 Ом. Рамочная антенна любой конфигурации имеет

коэффициент усиления выше, чем у диполя, наибольшее усиление имеет круглая рамка, т. к. именно круг охватывает наибольшее пространство.

За счет того, что часть антенны расположена вертикально, рамка излучает довольно большой уровень вертикально поляризованной волны.

Распространенной конструкцией является двойная рамочная антенна, или антенна Харченко по фамилии автора (рисунок 5.2) [6].

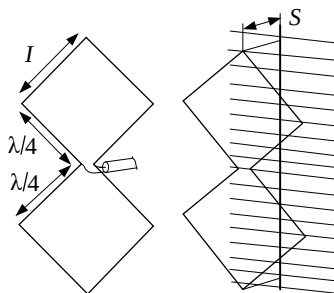


Рисунок 5.2

Периметр каждой из рамок равен длине волны, на которой работает рамка. За счет параллельного включения двух рамок суммарное входное сопротивление системы близко к 60 Ом, следовательно, антенну можно питать через коаксиальный кабель как 75 Ом, так и 50 Ом. Возрастает и полоса пропускания такой антенны, увеличивается ее эффективность на высоких частотах. Для выполнения рефлектора используют лист металла, либо его эквивалент, выполненный из проводников.

5.2 Определение параметров рамочных антенн

Задания:

- 1) выполнить моделирование петлевого диполя на частоте $10 \cdot N$, МГц (N – номер по журналу);
- 2) получить графики частотных зависимостей петлевого диполя;
- 3) выполнить моделирование рамочной антенны-квадрата на частоте $10 \cdot N$, МГц (N – номер по журналу);
- 4) выполнить моделирование антенны «\ANT\VHF beams\ZZ-NEW.MAA».

1 На вкладке «Геометрия» отметить пункт «в лямбдах» и задать необходимую частоту (см. рисунок 3.5).

Задать петлевой диполь длиной $0,5\lambda$ (рисунок 5.3).

No.	X1(w)	Y1(w)	Z1(w)	X2(w)	Y2(w)	Z2(w)	R(w)	Seg.
1	-0.25	0.0	0.0	0.25	0.0	0.0	0.000133	-1
2	-0.25	0.0	0.01	0.25	0.0	0.01	0.000133	-1
3	-0.25	0.0	0.0	-0.25	0.0	0.01	0.000133	-1
4	0.25	0.0	0.0	0.25	0.0	0.01	0.000133	-1
сум.								

Рисунок 5.3

Перейти на вкладку «Вид» и задать источник в центре нижнего проводника (рисунок 5.4) (выделить левой кнопкой необходимый проводник, нажать правой кнопкой на проводнике → Добавить источник → в конец провода).

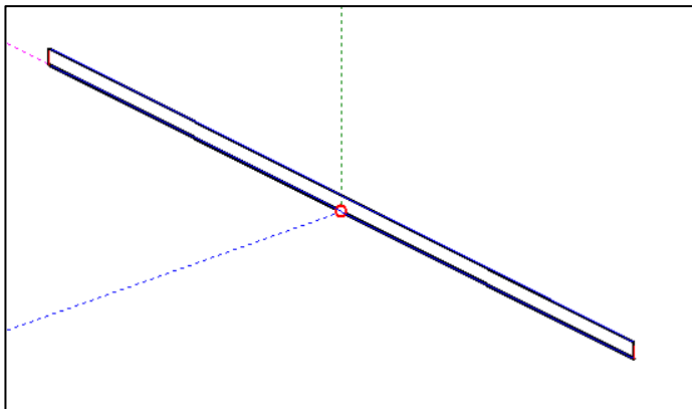


Рисунок 5.4

Изменить сопротивление для расчета КСВ на 300 Ом (на панели кнопка в виде шестеренки) (рисунок 5.5).

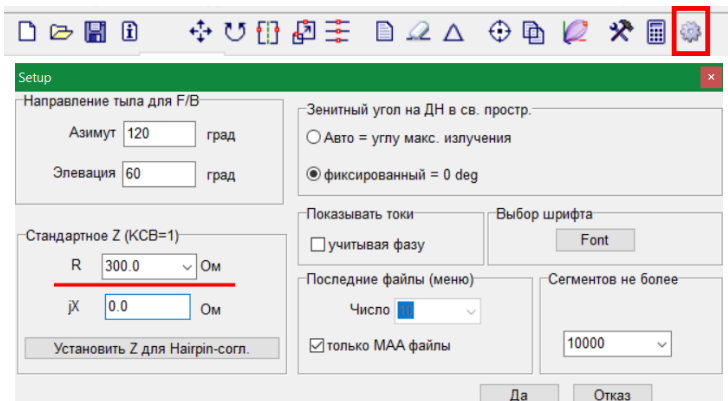


Рисунок 5.5

Перейти на вкладку «Вычисления», выбрать пункт «Свободное пространство» и нажать кнопку «Пуск».

Перейти на вкладку «Вид» и проверить распределение тока вдоль антенны. Как видно, распределение тока в нижнем и верхнем проводнике отличается (рисунок 5.6).

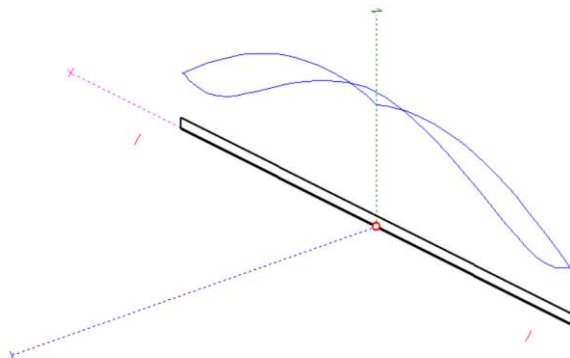


Рисунок 5.6

Перейти на вкладку «ДН», изучить диаграммы и рассчитанные параметры антенны. Записать значение КСВ.

Выполнить оптимизацию антенны. Перейти на вкладку «Вычисления», нажать кнопку «Оптимизация». Установить движок КСВ на максимум (крайнее правое положение) выбрать элементы для изменений (Все элементы) и нажать кнопку «Пуск» окна оптимизации.

Выполнить моделирование. Перейти на вкладку «Вид» и проверить распределение тока вдоль антенны. Как видно, распределение тока в нижнем и верхнем проводниках теперь совпадает (рисунок 5.7).

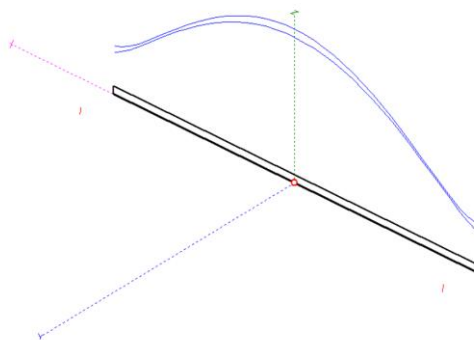


Рисунок 5.7

Перейти на вкладку «ДН», изучить диаграммы и рассчитанные параметры антенны. Сравнить параметры антенны до и после оптимизации.

2 Перейти на вкладку «Вычисления». Нажать кнопку «Графики». Настроить параметры так же, как и в предыдущих работах.

Перейти на вкладку «КСВ». Нажать по очереди кнопки «По 2 точкам», «Вся сетка», «Доп. точки». По полученному графику получить полосу пропускания антенны (для КСВ 1,5 и 2) (рисунок 5.8). Сравнить полосу пропускания петлевого диполя и полуволновой антенны (из подразд. 3.2).

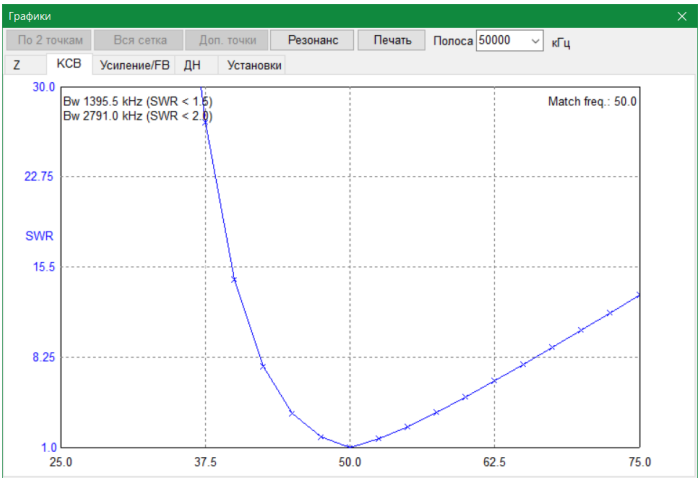


Рисунок 5.8

Получить графики «Z» и «ДН», перейдя на соответствующие вкладки (рисунок 5.9).

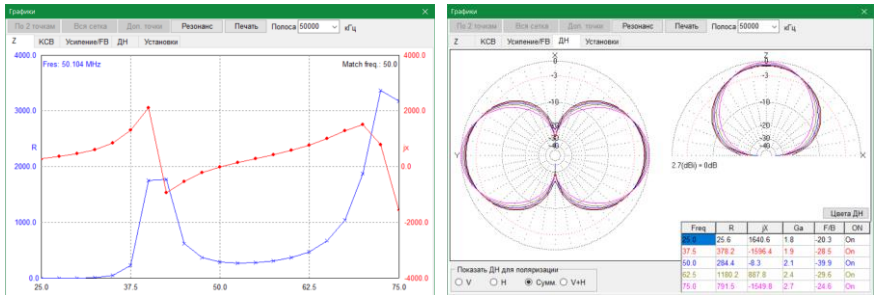


Рисунок 5.9

Получить параметры согласующего устройства для рассчитанной антенны (Инструменты → ВЧ компоненты, вкладка «СУ на LC»).

Сохранить ДН для последующих сравнений (Файл → Сохранить ДН).

3 Создать новый документ. Задать рамочную антенну со стороной $0,5\lambda$ (рисунок 5.10).

No.	X1(wl)	Y1(wl)	Z1(wl)	X2(wl)	Y2(wl)	Z2(wl)	R(wl)	Seg.
1	0.0	0.0	0.0	0.177	0.0	0.177	0.000133	-1
2	0.0	0.0	0.354	0.177	0.0	0.177	0.000133	-1
3	0.0	0.0	0.354	-0.177	0.0	0.177	0.000133	-1
4	0.0	0.0	0.0	-0.177	0.0	0.177	0.000133	-1
свод.								

Рисунок 5.10

Перейти на вкладку «Вид» и задать источник в нижнем углу квадрата (выделить левой кнопкой необходимый проводник, нажать правой кнопкой на проводнике → Добавить источник → в начало провода) (рисунок 5.11).

Изменить сопротивление для расчета КСВ на 300 Ом (см. рисунок 5.5).

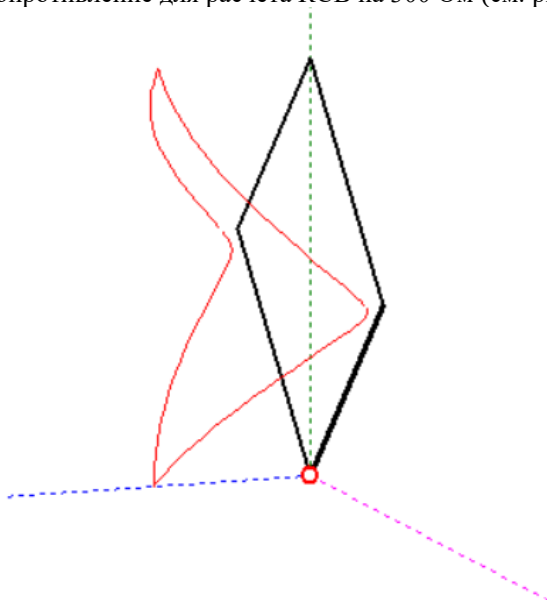


Рисунок 5.11

Перейти на вкладку «Вычисления», выбрать пункт «Свободное пространство» и нажать кнопку «Пуск».

Перейти на вкладку «Вид» и проверить распределение тока вдоль антенны (см. рисунок 5.11).

Перейти на вкладку «ДН», изучить диаграммы и рассчитанные параметры антенны. Записать значение КСВ. Получить трехмерную ДН.

Изучить диаграммы для вертикальной и горизонтальной плоскостей поляризации. Определить направление максимума излучения для каждой плоскости поляризации (рисунок 5.12).

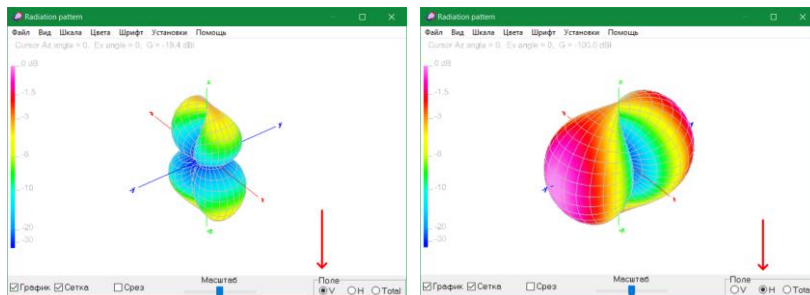


Рисунок 5.12

4 Открыть антенну \ANT\VHF beams\ZZ-NEW.MAA». Провести моделирование (рисунок 5.13).

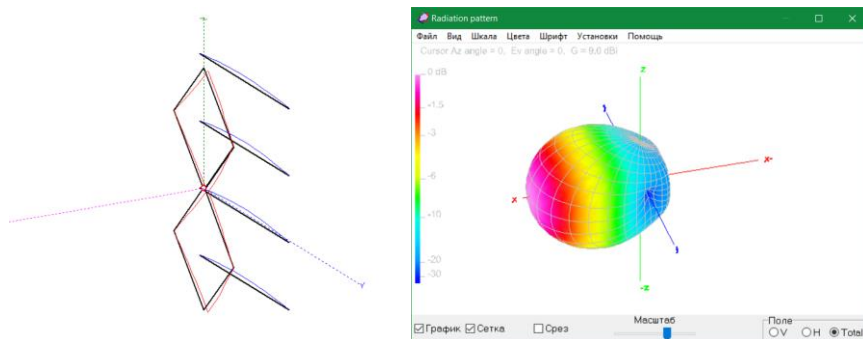


Рисунок 5.13

Сделать выводы по результатам моделирования.

6 НАПРАВЛЕННЫЕ АНТЕННЫ

6.1 Теория направленных антенн

Одиночные вибраторы имеют слабовыраженные направленные свойства. Для сужения ДН и повышения КНД целесообразно применять антенну в виде антенной решетки, элементами которой являлись бы вибраторы [1].

Многовибраторная антенна – это антенная решетка, элементами которой являются симметричные или несимметричные вибраторы.

Расстояние между соседними элементами в антенной решетке по сравнению с длиной волны невелико, поэтому между ними существует электромагнитная связь за счет полей излучения (переизлучения). Этот факт оказывает существенное влияние на основные характеристики и параметры антенны в целом. Поэтому необходимо количественно оценить взаимное влияние вибраторов друг на друга. Это важно как для обычной АР, состоящей только из активных вибраторов, так и для антенн, где один вибратор активный, а все остальные пассивные. К пассивным вибраторам энергия от генератора не подводится, они только переизлучают ЭМВ, создаваемые активным вибратором.

По конструкции различают следующие виды многовибраторных антенн: директорная (антенна типа «волновой канал»); логопериодическая вибраторная; многовибраторная синфазная горизонтальная.

Антенная решетка из двух вибраторов. Рассмотрим антенны из двух вибраторов, один из которых активный, а другой – пассивный, изображенные на рисунке 6.1.

Из рисунка 6.1 видно, что, изменяя реактивное сопротивление пассивного вибратора X (например, изменением его длины $2l$), можно получить необходимый фазовый сдвиг, который также будет зависеть и от расстояния между вибраторами. Следовательно, подбирая соответствующим образом длину пассивного вибратора и расстояние между пассивным и активным вибраторами, можно добиться требуемой диаграммы направленности.

Причем, если размер пассивного вибратора $L_x > 0,5\lambda$, то ток в нем будет опережать по фазе на 90° ток в активном вибраторе (т. е. ток в активном вибраторе будет отставать по фазе от тока в пассивном вибраторе). Тогда ДН будет направлена на активный вибратор, так как максимум множителя антенной решетки ориентируется в сторону элемента, в котором ток отстает по фазе. Пассивный вибратор при этом играет роль отражателя (рефлектора).

И наоборот, если $L_x < 0,5\lambda$, то ток пассивного вибратора испытывает отставание по фазе также на 90° по отношению к току активного вибратора. При этом ДН максимум направлена на пассивный вибратор, который в этом случае называют директором (направляющим).

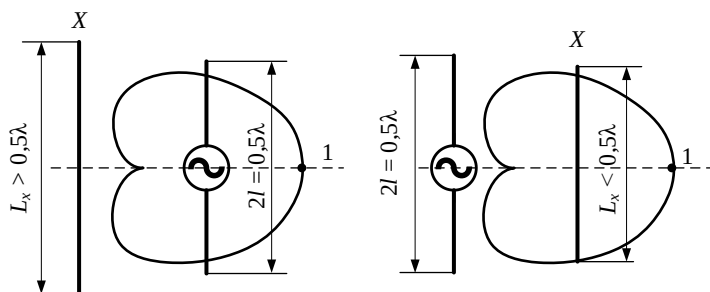


Рисунок 6.1

Рассмотренные варианты использования активного вибратора совместно с пассивным дают основу для построения более сложных многовибраторных антенн.

Директорная антенна нашла широкое применение, конструктивно она состоит из активного вибратора (AB), рефлектора и нескольких директоров [5]. Рефлектор существенно ослабляет заднее излучение, поэтому одного рефлектора оказывается вполне достаточно. Схематично конструкция директорной антенны показана на рисунке 6.2.

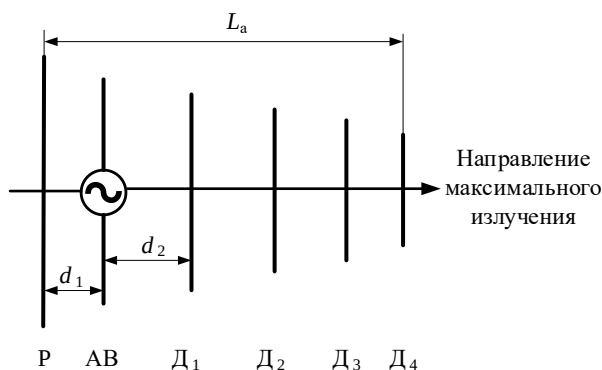


Рисунок 6.2

Все вибраторы крепят на одной направляющей стреле, которую обычно для прочности выполняют из металла. Активный вибратор крепят к стреле

через изолятор. При этом каждый последующий (от активного вибратора) директор имеет всё меньшую длину.

Путем экспериментального подбора размеров вибраторов и расстояний между ними добиваются необходимых условий, при которых происходит синфазное сложение поля излучения активного вибратора и полей переизлучения от всех пассивных вибраторов в направлении оси антенны. Применяя несколько директоров (за счет увеличения продольного размера антенны) удастся сузить ее ДН до значений $\approx 20^\circ$. При этом число директоров достигает 12. Дальнейшее увеличение числа директоров практически не влияет на уменьшение ширины ДН. Это происходит потому, что в крайних директорах наводятся малые токи и, как следствие, эффективность их мала.

6.2 Определение параметров направленных антенн

Задания:

- 1) выполнить моделирование директорной антенны на частоте $10 \cdot N$, МГц (N – номер по журналу);
- 2) получить графики частотных зависимостей рамочной антенны;
- 3) выполнить сравнение ДН смоделированной антенны и антенн из библиотеки программы: 8EL6M, 12CQ430 (..\ANT\VHF beams\...).

1 На вкладке «Геометрия» отметить пункт «в лямбдах» и задать необходимую частоту.

Задать излучатель длиной $0,5\lambda$, директор длиной $0,4\lambda$, рефлектор длиной $0,6\lambda$. На расстоянии $0,25\lambda$ между проводниками (рисунок 6.3).

No.	X1(w)	Y1(w)	Z1(w)	X2(w)	Y2(w)	Z2(w)	R(w)	Seg
1	0.0	0.25	0.0	0.0	-0.25	0.0	0.000133	-1
2	0.25	0.2	0.0	0.25	-0.2	0.0	0.000133	-1
3	-0.25	0.3	0.0	-0.25	-0.3	0.0	0.000133	-1
след.								

Рисунок 6.3

Перейти на вкладку «Вид» и задать источник в центре излучателя (выделить левой кнопкой необходимый проводник, нажать правой кнопкой на проводнике → Добавить источник → в середину провода) (рисунок 6.4).

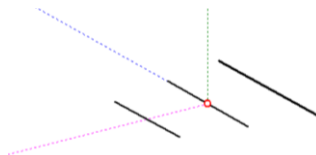


Рисунок 6.4

Перейти на вкладку «Вычисления», выбрать пункт «Свободное пространство» и нажать кнопку «Пуск».

Перейти на вкладку «Вид» и проверить распределение тока вдоль антенны.

Перейти на вкладку «ДН», изучить диаграммы и рассчитанные параметры антенны (рисунок 6.5). Записать значение КСВ. Получить трехмерную ДН (рисунок 6.6).

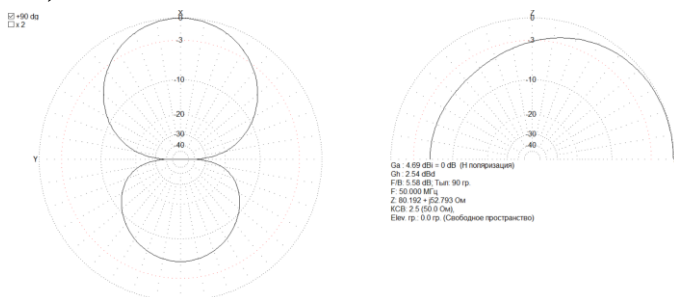


Рисунок 6.5

Нажать кнопку «3Д ДН» и выбрать шаг 5 для вывода трехмерной ДН.

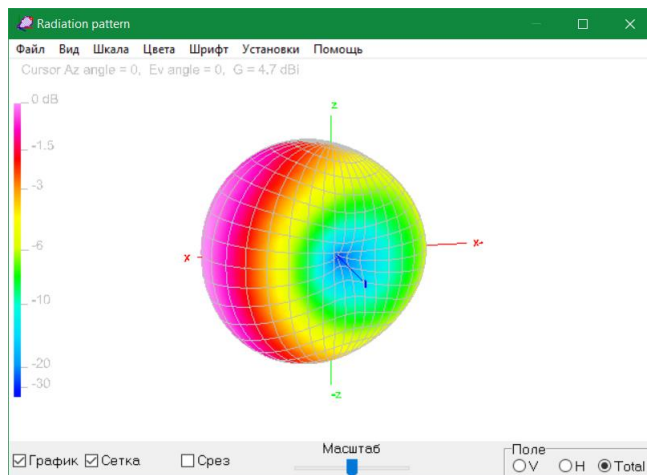


Рисунок 6.6

Выполнить оптимизацию антенны. Перейти на вкладку «Вычисления», нажать кнопку «Оптимизация». Установить движки, как на рисунке 6.7, выбрать элементы для изменений (Все элементы) и нажать кнопку «Пуск» окна оптимизации.

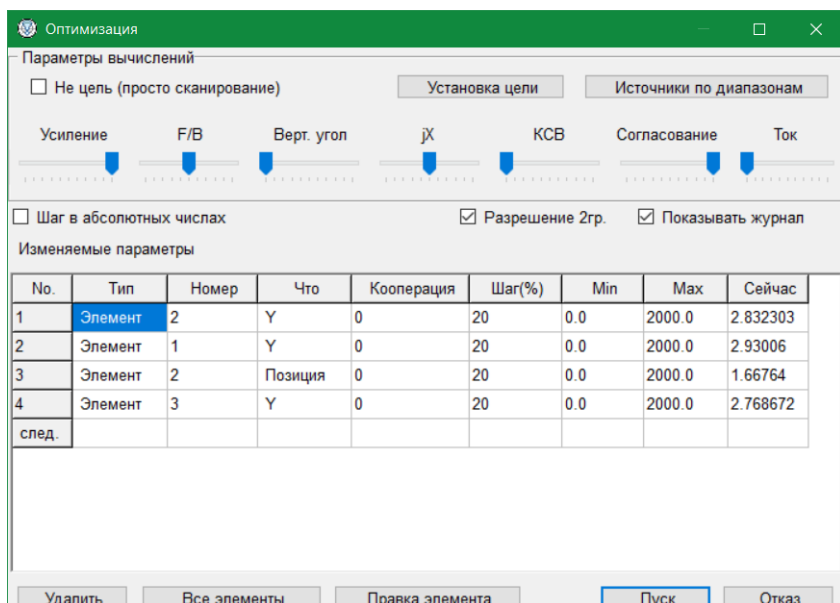


Рисунок 6.7

Выполнить моделирование. Перейти на вкладку «Вид» и проверить распределение тока вдоль антенны (рисунок 6.8).

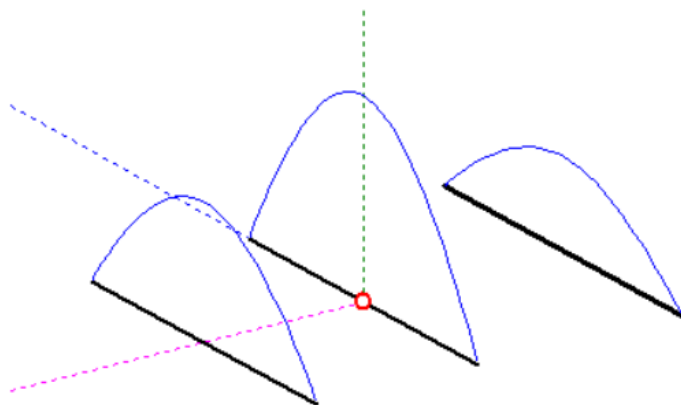


Рисунок 6.8

Перейти на вкладку «ДН», изучить диаграммы и рассчитанные параметры антенны (рисунок 6.9). Сравнить параметры антенны до и после оптимизации. Сохранить ДН для последующих сравнений (Файл → Сохранить ДН).

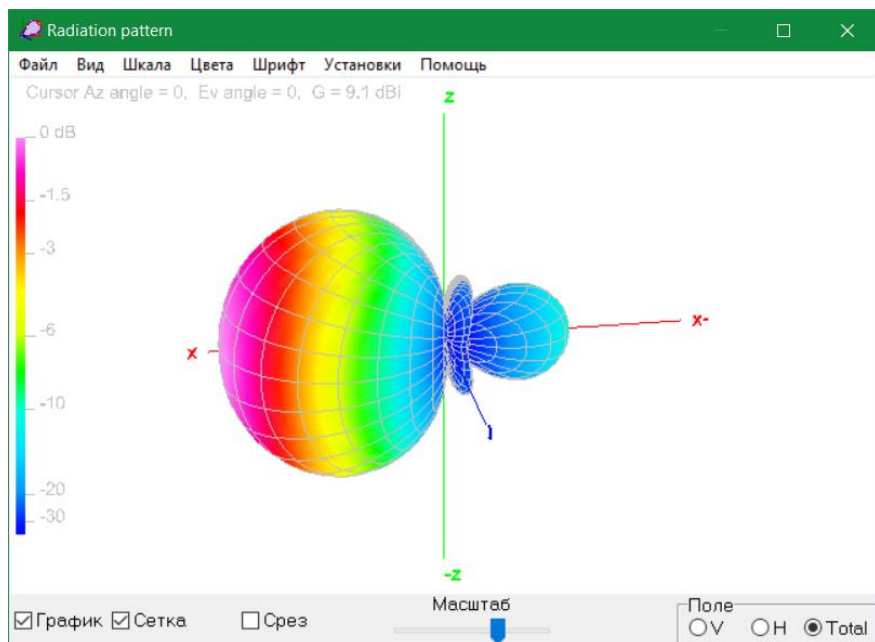


Рисунок 6.9

2 Перейти на вкладку «Вычисления». Нажать кнопку «Графики».

Настроить параметры, как на рисунке 3.18 (Центральная частота и полоса равны частоте по варианту).

Перейти на вкладку «КСВ». Нажать по очереди кнопки «По 2 точкам», «Вся сетка», «Доп. точки». По полученному графику получить полосу пропускания антенны (для КСВ 1,5 и 2).

Получить графики «Z» и «ДН», перейдя на соответствующие вкладки.

Получить параметры согласующего устройства для рассчитанной антенны (Инструменты → ВЧ компоненты, вкладка «СУ на LC»).

3 Выполнить моделирование антенн из библиотеки программы: 8EL6M, 12CQ430 (\ANT\VHF beams\) (рисунок 6.10). Сохранить ДН антенн.

Перейти на вкладку «Вычисления». Нажать кнопку «Графики».

Перейти на вкладку «КСВ». Нажать по очереди кнопки «По 2 точкам», «Вся сетка», «Доп. точки». По полученному графику получить полосу пропускания антенны (для КСВ 1,5 и 2).

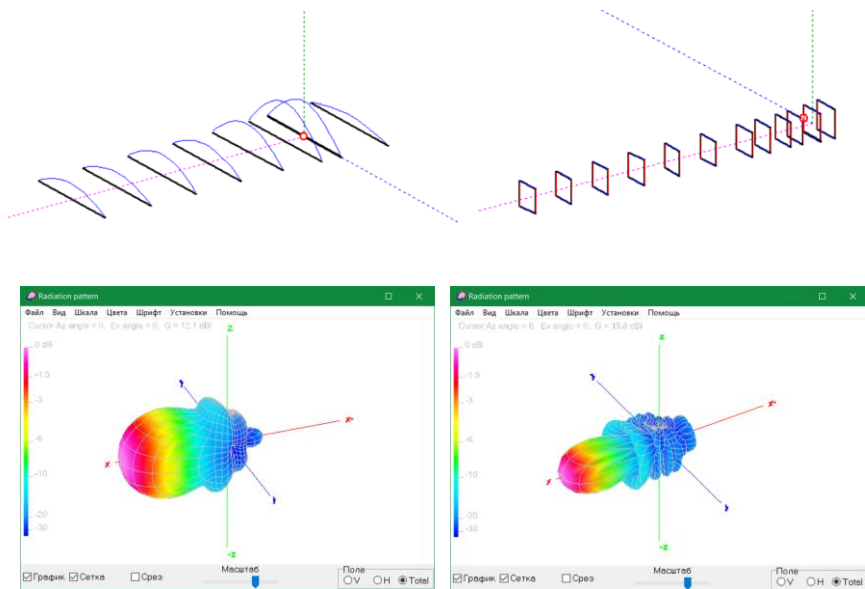


Рисунок 6.10

Выполнить сравнение ДН смоделированной антенны и антенн из библиотеки программы (Инструменты → Сравнить). С помощью кнопки «Открыть *.tab файл» добавить сохраненные ранее ДН (рисунок 6.11).

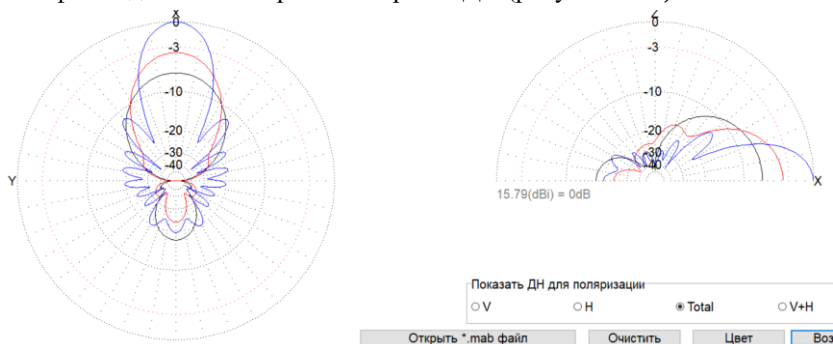


Рисунок 6.11

Сделать вывод по результатам сравнения.

7 ШИРОКОПОЛОСНЫЕ АНТЕННЫ

7.1 Теория широкополосных антенн

Диапазон рабочих частот (полоса пропускания) антенны – это интервал частот от $f_{\min}$ до $f_{\max}$, в пределах которого все параметры антенны не выходят из заданных пределов: $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$. [18].

С точки зрения рабочей полосы частот различают антенны настроенные, узкодиапазонные (узкополосные), широкодиапазонные (широкополосные) и сверхширокополосные.

Антенны, параметры которых соответствуют предъявляемым требованиям на одной рабочей частоте, называются настроенными [13].

Основные параметры узкодиапазонных антенн сильно зависят от частоты. Вследствие этого они могут работать без перестройки только в узком диапазоне частот (относительная полоса частот $\Delta f / f_{\text{ср}}$, то есть отношение разности граничных частот диапазона Δf к его центральной частоте $f_{\text{ср}} = (f_{\max} + f_{\min}) / 2$, составляет менее 10 %.

Широкодиапазонные антенны работают без перестройки в широком диапазоне частот (относительная полоса частот находится в пределах от 10 до 50 %).

Сверхширокополосные антенны обеспечивают соответствие параметров предъявляемым требованиям при коэффициенте перекрытия диапазона частот $f_{\max} / f_{\min} \geq 5$.

Основным фактором, определяющим полосу рабочих частот СВ, является изменение входного сопротивления при изменении частоты. Поэтому широкополосные вибраторы – это вибраторы с низким значением волнового сопротивления (у них утолщенные проводники). В связи с этим для вибратора из толстых проводников гораздо в большей полосе частот можно обеспечить необходимое согласование с фидером, даже не прибегая к согласующим устройствам. При переходе на цилиндрическую форму плеч вибратора существенно увеличивается входная емкость, так как площадь поперечных сечений плеч, выходящих на зажимы, увеличивается. Чтобы избежать этого, входные части вибраторов выполняют в виде конусов. Если плечи СВ – конусы, то вибратор называют биконической антенной (рисунок 7.1).

В этой антенне секция «А» настраивается для работы в диапазоне 10 м. Заградительный контур $L1C1$, настроенный на диапазон 10 м, «отключает» верхнюю часть антенны при ее работе в этом диапазоне. При работе антенны в диапазоне 15 м секция «Б» удлиняет секцию «А» до длины, резонансной в

этом диапазоне. Контур $L2C2$, настроенный на диапазон 15 метров, отключает верхнюю часть антенны при ее работе в диапазоне 15 метров. Для работы на диапазоне 20 метров антенна настраивается в резонанс изменением длины секции «В».

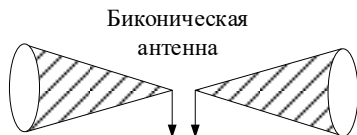


Рисунок 7.1

Однако создание вибратора большого диаметра из сплошного металла приводит к увеличению его массы и стоимости. Поэтому на практике используют вибраторы, имеющие большой эквивалентный диаметр или периметр поперечного сечения. Это достигается использованием вибраторов, состоящих из отдельных проводов (рисунок 7.2) (диполь Надененко).

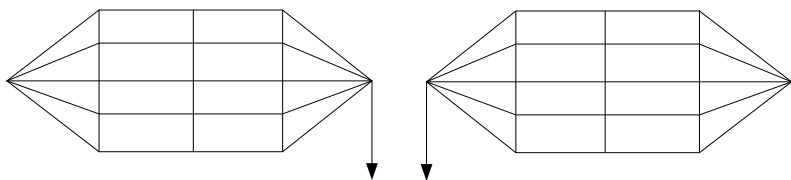


Рисунок 7.2

При этом конус может быть как сплошным, так и выполненным из отдельных проводников, которые являются образующими конуса.

Многодиапазонная вертикальная антенна

Для работы на нескольких диапазонах можно использовать комбинированную антенну. Схема трехдиапазонной антенны показана на рисунке 7.3.

Три четвертьволновых вибратора подключаются параллельно к центральной жиле коаксиального кабеля. К оплетке коаксиального кабеля подключаются не менее двух четвертьволновых противовесов для каждого диапазона работы антенны. Использование более трех вибраторов для выполнения многодиапазонной вертикальной

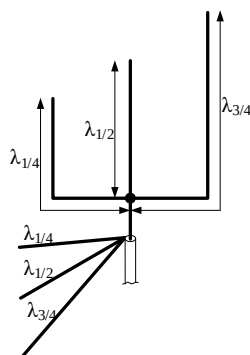


Рисунок 7.3

антенны нецелесообразно. Емкостная составляющая импеданса многодиапазонной вертикальной антенны будет сравнима с активной частью ее входного сопротивления на верхних диапазонах работы антенны, в результате чего эффективность работы антенны на них значительно падает.

Многодиапазонные антенны с заградительными контурами

Широко распространены антенны с заградительными контурами, установленными в ее полотне (TRAP-антенны). Они позволяют работать в нескольких диапазонах, при этом диаграммы направленности на разных диапазонах совпадают. Колебательный контур не пропускает волны на своей резонансной частоте. Пример такой антенны показан на рисунке 7.4 [6].

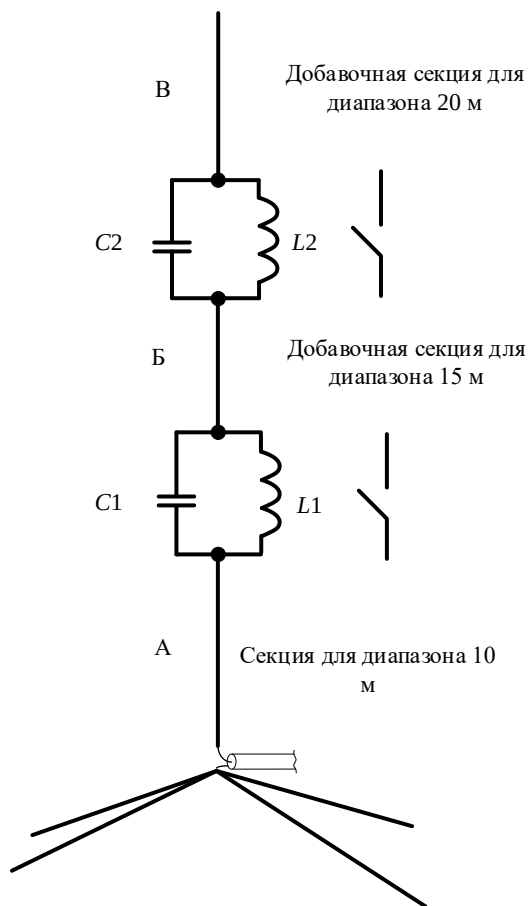


Рисунок 7.4

7.2 Определение параметров широкополосных антенн

Задания:

- 1) выполнить моделирование полуволновой антенны на частоте $10 \cdot N$, МГц (N – номер по журналу) с различными диаметрами проводника;
- 2) выполнить моделирование трехдиапазонной вертикальной антенны;
- 3) выполнить моделирование вертикальные антенны с заградительными контурами.

1 Выполнить моделирование полуволновой антенны на частоте $10 \cdot N$, МГц (N – номер по журналу) (см. подразд. 3.2). Получить график КСВ и записать полосу частот для «SWR<1.5».

Изменить диаметр проводника антенны: $\times 0.1$, $\times 0.5$, $\times 5$, $\times 10$, $\times 20$, $\times 50$, $\times 100$, $\times 200$ (рисунок 7.5). При каждом моделировании получить график КСВ (на рисунке 7.6 приведен пример для $\times 5$ и $\times 200$) и записывать полосу частот для «SWR<1.5» и радиус проводника (отключить пункт «в лямбдах»).

No	X1(m)	Y1(m)	Z1(m)	X2(m)	Y2(m)	Z2(m)	R(mm)	Seg
1	0.0	0.0	1.498962	0.0	0.0	-1.498962	0.8	-1
срэд.								

Рисунок 7.5

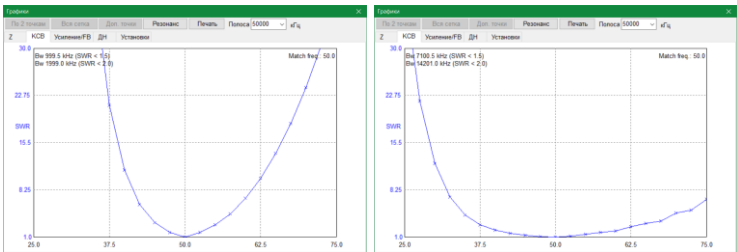


Рисунок 7.6

Построить график зависимости полосы частот от радиуса проводника $F(R)$ (рисунок 7.7).

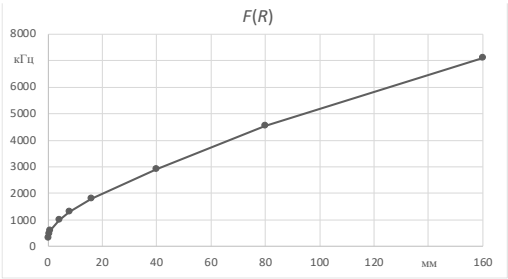


Рисунок 7.7

2 Открыть антенну «\ANT\HF multibands\OpenSleeve\GP Sleeve 14-21-28.maa». Провести моделирование на частоте 21 МГц (рисунок 7.8).

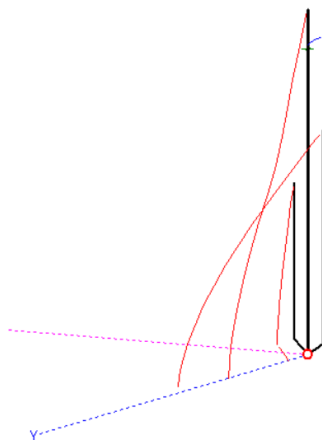


Рисунок 7.8

Перейти на вкладку «Вычисления». Нажать кнопку «Графики». Настроить параметры, как на рисунке 7.9).

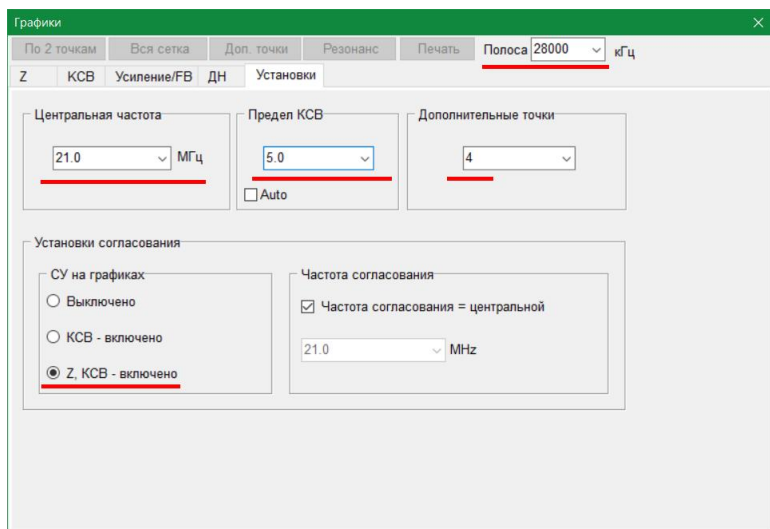


Рисунок 7.9

Перейти на вкладку КСВ. Нажать по очереди кнопки «По 2 точкам», «Вся сетка», «Доп. точки». По полученному графику определить частоты, на которых работает антенна.

Получить графики «Z» и «ДН», перейдя на соответствующие вкладки.

3 Открыть антенну «\ANT\HF multibands\Trap\14_21_28trapGP.maa». Провести моделирование на частоте 21 МГц.

Перейти на вкладку «Вычисления». Нажать кнопку «Графики». Настроить параметры, как на рисунке 7.9.

Перейти на вкладку КСВ. Нажать по очереди кнопки «По 2 точкам», «Вся сетка», «Доп. точки». По полученному графику определить частоты, на которых работает антенна.

Получить графики «Z» и «ДН», перейдя на соответствующие вкладки.

Сделать выводы по результатам моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Антенны : учеб. пособие для СПО / Ю. Т. Зырянов, П. А. Федюнин, О. А. Белосусов [и др.] – 4-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2020. – 412 с.
- 2 Антенны и распространение радиоволн : учеб. / В. Т. Ерёменко, А. П. Фисун, А. М. Кокорин [и др.]. – Орёл : ОГУ им. И. С. Тургенева, 2017. – 329 с.
- 3 **Гончаренко, И. В.** Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA / И. В. Гончаренко. – М. : ИП РадиоСофт, Журнал «Радио», 2002. – 80 с.
- 4 **Горелов, Г. В.** Системы связи с подвижными объектами : учеб. пособие / Г. В. Горелов, Д. Н. Роевков, Ю. В. Юркин ; под ред. Г. В. Горелова. – М. : Учеб.-метод. Центр по образованию на ж. д. трансп., 2014. – 335 с.
- 5 **Гошин, Г. Г.** Устройства СВЧ и антенны. Ч. 2. Антенны : учеб. пособие / Г. Г. Гошин. – Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 145 с.
- 6 **Григоров, И. Н.** Все об антеннах / И. Н. Григоров. – М. : ДМК Пресс, 2009. – 352 с.
- 7 **Докучаев, В. А.** Толковый словарь терминов по системам, средствам и услугам связи / В. А. Докучаев, О. Н. Иванова, З. А. Красавина ; под ред. проф. В. Докучаева. – М. : Радио и связь, 2003. – 548 с.
- 8 **Егоров, Ю. Н.** Основы общей теории антенных систем : учеб. пособие / Ю. Н. Егоров, В. В. Тебекин. – Минск : ВА РБ, 2024. – 127 с.
- 9 **Ерохин, Г. А.** Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн / учеб. / Г. А. Ерохин под ред. Г. А. Ерохина. – 3-е изд. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 491 с.
- 10 **Зырянов, Ю. Т.** Антенны : учеб. пособие для вузов / Ю. Т. Зырянов, П. А. Федюнин. – 5-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2022. – 412 с.
- 11 **Карпушкин, Э. М.** Теория радиосистем : учеб. пособие / Э. М. Карпушкин. – Минск : БГУИР, 2023. – 171 с.
- 12 **Кисель, Н. Н.** Моделирование распространения радиоволн в пакете Wireless InSite : учеб. пособие / Н. Н. Кисель. – Ростов н/Д; Таганрог : Изд. Южного федерального университета, 2018. – 107 с.
- 13 **Кубанов, В. П.** Антенны и фидеры – назначение и параметры / В. П. Кубанов. – Самара : ПГУТИ, 2013. – 60 с.
- 14 **Малеханов, А. И.** Лекции по теории антенных систем : учеб.-метод. пособие / А. И. Малеханов. – Н. Новгород : ННГУ, 2021. – 117 с.
- 15 **Маслов, М. Ю.** Методическая разработка к лабораторному практикуму по курсу «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства» / М. Ю. Маслов, В. А. Ружников, Д. В. Скачков. – Самара : ПГУТИ, 2013. – 32 с.
- 16 Моделирование антенн и элементов тракта : учеб.-метод. пособие / под ред. К. В. Шишакова. – Ижевск : ИжГТУ, 2009. – 127 с.

17 **Пудовкин, А. П.** Основы теории антенн : учеб. пособие / А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк, А. А. Иванов. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 92 с.

18 Основы теории антенн и распространения радиоволн : учеб. пособие / В. П. Кубанов, В. А. Ружников, М. Ю. Сподобаев, Ю. М. Сподобаев ; под ред. В. П. Кубанова. – Самара : ПГУТИ, 2016. – 258 с.

19 **Ротхаммель, К.** Энциклопедия антенн / К. Ротхаммель. – М. : ДМК-Пресс, 2016. – 812 с.

20 **Стенин, Ю. М.** Антенные и фидерные системы. Конспект лекций / Ю. М. Стенин. – Казань, 2012. – 40 с.

21 Физическая энциклопедия. В 5 т. Т. 4 / гл. ред. А. М. Прохоров. – М. : Большая Советская энциклопедия, 1990. – 724 с.

22 **Шевчук, В. Г.** Транспортные радиосистемы. Распространение энергии звуковых и электромагнитных волн / В. Г. Шевчук. – Гомель : БелГУТ, 1999. – 128 с.

23 **Яманов, Д. Н.** Антенны и распространение радиоволн : тексты лекций / Д. Н. Яманов. – М. : МГТУ ГА, 2017. – 64 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	3
1 ОБЩИЕ СВОЙСТВА РАДИОВОЛН	4
1.1 Распространение радиоволн	4
1.2 Помехи радиоприему	12
2 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АНТЕНН	15
2.1 Общие сведения	15
2.2 Физический смысл действующей длины антенны	18
2.3 Шумовая температура приемной антенны	19
2.4 Согласованность передающей и приемной антенн	20
2.5 Общие сведения и типы линейных антенн	24
2.6 Железнодорожные антенно-фидерные устройства	25
3 СИММЕТРИЧНЫЕ ВИБРАТОРЫ	31
3.1 Общие сведения о симметричных вибраторах	31
3.2 Определение параметров симметричных антенн	33
4 НЕСИММЕТРИЧНЫЕ ВИБРАТОРЫ	43
4.1 Изучение несимметричного вибратора	43
4.2 Определение параметров несимметричных вибраторов	48
5 РАМОЧНЫЕ АНТЕННЫ	54
5.1 Теория рамочных антенн	54
5.2 Определение параметров рамочных антенн	55
6 НАПРАВЛЕННЫЕ АНТЕННЫ	61
6.1 Теория направленных антенн	61
6.2 Определение параметров направленных антенн	63
7 ШИРОКОПОЛОСНЫЕ АНТЕННЫ	68
7.1 Теория широкополосных антенн	68
7.2 Определение параметров широкополосных антенн	71
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	74

Учебное издание

ЖИГАЛИН Игорь Олегович
МЕДВЕДЕВ Денис Дмитриевич
КИСЕЛЕВА Светлана Владимировна

ТРАНСПОРТНЫЕ РАДИОСИСТЕМЫ

Пособие по учебной дисциплине
«Транспортные радиосистемы»

Редактор *А. А. Павлюченкова*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Подписано в печать 21.04.2025 г. Формат 60х84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 4,42. Уч.-изд. л. 4,05. Тираж 50 экз.
Зак № 785. Изд. № 14

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/361 от 13.06.2014

№ 2/104 от 01.04.2014

№ 3/1583 от 14.11.2017

Ул. Кирова, 34, 246653, Гомель