

Сподобаев Ю.М., Кубанов В.П.

**ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
ЭКОЛОГИИ**



Москва
«Радио и Связь»
2000

УДК 621.396.67:628.518

Сподобаев Ю.М., Кубанов В.П. Основы электромагнитной экологии. – М.: Радио и связь, 2000. – 240 с.

ISBN 5-256-01513-3

Рассмотрен специфический вид антропогенного загрязнения окружающей среды – электромагнитное загрязнение. Показано, что проблемы электромагнитной экологии, традиционно являясь санитарно-гигиеническими, в настоящее время стали частью общей экологической проблемы и получили общественно значимое звучание.

Приведена методологическая база для решения конкретных задач расчетного прогнозирования электромагнитной обстановки вблизи излучающих технических средств радиосвязи, радиовещания и телевидения.

Для научных работников, специалистов проектирования и эксплуатации радиосредств, работников служб государственного надзора за связью и санитарно-эпидемиологического контроля, аспирантов и студентов вузов телекоммуникационного профиля, изучающих в рамках действующих учебных планов дисциплину «Электромагнитная экология».

Табл. 35, илл. 156, библи. 78 назв.

Рецензент д.т.н., профессор В.А. Андреев

Научное издание

ИБ № 2938

ISBN 5-256-01513-3

© Сподобаев Ю.М., Кубанов В.П., 2000

ПРЕДИСЛОВИЕ

Чуть более 100 лет отделяет нас от крупнейшего события XIX века – изобретения радио. Оно радикально повлияло на научно-технический прогресс, развитие цивилизации. Электромагнитные волны нашли применение не только для целей передачи сообщений на расстояние. Читатель без особого труда приведет множество примеров их применения в самых разных сферах деятельности. Один из них – использование отдельных участков радиочастотного спектра в медицине. Сегодня можно смело утверждать, что радио величайшее благо для человечества.

Широкое применение волновых электромагнитных процессов в повседневной жизни привело к тому, что к естественным электромагнитным полям, которые сопутствовали зарождению и развитию жизни на Земле, добавились искусственные, преднамеренно создаваемые самыми разными излучающими устройствами, в первую очередь, антеннами радиопередающих устройств систем радиосвязи, телевидения и радиовещания.

Общеизвестно, что электромагнитные волны являются биологически активным фактором. Наряду с уже упоминавшимся использованием электромагнитных волн в целях исцеления от недугов, к сожалению, обнаружено и неблагоприятное воздействие радиочастотных излучений на окружающую среду и, в том числе, на человека.

В экологии сформировалось новое направление – электромагнитная экология с рядом специфических проблем: биофизических, медико-биологических и научно-технических. Электромагнитная экология – это раздел экологии, изучающий взаимодействие человека и окружающей среды с электромагнитными полями.

Проблемам электромагнитной экологии посвящается все больше работ – это монографии, диссертации, публикации в периодических научных изданиях, доклады на представительных научных форумах. Однако авторам неизвестны работы, где бы на систематической основе были изложены вопросы мониторинга окружающей среды по электромагнитному фактору. Этот недостаток в определенной мере призвана устранить предлагаемая читателям книга.

О чем же идет речь в книге, каковы категории потенциального читателя?

Во-первых, авторы попытались показать, что проблемы электромагнитной экологии, традиционно являясь санитарно-гигиеническими, в настоящее время стали частью общей экологической проблемы и получили общественно значимое звучание. В этом отношении первая глава не лишена оттенка популяризации и может, как представляется авторам, заинтересовать самую широкую аудиторию.

Во-вторых, авторы постарались рассказать о системе защиты от радиочастотных излучений, в частности, о мировой практике нормирования электромагнитных полей. Об этом идет речь во второй главе книги. Эта глава в целом рассчитана на круг более узких специалистов – врачей гигиенистов, инженеров служб государственного надзора за связью, проектировщиков, специалистов по эксплуатации радиосредств. Однако, отдельные фрагменты главы, касающиеся социально-психологических аспектов проблемы нормирования, будут интересны широкому кругу читателей.

В-третьих, авторы попытались помочь студентам вузов телекоммуникационного профиля, изучающим в рамках действующих учебных планов дисциплину «Электромагнитная экология», аспирантам и научным работникам, специалистам групп проектирования радиотехнических объектов в формировании методологической базы для решения конкретных задач расчетного прогнозирования электромагнитной обстановки вблизи излучающих технических средств радиосвязи, радиовещания и телевидения. Именно эти технические средства являются основными источниками электромагнитного загрязнения окружающей среды, именно поэтому шесть глав книги (с третьей по восьмую) посвящены непосредственно вопросам мониторинга окружающей среды по электромагнитному фактору. В этих главах читатель найдет рецепты, но не обнаружит «готовых блюд» в виде программ для ПЭВМ. Сделано это вполне осознанно и не потому, что авторы держат «секреты кухни» в тайне, а потому что программные комплексы и руководства пользователя в отдельных случаях соизмеримы с объемом настоящей книги. Вместе с тем авторы открыты для делового партнерства при решении конкретных задач мониторинга окружающей среды по электромагнитному фактору вблизи конкретных излучающих объектов.

Разделы 4.4 и 5.4 по просьбе авторов написаны М.Ю. Сподобаевым и Д.В. Филипповым, раздел 6.4 – М.Ю. Сподобаевым.

Авторы выражают глубокую благодарность ОАО «Телекоммуникационные сети связи Удмуртской республики», ОАО «Связьинформ» Челябинской обл., ОАО «Ивановские телекоммуникационные сети» за финансовую поддержку издания книги, а также К.И. Савченко, взявшему на себя труд компьютерной верстки книги.

Авторы отдают себе отчет в том, что книга не лишена недостатков, как по фактическому содержанию, так и по методике изложения, и с благодарностью примут все критические замечания и пожелания.

Отзывы и замечания по книге следует направлять по адресу:
443010, Самара, ул. Льва Толстого 23, ПГАТИ,
E-mail: spod@srttc.samara.ru.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

1.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ КАК ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Природа не дает человеку в готовом виде всего того, что ему необходимо для удовлетворения его потребностей. Возникла необходимость в труде и производственной деятельности. Прогресс развития человечества, рост производства, образование инфраструктуры (транспорт, связь и т.п.) привели к резкому возрастанию обмена веществ и энергии между человеческим обществом и биосферой. Воздействия человека на окружающую среду – это антропогенное воздействие.

Одним из видов антропогенного воздействия является антропогенное загрязнение. Загрязнение вообще – это неблагоприятное изменение нашего окружения, являющееся полностью или в основном побочным результатом деятельности человека. Загрязнение, связанное с деятельностью человека, называют антропогенным загрязнением.

Антропогенное загрязнение – это вещество и энергия либо вообще не характерные для биосферы, либо не характерны их концентрации и интенсивности.

В виде энергии окружающая среда загрязняется теплом, ионизирующим излучением, электромагнитными полями (ЭМП), световой энергией (в том числе ультрафиолетовым и инфракрасным излучением), акустическим шумом, вибрацией, ультразвуком. С точки зрения экологии ЭМП – это один из видов энергетического загрязнения окружающей среды (рис. 1.1).

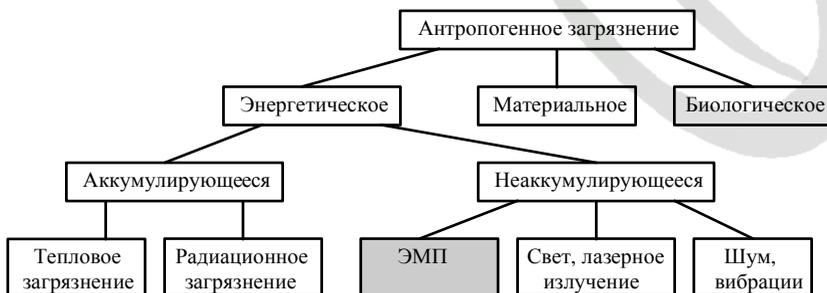


Рис. 1.1. Классификация антропогенных загрязнений

Энергетические загрязнители (кроме теплового и радиационного) не аккумулируются в природе, а оказывают влияние на биосферу лишь во время их производства. Аккумулирующееся загрязнение – это вредные вещества и некоторые виды энергии, способные в отличие от неаккумулирующихся накапливаться в окружающей среде и живых организмах.

Согласно международной регламентации, электромагнитный спектр до 3 ТГц делится на 12 частотных диапазонов. Эти диапазоны обозначены номерами, как показано в табл. 1.1, в которой приведены только диапазоны используемые для телекоммуникаций.

Таблица 1.1

**Частотные диапазоны электромагнитного спектра в полосе частот
300 Гц - 300 ГГц**

| Номер диапазона | Диапазон частот | Вид радиоволн | Вид радиочастот |
|-----------------|-----------------|-------------------|------------------------------|
| 3 | 0,3...3 кГц | гектокилометровые | инфранизкие частоты (ИНЧ) |
| 4 | 3...30 кГц | мираметровые | очень низкие частоты (ОНЧ) |
| 5 | 30...300 кГц | километровые | низкие частоты (НЧ) |
| 6 | 0,3...3 МГц | гектометровые | средние частоты (СЧ) |
| 7 | 3...30 МГц | декаметровые | высокие частоты (ВЧ) |
| 8 | 30...300 МГц | метровые | очень высокие частоты (ОВЧ) |
| 9 | 0,3...3 ГГц | дециметровые | ультравысокие частоты (УВЧ) |
| 10 | 3...30 ГГц | сантиметровые | сверхвысокие частоты (СВЧ) |
| 11 | 30...300 ГГц | миллиметровые | крайне высокие частоты (КВЧ) |

Для того чтобы уменьшить взаимное влияние различных технических средств друг на друга, а также снизить уровень радиопомех, проведена международная регламентация каждого используемого диапазона [44]. Для каждого типа излучающих технических средств отведены свои участки. Определенные поддиапазоны отведены для радиовещания, для телевидения, для различных видов радиосвязи, для радиолокации и т. д. Свои участки диапазона имеют технические средства военного назначения, отдельно выделены поддиапазоны для радиолюбителей. Установленные жесткие требования и ограничения на уровни, так называемых, внеполосных излучений позволяют обеспечить электромагнитную совместимость излучающих средств – возможность одновременной работы или работы по графику.

Подсчитано, что человечество использует миллиарды тонн минерального сырья, топлива, воды, биомассы, атмосферного кислорода, а в полезный продукт переходит лишь один процент затраченных природных ресурсов. Это в полной мере относится и к электромагнитному полю. Приведем такой гипотетический пример. Технические средства радиосвязи, радиовещания и телевидения излучают огромное количество электромагнитной энергии. Мощности передатчиков изменяются от милливатт (например,

мощность передатчика радиотелефонной трубки) до сотен киловатт и даже единиц мегаватт (радиовещательные передатчики НЧ и СЧ диапазонов). Электромагнитная энергия, излучаемая телекоммуникационными средствами, имеет вполне определенное назначение – она должна воздействовать на входные цепи приемных устройств. Если предположить, что для нормальной работы каждого приемного устройства необходима мощность 1 мВт, то нетрудно подсчитать, что для полного изъятия из окружающей среды электромагнитной энергии одного передатчика мощностью 100 кВт необходимо иметь 100 млн. приемников. Таких передатчиков только в России сотни и даже тысячи...

Что же происходит с электромагнитной энергией? На что она расходуется? Как проявляется ее действие? Часть ее уходит в космическое пространство, а остальная рассеивается (поглощается) окружающей средой: атмосферой, окружающими предметами, в том числе и биологическими объектами.

Следует учитывать, что электромагнитную энергию излучают и множество других технических средств, основные функции которых не связаны с преднамеренным процессом излучения, например, энергетические установки, электрифицированный транспорт, линии электропередач (ЛЭП), бытовые приборы, компьютеры и т.п.

Уровень электромагнитного загрязнения пока не приобрел глобально опасного характера, если не считать появившегося в последнее столетие и постоянно увеличивающегося уровня радиодфона, под которым понимают суммарный эффект всех излучающих средств Земного шара [1]. Электромагнитное излучение высокого уровня локализовано вблизи источников и существует только в периоды работы излучающих технических средств.

1.2. ИСТОЧНИКИ И МАСШТАБЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

В последние несколько десятилетий применение устройств, которые излучают ЭМП, значительно возросло. Начало освоения человеком ЭМП связано с использованием диапазона длинных волн (длина волны 1...10 км), что было обусловлено развитием радиосвязи и радиовещания в этом диапазоне. Затем бурными темпами стало развиваться телевидение, и диапазон используемых длин волн стал расширяться в сторону их укорочения. С развитием радиолокации и радионавигации активно стали осваиваться диапазоны метровых, дециметровых и сантиметровых волн. В настоящее время трудно назвать такую область науки, техники, народного хозяйства, где бы ни использовалась радиоэлектронная аппаратура, в том числе излучающая ЭМП.

Приведем примерный перечень видов телекоммуникационной деятельности и оборудования, которые являются причиной насыщения окружающей среды электромагнитной энергией в различных диапазонах [2]:

- до 300 Гц (до 1000 км) – статические поля различного происхождения, энергетические установки, линии электропередачи, видеодисплейные терминалы;

- 0,3...3 кГц (1000...100 км) – модуляторы радиопередатчиков, медицинские приборы, электрические печи индукционного нагрева, закаливания, сварки, плавления, очистки;

- 3...30 кГц (100...10 км) – средства связи на ОНЧ, системы радионавигации, модуляторы радиопередатчиков, медицинские приборы, электрические печи индукционного нагрева, закаливания, сварки, плавления, очистки, видеодисплейные терминалы;

- 30...300 кГц (10...1 км) – радиовещание, радионавигация, морская и авиационная связь, средства связи на НЧ, радиолокация, видеодисплейные терминалы, электрофорез, индукционный нагрев и плавление металла;

- 0,3...3 МГц (1...0,1 км) – радиовещание, связь, радионавигация, морская радиотелефония, любительская радиосвязь, промышленные радиочастотные приборы, передатчики с амплитудной модуляцией, сварочные аппараты, производство полупроводниковых материалов, медицинские приборы;

- 3...30 МГц (100...10 м) – радиовещание, любительская радиосвязь, глобальная связь, ВЧ терапия, магнитные резонансные возбудители, диэлектрический нагрев, сушка и склейка дерева, плазменные нагреватели;

- 30...300 МГц (10...1 м) – подвижная связь, нагрев, частотно-модулированное радиовещание, телевизионное вещание, скорая помощь, диэлектрический нагрев, магнитные резонансные возбудители, сварка пластмасс, плазменный нагрев;

- 0,3...3 ГГц (100...10 см) – радиорелейные линии, подвижная связь, радиолокация, радионавигация, телевизионное вещание, микроволновые печи, медицинские приборы, плазменный нагрев, ускорители частиц;

- 3...30 ГГц (10...1 см) – радиолокация, спутниковая связь, подвижная связь, метеорологические локации, радиорелейные линии, защитная сигнализация, плазменный нагрев, установки термоядерного синтеза;

- 30...300 ГГц (10...1 мм) – радиолокация, спутниковая связь, радиорелейные линии, радионавигация.

Приведенные данные показывают, что человечество использует практически весь частотный диапазон электромагнитного излучения. Созданная человеком электромагнитная обстановка состоит из полей, которые излучаются преднамеренно или являются продуктами использования других устройств.

В развитии излучающих электромагнитную энергию технических средств, существует три устойчивые тенденции, которые заставляют обращать пристальное внимание на вопросы электромагнитной экологии.

Первая – увеличение количества излучающих средств за счет технического освоения и более плотного заполнения частотных диапазонов, расширения сети радиосвязи и радиовещания, увеличения каналов телевизионного вещания и других служб.

Вторая – увеличение энергетических потенциалов технических средств путем увеличения мощностей приборов и передатчиков, увеличения эффективности передающих антенн средств телекоммуникаций и их территориальной концентрации.

Третья – внедрение сложной электронной бытовой техники, персональных компьютеров и других достижений новых технологий.

В настоящее время наблюдается ухудшение экологической ситуации по электромагнитному фактору. Это следует связывать, в первую очередь, с преобладанием ведомственных, чисто коммерческих и потребительских подходов к вопросам использования ЭМП. Излучающие технические средства и объекты размещаются на крышах жилых домов и вблизи зон массового пребывания людей без анализа уже существующей электромагнитной обстановки, прогнозирования ЭМП размещаемых средств. Как правило, для размещения излучающих технических средств используются одни и те же удобные с точки зрения массового обслуживания места установки антенн (мачты, башни, высотные здания и т.д.). Несмотря на регламентации и ограничения по использованию технических средств, излучающих в окружающую среду ЭМП, в коммерческих целях иногда реализуется не сертифицированная по гигиеническим параметрам и параметрам электромагнитной совместимости аппаратура.

Неблагоприятная ситуация с электромагнитным фактором связана также со слабой материально-технической базой экологического электромагнитного мониторинга окружающей среды в России. Нормативной документацией предписано, что каждый объект, предназначенный для излучения в окружающую среду электромагнитной энергии, должен иметь санитарный паспорт, в котором кроме прочих данных, приводятся расчетные и измеренные уровни ЭМП и границы санитарных зон этих объектов. Кроме того, эффективных приборов для измерения параметров ЭМП, выпускаемых отечественной промышленностью, практически нет, а зарубежные весьма дороги.

Не следует забывать о бедственном состоянии экологического воспитания, образования и просвещения населения и даже специалистов. Это относится и к изучению вопросов электромагнитной экологии. Даже в вузах радиотехнического профиля изучение вопросов оценки состояния ок-

ружающей среды по электромагнитному фактору носит фрагментарный характер. В справочной, учебной и методической литературе по экологии только констатируется факт наличия ЭМП, как физического фактора, загрязняющего окружающую среду.

Основным «поставщиком» ЭМП в окружающую среду являются радиотехнические системы телекоммуникаций. Это связано с тем, что излучение ЭМП – неотъемлемое явление для радиоканала. Излучающие технические средства радиосвязи, радиовещания и телевидения распределяются по территориям, как правило, равномерно. Это делается для того, чтобы создать необходимую интенсивность ЭМП в местах пребывания людей, (чтобы работали приемники). Исторически сложившаяся ситуация с размещением технических средств обостряет вопросы электромагнитной экологии, поскольку строили и размещали излучающие технические средства так, чтобы было удобно эксплуатировать, не задумываясь об экологических последствиях. Результат – излучающие технические средства попали в границы городов, телецентры – в самых населенных местах и т.д. Как следствие всего этого, под высокие уровни ЭМП попал не только обслуживающий персонал излучающих технических средств, но и население близлежащих территорий. Однако радиосвязь, радиовещание и телевидение – достижение цивилизации и никто не собирается отказываться от них.

Существуют также созданные человеком источники ЭМП, используемые не для целей телекоммуникаций. Как было перечислено выше, в промышленности, науке и медицине применяется оборудование для передачи и концентрации электромагнитной энергии в ограниченных рабочих областях для создания полезных для человека физических, химических и биологических эффектов. Частотные диапазоны, выделенные для этих целей, приведены в табл. 1.2 [2]. Однако в отдельных странах используются и дополнительные частоты для этого оборудования.

Из-за несовершенств конструкций всегда существует утечка электромагнитной энергии от такого оборудования. Каждый генератор действует как источник ЭМП, способных стать причиной вредных эффектов, зависящих от уровней излученной мощности.

Общее количество промышленных, научных и медицинских установок, излучающих ЭМП, в мире оценивается в несколько сотен миллионов, и их число постоянно увеличивается на 3...7 % в год.

Промышленные, научные и медицинские установки обычно проектируются с учетом минимальной стоимости при выполнении необходимого набора операций. Частотная стабильность и спектральная плотность мощности ЭМП, излучаемых в рабочие объемы, являются, как правило, не главными параметрами. При этом рабочее место оператора обычно находится в непосредственной близости от генератора или усилителя.

Электромагнитная энергия излучается из оборудования главным образом из оконечных устройств и подходящих к ним проводников (например, радиочастотных кабелей). Количество излученной энергии зависит от особенностей конструкции устройств и размещения их на рабочем месте. Случайно излученные поля являются следствием токов, протекающих по поверхности оборудования и различным окружающим проводящим структурам.

Таблица 1.2

Центральные частоты и частотные диапазоны и выделенные для использования в промышленности, науке и медицине

| Центральная частота | Частотный диапазон | Регион применения |
|------------------------|---------------------|--|
| 70 кГц | 60...80 кГц | Россия |
| 6,78 МГц | 6,765...6,795 МГц | Подлежит согласованию |
| 13,560 МГц | 13,553...13,567 МГц | Распространен во всем мире |
| 27,120 МГц | 26,957...27,283 МГц | Распространен во всем мире |
| 40,68 МГц | 40,66...40,70 МГц | Распространен во всем мире |
| 42; 49; 56; 61; 66 МГц | ~ 0,2 % | Великобритания |
| 84; 168 МГц | ~ 0,005 % | Великобритания, Австрия, Лихтенштейн, Голландия, Португалия, Швейцария, Западная Германия, Югославия |
| 433,92 МГц | 433,05...434,79 МГц | |
| 896 МГц | 886...906 МГц | Великобритания |
| 915 МГц | 902...928 МГц | Северная и Южная Америка |
| 2,375 ГГц | 2,325...2,425 ГГц | Албания, Болгария, Чехословакия, Венгрия, Румыния и Россия |
| 2,45 ГГц | 2,4...2,5 ГГц | Распространен во всем мире, исключая страны, где используется 2,375 ГГц |
| 3,39 ГГц | 3,37...3,41 ГГц | Голландия |
| 5,8 ГГц | 5,724...5,875 ГГц | Распространен во всем мире |
| 6,78 ГГц | 6,74...6,82 ГГц | Голландия |
| 24,025 ГГц | 24,0...24,05 ГГц | Распространен во всем мире |
| 40,68 ГГц | 40,43...40,92 ГГц | Великобритания |
| 61,25 ГГц | 61,0...61,5 ГГц | Распространен во всем мире |
| 122,5 ГГц | 122...123 ГГц | |
| 245 ГГц | 244...246 ГГц | |

Все оборудование обычно действуют как своеобразная антенная система, состоящая из близко расположенных излучающих поверхностных элементов, резонирующих на некоторых частотах. Хотя эффективность излучения такой системы весьма низкая, тем не менее, излученная мощность может быть значительной, если высока номинальная мощность установки.

В последнее время все большее внимание привлекают еще две сферы деятельности, которые создают электромагнитное загрязнение – это энергетика и информатика. Электромагнитные поля, сопровождающие использование человеком электроэнергии промышленной частоты и компьютеров, вызывают определенное беспокойство у экологов, гигиенистов и т.д.

В последнее время появилось множество научных подтверждений явлению повышенной биологической активности магнитных полей промышленной частоты малых уровней [3, 4, 5]. Есть результаты научных исследований, позволяющие считать, что такие поля являются причиной некоторых видов онкологических заболеваний, особенно у детей. Очень тревожны тенденции резкого увеличения количества, видов и мощностей бытовой техники. Образ жизни цивилизованного человека предполагает, что на весьма ограниченной площади квартиры концентрируется большое количество всевозможной бытовой техники – от фенов и кофемолок до мощных стиральных и посудомоечных машин. Косвенно об увеличении ЭМП в нашем доме можно судить по тому факту, что за последние десять пятнадцать лет токовые номиналы плавких предохранителей и автоматов на входе силовой сети в квартирах увеличились с 5-6 до 20-25 ампер. Это означает увеличение потребляемой мощности в 10-25 раз и, как следствие, увеличение уровней ЭМП в квартирах в 5-6 раз. Кроме того, энергетика – это линии электропередач. Они проходят и по полям, лесам, рекам и под водой. Биологи показали, что ЭМП от линий электропередач влияют на поведенческие реакции насекомых (муравьи покидают прилегающие к ЛЭП участки леса), рыб (ЭМП от ЛЭП и подводных силовых кабелей, пересекающих водоемы, часто затрудняют миграцию рыб).

Массовая компьютеризация и производства, и быта привела к тому, что большое количество людей, в том числе дети, проводят длительное время у компьютера не только как источника информации, но и источника энергетического загрязнения, причем находясь в непосредственной близости от него.

Нельзя панически бояться ЭМП, но и не следует относиться к ним халатно. Биологическая активность ЭМП доказана и может быть очень высокой.

В проблемах электромагнитной экологии выделилось три направления:

- биофизическое, занимающееся вопросами исследования взаимодействия биологических тканей с ЭМП;
- медико-биологическое, которое занимается изучением и нормированием воздействующего фактора на окружающую среду и человека;
- научно-техническое, целью которого является разработка методов и средств анализа в окружающей среде ЭМП и защиты от них в случае необходимости.

К настоящему времени накоплен богатейший научный материал по первым двум направлениям. Об этом свидетельствуют многочисленные отечественные и зарубежные публикации, посвященные биологическим эффектам ЭМП и исследованиям причинно-следственных связей между биологическими объектами и ЭМП. Наиболее полная и хорошо систематизированная библиография по этим вопросам, по мнению авторов, приведена в [3, 4, 6]. Однако в последние годы возникла острая необходимость анализа распределения ЭМП различных технических средств и в первую очередь телекоммуникационных радиосредств в окружающей среде. Это связано с многочисленными экологическими и санитарно-гигиеническими задачами, заключающимися в решении вопросов безопасного размещения излучающих объектов. При этом используются действующие нормативные и методические документы, в которых приведены предельно-допустимые уровни ЭМП для всех диапазонов частот.

1.3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В состав биосферы входят ЭМП естественного и искусственного происхождения. В спектре естественных электромагнитных полей условно выделяют несколько компонентов земного, околоземного и космического происхождения – это постоянное магнитное поле Земли (геомагнитное поле), электрическое поле Земли и переменные электромагнитные поля в диапазоне частот от 10^3 до 10^{12} Гц. Источником переменных электромагнитных полей являются атмосферные явления (атмосферное электричество), а также радиоизлучение Земли, Солнца и галактик. Поля искусственного происхождения излучаются техническими средствами, созданными человеком. Диапазон частот излучаемых ЭМП – промышленные частоты и весь радиочастотный диапазон. Интенсивность излучения зависит от мощности технических средств, параметров излучателей, удаленности точки наблюдения и т.д. Характерная особенность этого вида излучения – высокая когерентность, т.е. частотная и фазовая стабильность, а также пространственная концентрация электромагнитной энергии. Кроме этого, выделяют ради фон, как суммарный эффект всех излучающих радиосредств Земного шара и прежде всего НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов, в которых наблюдается глобальное распространение радиоволн. В настоящее время ЭМП искусственного происхождения стали намного превышать естественный электромагнитный фон. Они превратились в опасный экологический фактор.

По образному выражению Ю. Холодова [7] все живое постоянно находится в «шестом незримом океане волн» – это четыре водных океана, воз-

душный, а под шестым понимается океан электромагнитных полей. ЭМП существует как в пространстве, не содержащем вещества (вакууме), так и в пространстве, заполненном веществом, в том числе и биологическими тканями. Квантовая энергия ЭМП на радиочастотах слишком мала и не способна изменить молекулярную структуру или разрушить любые молекулярные связи. Максимальная квантовая энергия ЭМП на частоте 300 ГГц составляет 1,2 МэВ, в то время как для разрыва самой слабой водородной связи требуется 80 МэВ. В связи с этим ЭМП частотой 300 ГГц и ниже часто называют неионизирующим излучением. Даже высокоинтенсивное неионизирующее излучение не может вызывать ионизацию в биологической системе. Однако оно может вызывать другие биологические эффекты, например, за счет нагревания, изменения химических реакций и наведения электрических токов в тканях.

На рис. 1.2 приведена характерная зависимость показателей жизнедеятельности организмов от абиотического фактора, в качестве которого здесь выступают электромагнитные поля.

Медико-биологическими исследованиями доказано, что живые организмы не могут нормально функционировать без естественных ЭМП. Доказано участие естественной радиации и естественных ЭМП в образовании из неорганических веществ аминокислот, составляющих белок. Эти поля сопутствовали зарождению и развитию жизни на Земле, а также участвовали в эволюции человека. В реальных условиях естественные ЭМП изменяются в течение суток и по сезонам, зависят от географических координат и от 11-ти летнего цикла активности Солнца и других факторов. Можно выделить диапазон изменения интенсивностей естественных ЭМП, который сформировался и существует многие миллионы лет. Этот диапазон интенсивностей естественных ЭМП является «привычным» для живых организмов, его называют зоной оптимальных условий.

Гипогеоэлектромагнитные условия, т.е. условия, когда уменьшено или вовсе отсутствует электрическое и/или магнитное поле Земли, приводят к стрессовому состоянию организмов и, в конце концов, к его смерти (предел устойчивости 1). Особенно опасны гипогеомагнитные условия, однако, их весьма сложно реализовать технически. Этот вопрос подробно рассмотрен в [8]. Там, в частности, сказано, что обследование ряда специализированных экранированных сооружений позволило получить новые интересные данные, раскрывающие специфические особенности сформировавшейся в них непривычной для человека электромагнитной среды, и в первую очередь, снижение геомагнитного поля, естественных переменных ЭМП, нарушение их пространственной ориентации, исключение воздействия на организм человека естественного освещения, ультрафиолетовой радиации и др. Полученные данные о степени ослабления геомагнитных

полей на других объектах и установках свидетельствуют о том, что гипогеомагнитные условия могут создаваться не только в специализированных экранированных сооружениях. Показано, что в подземных сооружениях метрополитена уровни естественных геомагнитных полей могут быть снижены в 2...5 раз, в жилых зданиях, выполненными из железобетонных конструкций – в 1,3...1,5 раза, на Останкинской телебашне в служебных помещениях – в 1,5...2,3 раза, а в кабинах скоростных лифтов – в 15...19 раз, в кабинах буровых установок и экскаваторов – в 1,8...8,5 раз, в салонах



Рис. 1.2. ЭМП – абиотический фактор окружающей среды

легковых автомобилей – в 1,5...3 раза и т. д. Человек попадает в гипогеомагнитные условия и при осуществлении космических полетов, в самолетах, в служебных помещениях и каютах речных и морских судов, на подводных лодках и других военно-технических средствах и объектах, в банковских хранилищах и т.д. Добавим, что работа на перечисленных объектах сопровождается гипогеоэлектрическими условиями, которые, характеризуются отсутствием естественного электрического поля Земли. Эти условия менее опасны, однако тоже могут привести к тяжелым последствиям.

В связи с этим, обратим особое внимание на существующую глубоко ошибочную точку зрения на возможность защиты населения от ЭМП искусственного происхождения экранированием жилых помещений и зданий. В рекомендациях по защите населения от ЭМП часто можно видеть предложения по установке на окна решеток и металлизированного стекла, обо-

рудование высокочастотного заземления всего здания и т.д. Все это приводит не только к экранированию от ЭМП искусственного происхождения, но и создает худшую гипогеоэлектромагнитную обстановку со всеми вытекающими последствиями.

В связи с этим вводится понятие ослабления интенсивности геомагнитного поля. В соответствии с проектом нормативного документа «Временные допустимые уровни (ВДУ) ослабления интенсивности геомагнитного поля на рабочих местах» ослабление интенсивности не должно быть более, чем в 2 раза по сравнению с его интенсивностью на открытом пространстве на прилегающей к исследуемому месту территории [8].

Чрезмерное насыщение окружающей среды электромагнитным загрязнением тоже может привести к стрессовому состоянию живых организмов. Превышение предела устойчивости по ЭМП со стороны больших интенсивностей (предел устойчивости 2 на рис. 1.2) ведет к смерти организма. Длительное время под пределом (порогом) устойчивости в области больших интенсивностей понимали тепловой порог. Интервал интенсивностей ЭМП, включающий оптимальные условия и зоны усиливающегося стресса, называют диапазоном устойчивости, в котором еще возможно существование организмов.

ЭМП могут вызывать биологические эффекты, которые не всегда, приводят к неблагоприятному влиянию на здоровье. Биологический эффект имеет место, если под действием ЭМП в биологической системе происходят какие-либо заметные или выявляемые физиологические изменения. Неблагоприятное влияние на здоровье имеет место, если биологический эффект выходит за пределы нормы и не может быть компенсирован организмом, приводя, таким образом, к развитию пагубных для здоровья последствий. Некоторые биологические эффекты могут быть безобидными, как, например, реакция организма на усиление кожного кровотока при слабом нагревании под действием ЭМП. Некоторые эффекты могут быть положительными, например, чувство теплоты в холодных условиях, или даже приводить к благоприятным последствиям для здоровья, например, выработка в организме под действием солнечных лучей витамина Д. Однако выявлен ряд биологических эффектов, которые приводят к отрицательным последствиям для здоровья.

Когда электромагнитные волны проходят через одну среду к другой, они могут отражаться, преломляться, передаваться или поглощаться в зависимости от электрических параметров сред, частоты поля и угла падения. Поглощенная энергия может превращаться в другие виды энергии и стать причиной вмешательства в функционирование биологических систем. Большая часть энергии превращается в тепло. В среде, характеризующейся большим поглощением электромагнитной энергии (потерями), при

значительных уровнях падающих электромагнитных волн возможны различные физико-химические процессы, вплоть до обугливания, плавления и испарения вещества. Если эта среда – живой организм, то ему грозят опасные последствия и даже гибель. Однако не все биологические эффекты, возникающие под действием ЭМП, могут быть объяснены с точки зрения поглощенной энергии.

Изменяющиеся во времени внешние электрические и магнитные поля наводят электрическое поле и соответствующие электрические токи в биологических системах, подверженных воздействию этих полей. Интенсивность и пространственное распределение наведенных токов и полей зависят как от параметров воздействующего поля, так и от характеристик подверженных воздействию биологических систем. Электрические свойства биологических систем различаются для различных типов тканей и определяются комплексной диэлектрической проницаемостью, электрической проводимостью и тангенсом угла диэлектрических потерь (табл. 1.3). Биологические характеристики и эффекты, относящиеся к воздействию электромагнитных полей, обычно зависят от силы наведенных токов и уровней полей. Наведенные поля могут оказывать влияние на нервную ткань, а также могут приводить к изменениям в клетках тканей и субклеточных структурах, что было выявлено на микроскопическом уровне.

Таблица 1.3

Электрические характеристики тканей с низким содержанием воды для млекопитающих и человека при 37°C

| Частота | Жировая ткань | | | Костная ткань | | |
|---------|-------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| | ϵ | σ , См/м | $\text{tg } \delta$ | ϵ | σ , См/м | $\text{tg } \delta$ |
| 100 Гц | $1,5 \cdot 10^5$ | 0,03 | 33 | 3800 ± 2000 | $0,023 \pm 0,003$ | 1090 |
| 1 кГц | $3 \dots 5 \cdot 10^4$ | 0,03...0,2 | 10...100 | 1000 ± 500 | $0,023 \pm 0,003$ | 414 |
| 10 кГц | $1 \dots 20 \cdot 10^3$ | 0,03...0,2 | 2,5...300 | 640 ± 240 | $0,013 \pm 0,003$ | 37 |
| 100 кГц | $2 \cdot 10^2$ | 0,2 | 150 | 280 ± 30 | $0,024 \pm 0,003$ | 15 |
| 1 МГц | $1 \cdot 10^2$ | 0,2 | 30 | 87 ± 13 | $0,027 \pm 0,003$ | 6 |
| 10 МГц | 40 | 0,2 | 7,5 | 37 ± 5 | $0,024 \pm 0,004$ | 1,2 |
| 100 МГц | $4,5 \dots 22$ | 0,02...0,2 | 0,7...1,7 | 23 ± 5 | $0,057 \pm 0,018$ | 0,4 |
| 1 ГГц | $4,3 \dots 16$ | 0,03...0,3 | 0,03...0,2 | 8 | 0,05 | 0,1 |
| 10 ГГц | $4 \dots 7$ | - | | 7,5 | 0,26 | 0,2 |
| 100 ГГц | $3,5 \dots 4,0$ | 0,3...0,4 | 0,014...0,16 | 8 | 0,5...0,7 | 0,1 |

В радиочастотном диапазоне для оценки воздействия используется две различные, но взаимосвязанные величины. На более низких частотах (ниже приблизительно 100 кГц) биологические эффекты обычно оцениваются по

плотности тока в тканях. Этот параметр является наиболее часто используемым, как дозиметрическая величина. На более высоких частотах многие эффекты взаимодействия определяются по энергии рассеяния на единицу массы.

Энергия ЭМП радиочастот взаимодействуют с человеком и другими живыми системами прямым и косвенным путями. Главным прямым механизмом взаимодействия является воздействие токов, наводимых в тканях организмов. Величина и характер воздействия зависят от частоты и интенсивности ЭМП, а также параметров тканей. Для частот ниже 100 кГц наблюдается увеличение чувствительности нервных тканей к наведенным токам. Пороговые значения плотности токов стимуляции нервных и мышечных тканей зависят от частоты и лежат в пределах от 0,1...1 А/м² на частоте 300 Гц до 10...100 А/м² на частоте 100 кГц. Выше 100 кГц нервные ткани становятся менее чувствительными к прямой стимуляции ЭМП, и основным механизмом взаимодействия становится термализация энергии.

Косвенные пути взаимодействия являются определяющими для частот ниже 100 МГц. Такие поля в отдельных ситуациях могут становиться причиной специфичного взаимодействия. Например, в случае нахождения в ЭМП различных металлических объектов на них наводятся высокочастотные напряжения. Контакт тела человека с такими объектами может стать причиной протекания местных высокочастотных токов большой плотности, способных вызвать, во-первых, удар, как следствие воздействия на периферическую нервную систему, во-вторых, ожоги. Величина тока зависит от частоты, напряженности ЭМП, размера и формы объекта, площади, через которую происходит контакт.

Взаимодействие ЭМП с биологическими объектами рассматриваются как в рамках классической электродинамики, учитывающей макроскопические свойства вещества, так и методами квантовой электродинамики, которые предполагают знание микроструктуры вещества и базируются на квантовой теории поля. На основе классической теории ЭМП изучается широкий круг вопросов, связанных с количественной оценкой поглощенной, прошедшей и отраженной энергии биологическими объектами. Эффект воздействия ЭМП на биологические объекты с точки зрения классической электродинамики зависит от количества поглощенной энергии ЭМП за определенный промежуток времени, т.е. дозы облучения. В практике электромагнитной безопасности такой подход называют дозиметрическим. Механизм взаимодействия основан на явлениях, происходящих в диэлектрическом веществе с потерями, обладающем конечными электрофизическими параметрами – диэлектрической проницаемостью ε и удельной электрической проводимостью σ .

Под действием ЭМП в вещественной среде возникает: движение свободных зарядов, смещение зарядов, связанных молекулярной структурой, изменяется ориентация осей вращения элементарных зарядов магнитных материалов.

Как особая форма существования материи, ЭМП описывается характеристическими для волновых процессов физическими величинами и параметрами. К ним относятся напряженность электрического и магнитного полей, длина волны (частота), поляризация, вид модуляции, фаза и т.д. В самом общем случае поле может представлять собой сложную структуру, т.е. иметь, например, в декартовой системе координат до трех компонент электрического и трех компонент магнитного полей. Следует помнить, что ЭМП подчиняются принципу суперпозиции, т.е. в одной точке пространства может существовать множество различных ЭМП.

Основной дозиметрической величиной ЭМП с частотой выше 300 МГц является интенсивность поля, измеряемая как плотность потока энергии в ваттах на квадратный метр Вт/м^2 (или мВт/см^2 и мкВт/см^2). Для того, чтобы поля радиочастот могли вызвать тяжелые отрицательные последствия для здоровья, например, катаракты и ожоги кожи, их плотность потока энергии должна превышать 1000 Вт/м^2 . Такие величины практически не встречаются в повседневной жизни человека, за исключением участков территорий, прилегающих к мощным радиолокационным станциям.

Величина поглощенной биологическим объектом энергии или дозы зависит как от параметров ЭМП (интенсивности, частоты, вида модуляции, структуры и т.д.), так и от характеристик, размеров, формы и положения биологического объекта относительно распространяющегося ЭМП. Кроме того, часто следует учитывать окружающую биологический объект обстановку – наличие переизлучающих конструкций, заземления, параметров подстилающих поверхностей и т.д. Конечной целью анализа уровня воздействия ЭМП является картина распределения поглощенной энергии по биологическому объекту, либо усредненные по отдельным участкам (органам) величины поглощенной энергии. В практике мировой дозиметрии введен параметр SAR (Specific Absorbed Rate) – удельная поглощенная мощность (УПМ), который представляет собой поглощенную энергию ЭМП единицей массы биологического объекта, и имеет размерность ватт на килограмм (Вт/кг) или милливольт на грамм (мВт/г). Этот параметр можно усреднять по общей массе биологического объекта, либо по его отдельным частям (органам), либо определять дифференциальное значение в виде отношения поглощенной энергии бесконечно малым элементом объема к его массе.

Рис. 1.3 иллюстрирует расчетное изменение средней УПМ для среднего человека в зависимости от частоты падающей плоской волны для трех видов поляризации поля [6]. Плотность потока энергии падающей волны составляла 10 Вт/м^2 . При E -поляризации вектор напряженности электрического поля параллелен продольной оси модели человека, при H -поляризации вектор напряженности магнитного поля параллелен продольной оси модели человека, а K -поляризация соответствует распространению волны вдоль оси модели человека.

Из анализа этих зависимостей можно сделать следующие заключения:

- средняя УПМ зависит от частоты и поляризации поля;
- максимальные значения средней УПМ наблюдаются на частотах до 1 ГГц при согласованной с моделью человека поляризации поля (E -поляризации);
- средняя УПМ при E - и K -поляризациях имеет максимумы (резонансы) на определенных частотах падающего поля.

Для того чтобы поля радиочастот могли вызвать отрицательные последствия для здоровья величина УПМ должна превышать 4 Вт/кг .

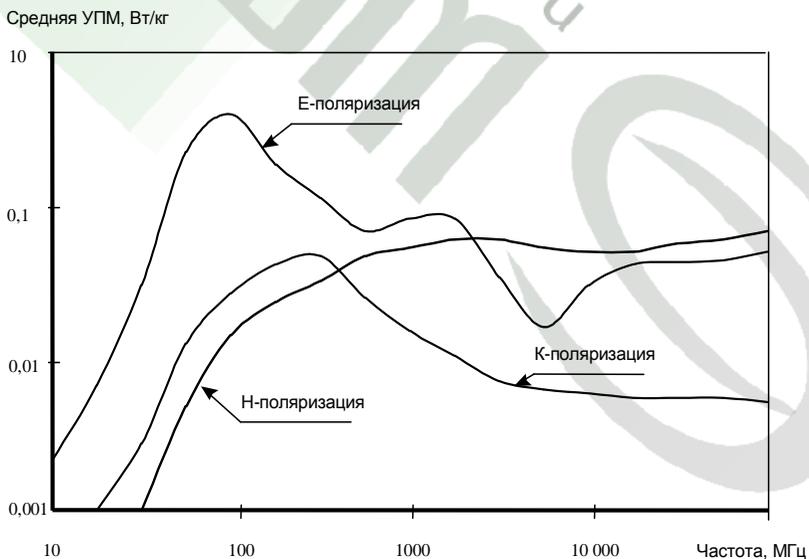


Рис. 1.3. Зависимость УПМ для среднего мужчины от частоты падающей плоской волны различной поляризации

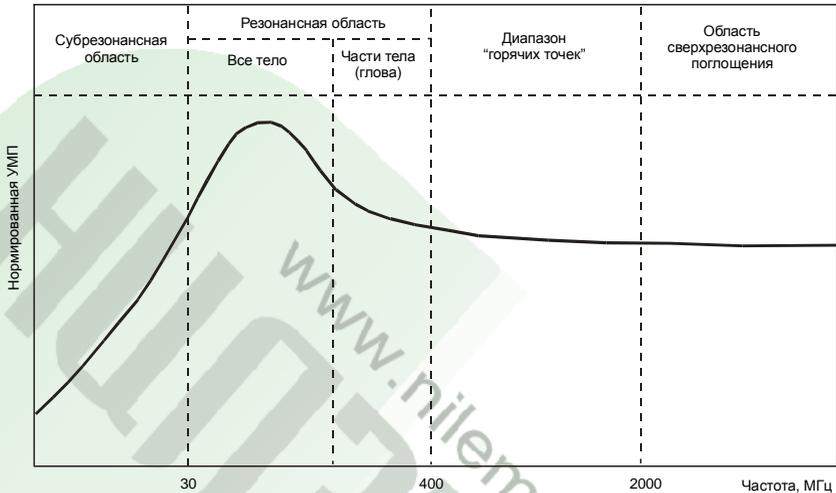


Рис. 1.4. Зависимость нормированной УМП от частоты и соответствующие характеристики поглощения в живом организме

На основе зависимостей УПМ человеческим телом радиочастотный диапазон может быть разделен на четыре области, как показано на рис. 1.4 [6]:

- субрезонансный диапазон (до 30 МГц), где преобладает поглощение энергии всей массой человеческого туловища за исключением шеи и ног, где может иметь место значительно большее поглощение, быстро увеличивающееся с частотой;

- резонансный диапазон (от 30 МГц до 300 МГц) для всего тела и даже для более высоких частот, если рассматриваются резонансы частей тела, особенно головы;

- диапазон «горячих точек» (приблизительно от 400 МГц до 2 ГГц), где может ожидать значительное локальное поглощение энергии частями (органами) человека, при этом поглощение энергии уменьшается при увеличении частоты и размеры «горячих точек» изменяются в пределах от нескольких сантиметров на частоте 915 МГц до 1 см на частоте 3 ГГц; диапазон поверхностного поглощения (более 2 ГГц), где повышение температуры является локализованным по поверхности тела.

Средняя УПМ изменяется в зависимости от биологических объектов, как показано на рис. 1.5 для человека, обезьяны и мыши [6].

Различные эффекты воздействия, выявленные медико-биологическими исследованиями, хорошо согласуются с положениями теории электроди-

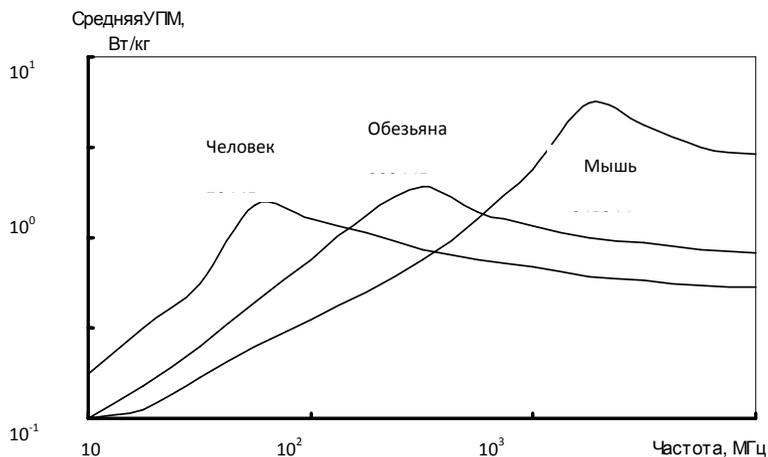


Рис. 1.5 Средняя УПМ для трех биологических объектов, подверженных воздействию ЭМП с плотностью потока энергии равной 10 ВТ/м^2 при Е-поляризации

намики и антенн. Так, например, резонансный характер зависимостей легко объясняется, а сам резонанс вычисляется, применением аналогии между биологическими объектами и вибраторными антеннами. Частотный резонанс у вибраторных антенн наблюдается в области длин волн, при которых длина вибратора кратна половине длины волны. Резонанс УПМ в области 70 МГц для человека соответствует длине волны равной 4,3 метра (половина длины волны 2,15 метра). С учетом коэффициента укорочения (1,3...1,2) для вибраторной антенны, эквивалентной по размерам росту и поперечному сечению туловища среднего человека, резонанс должен наблюдаться при длине вибратора 2,15, что с учетом коэффициента укорочения составит 1,65...1,8 метра. Эти значения соответствуют росту среднего человека. Аналогичные расчеты для мышей на частоте 2450 МГц дают резонансные размеры 4,7...5,1 сантиметра, что соответствует реальным размерам мышей.

Известный эффект увеличения УПМ в области шеи и ног человека объясняется увеличением плотности токов проводимости за счет уменьшения поперечного сечения человека, как вибратора, на этих участках. Появление на более высоких частотах «горячих точек» внутри биологических объектов связано с резонансными явлениями, аналогичными явлениям, происходящим в объемных резонаторах различных геометрических размеров.

Резонансная частота «горячих точек» легко вычисляется по геометрическим размерам резонаторов, в качестве которых выступают однородные по электрическим параметрам отдельные органы биологических объектов. Поверхностное поглощение энергии ЭМП на частотах более 3 ГГц объясняется скин-эффектом, т.е. уменьшением глубины проникновения ЭМП в среды с конечной проводимостью с увеличением частоты падающего поля (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Глубина проникновения ЭМП в различные ткани (см)

| Ткань | Частота, МГц | | | | | |
|-----------------|--------------|-------|-------|-------|------|-------|
| | 100 | 200 | 400 | 1000 | 3000 | 10000 |
| Костный мозг | 22,9 | 20,66 | 18,37 | 11,90 | 9,92 | 0,34 |
| Головной мозг | 3,55 | 4,13 | 2,07 | 1,93 | 0,47 | 0,16 |
| Хрусталик глаза | 9,42 | 4,39 | 4,23 | 2,91 | 0,50 | 0,17 |
| Кровь | 2,86 | 2,15 | 1,79 | 1,40 | 0,78 | 0,14 |
| Мышцы | 3,45 | 2,32 | 1,84 | 1,46 | - | 0,31 |
| Кожа | 3,76 | 2,78 | 2,18 | 1,64 | 0,64 | 0,18 |

Использованием экспериментальных и теоретических данных были выявлены и установлены пороговые значения по трем видам воздействующего фактора, выше которых вредные здоровью эффекты имеют повышенную вероятность, и ниже которых эти вредные эффекты, как правило, не проявляются. Основные эффекты воздействия начинаются на этих пороговых уровнях.

Одним из таких действующих факторов является УПМ, усредненная по всему телу или по частям тела. Усредненная по всему телу УПМ является широко используемым критерием при оценке вредных эффектов радиочастотного воздействия, особенно для частот выше 10 МГц. Усредненные по частям тела величины УПМ являются необходимыми для того, чтобы оценить и ограничить рассеяние энергии в малых иногда особенно чувствительных к воздействию объемах тела (например, голова) и для того, чтобы избежать перегрева частей тела, появляющегося в результате специфических условий воздействия. Примерами таких условий являются:

- руки человека при настройке радиочастотного оборудования;
- заземленный человек, подверженный воздействию радиочастотного поля в нижней части мегагерцового диапазона;
- люди, подверженные воздействию ближним полем антенн;
- люди, подверженные воздействию более высокого участка частотного диапазона, где глубина проникновения радиочастотного поля низка.

В качестве действующего фактора могут рассматриваться напряженность наведенного электрического поля или плотность тока. Радиочастотные поля могут наводить достаточно высокие плотности тока, которые стимулируют возбудимую ткань (нервную или мышечную) или создают другие вредные эффекты, особенно на частотах ниже 100 кГц. Пороговые значения для биологических эффектов обозначаются в терминах плотности тока и сильно зависят от частоты.

В некоторых случаях действующим фактором являются контактные токи между человеком и заряженным объектом. На проводящих объектах, находящихся в электрическом поле, могут наводиться высокие потенциалы. Для частот поля ниже 100 кГц контакт человека с таким объектом может привести к стимуляции электрически возбудимой ткани с болевыми ощущениями и более тяжелым эффектам (ожогам), если плотность тока достаточно высока. Для частот, лежащих между 100 кГц и 100 МГц, риск ожога от контактного тока будет преобладающим.

Количественные значения этих порогов являются необходимыми для обеспечения практического метода оценки радиочастотного воздействия. Некоторые значения этих порогов будут приведены в следующей главе.

Отметим, что в последнее время развивается информационная теория воздействия ЭМП, основанная на концепции взаимодействия внешних полей с внутренними полями организмов. Это происходит при достаточно малых уровнях облучения. Ученые обнаружили резонансный характер нетеплового воздействия, которое наблюдается на частотах, близких к собственным частотам колебаний биологических молекул и надмолекулярных систем. Воздействию ЭМП в этом случае носит не энергетический, а информационный характер. Вероятно, такое воздействие существует и при больших интенсивностях облучения, но маскируется тепловыми эффектами.

Таким образом, между полем и биологическими объектами существуют сложные причинно-следственные связи.

В заключение отметим, что ЭМП все-таки рассматриваются как болезнетворный фактор. На основании медико-биологических исследований установлены основные симптомы поражений, возникающих при воздействии ЭМП. Их совокупность можно классифицировать как специфическую болезнь, которую иногда называют «радиоволновой болезнью». Ее тяжесть находится в зависимости от интенсивности ЭМП, длительности воздействия, биологической активности различных диапазонов частот, внешних условий, а также от функционального состояния организма, его устойчивости к воздействию ЭМП, возможности адаптации.

До некоторых значений интенсивности действующего ЭМП в организме действуют пассивные механизмы защиты – реакции приспособле-

ния, адаптация, обусловленная быстро реагирующей периферической нервной системой. Адаптационные возможности ограничены, и для их развития требуется длительный эволюционный период.

При длительном и интенсивном облучении за пределами адаптационных возможностей организма вступают в действие механизмы активной защиты. Их называют компенсаторными, когда регулирование биологических процессов осуществляется центральной нервной системой. Однако эти возможности также не беспредельны, они ограничиваются истощением защитных резервов организма.

В результате действия ЭМП возможны как острые, так и хронические поражения, нарушение в системах и органах, функциональные сдвиги в деятельности нервно-психической, сердечно-сосудистой, эндокринной, кроветворной и других систем.

Обычно изменения деятельности нервной и сердечно-сосудистой систем обратимы и, как правило, уменьшаются и исчезают при снятии воздействия ЭМП и улучшении окружающих условий. Однако длительное и интенсивное воздействие ЭМП приводит к устойчивым нарушениям и заболеваниям.

СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ РАДИОЧАСТОТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

2.1. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОВЕЩАНИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Работа технических средств радиосвязи, радиовещания и телевидения охватывает практически весь радиочастотный диапазон волн. Особенности распространения радиоволн, специфика конструктивного выполнения и размещения антенно-фидерных устройств, а также принципы нормирования электромагнитных полей, как фактора, загрязняющего окружающую среду, определяют необходимость анализа санитарно-гигиенической и экологической опасности этих технических средств по частотным диапазонам.

Технические средства НЧ и СЧ диапазонов, представляющие экологическую опасность, работают в основном для целей радиовещания, которое в этих диапазонах для России имеет определяющее значение. Создание сети радиовещания в НЧ и СЧ диапазонах практически закончено, технические средства работают круглосуточно, и радиовещанием охвачена практически вся территория России. Развитие сети в основном идет по пути увеличения энергетических потенциалов, т.е. увеличиваются излучаемые мощности и эффективность передающих антенн. В этих диапазонах используются технические средства мощностью до 1000 кВт и более. Важной особенностью волн НЧ и СЧ диапазонов является их способность распространяться вдоль земной поверхности – земная волна. Основное требование, предъявляемое к излучающим системам, работающим на земной волне, – это максимальный коэффициент усиления вдоль горизонта. Естественно, что сочетание таких режимов работы с очень большими излучаемыми мощностями определяют значительную опасность электромагнитного излучения технических средств НЧ и СЧ диапазонов. Более подробные сведения об особенностях распространения радиоволн и излучающих технических средствах НЧ и СЧ диапазонов содержатся в четвертой главе.

Технические средства ВЧ диапазона используются как для радиовещания, так и для радиосвязи на большие расстояния. При этом тенденция увеличения энергетических потенциалов технических средств проявляется наиболее устойчиво. Если ранее мощность передатчиков не превышала 200...250 кВт, то позднее был разработан и внедрен передатчик с мощностью до 500 кВт. В этом диапазоне волн широко используется более 100 типоразмеров антенн, среди которых есть антенны и антенные системы с

очень высокой эффективностью (узкие диаграммы направленности, высокие значения коэффициента усиления). Основным видом распространения волн ВЧ диапазона является распространение путем отражения от ионосферы (ионосферные или пространственные волны). Земная волна тоже присутствует, но только вблизи излучающей системы, так как она в процессе распространения сильно поглощается в полупроводящей почве. Более подробные сведения об особенностях распространения радиоволн и излучающих технических средствах ВЧ диапазона содержатся в пятой главе.

Для устойчивой работы радиолиний ВЧ диапазона диаграмма направленности в вертикальной плоскости передающей антенны должна иметь эффективное излучение в секторе углов возвышения, соответствующем сектору наиболее вероятных углов прихода волны в точку приема на линиях радиосвязи и для обслуживаемой территории на линиях радиовещания. Во многих случаях нижняя граница сектора углов возвышения – $2...3^\circ$, верхняя – 20° . Практика электромагнитной экспертизы показывает, что экологическую опасность представляют как пространственные, так и земные волны. Причем пространственные волны определяют ограничения на высоты объектов, в которых регламентируется уровень поля, а земные – границы санитарно-защитных зон.

В отрасли связи технические средства ВЧ диапазона объединяются в комплексы, режимы работы отдельных технических средств изменяются в течение суток и по сезонам. Это приводит к постоянному изменению электромагнитной обстановки и, как следствие, к сложности электромагнитного мониторинга.

Исторически сложилось так, что комплексы технических средств НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов размещались обычно за пределами селитебной территории. Однако бурное развитие городов и населенных пунктов, а также поселков и городков проживания производственного персонала этих комплексов, в ряде случаев, привело к нарушению экологической обстановки в местах пребывания людей по фактору загрязнения электромагнитным полем.

Специфика размещения и режимов работы определяет и технические средства телевидения и ЧМ радиовещания, как источники загрязнения крупных населенных пунктов электромагнитным полем. Перечислим факторы, определяющие экологическую опасность электромагнитного поля технических средств телевидения и ЧМ радиовещания:

- размещение на территории населенных пунктов;
- одновременная работа нескольких телевизионных и радиовещательных программ;
- размещение антенн на высоких опорах;

- ориентация излучения антенн на зону обслуживания, в том числе и на прилегающую территорию;
- сравнительно высокие излучаемые мощности каждого технического средства – от нескольких киловатт до 50 кВт;
- работа в диапазонах ОВЧ и УВЧ, где выявлена наибольшая биологическая активность электромагнитных полей.

Распределительная передающая телевизионная сеть России состоит из 12 тысяч передатчиков мощностью от 1 Вт до 50 кВт, а сеть радиовещания содержит около 1700 радиопередатчиков различных диапазонов мощностью от десятков ватт до 2 МВт. Суммарная мощность только радиовещательных передатчиков, работающих на внутреннее вещание в полосе частот 0,03...300 МГц, составляет 113 МВт, в результате чего около 96% населения России охвачено радиовещанием [73]. Более подробные сведения об особенностях распространения радиоволн и излучающих технических средствах ОВЧ и УВЧ диапазонов содержатся в шестой главе.

При решении проблем электромагнитной экологии для технических средств радиосвязи, радиовещания и телевидения необходимо обеспечить комплексное исследование проблемы с учетом всех важнейших взаимосвязей. Нетрудно проследить эти взаимосвязи на отдельных проблемах электромагнитной экологии. Так, например, нормирование, измерение и защита от электромагнитных полей технических средств можно проводить только вместе с анализом структуры этих полей в зоне взаимодействия с биологическими объектами. В свою очередь, нормирование определяет необходимость и степень защиты, а также требования к измерительной аппаратуре. Анализ структуры полей возможен сочетанием теоретических и экспериментальных методов исследований.

Комплекс решенных проблем электромагнитной экологии составляет систему защиты окружающей среды от электромагнитных полей (рис. 2.1). Основные элементы системы – нормирование ЭМП, расчетное прогнозирование электромагнитной обстановки, инструментальный контроль и защита от ЭМП [9].

В гигиенической практике принято, что нормирование ЭМП осуществляется, во-первых, в зависимости от частотного диапазона. При этом предельно допустимый уровень ЭМП может быть постоянным на каком либо участке диапазона частот, а может быть частотно зависимым, что особенно часто наблюдается в зарубежных стандартах. Во-вторых, предельно допустимые уровни часто привязываются к видам технических средств (радиотехнические объекты, телевидение, радиолокационные станции, видеодисплейные терминалы и т.д.). В-третьих, в нормативных документах России выделяют различные контингенты облучаемых лиц – население, производственный персонал, пользователи. Для каждого контингента характерны свои особенности условий облучения и это, естест-

венно, учитывается при нормировании. В зарубежных стандартах аналогом такого подхода является выделение контролируемых и неконтролируемых условий облучения.

Прогнозирование ЭМП вблизи излучающих объектов может быть выполнено тремя различными методами: моделирования, аналогий и экстраполяции, эвристического прогнозирования.

Метод моделирования является основным при проведении санитарной электромагнитной экспертизы излучающих объектов. Применение этого метода заложено в основу составления санитарного паспорта излучающего объекта, в котором в обязательном порядке должны быть материалы расчетов ЭМП и санитарных зон. Математические модели расчетного прогнозирования закладываются в нормативные методические документы.

Метод аналогий и экстраполяции может применяться для типовых или похожих друг на друга объектов. Такими объектами могут быть, например, базовые станции сотовой радиосвязи, радиолокационные станции, отдельные

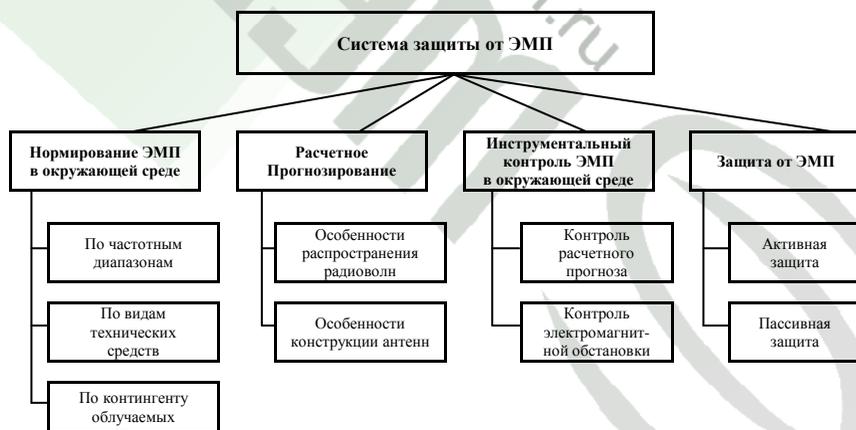


Рис. 2.1. Структура системы защиты окружающей среды и человека от ЭМП

радиостанции и т. п. При одинаковом или подобном наборе технических средств и примерно одинаковых условиях размещения об электромагнитной обстановке нового объекта можно судить по ее анализу на ранее обследованных объектах.

Метод эвристического прогнозирования (метод экспертных оценок) может использоваться на этапах предварительного размещения излучающих объектов, для комплексной оценки состояния окружающей среды, в случаях, когда другие методы неприменимы (например, не разработаны

модели) или нужна оперативная информация. В основе метода лежит система получения и соответствующей обработки мнений высококвалифицированных специалистов (экспертов). Прогнозные экспертные оценки основаны на мобилизации профессионального опыта и интуиции.

Расчетное прогнозирование является весьма сложной задачей. Всегда встает вопрос о точности расчетов ЭМП, которая определяется степенью детализации, как самих излучающих элементов (антенн), так и окружающей обстановки. Выбор методов расчета определяется, с одной стороны, необходимой точностью прогнозирования, с другой стороны, сложностью электродинамических моделей. Строгие решения соответствующих электродинамических задач должны приводить к реальным моделям излучающих объектов. Методы должны быть не только принципиально реализуемы, но и реализуемы с точки зрения использования в гигиенической практике электромагнитного прогнозирования, с точки зрения использования доступного парка вычислительной техники. Существует позиция, и авторы ее разделяют, что электромагнитным прогнозированием должны заниматься подготовленные специалисты, знакомые с теорией антенн, электродинамикой, распространением радиоволн, системными вопросами телекоммуникаций и т.д. В этом случае методы расчета ЭМП в окружающей среде могут быть достаточно сложными, а, следовательно, и более точными. Формализация процесса электромагнитного прогнозирования хотя и возможна, но требует применения высокопроизводительной вычислительной техники и больших финансовых затрат.

Следует осторожно относиться и к инструментальному исследованию электромагнитной обстановки. Если поставлена цель сравнения результатов расчета и измерений ЭМП, то измерения следует проводить в условиях, приближенных к моделям, заложенным в основу методик расчета. Так, например, в основе практически всех методик расчета лежит предположение о гладкой однородной подстилающей поверхности земли, о выполнении условий прямой видимости между точкой наблюдения и излучающими элементами. Измерения в местах затенения или вблизи различных переизлучающих конструкций могут привести к непредсказуемым результатам. С другой стороны, контролировать электромагнитную обстановку для целей санитарно-гигиенической экспертизы необходимо в любых условиях, но в этом случае сравнивать результаты измерений и расчетов следует с определенной осторожностью, ибо очень легко прийти к некорректным выводам.

Практика контроля показывает, что инструментальная оценка электромагнитной обстановки вблизи комплексов технических средств при смешанном воздействии ЭМП порой просто невозможна. Причин тому много: сложность критериев оценки безопасности; необходимость проведения измерений на высотах зданий перспективной застройки; недоступ-

ность отдельных территорий для проведения измерений; специфика работы технических средств, заключающаяся в периодической смене рабочих частот, антенн, направлений излучения; непрогнозируемые, изменяющиеся по сезонам и суткам окружающие условия; отсутствие хорошей измерительной аппаратуры, способной работать в полевых условиях и часто в условиях сложной электромагнитной обстановки и многое другое.

Конечной целью системы защиты окружающей среды и человека от ЭМП является разработка и внедрение различных защитных мероприятий.

Мероприятия по защите от ЭМП определяются общими методами защиты, разработанными в теории безопасности жизнедеятельности.

Первый метод (рис. 2.2) основан на пространственном или временном разделении *ноксосферы* (пространства, в котором действуют те или иные опасные факторы) и *гомосферы* (пространства, в котором находится человек).

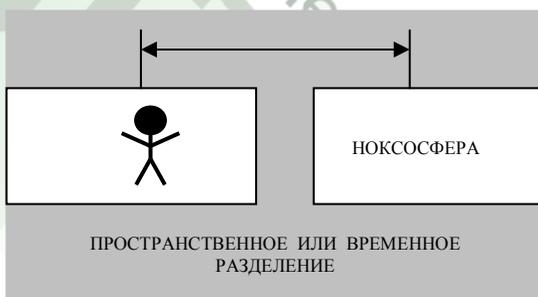


Рис. 2.2. Пространственное или временное разделение ноксосферы и гомосферы

Этому соответствует защита расстоянием для населения (организация при необходимости санитарно-защитных зон вокруг излучающих объектов) или контроль времени нахождения производственного персонала в ЭМП с целью не допустить превышения предельно допустимых доз облучения.

Второй метод состоит в обеспечении безопасного состояния среды, окружающей человека (рис. 2.3).

Этот способ реализуется при защите населения от ЭМП, например, использованием в качестве экранирующих препятствий лесозащитных полос, искусственных сооружений и естественных природных рельефов. Для производственного персонала этот способ реализуется экранированием рабочих мест и помещений, либо экранированием источников излучения.

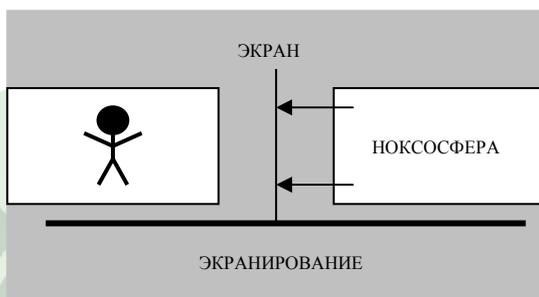


Рис. 2.3. Экранирование гомосферы от вредных факторов ноक्सосферы

И третий метод защиты от опасностей предусматривает средства, обеспечивающие адаптацию человека в производственной среде с помощью средства индивидуальной защиты (рис.2.4).



Рис. 2.4. Адаптация человека в производственной среде с помощью средства индивидуальной защиты

Мероприятия по защите от ЭМП традиционно подразделяют на активные и пассивные меры защиты. Активная защита предполагает воздействие на сам источник излучения и обеспечивается мероприятиями по снижению излучаемой мощности, изменению характеристик излучения антенных систем, изменению режимов работы технических средств и, как крайняя мера, вынос излучающего объекта с данной территории. Пассивная защита заключается в проведении организационных или технических мероприятий на прилегающих к излучающему объекту территориях, или на конкретных объектах, подверженных воздействию ЭМП.

Рассмотрим основные принципы, закладываемые в структурные элементы системы защиты.

2.2. НОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

2.2.1 Принципы нормирования электромагнитных полей в окружающей среде

Нормирование с точки зрения экологических проблем – это установление предельно допустимых уровней действующего фактора. По определению предельно допустимый уровень (ПДУ) – это уровень вредного фактора, который не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований, в отдаленные сроки жизни настоящего и последующего поколений. Предельно допустимый уровень устанавливается по биологически активному параметру действующего фактора.

Электромагнитное поле, как особая форма существования материи, характеризуется целым рядом параметров – частотой, напряженностью электрического и магнитного полей, фазой, поляризацией, видом модуляции, структурой и др. Биологическая активность почти всех перечисленных параметров уже доказана и степень их воздействия учитывается в разрабатываемых нормативных документах.

При оценке воздействия ЭМП на организм человека длительное время наблюдалось столкновение двух точек зрения.

Первая из них принадлежала врачам гигиенистам, которые, заботясь о здоровье человека, старались дать абсолютно нереальные предельно допустимые уровни, иногда не задумываясь об экономических и технических возможностях их реализации. Так, например, в 1968 году предельно допустимый уровень напряженности электрического поля в ВЧ диапазоне был установлен [10] на уровне 0,2 В/м, против 10 В/м в настоящее время. Применить такие нормативы к реальным передающим техническим средствам значило бы закрыть большую часть из них. Значительно жестче настоящих были предельно допустимые уровни, установленные в 1978 году (НЧ диапазон – 20 В/м, СЧ диапазон – 10 В/м, ВЧ диапазон – 4 В/м, ОВЧ диапазон – 2 В/м) [11].

Вторая точка зрения отстаивалась инженерами, эксплуатирующими технические средства, руководителями радиотехнических объектов и ведомств, которые вопреки мнению гигиенистов готовы были не иметь вообще никаких нормативов и проповедовали абсолютную безвредность всего и вся.

Разумная альтернатива реализуется научно-обоснованными нормативами.

В 1953 году американский ученый Г. Шван предложил считать предельно допустимой для человека плотность потока энергии, равную 100

мВт/см². Такой уровень повышает температуру облучаемого объекта или участка не более, чем на 1°С, и вызывает эффекты сопоставимые с происходящими в организме при естественных физиологических процессах. Эта регламентация давала 10-кратный запас по отношению к условиям, вызывающим тепловое поражение. В 1956 году этот предельно допустимый уровень для диапазона частот от 10 МГц до 100 ГГц был введен Американским национальным институтом стандартов как для производственного персонала, так и для населения. Этот же уровень был позже принят в качестве предельно допустимого многими западными странами

Проблема нормирования очень сложна. Специалисты сталкиваются с различными аспектами этой проблемы.

Во-первых, это **медико-биологические** аспекты, которые включают необходимость проведения гигиенических, клинико-физиологических и экспериментальных исследований.

Гигиенические исследования заключаются в обнаружении ЭМП, обследовании рабочих мест, уровней и режимов облучения, выявлении биологически активных параметров и пр.

Клинико-физиологические исследования включают обследование людей, подверженных облучению, анализ статистики и видов заболеваний, сравнение с необлученными категориями людей и т. д.

Экспериментальные исследования заключаются в проведении исследований на реальных биологических объектах и предполагают весь комплекс научно-исследовательских работ, связанных с облучением животных, наблюдением за ними, сравнением с контрольными группами и т. д. Для этого создают специальные облучающие системы, где помещают подопытных животных, в качестве которых чаще всего используют белых мышей и крыс. Виды животных выбирают, с одной стороны, исходя из габаритных возможностей облучающих систем, а, с другой стороны, необходимо выполнить требование достоверности результатов исследований, которая, кроме всего прочего, определяется минимальным количеством животных, необходимых для статистических обработок результатов исследований.

Кроме облучаемых, должна быть и контрольная группа животных, которая располагается в непосредственной близости. Условия жизнеобеспечения для всех животных (температура воздуха, влажность, давление, режим питания, прочие внешние факторы) должны быть одинаковыми. По окончании режимов облучения животных исследуют по многочисленным тестам: берут анализы, исследуют ткани и функциональные системы. Количество таких тестов достигает нескольких десятков. Это делают как с облучаемыми животными, так и с животными контрольной группы. Сравнивая результаты исследований для облучаемых животных и животных контрольной группы, делают выводы о степени влияния или не влияния

ЭМП на выбранный вид животных. Затем по принятым в медико-биологической практике методикам пересчитывают установленные для животных предельно допустимые уровни на человека.

Экспериментальные исследования на человеке, как правило, не проводятся. Это связано с тем, что в экспериментах создаются уровни поля, которые могут навредить здоровью человека. Только в последнее время стали проводить исследования по влиянию ЭМП радиотелефонов на добровольцах. Электромагнитные условия проведения таких экспериментов практически не отличаются от условий обычного сеанса телефонного разговора.

В последнее время широкое распространение получили *фантомные исследования*. Напомним, что фантом – это модель человеческого тела или его части в натуральную величину. Фантомы выполняют из материалов, имеющих такие же электрические характеристики, как и биологические ткани. Обычно в фантомах воспроизводят всего несколько видов тканей: кожу, жировой слой, костные ткани. А внутренние органы человека воспроизводят однородным веществом с усредненными электрическими характеристиками. Чаще всего необходимые электрические характеристики фантомных материалов достигаются изменением концентрации растворов солей. По форме и размерам фантомы могут с высокой степенью точности воспроизводить тело человека или его части (рис. 2.5), а могут быть модельные фантомы. В зависимости от решаемых задач исследуемый объект может быть в качестве грубого приближения заменен цилиндром, сферой или шаром. Голова человека, например, хорошо моделируется



Рис. 2.5. Фантомы человека и головы человека для исследования влияния ЭМП

эллипсоидом (рис. 2.6). Полуэллипсоидом моделируется человек или крыса, находящиеся на проводящей поверхности (рис. 2.7). На фантомах проводятся исследования, связанные с непосредственными оперативными измерениями каких-либо воздействующих факторов или ответных реакций: напряженности поля вблизи и внутри фантома, токов в фантоме, температуры нагрева тканей от ЭМП.

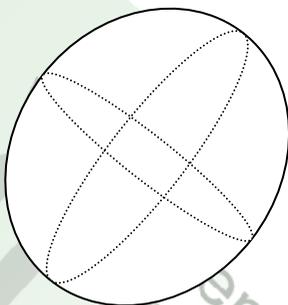


Рис. 2.6. Эллипсоидная модель головы человека

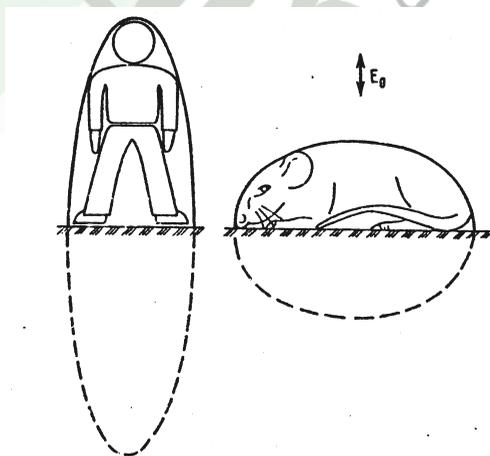


Рис. 2.7. Моделирование человека и крысы полуэллипсоидом

Бурное развитие вычислительной техники позволило создавать компьютерные фантомы тела человека и его частей и проводить математическое моделирование влияния ЭМП на человека. Первый числовой фантом человека состоял из 180 кубических ячеек разного размера

(рис. 2.8), а первый числовой фантом головы и шеи человека состоял из 16 ячеек (2.9).

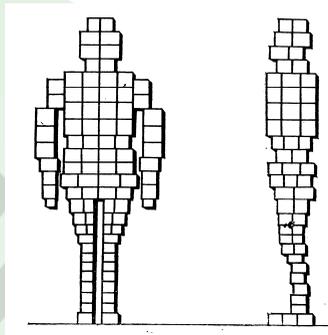


Рис. 2.8. Числовой компьютерный фантом человека, состоящий из 180 кубиков

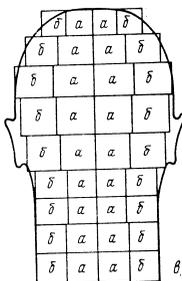


Рис. 2.9. Числовой компьютерный фантом головы человека

Уменьшение размеров ячеек до единиц миллиметров при моделировании головы человека позволило имитировать не только мозг, кровь, кожу, кости, мышечную и жировую ткань, но и хрусталик, склеру, жидкость глаза. В литературе описываются числовые модели головы, состоящие более чем из 2,5 миллионов ячеек при имитации 13 разновидностей тканей. Для каждой ячейки задаются электрические характеристики, соответствующие характеристикам моделируемого объекта. Такие возможности предоставила современная медицинская техника – компьютерные томографы, которые позволяют с высокой степенью точности изображать и

координировать внутреннее строение любого объекта, в том числе тела человека.

Компьютерное моделирование позволяет имитировать не только тело человека, но и имитировать его облучение ЭМП. При этом рассчитывается, как будет реагировать фантом на это облучение – какие потекут электрические токи внутри фантома, какие создадутся поля, как измениться температура в целом и на отдельных частях фантома, сколько энергии поглотиться в различных частях фантома. Ответы на эти вопросы и есть результаты численных медико-биологических исследований на математических моделях.

Во-вторых, это **технические** аспекты, предполагающие создание технической базы проведения экспериментальных исследований – разработку генераторного оборудования и облучающих систем, определение необходимого набора измерительной аппаратуры, создание системы жизнеобеспечения животных и т.д.

В-третьих, это **экономические** аспекты, т.е. необходимость финансирования всего комплекса работ по нормированию ЭМП.

В-четвертых, **социально-психологические** аспекты. Разработка и введение нормативов приводят к появлению в обществе различных форм электромагнитной фобии (навязчивого состояния страха). Это часто провоцируют и средства массовой информации. Вот, например, заголовки статей, посвященных электромагнитному загрязнению: газета «Известия» – «Электромагнитное загрязнение в крупных городах достигло критической черты», «Отдых на участке под высоковольтной ЛЭП может оказаться очень коротким», «От магнитных полей в квартире заболит не только голова», «Мобильные телефоны сварят ваши мозги», «Работать с Notebook на коленях – небезопасное занятие»; газета «СПИД-ИНФО» – «Останкино – рай для самоубийц»; газета «Московский комсомолец» – «Москвичей защитят от сотовой связи». Часто публикуются непроверенные, искаженные факты, будто бы основанные на авторитетных зарубежных научных исследованиях. Так, например, в газете «Известия» 4.02.98 была опубликована статья «Телебашня за окном» (автор Алексей Савин), в которой со ссылкой на исследования, проведенные под руководством Хелен Долк, в Лондонском институте гигиены и тропической медицины получены шокирующие специалистов научные данные. В статье приводятся красивые гистограммы и констатируется, что «заболеваемость различными формами лейкемии у живущих в непосредственной близости от телебашни превышает средние значения в девять раз». Это не соответствует действительности. Один из авторов настоящей книги встречался в Лондоне со специалистами группы Хелен Долк, которые поделились результатами этих исследований. Ошибочные заключения были сделаны по первой части научной статьи в «American Journal of Epidemiology» (Vol. 145, №1, January 1 1997,

стр. 1-9). Журналист не обратил внимания на вторую часть этой статьи в этом же журнале (стр. 10-17), в которой по результатам обследования 20–ти телецентров Великобритании не установлена связь между заболеваемостью лейкемией и электромагнитным полем обсуждаемого частотно-го диапазона.

В докладах Международной комиссии радиозащиты есть тезис о том, что не существует уровня облучения, который можно было бы признать абсолютно безопасным. Для жизни человека, как и для существования любого биологического объекта, существует риск, определяемый вероятностью гибели от каких-то катаклизмов, воздействий, факторов окружающей среды и т.д. Доказано, что в лучшем случае риск для человека может составлять величину не менее 10^{-7} . Технические достижения цивилизации в значительной степени увеличивают эту вероятность, доводя ее в некоторых случаях до единиц процентов. Определенный вклад в величину риска вносят и электромагнитные поля искусственного происхождения. Однако человечество не собирается отказываться от своих достижений и двигаться назад к природе. Любые нормы, стандарты и регламентации, связанные с защитой человека от опасного воздействия ЭМП, представляют собой компромисс между преимуществами, получаемыми при использовании техники, и возможным риском, связанным с этим использованием. Доказана полная несостоятельность и социальная неприемлемость идеологии абсолютной безопасности.

Восприятие риска. На решение человека о том, следует ли ему принять риск или отвергнуть его, влияет целый ряд факторов. Люди обычно воспринимают риски как ничтожные, допустимые, терпимые или недопустимые и сопоставляют их с получаемой пользой. Часто большая польза или выгода заставляют человека существенно повышать риски. Такое восприятие может зависеть от возраста, пола, уровня культуры и образования человека. Например, многие молодые люди воспринимают риск, связанный с прыжками с парашютом, как допустимый. Многие пожилые люди считают это опасным и, таким образом, воспринимают такой риск как недопустимый.

На восприятие может влиять характер риска. В [12] подчеркивается, что на восприятие риска обычно влияют следующие пары характеристик. Первая из них обычно усиливает, а вторая – уменьшает восприятие риска.

Вынужденный или добровольный риск. Это является важным фактором восприятия риска, особенно в отношении источников ЭМП. Люди, которые не пользуются мобильными телефонами, воспринимают вынужденный риск, связанный с действием относительно малых уровней ЭМП, излучаемых базовыми станциями мобильной связи, как высокий. Однако лица, добровольно пользующиеся мобильными телефонами, обычно

воспринимают риск, связанный с гораздо большими уровнями полей, как низкий.

Не подконтрольность или чувство владения ситуацией. Если люди не способны каким-либо образом повлиять, например, на строительство линий электропередач или базовых станций мобильной связи, особенно вблизи собственных домов, школ или зон отдыха, они обычно воспринимают риск, связанный с такими сооружениями, как высокий.

Знакомый или незнакомый. Знакомая ситуация или чувство понимания технологии помогает снизить уровень воспринимаемого риска. Восприятие риска усиливается, если ситуация или технология, например электромагнитное излучение, является новой, незнакомой или трудной для понимания. Восприятие риска может значительно усиливаться, если существует недостаточное научное понимание возможных медицинских последствий данной ситуации или технологии.

Чувство страха или его отсутствие. Некоторые болезни и состояния, такие как рак, тяжелые продолжительные боли или инвалидность, вызывают больший страх, чем другие. Таким образом, даже небольшая вероятность развития рака, особенно у детей, под действием ЭМП, становится объектом пристального внимания со стороны общества.

Несправедливость или справедливость. Если люди подвергаются действию ЭМП от базовых станций мобильной связи, но сами не имеют мобильных телефонов, или если они подвергаются действию электрических и магнитных полей от высоковольтных линий электропередач, которые не подают электроэнергию в их населенный пункт, они считают это несправедливым и с меньшей долей вероятности будут готовы принять любой связанный с этим риск.

Для людей, не владеющих мобильным телефоном, действие ЭМП, излучаемых базовыми станциями мобильной связи, может восприниматься как высокий риск по следующим причинам:

- люди вынуждены подвергаться действию ЭМП;
- несправедливо, что в результате строительства таких базовых станций риску воздействия ЭМП подвергается вся община, хотя выгоду от этого получает лишь небольшое число лиц, пользующихся мобильными телефонами;
- развитие таких сетей неподконтрольно желанию общественности;
- технология мобильной телефонной связи незнакомая и непонятна большинству людей;
- ощущается недостаток научной информации для точной оценки степени риска для здоровья;
- существует вероятность того, что эта технология может послужить причиной развития болезни, вызывающей страх, например, лейкемии, рака.

Риск полностью не исключается, и предельно допустимые уровни воздействия ЭМП зависят от того, насколько нам известны поражения, наносимые организму, каковы принятые при этом критерии оценки опасности, каков установленный запас прочности. В качестве критериев оценки опасности могут быть выбраны различные физиологические или медицинские показатели. Это может быть процент летальных исходов или необратимых отрицательных последствий, кратковременное снижение трудоспособности до определенного уровня, появление обратимых последствий и, наконец, первые выраженные реакции на воздействие. С учетом этого предлагалось вводить, например, допустимые (или эксплуатационные) уровни, предельно допустимые и предельно переносимые (для аварийных режимов) [74].

В отечественных нормативных документах нормирование ЭМП производится отдельно для производственного персонала и населения. Среди производственного персонала иногда выделяют контингент профессионально связанный и не связанный с производством работ в ЭМП. При этом учитывается, что население может облучаться круглосуточно, а производственный персонал может попадать в ЭМП только в течение рабочей смены на производстве – 8 часов. Кроме того, диапазон состояний организма у населения значительно шире (от ребенка до пожилого человека, от здорового человека до тяжело больного), чем у производственного персонала, который к тому же в условиях работы с ЭМП подвергается периодическим медицинским обследованиям и часто получает различные виды материальной и социальной помощи. В связи с этим ПДУ для производственного персонала в 2...3 раза выше, чем для населения.

Предельно допустимые уровни ЭМП на производстве не должны превышать на рабочих местах производственного персонала, а для населения – на селитебной территории, под которой понимается территория населенных пунктов, отведенная под жилые кварталы, общественные здания, парки, бульвары и т.п.

Вводимые таким образом предельно допустимые уровни на электромагнитное загрязнение носят санитарно-гигиенический характер, а не экологический. Многие компоненты окружающей среды оказываются более чувствительными к ЭМП, чем человек, и резко деградируют или исчезают при интенсивном воздействии. Нормирование ЭМП для человека и сведения об электромагнитном загрязнении – это важная, но все-таки односторонняя информация для оценки его воздействия. Более совершенный и желательный подход заключается в изучении реакции любых биологических компонент экосистем на воздействие любого загрязняющего фактора и разработка на этой основе шкалы оценок вредности воздействия. Такой подход реализуется в системах биоиндикации, которые по электромагнитному фактору в настоящее время не созданы.

Для населения гигиенические требования к объектам, излучающим электромагнитную энергию в окружающую среду в радиочастотном диапазоне, определяются Государственными нормативными документами [13,14].

Предельно допустимые уровни ЭМП устанавливаются в диапазоне частот до 300 МГц по напряженности электрического поля E в В/м, по напряженности магнитного поля H в А/м. Иногда в зарубежных стандартах нормируется индукция магнитного поля, которая выражается в Тл (мТл, мкТл) – 1мТл соответствует 800 А/м.

В диапазоне частот выше 300 МГц предельно допустимые уровни устанавливаются по плотности потока энергии ППЭ в Вт/м² (мВт/см² и мкВт/см²).

При нормировании ЭМП для производственного персонала принят, так называемый, дозный подход, при котором по аналогии с радиоактивным излучением нормируется предельная доза энергии, поглощаемая телом человека в электромагнитном поле. Такой подход позволяет учитывать временной фактор и оценивать опасность ситуации, при которой человек в течение рабочей смены должен работать в электромагнитных полях различных уровней и частотных диапазонов. Дозу облучения ЭМП называют энергетической экспозицией – ЭЭ (иногда энергетической нагрузкой – ЭН).

В диапазоне частот до 300 МГц энергетическая экспозиция для электрического поля ЭЭ_Е нормируется в (В/м)²·ч, а для для магнитного поля ЭЭ_Н в (А/м)²·ч. В диапазоне частот выше 300 МГц энергетическая экспозиция нормируется по плотности потока энергии ЭЭ_{ППЭ} – размерность Вт·ч/м² (мкВт·ч/см²).

При проведении электромагнитного мониторинга не следует забывать о структуре поля, которая в общем случае может быть весьма сложной и представлять собой до шести компонент напряженности электрического и магнитного полей. В отечественной и зарубежной санитарно-гигиенической практике принята энергетическая концепция учета отдельных составляющих поля. Если в данной точке пространства создается электромагнитное поле, описываемое несколькими несинфазными пространственными компонентами в декартовой E_x , E_y и E_z (или H_x , H_y и H_z) или цилиндрической E_r и E_z (или H_ϕ) системах координат (это характерно для полей вблизи антенн в виде одиночных вертикальных вибраторов, работающих в НЧ, СЧ и ВЧ диапазонах), то суммарная напряженность поля E_Σ (или H_Σ) от каждого такого технического средства определяется следующим образом:

$$E_\Sigma = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}, \quad E_\Sigma = \sqrt{E_r^2 + E_z^2};$$

$$H_{\Sigma} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}, \quad H_{\Sigma} = H_{\varphi}. \quad (2.1)$$

С критериями оценки опасности ЭМП тесно связан характер воздействия, под которым понимают совокупное загрязнение окружающей среды ЭМП и другими факторами. Характер воздействия ЭМП может быть [15]:

1. Изолированным – от одного источника ЭМП. В этом случае оценка опасности электромагнитной обстановки производится непосредственно по предельно допустимому уровню ЭМП, определяемому по виду и рабочей частоте технических средств.

2. Сочетанным – от двух и более источников ЭМП, имеющих одинаковую величину предельно допустимого уровня одного и того же нормируемого параметра.

3. Смешанным – от двух и более источников ЭМП, имеющих различные величины предельно допустимых уровней одного или различных нормируемых параметров.

4. Комбинированным – в случае воздействия ЭМП и какого-либо другого неблагоприятного загрязняющего фактора (материального или энергетического).

Сочетанное, смешанное и комбинированное воздействие ЭМП предполагает введение критериев и алгоритмов, по которым производится оценка состояния окружающей среды.

Воздействие может быть постоянным и прерывистым. Типичным случаем прерывистого воздействия является облучение от сканирующих антенн радиолокационных станций. Воздействию может подвергаться все тело человека (общее облучение) или части тела (локальное облучение), например, в случае облучения ЭМП радиотелефона.

Подводя итог, отметим, что нормирование ЭМП осуществляется в зависимости от частоты ЭМП (с увеличением частоты имеется четкая тенденция уменьшения предельно допустимого уровня, т. е. нормы становятся строже), от категории облучаемых людей (население, производственный персонал, пользователи), от вида технических средств (телевидение, сотовая связь, радиолокаторы, ЛЭП, печи СВЧ, видеодисплейные терминалы и т. д.).

2.2.2. Гигиеническое нормирование электромагнитных полей

В табл. 2.1 приведены предельно допустимые уровни электромагнитного поля для различных частотных диапазонов. Эти предельно допустимые уровни относятся к радиотехническим объектам, работающим в режиме непрерывного излучения (кроме объектов радио и телевизионного вещания в ОВЧ-диапазоне и технических средств сотовой подвижной связи) [13].

Следует обратить внимание, что с увеличением частоты предельно допустимые уровни становятся строже, и самый жесткий норматив принят в диапазоне 30...300 МГц. Напомним, что этот диапазон частот является резонансным для человека (см. рис.1.4). Предельно допустимый уровень, равный 10 мкВт/см^2 , соответствует в поле плоской волны напряженности поля $6,14 \text{ В/м}$.

Прежде, чем привести предельно допустимые уровни электромагнитного поля для технических средств телевидения, напомним частотный план телевизионного вещания.

Метровые каналы:

- I диапазон (1 и 2 каналы) – 48,5...66 МГц;
- II диапазон (3...5 каналы) – 76...100 МГц;
- III диапазон (6...12 каналы) – 174...230 МГц.

Дециметровые каналы:

- IV диапазон (21...34 каналы) – 470...582 МГц;
- V диапазон (34...60 каналы) – 582...790 МГц.

Таблица 2.1

**Предельно допустимые уровни электромагнитных полей
(круглосуточное непрерывное излучение)**

| Номер диапазона | Вид радиоволн | Диапазон частот | Диапазон длин волн | ПДУ |
|-----------------|--|-----------------|--------------------|------------------------|
| 5 | километровые волны (низкие частоты) | 30...300 кГц | 10...1 км | 25 В/м |
| 6 | гектометровые волны (средние частоты) | 0,3...3 МГц | 1...0,1 км | 15 В/м |
| 7 | декаметровые волны (высокие частоты) | 3...30 МГц | 100...10 м | 10 В/ м |
| 8 | метровые волны (очень высокие частоты) | 30...300 МГц | 10...1 м | 3 В/м |
| 9 | дециметровые волны (ультравысокие частоты) | 300...3000 МГц | 1...0,1 м | 10 мкВт/см^2 |
| 10 | сантиметровые волны (сверхвысокие частоты) | 3...30 ГГц | 10...1 см | 10 мкВт/см^2 |
| 11 | миллиметровые волны (крайне высокие частоты) | 30...300 ГГц | 10...1 мм | 10 мкВт/см^2 |

ПДУ по напряженности поля приведены в эффективном значении, а по плотности потока энергии – в среднем значении. Диапазоны, приведенные в таблице, исключают нижний и включают верхний предел частоты.

В диапазонах 66...74 МГц и 100...108 МГц осуществляется ОВЧ ЧМ радиовещание, технические средства которых часто размещаются совместно с техническими средствами телевидения.

Предельно допустимые значения напряженности ЭМП в диапазоне 48,4...300 МГц в зоне размещения радиотелевизионных передающих станций зависят от частоты и определяются по формуле [16]:

$$E_{\text{ПДУ}} = 21 \cdot f^{-0.37}, \quad (2.2)$$

где $E_{\text{ПДУ}}$ – предельно допустимое значение напряженности электромагнитного поля в В/м; f – нормируемая частота электромагнитного поля в МГц.

В табл. 2.2 приведены предельно допустимые значения напряженности поля для метровых телевизионных каналов.

Нормирование ЭМП, создаваемого техническими средствами ОВЧ ЧМ радиовещания, осуществляется аналогично электромагнитным полям от телевизионных технических средств, т.е. предельно допустимые уровни частотнозависимы. Предельно допустимые уровни полей, создаваемых телевизионными станциями УВЧ диапазона (более 300 МГц), определяются по табл. 2.1 [13].

Таблица 2.2

Предельно допустимые уровни электромагнитных полей на частотах метровых телевизионных каналов

| Телевизионный канал | Средняя частота канала, МГц | $E_{\text{ПДУ}}$, В/м |
|---------------------|-----------------------------|------------------------|
| 1 | 52,5 | 4,85 |
| 2 | 62,0 | 4,56 |
| 3 | 80,0 | 4,15 |
| 4 | 88,0 | 4,01 |
| 5 | 96,0 | 3,88 |
| 6 | 178,0 | 3,09 |
| 7 | 186,0 | 3,04 |
| 8 | 194,0 | 2,99 |
| 9 | 202,0 | 2,95 |
| 10 | 210,0 | 2,90 |
| 11 | 218,0 | 2,86 |
| 12 | 226,0 | 2,83 |

Такой порядок нормирования ЭМП радиотелевизионных передающих станций разрабатывался в середине 80-х годов. Не обсуждая здесь сам предельно-допустимый уровень, который, кстати, в 10...20 раз ниже рекомендованных стандартами других стран, отметим, что введение частотнозависимых предельно допустимых уровней для технических средств одного типа в значительной степени усложняет инструментальный электромагнитный мониторинг окружающей среды. Принятие решения о степени опасности электромагнитного загрязнения связывается, во-первых, с применением только селективных приборов и, во-вторых, с последующей сложной обработкой результатов по санитарно-гигиеническим критериям.

В табл. 2.3 приведены предельно допустимые значения напряженности поля, создаваемой системами сотовой связи [14].

Временные допустимые уровни (ВДУ) воздействия электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой связи

| № п/п | Категория облучения | Предельно допустимые уровни |
|-------|---|---|
| 1. | Профессиональное воздействие | $ППЭ_{ПДУ} = 200/T$ $200 \text{ мкВт}\cdot\text{ч}/\text{см}^2$ – ПДУ энергетической нагрузки за рабочую смену; $ППЭ_{ПДУ} = 1000 \text{ мкВт}/\text{см}^2$ – это максимально допустимое значение |
| 2. | Непрофессиональное воздействие: - население от базовых станций; - облучение пользователей радиотелефонов. | $ППЭ_{ПДУ} = 10 \text{ мкВт}/\text{см}^2$ $ППЭ_{ПДУ} = 100 \text{ мкВт}/\text{см}^2$ |

Обратим внимание, что здесь выделен еще один контингент облучаемых людей – это пользователи сотовых радиотелефонов, для которых в десять раз увеличен предельно допустимый уровень в сравнении с населением.

В табл. 2.4 приведена предельно допустимая энергетическая экспозиция как нормируемая величина дозы электромагнитного излучения для производственного персонала [13].

Таблица 2.4

Предельно допустимые значения энергетической экспозиции

| Диапазон частот | Предельно допустимая энергетическая экспозиция |
|-----------------|--|
| 0,03...3 МГц | $20\,000 \text{ (В/м)}^2\cdot\text{ч}, 200 \text{ (А/м)}^2\cdot\text{ч}$ |
| 3...30 МГц* | $7\,000 \text{ (В/м)}^2\cdot\text{ч}$ |
| 30...50 МГц | $800 \text{ (В/м)}^2\cdot\text{ч}, 0,72 \text{ (А/м)}^2\cdot\text{ч}$ |
| 50...300 МГц * | $800 \text{ (В/м)}^2\cdot\text{ч}$ |
| 0,3...300 ГГц | $200 \text{ мкВт}\cdot\text{ч}/\text{см}^2$ |

* – норматив по магнитной составляющей не разработан

Зная энергетическую экспозицию, можно, во-первых, определять предельно допустимые уровни напряженности электрического $E_{ПДУ}$, магнитного $H_{ПДУ}$ полей и плотность потока энергии $ППЭ_{ПДУ}$ для заданного времени облучения по формулам:

$$E_{ПДУ} = \sqrt{\frac{\mathcal{E}\mathcal{E}_E}{T}}, \quad H_{ПДУ} = \sqrt{\frac{\mathcal{E}\mathcal{E}_H}{T}}, \quad ППЭ_{ПДУ} = \frac{\mathcal{E}\mathcal{E}_{ППЭ}}{T}. \quad (2.3)$$

Во-вторых, можно определять время нахождения производственного персонала T в поле заданной интенсивности E , H или $ППЭ$:

$$T = \frac{\mathcal{E}\mathcal{E}_E}{E^2}, \quad T = \frac{\mathcal{E}\mathcal{E}_H}{H^2}, \quad T = \frac{\mathcal{E}\mathcal{E}_{ППЭ}}{ППЭ}. \quad (2.4)$$

Гигиенические нормативы с частотно зависимыми предельно допустимыми уровнями составляющих напряженности поля или плотности потока мощности, отражающие допустимую степень воздействия электромагнитного поля, существенно отличаются в различных странах. В табл. 2.5 в качестве сравнения приведены предельно допустимые уровни, действующие в ряде стран и установленные международными рекомендациями.

Признается [8], что зарубежные стандарты (в основе большинства лежат нормативы США) имеют достаточно четкое обоснование. Для частот более 10 МГц они построены на концепции удельного поглощения мощности – УПМ. Напомним, что в качестве порога возможных биологических эффектов рассматривается величина УПМ равная 0,4 Вт/кг. В стандартах США, INIRC/IRPA, CENELEC и ряда других принято, что УПМ не должна превышать 4 Вт/кг (усредненная величина на все тело) для производственного персонала или контролируемых условий и 0,08 Вт/кг для населения или неконтролируемых условий. Этим реализуется единый подход к гигиеническому нормированию ЭМП для производственного персонала и населения. Различие в значениях предельно допустимых уровней составляет 5 раз по мощности или $\sqrt{5}$ по напряженности поля.

Зарубежные национальные стандарты и международные рекомендации допускают существенно более высокие уровни ЭМП для всех категорий облучаемых людей в сравнении с нормативами России. Считается, что это обусловлено различием в подходах к оценке вредности воздействующего ЭМП, а именно, ориентацией отечественного нормирования на пороги вредного воздействия, связанные не с тепловыми эффектами, а со специфическим действием ЭМП, которое наблюдается на значительно более низких уровнях.

Совершенно очевидно, что вопросы нормирования электромагнитных полей требуют дальнейших серьезных исследований объединенными усилиями специалистов различных областей. В настоящее время у нас в стране и за рубежом проводятся разносторонние медико-биологические исследования с целью получения новых и уточнения имеющихся гигиенических нормативов. По мнению экспертов Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [8], сформулированному на основании детального анализа совокупности имеющихся данных по биологическому действию и клиническим эффектам ЭМП, ПДУ радиочастотных воздействий должны лежать в диапазоне интенсивностей 100...1000 мкВт/см² с возможным повышением для некоторых частот и условий воздействия и снижением для населения.

Национальные стандарты ряда стран и международные рекомендации

| Страна, организация | Область распространения | Частотный диапазон, (f, МГц) | Предельно допустимый уровень | |
|------------------------------------|--------------------------|--|---|---|
| | | | Электрическое поле E | Магнитное поле H |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| США ANSI C95.1-91 | Контролируемые условия | 0,003...0,1 0,1...3,0 3...30 30...100 100...300 300...3000 3000...300000 | 614 В/м 614 В/м 1842/ф В/м 61,4 В/м 61,4 В/м | 163 А/м 16,3/ф А/м 16,3/ф А/м 16,3/ф А/м 0,163 А/м |
| | Неконтролируемые условия | 0,003...0,1 0,1...1,34 1,34...30 30...100 100...300 300...15000 15000...300000 | 614 В/м 614 В/м 823,8/ф В/м 27,5 В/м 27,5 В/м | 163 А/м 16,3/ф А/м 16,3/ф А/м 158,3/ф ^{1,668} А/м 0,0729 А/м |
| Канада | Работающие | 0,01...1 1...10 10...30 30...300 300...1500 1500...300000 | 600 В/м 600/ф В/м 60 В/м 60 В/м | 4,9 А/м 4,9/ф А/м 4,9/ф А/м 0,163 А/м |
| | Население | 0,01...1 1...10 10...30 30...300 300...1500 1500...300000 | 280 В/м 280/ф В/м 28 В/м 28 В/м | 1,8 А/м 2,1/ф А/м 2,1/ф А/м 0,07 А/м |
| Германия DIN VDE № 0848 1984 | Работающие и население | 0,01...0,03 0,03...2 2...30 30...3000 3000...12000 12000...300000 | 1500 В/м 1500 В/м 3000/ф В/м | 350 А/м 7,5/ф А/м 7,5/ф А/м |
| INIRC/IRPA | Работающие | 0,1...1 1...10 10...400 400...2000 2000...300000 | 614 В/м 614/ф В/м 61 В/м | 1,6/ф А/м 1,6/ф А/м 0,16 А/м |
| | Население | 0,1...1 1...10 10...400 400...2000 2000...300000 | 87 В/м 87/ф ^{0,5} В/м 27,5 В/м | 0,23/ф ^{0,5} А/м 0,23/ф ^{0,5} А/м 0,073 А/м |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|--------------------------|--|---|---|
| CENELEC | Контролируемые условия | 0,03...0,1 0,1...0,4 0,4...10 10...30 30...400 400...2000 2000...300000 | 1500 В/м 1500 В/м 614/f В/м 61,4 В/м 61,4 В/м | $2,158/f^{1,355}$ 4,89/f А/м 4,89/f А/м 4,89/f А/м 0,16 А/м $f/400$ мВт/см ² 5 мВт/см ² |
| | Неконтролируемые условия | 0,03...0,14 0,14...0,92 0,92...10 10...30 30...400 400...2000 2000...300000 | 300 В/м 300 В/м 275/f В/м 27,5 В/м 27,5 В/м | 16 А/м 2,19/f А/м 2,19/f А/м 2,19/f А/м 0,07 А/м $f/2000$ мВт/см ² 1 мВт/см ² |
| Англия | Работающие и население | 0,001...0,535 0,535...12 12...200 200...400 400...800 800...1550 1550...300000 | 50 В/м 0,25×f В/м 100 В/м 0,125×f В/м | 64 А/м $18/f^2$ А/м 0,13 А/м 0,00066f А/м 0,26 А/м 0,00033f А/м 10 мВт/см ² |

Весьма актуальными стали вопросы нормирования воздействия электромагнитных полей сочетанного (от двух и более источников одного частотного диапазона), смешанного (от двух и более источников различных частотных диапазонов) и комбинированного (в случае одновременного действия какого-либо другого неблагоприятного фактора). Такие нормативы охватывали бы комплексы разнодиапазонных технических средств.

Для населения не решен вопрос учета в предельно допустимых уровнях фактора времени так, как это сделано для производственного персонала.

Еще одна обсуждаемая задача – это введение в гигиенические нормативы вероятностных параметров. Электромагнитные поля в реальных условиях распространения, т.е. при распространении в статистически неоднородной среде, имеют вероятностные характеристики. Естественно, что расчетные модели и результаты инструментального контроля тоже могут иметь вероятностные параметры, а, следовательно, и любые регламентации (установление санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки) в этом случае будут выполняться с вероятностью, определяемой вероятностными параметрами предельно допустимых уровней. Подобный подход к нормированию успешно развивается в работах отечественных ученых [17,18].

2.3. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВБЛИЗИ ИЗЛУЧАЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Одной из важнейших проблем электромагнитной экологии является прогнозирование электромагнитной обстановки вокруг излучающих объектов. Оно должно проводиться на стадиях проектирования, строительства или реконструкции излучающих объектов и позволяет оценить электромагнитную обстановку с точки зрения выполнения действующих нормативов, наметить комплекс мероприятий организационного и градостроительного характера. Кроме того, правильный прогноз оценивает перспективы развития объектов телекоммуникаций и обосновывает ресурс энергетического потенциала технических средств с точки зрения электромагнитной безопасности, позволяет производить оптимизацию размещения антенных устройств.

Электромагнитное прогнозирование для целей электромагнитной экологии определяется широким диапазоном подходов и характеристик.

С точки зрения природы прогнозируемого объекта (ЭМП) прогнозы электромагнитной обстановки относятся к *вероятностным*, в которых фиксируются основные характеристики вероятностной системы. Отметим, что в настоящее время, несмотря на то, что природа распространения ЭМП связана с вероятностными параметрами, в мировой и отечественной гигиенической практике приняты детерминированные подходы.

По признаку масштабности электромагнитное прогнозирование может относиться, с одной стороны, к *локальным* и *суперлокальным*, когда речь идет о прогнозировании ЭМП вблизи отдельных антенн и комплексов антенн. С другой стороны, электромагнитный прогноз может быть *субглобальным* (например, карта ЭМП отдельного города) и *глобальным*, когда оценивается электромагнитная структура биосферы в целом.

По числу излучающих средств прогнозирование может быть *мультиплетным* и охватывать комплексы разнодиапазонных технических средств, а также *сингулярным*, относящимся к одному объекту или излучателю.

По характеру связи с другими объектами или загрязняющими факторами электромагнитное прогнозирование является в настоящее время *безусловным*. Как нормируемый загрязняющий фактор окружающей среды, прогнозирование ЭМП не связывается с другими загрязнениями. Пока не производится гигиеническая оценка комплексного характера воздействия ЭМП и других загрязнений.

По признаку системы знаний, лежащих в основе электромагнитного прогнозирования, все прогнозы относятся к *научным*, имеющим теоретическое обоснование и определенные математические модели.

По форме представления результатов электромагнитное прогнозирование относится как к *количественным*, так и к *описательным*.

По признаку назначения электромагнитное прогнозирование рассчитано на требования потребителей – органов санитарно-гигиенического и экологического контроля, архитектурно-планировочных организаций и органов управления народным хозяйством.

По степени осознанности и обоснованности все прогнозы в этой сфере должны по возможности относиться к *логическим*. Область применения интуитивных прогнозов должна ограничиваться рамками экспертных оценок по частным вопросам.

По способу проверки достоверности электромагнитные прогнозы в основном относятся к категории *верифицируемых* (проверяемых опытным путем).

По признаку заинтересованных областей науки прогнозы в области электромагнитной экологии могут относиться как к *естественнонаучным* и *техническим*, так и *социально-экономическим* и *медицинским*.

По признаку отношения к объекту прогнозирование является *активным*, предполагающим воздействие на излучающий объект. Как правило, прогнозы должны быть *конструктивными*, т.е. дающими возможность изменения отдельных сторон объекта без изменения его функционального назначения. Вместе с тем в отношении некоторых излучающих технических средств, оказывающих явно неблагоприятное влияние на людей, прогнозы должны быть *деструктивными*, т.е. предполагающими в перспективе перенос или даже ликвидацию объекта.

Расчетное прогнозирование должно производиться по достоверным, апробированным, научно обоснованным методикам, которые должны быть неотъемлемой частью санитарных норм [13]. Разработка таких методик для технических средств радиосвязи, радиовещания и телевидения сложная проблема, поскольку эти технические средства работают в очень широком диапазоне частот, размещаются в различных условиях и их излучающие системы весьма разнообразны.

Изложение сути методик расчетного прогнозирования излучающих технических средств различных диапазонов радиочастотного спектра содержится в последующих главах.

Сложность структуры радиоволн вблизи излучателей НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов, а также многочисленность влияющих факторов определяют трудности всестороннего решения проблемы электромагнитного прогнозирования в этих диапазонах. Указанная сложность определяет целесообразность применения в качестве основного метода исследования математическое моделирование. Однако математическая модель, какой бы сложной она ни была, не может отражать всех физических явлений, которые

проявляются в реальных условиях. Модель должна воплощать в себе наиболее существенные для решаемой научной задачи стороны явления.

Следует отметить, что в практике проектирования излучающих объектов имели место попытки создания математических моделей на основании ряда допущений, приближений и упрощений, верных только для дальней зоны излучения, не учитывающих полупроводящих свойств земной поверхности и ориентированных на ручные методы расчета. Приближенные математические модели были применимы для частных случаев, давали результаты оценочного характера и неприменимы для комплексов антенн.

Практика проектирования антенных устройств, при которой разработчик оперирует с приближенными математическими моделями объекта, приводит к невозможности на этапе проектирования учесть все многообразие свойств объекта и к большому объему экспериментальных исследований. Решение вопроса – отказ от «грубых» моделей и использование алгоритмов, основанных на неупрощенных краевых задачах для уравнений Максвелла. Наряду с высоким уровнем адекватности такие математические модели универсальны, т.е. пригодны для многих объектов. В настоящее время неупрощенные электродинамические модели составляют основу систем автоматизированного проектирования антенных устройств и систем телекоммуникаций [19].

Применение в качестве метода исследования математического моделирования и ориентация расчетных методик на широкое применение компьютеров предопределили необходимость получения удобных для этих целей решений соответствующих задач электродинамики.

В практике санитарно-гигиенической и экологической экспертизы излучающих объектов ОВЧ и УВЧ диапазонов чаще всего приходится иметь дело с расчетом электромагнитной обстановки в дальней зоне излучения. Исключения составляют случаи, когда приходится прогнозировать обстановку в непосредственной близости от антенн – на крышах зданий и мачтах, где установлены антенны, и где предполагается нахождение обслуживающего персонала.

Для дальней зоны возможен расчет электромагнитной обстановки по паспортным параметрам антенн. Такая возможность определяется в [13]. Анализ опыта проведения электромагнитной экспертизы показывает, что часто техническая документация на излучающие технические средства не имеет необходимого набора данных по направленным свойствам антенн (диаграммы направленности и коэффициент усиления), а также данных по антенно-фидерному тракту. В таких случаях прогнозирование становится весьма затруднительным и даже практически невозможным. Такая ситуация возникает при проведении электромагнитного прогнозирования вблизи технических средств, поставляемых зарубежными фирмами, специаль-

ных технических средств, технических средств, оборудованных нестандартными антеннами и т. д.

Сложность анализа ЭМП апертурных антенн, которые используются в УВЧ и СВЧ диапазонах, связана с необходимостью расчета полей в ближней зоне, в том числе дифракционного поля за апертурой, при многообразии амплитудно-фазовых распределений, особенностях конструкций антенн и необходимости учета излучения облучателя.

Излучаемому ЭМП характерно наличие различных зон излучения. Область вблизи источника ЭМП называется ближней зоной. В ближней зоне можно выделить две подобласти: область реактивного ближнего поля и область излучаемого ближнего поля. Область пространства, окружающая антенну, в которой преобладают реактивные компоненты, известна как область реактивного ближнего поля. Иногда эту зону называют зоной индукции, где поле слабо зависит от расстояния. В области излучаемого ближнего поля модель излучения изменяется с расстоянием от антенны. Ближние поля быстро изменяются с расстоянием и математические выражения для поля обычно содержат составляющие, пропорциональные $1/r$, $1/r^2$, ... $1/r^n$, где r – расстояние от источника до точки, в которой определяется поле. На больших расстояниях от источника составляющие, пропорциональные $1/r^2$, $1/r^3$ и более высоких порядков, являются малыми величинами в сравнении с составляющей, пропорциональной $1/r$, и поля носят название полей дальней зоны. Эти поля представляют собой сферические волны, которые в ограниченной области пространства могут быть аппроксимированы плоскими волнами. Измерения и вычисления полей в дальней зоне обычно более просты, чем в ближней.

Когда наибольший размер L источника излучения (антенны) больше длины волны λ , границу дальней зоны обычно определяют соотношением $2L^2/\lambda$. Для $L < \lambda$ это расстояние равно $\lambda/2\pi$. На практике расстояние от источника до границы дальней зоны выбирают как большую из двух величин $2L^2/\lambda$ и $\lambda/2\pi$. Однако граница между областями ближнего и дальнего поля не резкая, поскольку ближние поля (составляющие, пропорциональные $1/r^2$, $1/r^3$ и более высоких порядков) уменьшаются постепенно с увеличением расстояния от источника (рис. 2.10). Применительно к параметрам проволочных и вибраторных антенн иногда полезно знать, что характеристика направленности с высокой степенью точности (единицы процентов) формируется уже на расстояниях L^2/λ . Однако на этих расстояниях коэффициент усиления, как параметр антенн в дальней зоне, еще не сформировался и отличается от такового в дальней зоне на 20...30%.

Расчеты электромагнитных полей для любых антенн могут проводиться по методикам, основанным на двух принципиально отличающихся способах. Во-первых, расчеты могут быть построены на использовании

паспортных параметров антенн, которые определяются для дальней зоны излучения. При этом переход в ближнюю зону будет давать погрешности, которые в ряде случаев можно заранее прогнозировать и трактовать, например, как гигиенический запас. Во-вторых, методики могут базироваться на строгих решениях соответствующих электродинамических задач, что позволит в ряде случаев учитывать целый ряд факторов и, в конечном счете, повысить точность прогнозирования электромагнитной обстановки. Естественно, что такие решения являются более общими, и включают соотношения для дальней зоны, как частные случаи.

$1/kr, 1/(kr)^2, 1/(kr)^3$

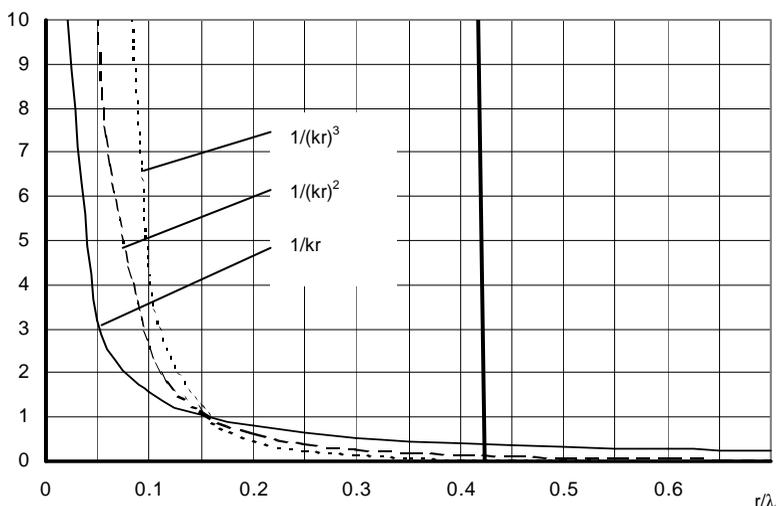


Рис. 2.10. Соотношение между составляющими поля

В свободном пространстве электромагнитные волны от точечного изотропного источника излучения распространяются равномерно во всех направлениях. В этом случае фронт волны является сферическим. При увеличении расстояния до точки наблюдения поверхность волнового фронта увеличивается пропорционально квадрату расстояния, и плотность потока энергии P является однородной величиной во всей дальней зоне.

Если рассматривается поле в дальней зоне излучения антенны, имеющей коэффициент направленного действия D , то плотность потока энергии в направлении максимального излучения легко определяется соотношением:

$$P = P_{\Sigma} D / 4\pi r^2, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.5)$$

где P_{Σ} – излученная антенной мощность, Вт; r – расстояние от антенны до точки наблюдения, м.

Величина коэффициента направленного действия антенны (или коэффициента усиления G , который связан с D соотношением $G = D\eta$, где η – КПД антенны) обычно известна для любой антенны и является паспортным параметром. Если же величина D неизвестна, то для ряда антенн его можно легко определить, используя известные соотношения теории антенн. Так, например, для апертурных антенн с эффективной площадью $A_{\text{э}}$ коэффициент направленного действия может быть определен по формуле:

$$D = 4\pi A_{\text{э}} / \lambda^2. \quad (2.6)$$

Эффективная площадь антенны $A_{\text{э}}$ отличается от физической площади раскрытия антенны A в меньшую сторону и составляет: $A_{\text{э}} = (0,5...0,9)A$. Очевидно, что замена $A_{\text{э}}$ в формуле 2.6 на A приведет к увеличению плотности потока энергии в 1,1...2,0 раза. В [2] считают допустимой такую замену до расстояний $0,5L^2/\lambda$ для больших антенн ($L > \lambda$), обосновывая это тем, что погрешность расчета направлена в сторону увеличения P , т.е. в сторону гигиенического запаса. На расстояниях ближе, чем $0,5L^2/\lambda$, значения плотности потока энергии, рассчитанные с помощью этих формул, становятся нереально большими и не могут быть использованы для оценки излученного ближнего поля.

Для получения пространственного распределения плотности потока энергии в формулу 2.5 необходимо ввести множителем квадрат характеристики направленности антенны, как функцию угловых координат.

К сожалению, не существует аналогичной формулы для реактивного ближнего поля для малых излучателей ($L < \lambda$). Максимумы и минимумы электрического и магнитного полей в ближней зоне могут не совпадать в пространстве, как это имеет место для плоских волн (дальней зоны), поле может иметь характер неоднородного поля, при этом обычно наблюдаются существенные отклонения от импеданса плоской волны, равного 377 Ом. В некоторых областях могут существовать почти чистые электрические, а в других почти чистые магнитные поля. Выявить особенности изменений, структуру и количественные характеристики ближних полей удается только в рамках строгих решений соответствующих электродинамических задач.

Исследования ближних полей становятся особенно важными, когда осуществляется санитарно-гигиеническая экспертиза технических средств телекоммуникаций, работающих в НЧ, СЧ и ВЧ диапазонах.

Методики расчета обычно разрабатываются по группам антенн, отличающихся по принципам действия, диапазонам частот и условиям размещения.

Первая группа включает антенны НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов, анализ излучения которых проводится с учетом реальных электрофизических параметров земной поверхности. Антенны этих диапазонов представляют собой проволочные и вибраторные конструкции. Методики расчета ближних ЭМП основаны на строгом решении задачи излучения элементарного электрического вибратора, расположенного над полупроводящей поверхностью раздела, с последующим использованием принципа суперпозиции. Эти решения ориентированы на численные методы расчета, дают весь набор составляющих ЭМП и применимы для распространения на сложные излучающие системы.

Вторая группа антенн – это антенны телевидения, ОВЧ ЧМ вещания и систем подвижной связи. Эти антенны располагаются высоко над землей, санитарные зоны практически всегда попадают в дальнюю зону. Поэтому для целей электромагнитной экологии вполне достаточен анализ ЭМП по двухлучевой модели с использованием эксплуатационных характеристик антенн либо очевидных соотношений для различных типов антенн.

Третья группа – это апертурные антенны, которые используются в УВЧ и СВЧ диапазонах. Сложность анализа ЭМП апертурных антенн связана с необходимостью расчета полей в ближней зоне, в том числе и за апертурой, при многообразии амплитудно-фазовых распределений, особенностях конструкций антенн и необходимости учета излучения облучателя.

2.4. МЕТОДЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Несмотря на большой объем информации, расчетные методы часто не могут заменить инструментальный контроль, который является единственным средством, позволяющим в условиях статистически неоднородной среды оценить биологическую опасность электромагнитных полей из-за невозможности учета в моделях излучения всего многообразия влияющих факторов. Различают два отличающихся своими целями вида инструментального контроля – это инструментальный контроль расчетного прогноза и профилактический санитарный инструментальный контроль.

Инструментальный контроль расчетного прогноза электромагнитного поля имеет своей целью оценить достоверность расчетного прогноза, при необходимости его скорректировать, выявить и обосновать неучтенные факторы в условиях реального размещения объекта.

Методики инструментального контроля расчетного прогноза разрабатываются в соответствии с методиками расчетного прогнозирования и включают в себя не только перечень и эксплуатационные требования измерительной аппаратуры, но и учитывают те особенности и предпосылки, которые заложены в основу расчета. Особой сложностью отличается инструментальный контроль в НЧ, СЧ и ВЧ диапазонах, поскольку конструктивные особенности антенн этих диапазонов и условия распространения определяют весьма сложную структуру поля вблизи излучателей. Так, например, в НЧ, СЧ и ВЧ диапазонах антенны, излучающие в дальнюю зону поле преимущественно горизонтальной поляризации, в ближней зоне имеют три составляющие электрического поля в декартовой системе координат – горизонтальные E_x , E_y и вертикальную E_z . Антенны, излучающие в дальнюю зону поле преимущественно вертикальной поляризации, в ближней зоне имеют две составляющие в цилиндрической системе координат – вертикальную E_z и продольную E_r . Причем часто вблизи излучающих систем уровни не основных составляющих превышают уровни составляющих поля, излучаемых в дальнюю зону. Эти закономерности выявлены и подтверждены многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями и учтены в методиках инструментального контроля полей в НЧ, СЧ и ВЧ диапазонах [20]. Аналогичные исследования для технических средств телевидения заложены в основу утвержденных и принятых методик инструментального контроля [21].

Профилактический инструментальный контроль санитарно-гигиеническими службами имеет своей целью проверку уровней поля в любых точках, в том числе в зонах, не поддающихся расчетному прогнозированию. Сложную самостоятельную проблему составляет инструментальный контроль электромагнитных полей вблизи переизлучающих объемов и в замкнутых объемах, к которым следует относить и помещения.

Игнорирование очевидного существования двух видов инструментального контроля приводит, как правило, с одной стороны, к недооценке и отрицанию расчетных методов электромагнитного мониторинга, с другой стороны, к гиперболизации инструментального контроля окружающей среды, неправильной трактовке результатов измерений и, как следствие, ошибочному заключению о состоянии окружающей среды по электромагнитному фактору. В качестве примера можно привести процесс электромагнитного мониторинга за техническими средствами НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов, где результаты измерений могут в значительной степени зависеть от состояния земной поверхности (сухая, сырая, покрытая снегом и т. д.).

Подготовка к проведению инструментального электромагнитного мониторинга технических средств телекоммуникаций в обязательном порядке должна включать несколько этапов:

1. Подготовка информации об источнике излучения, в которую входят:
 - * состав технических средств – типы передатчиков и антенн,
 - * рабочие диапазоны частот,
 - * режимы работы технических средств (расписание работы, направления излучения, смена частот и т.д.),
 - * технические данные передатчиков (мощность, КПД, модуляционные характеристики),
 - * конструктивные особенности и технические данные антенн (диаграммы направленности, коэффициенты усиления, КПД, вид поляризации).
2. Подготовка информации о местности, где планируется проводить измерения. Это предполагает знание или измерение расстояний до источников излучений, знание рельефа местности и доступности территорий, информацию о других источниках излучений, определение объектов, которые могут в значительной степени влиять на результаты измерений. Так, например, переотражающая поверхность может увеличить результат измерения поля в два раза, а плотность потока энергии – в четыре раза. Наличие угловых отражателей или изогнутых поверхностей может привести к еще большим погрешностям.
3. Изучение нормативной санитарно-гигиенической документации, относящейся к данному виду технических средств и диапазонов.
4. Подбор и подготовка необходимой измерительной аппаратуры.
5. Результаты расчетного прогнозирования электромагнитной обстановки. Авторы считают, что приступать к измерениям следует только после проведения расчетов ЭМП для режимов работы технических средств, обеспечиваемых во время измерений.

Приборы для измерения электрических и магнитных полей состоят из трех основных частей: зонд (измерительная антенна), соединительный кабель и измерительный прибор. Сложность критериев оценки электромагнитной обстановки и структуры полей определяют следующие требования к измерительной аппаратуре для инструментального контроля электромагнитных полей вблизи основных излучающих средств телекоммуникаций:

- * приборы должны быть частотно избирательными;
- * зонд должен реагировать только на электрическое или магнитное поле и не реагировать на оба одновременно;
- * зонд не должен в значительной степени искажать структуру измеряемого поля;

* кабель, соединяющий зонд с измерительным прибором, не должен искажать структуру поля и иметь антенного эффекта;

* частотный диапазон зонда должен соответствовать диапазону частот измеряемых полей;

* если измерения проводятся в реактивном ближнем поле, размеры зонда должны быть меньше четверти длины волны для самой высокой имеющейся частоты;

* прибор должен обеспечивать измерение одного или нескольких следующих параметров:

- средней плотности потока энергии ($\text{мкВт}/\text{см}^2$),

- среднего значения электрического поля ($\text{В}/\text{м}$),

- среднего значения магнитного поля ($\text{А}/\text{м}$).

* прибор должен показывать корень среднеквадратического значения параметра измеряемого поля;

* для случая изменяющихся полей (радиолокационные станции, измерение ЭМП в движении) должно быть известным время быстрого действия прибора; желательно иметь время быстрого действия около 1 секунды или меньше так, чтобы поля были легко обнаруживаемыми;

* зонд должен обеспечивать раздельное измерение трех ортогональных пространственных составляющих поля; это может быть выполнено либо с помощью применения изотропной антенны или с помощью физического вращения зонда в трех ортогональных плоскостях;

* прибор в целом должен обладать достаточной помехозащищенностью для работы в мешающих полях больших уровней, работать не только в стационарных, но и полевых условиях.

В настоящее время не существует измерительных приборов, позволяющих проводить непосредственное измерение средней плотности потока энергии в ближнем поле, да и нет необходимости эту величину измерять. Плотность потока энергии измеряют только в дальней зоне либо с помощью зондов для электрического и магнитного полей, либо с помощью зондов, представляющих собой апертурные антенны.

Плотность потока энергии эквивалентной плоской волны является без сомнения удобным параметром, но в реактивном ближнем поле сначала должны измеряться напряженности электрического E и магнитного H полей, а потом их значения сравниваются с соответствующими нормами воздействия.

В реактивном ближнем поле излучателей, работающих на частотах менее 300 МГц, измерительная антенна должна иметь электрически малые размеры (не более $0,25\lambda$), так как в поле имеются составляющие с большими градиентами. Увеличение размеров является критическим, большие зонды будут осуществлять пространственное усреднение измеряемой величины, и обычно рекомендуется использование изотропного зонда. По

рекомендациям, приведенным в [2], измерения электрических и магнитных полей производится на расстояниях не ближе 20 см от металлических объектов. В таких случаях результаты согласуются с измерениями контактных токов. Неоднородности в виде экстремальных значений в распределении полей, являющиеся результатом интерференции прямой и отраженной волн, располагаются на расстояниях не меньше половины длины волны.

Размещение аппаратуры и оператора при измерениях должно осуществляться с учетом минимизации их влияния на измеряемое поле. Оператор, выполняющий измерения, должен по возможности располагаться как можно дальше от тестируемой области. Для всех объектов, которые в процессе измерений могут отражать или поглощать энергию, должна быть определена их оптимальная позиция. Необходимо соблюдать предосторожности при тестировании мощных электромагнитных полей, которые могут быть причиной радиочастотных факелов и ударов.

При правильном выборе приборов и тщательном проведении измерений может быть достигнута приемлемая погрешность результатов измерений. Значительно сложнее достичь этой точности вблизи источников поля (антенн или переизлучающих поверхностей) – на расстояниях от источника поля менее 0,2 м или $\lambda/2$. Эти проблемы возникают при анализе ЭМП вблизи радиотелефонных трубок. В таком случае необходимо оценивать удельные нормы поглощения на фантомах человека с использованием дозиметрических подходов, или непосредственно измерять радиочастотный ток, протекающий через человека [2].

2.5. ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Существует и научно обоснован целый комплекс организационных и технических мероприятий по защите окружающей среды и человека от воздействия электромагнитных полей. К ним относятся, во-первых, «пассивные» методы защиты – это защита расстоянием (организация санитарных зон), временем (ограничение времени пребывания в электромагнитных полях), экранирование (применение поглощающих и экранирующих материалов), градостроительные мероприятия (озеленение, специальная планировка прилегающих к излучающим объектам районов, использование естественного и создание затеняющего искусственного рельефа местности) и т. д.

Настоящая работа посвящена проблеме загрязнения окружающей среды электромагнитными полями технических средств телекоммуникаций, поэтому при обсуждении способов защиты основное внимание авторы уделяют защите населения. С этой точки зрения экранирование не может

рассматриваться в качестве одного из способов пассивной защиты. Напомним, что экранирование зданий, помещений и применение индивидуальных средств защиты приводят к созданию для человека гипогеоэлектромагнитных условий со всеми вытекающими последствиями. Проблематичны для населения и методы защиты, связанные с ограничением времени пребывания человека в ЭМП. Существующие в настоящее время Государственные нормативные документы не содержат для населения подобных регламентаций, и предполагается, что население подвергается воздействию ЭМП круглосуточно. Таким образом, основными видами пассивной защиты для населения являются защита расстоянием и градостроительные мероприятия.

За счет планировочных и градостроительных мероприятий можно снизить уровень ЭМП как на территории жилой зоны, так и внутри зданий. Определенная ориентация зданий – глухим торцом к излучению, уменьшение этажности, увеличение разрывов между зданиями могут снизить уровень поля на 3...10 дБ. К сожалению, планировка и застройка селитебных территорий, прилегающих к излучающим объектам, как правило, осуществляется без учета мероприятий по защите населения от ЭМП. Это приводит в дальнейшем к осложнениям в отношениях между населением и владельцами излучающих объектов, что обычно кончается не в пользу последних.

Неприменимы для населения индивидуальные средства защиты, как не только создающие гипогеоэлектромагнитные условия, но и просто не эстетичные и не естественные атрибуты для человека.

Средства индивидуальной защиты применяются обычно для производственного персонала, когда другие защитные меры невозможны или недостаточно эффективны: при проходе через зоны повышенной интенсивности ЭМП, при ремонтных и наладочных работах в аварийных ситуациях, во время кратковременного контроля и измерения ЭМП. Такие средства неудобны для человека, ограничивают его подвижность и возможность выполнения операций, ухудшают гигиенические условия. Средства индивидуальной защиты основаны на принципе экранирования человека поглощающими и отражающими материалами.

Для защиты тела применяется одежда из металлизированных тканей и радиопоглощающих материалов. Металлизированная ткань состоит из хлопчатобумажных или капроновых нитей обвитых или совмещенных с тонкой металлической проволокой. Ткань становится подобной металлической экранирующей сетке.

Индивидуальная защита необходима для людей с имплантированными (вживленными) кардиостимуляторами – устройствами для регулирования частоты сердечных сокращений. Работоспособность кардиостимуляторов может быть нарушена внешними ЭМП. Чтобы обезопасить людей, в

некоторых странах выпускают экранирующие рубашки из радиозащитной ткани.

По мнению авторов, если что и может способствовать улучшению электромагнитной обстановки селитебных территорий, то это только

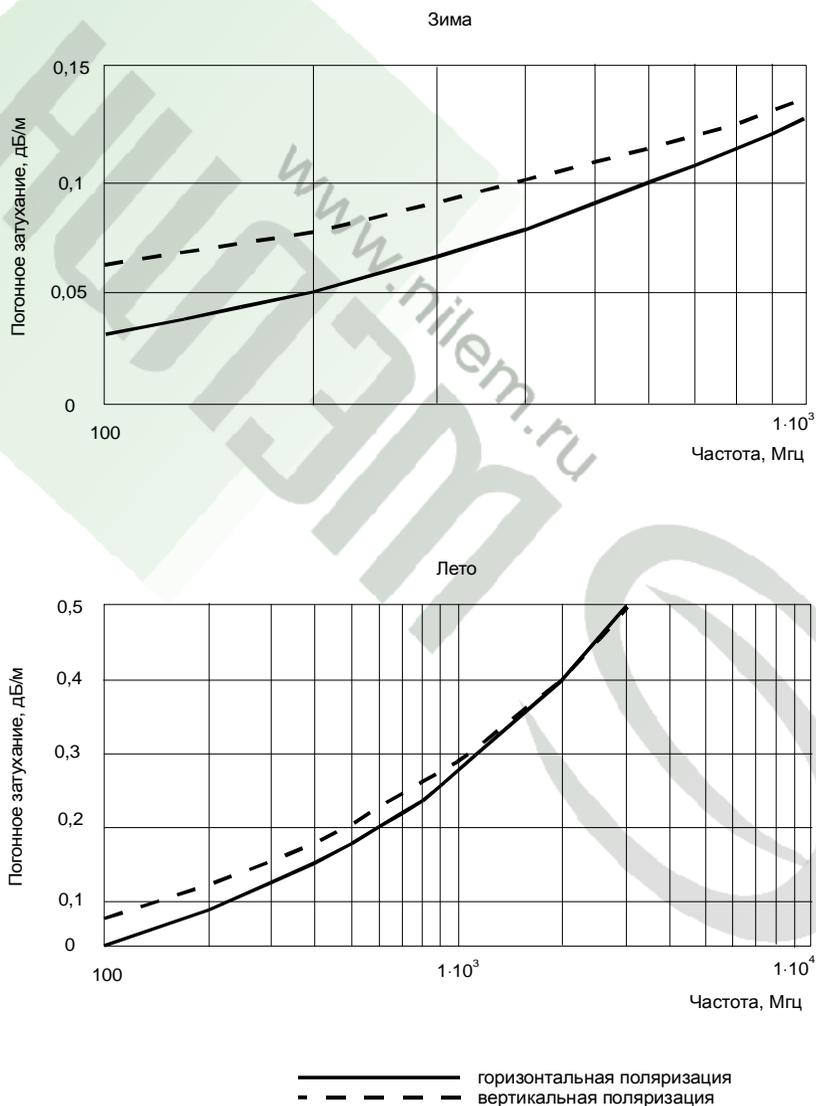


Рис. 2.11. Сквозное затухание, вносимое лесом летом и зимой

целенаправленное использование зеленых насаждений и, в первую очередь, создание лесопарковых зон. На рис. 2.11 приведены зависимости от частоты сквозного (погонного) затухания леса для зимы и лета [22].

Развитие методов анализа полей вблизи излучателей позволило совершенствовать «активные» методы защиты, к которым следует отнести уменьшение излучаемых мощностей, перенос и реконструкцию излучающих элементов, изменение режимов работы технических средств и т.д. Очевидно, что все методы активной защиты применимы для населения. Важным направлением, способствующим решению задач «активной» защиты, является классификация антенн по степени экологической опасности [23,24] и разработка излучающих систем с улучшенными экологическими характеристиками [25,26].

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

3.1. СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТАРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВИБРАТОРА

При анализе ближних электромагнитных полей антенн НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов их можно считать тонкопроволочными структурами, что позволяет каждый излучающий провод представить совокупностью множества элементарных электрических вибраторов (ЭЭВ). Соответственно уровень и структура электромагнитного поля в произвольной точке пространства будет определяться суперпозицией полей всех ЭЭВ. Антенное поле считается гладкой поверхностью с конкретными значениями диэлектрической проницаемости и удельной проводимости почвы. Таким образом, решения задач об излучении горизонтального и вертикального ЭЭВ, расположенных над реальной почвой, являются базовыми для реализации численных методов анализа ближних электромагнитных полей вблизи антенн НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов.

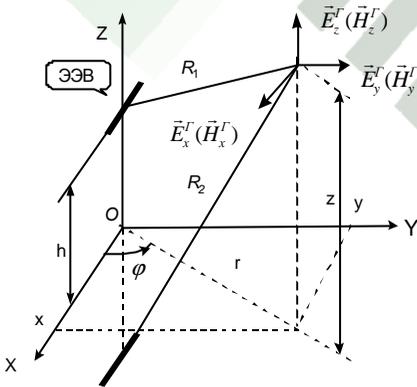


Рис. 3.1. Структура электромагнитного поля горизонтального элементарного электрического вибратора

Пусть горизонтальный ЭЭВ ориентирован вдоль оси X декартовой системы координат, а ось Z перпендикулярна поверхности раздела XOY – рис. 3.1. В общем случае в произвольной точке пространства такой ЭЭВ будет создавать три составляющих вектора напряженности электрического поля $\vec{E}_x^r, \vec{E}_y^r, \vec{E}_z^r$ и три составляющих вектора напряженности магнитного поля $\vec{H}_x^r, \vec{H}_y^r, \vec{H}_z^r$.

Задача об излучении ЭЭВ, расположенного над средой с конечной проводимостью, относится к числу классических во многих приложениях электродинамики, в том числе и в теории распространения радиоволн [27]. Учет конечной проводимости земли возможен различными методами, среди которых широко применяется метод решения задачи с использованием граничных условий

типа поверхностного импеданса. Применение таких граничных условий позволяет не рассматривать электромагнитное поле в нижней среде (при $Z < 0$), а учесть его приближенно путем введения постоянной δ , называемой поверхностным импедансом.

В случае однородной почвы при $|\varepsilon + i60\lambda\sigma| \gg 1$ обычно полагают

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon + i60\lambda\sigma}}, \quad (3.1)$$

где ε - относительная диэлектрическая проницаемость почвы; σ - удельная электрическая проводимость почвы; λ - длина волны.

Импедансный метод предполагает, что при $Z = 0$ выполняется импедансное граничное условие:

$$\vec{E}_\tau = \delta \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} [\vec{z}_0 \vec{H}]_\tau, \quad (3.2)$$

где индекс τ означает, что условие (3.2) связывает только составляющие векторов, касательные к поверхности раздела.

Решение задачи о структуре электромагнитного поля произвольной системы сторонних токов, расположенной над импедансной поверхностью, приведено в [28].

Составляющие напряженности электрического поля

Для ЭЭВ, ориентированного так, как это показано на рис. 3.1, комплексные амплитуды составляющих вектора \vec{E} имеют вид:

$$\begin{aligned} \vec{E}_x^r &= \vec{x}_0 \frac{k^2 P}{4\pi\varepsilon_0} e_x \frac{e^{ikR_1}}{R_1}; \\ \vec{E}_y^r &= \vec{y}_0 \frac{k^2 P}{4\pi\varepsilon_0} e_y \frac{e^{ikR_1}}{R_1}; \\ \vec{E}_z^r &= \vec{z}_0 \frac{k^2 P}{4\pi\varepsilon_0} e_z \frac{e^{ikR_1}}{R_1}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Здесь зависимость от времени имеет вид $e^{-i\omega t}$ и использованы следующие обозначения:

$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ - волновое число для свободного пространства ($\omega = 2\pi f$ - круговая частота, ε_0, μ_0 - диэлектрическая и магнитная постоянные);

$P = i \frac{Il}{\omega}$ – комплексная амплитуда дипольного момента (I – амплитуда

тока, возбуждающего вибратор, l – длина вибратора);

R_1 – расстояние от центра вибратора до расчетной точки;

e_x, e_y, e_z – сложные функции, зависящие от геометрических параметров задачи и электрофизических параметров почвы:

$$\begin{aligned} e_x &= e_1 \cos \varphi - e_2 \sin \varphi ; \\ e_y &= e_1 \sin \varphi + e_2 \cos \varphi ; \\ e_z &= e_3 \cos \varphi . \end{aligned} \quad (3.4)$$

В этих выражениях:

$$\begin{aligned} e_1 &= \left[1 + c - \Delta(1 + c' + 2i\delta p') - 2\delta^2 \Delta I(\delta) - 2\Omega U(\delta) + 2\Omega U\left(\frac{1}{\delta}\right) \right] \cos \varphi ; \\ e_2 &= - \left[1 + g - \Delta - \Delta g' + 2\Delta I\left(\frac{1}{\delta}\right) - 2\Omega U\left(\frac{1}{\delta}\right) + 2\Omega U(\delta) \right] \sin \varphi ; \\ e_3 &= d - \Delta d' + 2i\delta \Delta U(\delta) ; \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$c = a \cos^2 \theta - b \sin^2 \theta - 1 ; \quad c' = a' \cos^2 \theta' - b' \sin^2 \theta' - 1 ;$$

$$a = 1 + \frac{i}{\kappa R_1} - \frac{1}{\kappa^2 R_1^2} ; \quad a' = 1 + \frac{i}{\kappa R_2} - \frac{1}{\kappa^2 R_2^2} ; \quad b = \frac{2i}{\kappa R_1} \left(1 + \frac{i}{\kappa R_1} \right) ;$$

$$b' = \frac{2i}{\kappa R_2} \left(1 + \frac{i}{\kappa R_2} \right) ; \quad \theta = \arccos \left(\frac{z-h}{R_1} \right) ; \quad \theta' = \arccos \left(\frac{z+h}{R_2} \right) ;$$

$$g = \frac{1}{kr} i \left(1 + \frac{i}{\kappa R_1} \right) \sin \theta ; \quad g' = \frac{1}{kr} i \left(1 + \frac{i}{\kappa R_2} \right) \sin \theta' ;$$

$$d = -(a+b) \sin \theta \cos \theta ; \quad d' = -(a'+b') \sin \theta' \cos \theta' ;$$

$$p' = i \left(1 + \frac{i}{\kappa R_2} \right) \cos \theta' ; \quad \Delta = \frac{R_1}{R_2} e^{ik(R_2-R_1)} ; \quad \Omega = \frac{\delta \Delta}{kr(1-\delta^2)} . \quad (3.6)$$

Геометрические параметры задачи, входящие в выражения (3.3-3.6), имеют вид:

$$R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2} ; \quad R_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+h)^2} ; \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} . \quad (3.7)$$

Значение $I(\delta)$ выражается через хорошо известную в теории распространения радиоволн функцию ослабления $y(z, r)$:

$$y(z, r) = 1 + 2\sqrt{S_0} e^{-S} \int_{\sqrt{S}}^{\infty} e^{x^2} dx , \quad (3.8)$$

$$\text{где } S_0 = \frac{ikR_2\delta^2}{2\left(\frac{r}{R_2}\right)^2}; S = S_0\left(\frac{(z+h)}{\delta R_2} + 1\right)^2. \quad (3.9)$$

$$\text{В [29] показано, что } I(\delta) \cong y(z, r); U(\delta) \cong \left(i - \frac{1}{kR_1}\right) \frac{r}{R_1} y(z, r). \quad (3.10)$$

Для вычисления функции ослабления можно воспользоваться сходящимися и асимптотическими разложениями:

$$\text{- для } |S| < 12 \quad y(z, r) = 1 + i\sqrt{\pi S_0} e^{-s} - 2\sqrt{SS_0} \sum_{\nu=0}^n \frac{(-2S)^\nu}{(2\nu+1)!!}; \quad (3.11)$$

$$\text{- для } |S| \geq 12 \quad \text{при } I_m \sqrt{S} \geq 0 \quad y(z, r) = 1 - \sqrt{\frac{S_0}{S}} \sum_{\nu=0}^n \frac{(2\nu-1)!!}{(2S)^\nu}; \quad (3.12)$$

$$\text{- для } |S| \geq 12 \quad \text{при } I_m \sqrt{S} < 0 \quad y(z, r) = 1 + 2i\sqrt{\pi S_0} e^{-s} - \sqrt{\frac{S_0}{S}} \sum_{\nu=0}^n \frac{(2\nu-1)!!}{2S}. \quad (3.13)$$

Ограничение числа членов ряда производится исходя из следующих условий:

$$\text{- для сходящегося разложения } \left| 2\sqrt{SS_0} (-2S)^n \right| < \gamma \left| (2n+1)!! y(z, r) \right|, \quad (3.14)$$

$$\text{- для асимптотических разложений } \left| \sqrt{\frac{S_0}{S}} (2n-1)!! \right| < \gamma \left| (2S)^n y(z, r) \right|, \quad (3.15)$$

где γ – величина погрешности, обусловленная ограничением ряда (в практических расчетах можно принять $\gamma = 10^{-4}$).

Значения $I(1/\delta)$ и $U(1/\delta)$ можно получить используя те же сходящиеся и асимптотические разложения с заменой величины δ на $1/\delta$ при вычислении S_0 и S по формулам (3.9):

$$S_0 = ikR_2/2\delta^2(r/R_2)^2; S = S_0[1 + (z+h)\delta/R_2]^2. \quad (3.16)$$

Составляющие напряженности магнитного поля

Комплексные амплитуды составляющих вектора \vec{H} имеют вид:

$$\vec{H}_x^r = \vec{x}_0 \frac{k^2 P}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} h_x \frac{e^{ikR_1}}{R_1};$$

$$\vec{H}_y^r = y_0 \frac{k^2 P}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} h_y \frac{e^{ikR_1}}{R_1};$$

$$\vec{H}_z^r = z_0 \frac{k^2 P}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} h_z \frac{e^{ikR_1}}{R_1}, \quad (3.17)$$

где h_x, h_y, h_z – сложные функции, зависящие от геометрических параметров задачи и электрофизических параметров почвы:

$$h_x = h_1 \cos \varphi - h_2 \sin \varphi; \quad h_y = h_1 \sin \varphi + h_2 \cos \varphi; \quad h_z = -h_3 \sin \varphi. \quad (3.18)$$

В приведенных выражениях использованы обозначения:

$$h_1 = -\left[ip + i\Delta p' - 2\Omega'U\left(\frac{1}{\delta}\right) + 2\Omega'U(\delta) + 2\Delta'I\left(\frac{1}{\delta}\right) \right] \sin \varphi;$$

$$h_2 = [-ip + i\Delta p' + 2\delta\Delta I(\delta) - 2\Omega'U(1/\delta) + 2\Omega'U(\delta)] \cos \varphi;$$

$$h_3 = -ikrg + i\Delta krg' - 2i\Delta U(1/\delta); \quad p = i\left(1 + \frac{i}{kR_1}\right) \cos \theta;$$

$$\Delta' = \Delta/\delta; \quad \Omega' = \Omega/\delta. \quad (3.19)$$

Все остальные величины, входящие в функции h_x, h_y, h_z , определены при анализе структуры напряженности электрического поля.

3.2. СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТАРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВИБРАТОРА

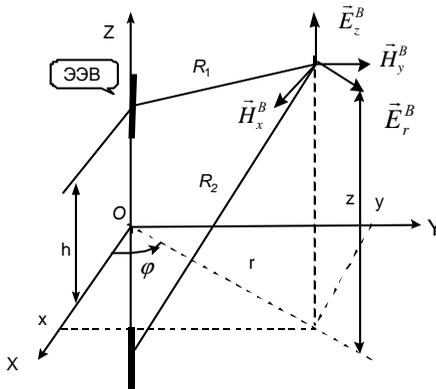


Рис. 3.2. Структура электромагнитного поля вертикального элементарного электрического вибратора

Пусть вертикальный ЭЭВ ориентирован вдоль оси Z декартовой системы координат, а ось Z перпендикулярна поверхности раздела XOY – рис. 3.2. Совместим с декартовой системой цилиндрическую систему координат r, φ, z . В общем случае в произвольной точке цилиндрической системы координат структуру поля будут определять две составляющих вектора напряженности электрического поля $(\vec{E}_r^B, \vec{E}_z^B)$ и

одна составляющая вектора напряженности магнитного поля \vec{H}_φ^B . В декартовой системе координат структура поля будет определяться составляющими: $\vec{E}_x^B, \vec{E}_y^B, \vec{E}_z^B, \vec{H}_x^B, \vec{H}_y^B$.

Составляющие напряженности электрического поля

Комплексные амплитуды составляющих вектора \vec{E} в цилиндрической системе координат имеют вид:

$$\vec{E}_r^B = \vec{r}_0 \frac{k^2 P}{4\pi\epsilon_0} e_4 \frac{e^{ikR_1}}{R_1}; \quad \vec{E}_z^B = \vec{z}_0 \frac{k^2 P}{4\pi\epsilon_0} e_5 \frac{e^{ikR_1}}{R_1}. \quad (3.20)$$

В этих выражениях пока не определены функции e_4 и e_5 :

$$e_4 = d + \Delta d' - 2i\delta\Delta U(\delta);$$

$$e_5 = 1 + m + \Delta(-1 + m' - 2i\delta\rho') + 2\Delta(1 - \delta^2)I(\delta). \quad (3.21)$$

В (3.21) использованы формальные параметры:

$$m = a \sin^2 \theta - b \cos^2 \theta - 1; \quad m' = a' \sin^2 \theta' - b' \cos^2 \theta' - 1.$$

Все остальные величины, входящие в выражения функций e_4 и e_5 , определены выше.

Для перехода к декартовым составляющим следует воспользоваться очевидными соотношениями:

$$\vec{E}_x^B = \vec{x}_0 E_r^B \cos \varphi; \quad \vec{E}_y^B = \vec{y}_0 E_r^B \sin \varphi. \quad (3.22)$$

Составляющие напряженности магнитного поля

Комплексная амплитуда азимутальной составляющей вектора \vec{H} имеет вид:

$$\vec{H}_\varphi^B = \vec{\varphi}_0 (H_y^B \cos \varphi - H_x^B \sin \varphi). \quad (3.23)$$

В этом выражении:

$$\vec{H}_x^B = -\vec{x}_0 \frac{k^2 P}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} h_B \sin \varphi \frac{e^{ikR_1}}{R_1};$$

$$\vec{H}_y^B = \vec{y}_0 \frac{k^2 P}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} h_B \cos \varphi \frac{e^{ikR_1}}{R_1}, \quad (3.24)$$

где $h_B = ikr g - i\Delta krg' + 2i\Delta U(\delta)$.

Все другие величины, входящие в эти выражения, определены выше.

3.3. АНАЛИЗ ВЫПОЛНЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА ИДЕАЛЬНО ПРОВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

На идеально проводящей поверхности касательные составляющие вектора напряженности электрического поля (\vec{E}_τ) и нормальные составляющие вектора напряженности магнитного поля (\vec{H}_n) должны быть равными нулю. В структуре поля рассмотренных ЭЭВ таковыми составляющими являются:

$$E_x^I = Ae_x, \quad E_y^I = Be_y, \quad E_r^B = Ce_4, \quad H_z^I = Dh_z,$$

где A, B, C, D – функции, заведомо не равные нулю.

При $\sigma = \infty$, $z = 0$ ряд величин, входящих в расчетные выражения для e_x, e_y, e_4, h_z , обращаются в ноль или единицу: $\delta = S_0 = S = \Omega = 0$, $\Delta = 1$, $I(\delta) = 1$.

Относительно функций $I(1/\delta)$ и $U(1/\delta)$ заметим следующее. Из формул (3.16) при $\sigma = \infty$, $z = 0$ следует, что $|S| = |S_0| = \infty$. По физическому смыслу параметр S является «численным расстоянием» при определении функции ослабления. Известно [27], что при $|S| \rightarrow \infty$ величина $|y(z, r)| \rightarrow 0$, т.е. при $\sigma = \infty$ имеем $I(1/\delta) = U(1/\delta) = 0$. С учетом изложенного можно записать:

$$e_x = (c - c') \cos^2 \varphi + (g - g') \sin^2 \varphi;$$

$$e_y = (c - c') \cos \varphi \sin \varphi - (g - g') \cos \varphi \sin \varphi;$$

$$e_4 = (d + d');$$

$$h_z = -ikr(g - g').$$

Если учесть, что для любой точки плоскости $Z = 0$, справедливы равенства $R_1 = R_2$, $\cos \theta = -\cos \theta'$, то нетрудно показать, что $c = c'$, $g = g'$, $d = -d'$.

Следовательно, на идеально проводящей поверхности раздела нулевые граничные условия $E_\tau = H_n = 0$ выполняются, что подтверждает корректность приведенного решения задачи об излучении горизонтального и вертикального ЭЭВ над реальной почвой.

3.4. СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕМЕНТА ГЮЙГЕНСА

Решение задачи об излучении элемента Гюйгенса является базовым при разработке численных методов анализа электромагнитной обстановки вблизи апертурных антенн технических средств, работающих в верхней части диапазона УВЧ, а также в СВЧ и КВЧ диапазонах. Максимальная длина волны, соответствующая упомянутому участку частотного спектра не превышает нескольких десятков сантиметров, а в большинстве технических средств используются длины волн менее 10 см. Антенны, как правило, относятся к классу апертурных и являются остронаправленными. Их высота подвеса над подстилающей поверхностью существенно превышает длину волны. Все это позволяет считать, во-первых, что подстилающая поверхность (земля, крыша зданий и т.п.) не оказывают заметного регулярного влияния на структуру поля в расчетных точках вблизи антенны, во-вторых, что расчетная точка всегда находится в дальней зоне относительно любого элемента Гюйгенса, расположенного на апертуре антенны.

Пусть элемент Гюйгенса расположен в центре декартовой (XYZ) и совмещенной с ней сферической (r, θ, φ) системы координат – рис. 3.3.

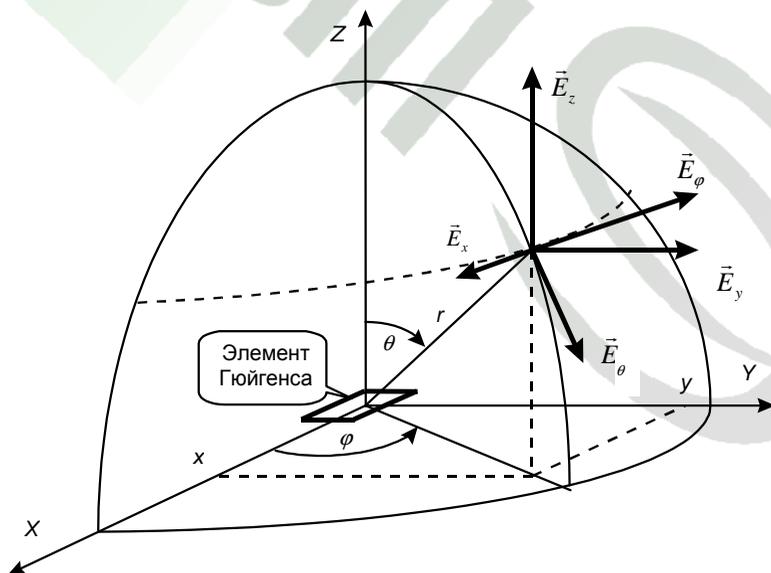


Рис. 3.3. Структура поля элемента Гюйгенса

В дальней зоне в произвольном направлении, характеризуемом координатами θ и φ , комплексные амплитуды вектора напряженности электрического поля рассчитываются по формулам [54]:

$$\begin{aligned}\bar{E}_\theta &= -\bar{\theta}_0 i \frac{E_0 S}{2r\lambda} (1 + \cos\theta) \sin\varphi e^{-ikr} = \bar{\theta}_0 E_\theta; \\ \bar{E}_\varphi &= -\bar{\varphi}_0 i \frac{E_0 S}{2r\lambda} (1 + \cos\theta) \cos\varphi e^{-ikr} = \bar{\varphi}_0 E_\varphi,\end{aligned}\quad (3.25)$$

где:

E_0 – значение напряженности электрического поля, возбуждающего элемент Гюйгенса;

S – площадь элемента Гюйгенса.

Вектор напряженности магнитного поля в дальней зоне в любом направлении определяется выражением:

$$\bar{H} = \frac{1}{120\pi} [\bar{E}, \bar{r}_0], \quad (3.26)$$

где \bar{r}_0 – координатный орт переменной r .

Декартовы составляющие комплексной амплитуды вектора \bar{E} в той же расчетной точке определяются через составляющие E_θ и E_φ сферической системы координат:

$$\begin{aligned}\bar{E}_x &= \bar{x}_0 (-E_\varphi \sin\varphi + E_\theta \cos\varphi \cos\theta); \\ \bar{E}_y &= \bar{y}_0 (E_\varphi \cos\varphi + E_\theta \sin\varphi \cos\theta); \\ \bar{E}_z &= \bar{z}_0 E_\theta \cos\theta,\end{aligned}\quad (3.27)$$

где $\varphi = \arctg \frac{y}{x}$.

ИЗЛУЧАЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА НЧ И СЧ ДИАПАЗОНОВ

4.1. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН НЧ И СЧ ДИАПАЗОНОВ

В соответствии с международным регламентом радиосвязи к диапазону низких частот (НЧ) относятся частоты от 30 до 300 кГц, к диапазону средних частот (СЧ) - от 300 до 3000 кГц. Им соответствуют километровой (10...1 км) и гектометровый (1000...100 м) диапазоны радиоволн (см. табл. 1.1). В отечественной технической литературе радиоволны километрового диапазона часто называются длинными волнами, а радиоволны гектометрового диапазона - средними. Радиоволны указанных диапазонов используются, как правило, для организации радиовещания в полосах частот 525...1605 кГц и 150...285 кГц. Есть области специального применения - радионавигация, радиосвязь.

На распространение радиоволн НЧ и СЧ диапазонов существенное влияние оказывает поверхность Земли и ионосфера - ионизированная область атмосферы, расположенная на высотах, превышающих 50 км. Отражение радиоволн указанных диапазонов в ионосфере обусловлено наличием в ней ионизированных слоев, которым присвоены названия D и E.

Радиоволны НЧ отличаются постоянством условий распространения. Постоянство выражается в том, что их прохождение не сопровождается резкими изменениями напряженности поля в месте приема или внезапными нарушениями связи. Можно сказать, что радиоволны НЧ диапазона распространяются как бы в своеобразном «сферическом волноводе», внутренние стенки которого образуются земной

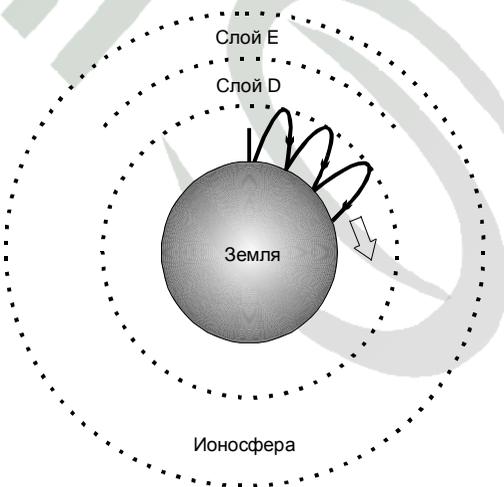


Рис. 4.1. Распространение радиоволн НЧ диапазона в «сферическом» волноводе

поверхностью и нижней границей ионосферы (рис. 4.1). В дневные часы эта граница находится в нижней части слоя D на высоте 60-70 км, а в ночные часы (когда слой D исчезает) - в нижней части слоя E на высоте порядка 90-100 км. Электромагнитное поле, создаваемое передающей антенной, можно представить совокупностью многих элементарных лучей, которые последовательно отражаются от ионосферы и земной поверхности, взаимодействуют между собой и образуют направляемую электромагнитную волну.

Радиоволны СЧ днем распространяются как поверхностные - за счет дифракции на сферической выпуклости Земли. Дело в том, что отражение радиоволн СЧ диапазона происходит в области слоя E, поэтому они дважды (при входе в слой E и при выходе из него) проходят через слой D, где испытывают очень большое поглощение. С наступлением темноты поглощение в слое D существенно уменьшается и радиоволны получают возможность распространяться и как земные, и как пространственные (рис. 4.2). В этом заключается важнейшая особенность распространения радиоволн СЧ диапазона. Интерференция поверхностной и пространственной волн приводит к замиранию сигнала в точке приема - явление фединга. Земные радиоволны способны обеспечить дальность связи на расстоянии 300...400 км, а пространственные - до 2000 км.

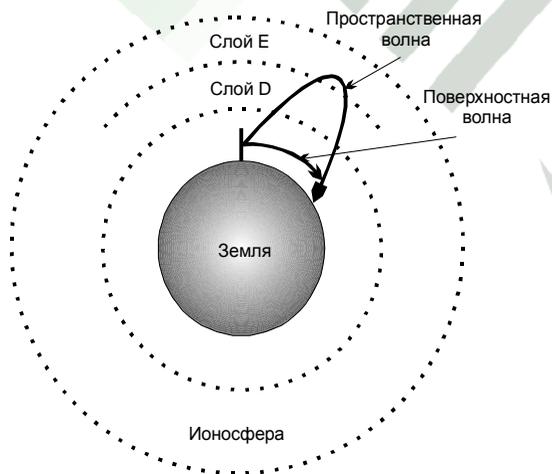


Рис.4.2. Распространение радиоволн СЧ диапазонов в виде земной и пространственной волн

Многие особенности распространения радиоволн указанных диапазонов, имеющие непосредственное отношение к работе систем радиовещания и радиосвязи (случайные, суточные и сезонные колебания напряженности поля, влияние 11-летнего периода солнечной активности, ионосферных возмущений), в настоящей книге не рассматриваются. С точки зрения электромагнитной экологии нас будет интересовать поле в непосредственной близости от антенн НЧ и СЧ диапазонов.

4.2. ХАРАКТЕРИСТИКА И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИЗЛУЧАЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

4.2.1. Радиопередатчики

К техническим средствам СЧ и НЧ диапазонов относят радиосистемы передачи, предназначенные для организации звукового вещания (радиовещания).

Уровень интенсивности излучения вблизи технических средств СЧ и НЧ диапазонов определяется очень многими факторами, главные из которых: мощность и частота излучения, тип передающей антенны, ее пространственная ориентация и высота подвеса относительно земной поверхности, электрофизические параметры почвы.

Прежде, чем перейти к изложению метода анализа оценки электромагнитной обстановки вблизи радиотехнических объектов СЧ и НЧ диапазонов, приведем некоторые общие сведения об основных технических средствах станций.

Каждая радиопередающая станция оснащается соответствующими радиопередатчиками, антеннами и различным вспомогательным оборудованием. Радиопередатчики и вспомогательное оборудование размещаются в одном или нескольких технических зданиях. Передающие антенны размещаются на специальной территории, называемой антенным полем. Антенны связаны с техническим зданием соединительными линиями (фидерами).

Электропитание радиостанций осуществляется по ЛЭП (основной и резервной), для резервирования линий часто предусматривается автономная электростанция. Линии электропередачи на радиостанции заканчиваются трансформаторной подстанцией или высоковольтным распределительным устройством.

Основным оборудованием радиопередающих станций являются радиопередатчики для радиовещания и для радиосвязи.

Радиопередатчики СЧ и НЧ диапазонов - это сложные устройства, содержащие возбудитель, формирующий радиочастотный сигнал, и усилитель мощности этого сигнала. Они оснащены системой управления, блокировки и сигнализации, системой охлаждения радиоламп, колебательных контуров и других тепловыделяющих элементов, различными устройствами защиты.

Типы наиболее распространенных радиопередатчиков диапазонов СЧ и НЧ приведены в табл. 4.1. Эти данные заимствованы из [31,32].

Радиовещательные передатчики диапазонов СЧ и НЧ

| Тип радиопередатчика | Номинальная мощность, кВт | Диапазон частот, кГц |
|----------------------|---------------------------|----------------------|
| Прибой-1 | 1000 | 526,5...1606,5 |
| Прибой-0,5 | 500 | 526,5...1606,5 |
| Прибой-1Д | 1000 | 148,5...283,5 |
| Прибой-0,5Д | 500 | 148,5...283,5 |
| Прилив-2М | 2000 | 526,5...1606,5 |
| Прилив-1М | 1000 | 526,5...1606,5 |
| Прилив-2Д | 2000 | 148,5...283,5 |
| Прилив-1Д | 1000 | 148,5...283,5 |
| ПСЧ-150-1 | 150 | 526,5...1606,5 |
| ПНЧ-150-1 | 150 | 148,5...283,5 |
| ПСЧА-1-1 | 1 | 526,5...1606,5 |
| Зона-СВ | 0,05; 0,2 | 522...1710 |
| ПСЧ-0,2 | 0,2 | 522...1611 |

4.2.2. Передающие антенны

Передающие антенны диапазонов НЧ и СЧ строятся на основе вертикальных мачт, башен или проводов [33, 34]. Это объясняется спецификой распространения радиоволн - вдоль земли хорошо распространяются волны вертикальной поляризации. Антенны, как правило, представляют собой очень громоздкие конструкции. По степени концентрации излучаемой электромагнитной энергии в горизонтальной плоскости различают ненаправленные и направленные антенны. К ненаправленным антеннам относятся антенны-мачты, Г-образные и Т-образные антенны. К направленным относятся антенные системы: антенна с рефлектором, СВ 2+2, СВ 4+4.

Антенны-мачты. Различают несколько модификаций антенн-мачт: АМНП – антенна-мачта нижнего питания, АМВП – антенна-мачта верхнего питания, АМШП – антенна-мачта шунтового питания, АРРТ – антенна с регулируемым распределением тока.

Одиночные антенны-мачты - это вертикальные несимметричные вибраторы с высотой 100...270 м. Все они отличаются друг от друга схемой системы питания, которая позволяет решать различные задачи: упростить конструкцию (АМВП), улучшить согласование антенны с передатчиком (АМШП), получить необходимые направленные характеристики в вертикальной плоскости (АРРТ).

На рис. 4.3 показана АМНП. В качестве излучателя используется конструкция самой мачты. Тело мачты имеет изолированное от земли основа-

ние. В вертикальном положении мачта поддерживается системой оттяжек, секционированных изоляторами. Питание антенны-мачты нижнего питания осуществляется концентрическим фидером. Внутренний провод фидера подсоединен непосредственно к основанию мачты, а внешний к системе заземления (80...120 радиальных проводов, имеющих длину, примерно равную высоте мачты и уложенных в землю на глубину примерно 0,5 м). Часто на верхнем торце мачты ставят металлический диск – емкостную нагрузку, которая позволяет улучшить некоторые электрические характеристики антенны и уменьшить высоту мачты. Высота АМНП выбирается обычно в пределах $0,5 \leq H/\lambda \leq 0,7$.

Применение опорных изоляторов повышает стоимость антенны и снижает надежность ее работы. Поэтому значительный интерес представляют антенны-мачты с заземленным основанием. Самым распространенным типом такой антенны является диапазонная антенна-мачта шунтового питания (АМШП), одна из реализаций которой показана на рис. 4.4. Заземленная мачта обвешивается системой проводников (наклонные провода, перемычка и собирательное кольцо). Шунтом служит часть ствола мачты от основания до перемычки, которая соединяет ствол с системой излучающих проводов. У основания мачты нижние наклонные провода изолируют-

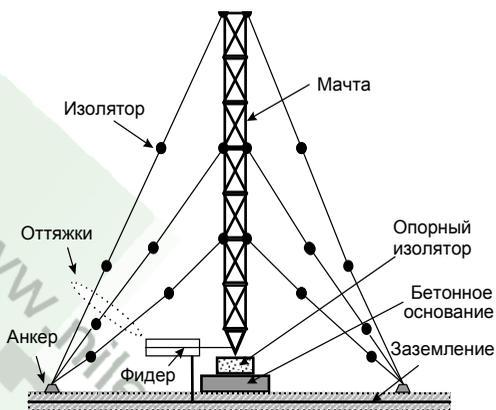


Рис. 4.3. Конструкция антенны-мачты нижнего питания

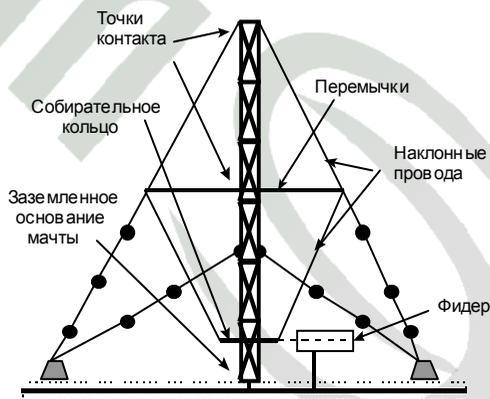


Рис. 4.4. Конструкция антенны-мачты шунтового питания

ся от основания мачты и соединяются с собирательным кольцом, к которому подводится питание. Система заземления под АМШП выполняется, как у АМНП. Высота АМШП выбирается обычно в пределах $0,15 \leq H/\lambda \leq 0,5$.

Антенны-мачты верхнего питания (АМВП) также, как и АМШП, не требуют опорного изолятора. Антенна представляет собой заземленную мачту с емкостной частью (зонтиком), изолированной от ствола мачты (рис. 4.5). Внутри мачты проложен несимметричный концентрический фидер, внутренний провод которого подключен к проводам зонтика, экран - к телу мачты. С точки зрения излучения генератор как бы включается между вершиной мачты и зонтиком. У заземленного основания мачты имеет место пучность тока. По сравнению с АМНП эта антенна имеет больший коэффициент усиления и более широкую полосу пропускания. Система заземления под АМВП выполняется как у АМНП.

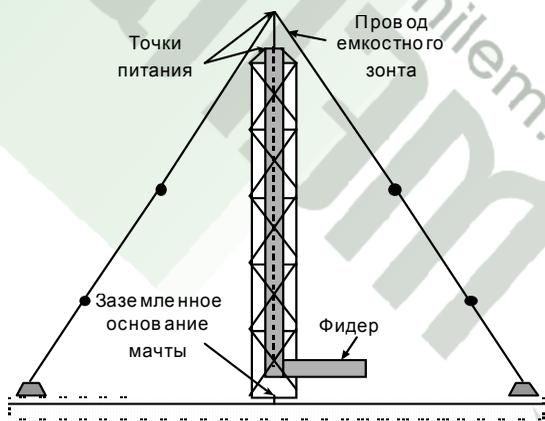


Рис. 4.5. Конструкция антенны-мачты верхнего питания

Широкое распространение для радиовещания в диапазонах СЧ и НЧ получили антенны с регулируемым распределением тока (АРРТ). Они обладают в широком диапазоне волн повышенным коэффициентом усиления и лучшими антифединговыми свойствами по сравнению с АМНП. Важной особенностью АРРТ является возможность

управления диаграммой направленности в вертикальной плоскости. В случае необходимости одна антенна может использоваться на любой волне в СЧ и НЧ диапазонах. Имеются конструкции АРРТ, как с изолированным основанием, так и с заземленным. На рис. 4.6 показана АРРТ с изолированным основанием [34]. Тело мачты и внутренняя поверхность цилиндра из проводов образуют вертикальную линию питания (фидер), по которой подводится энергия к системе излучающих наклонных проводов. Внешняя часть цилиндра из проводов является нижней излучающей частью антенны. Система заземления под АРРТ выполняется, как у АМНП.

Конструкция антенны позволяет излучать электромагнитную энергию равномерно в горизонтальной плоскости и концентрировать ее максимум вдоль поверхности Земли в вертикальной плоскости.

Г и Т-образные антенны. Эти антенны используются в качестве передающих для сравнительно небольших мощностей передатчиков до 100 кВт в системах ведомственной связи (речфлот, и др.). Направленные свойства - как у одиночной антенны-мачты. Общий вид Т-образной антенны показан на рис. 4.7.

Антенная система с рефлектором - это две одинаковые мачты АМНП, АМВП, АМШП или АРРТ (рис. 4.8). Одна мачта подключается к радиопередатчику, другая - соединяется с реактивным сопротивлением настройки.

Антенная система СВ 2+2 представляет собой четыре антенны-мачты расположенные в углах квадрата (рис. 4.9), имеющие мощное высокочастотное заземление. Две антенны-мачты любой

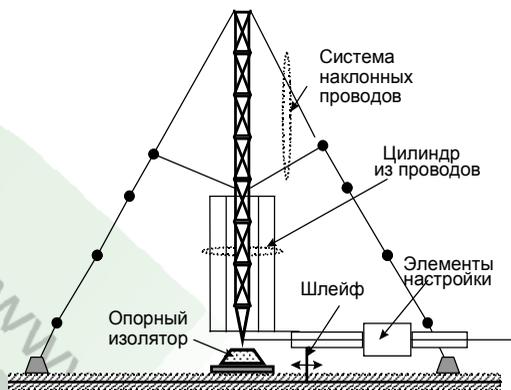


Рис. 4.6. Конструкция антенны с регулируемым распределением тока

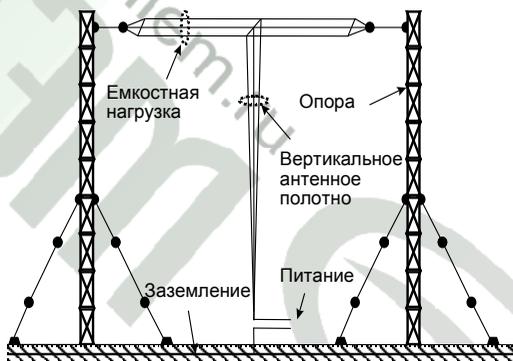


Рис. 4.7. Конструкция Т-образной антенны

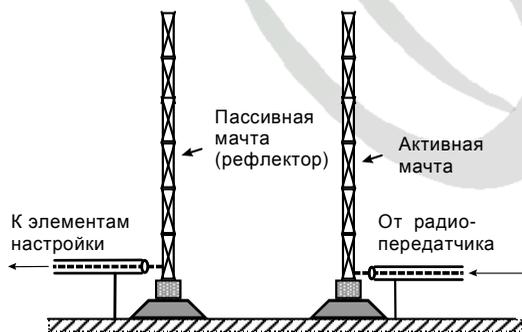


Рис.4.8. Конструкция антенной системы с рефлектором

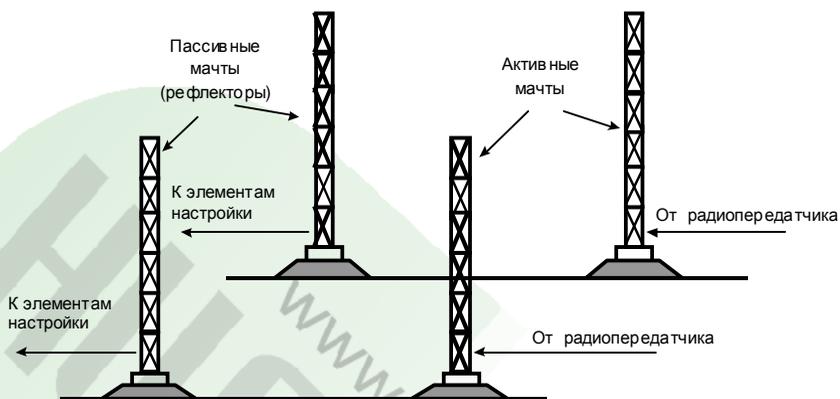


Рис. 4.9. Конструкция антенной системы СВ 2+2

стороны квадрата питаются от передатчика, а две другие выполняют функции пассивных рефлекторов. Направление максимального излучения в горизонтальной плоскости скачком меняется на 90° и 180° переключением фидеров. Направленные свойства в вертикальной плоскости определяются направленными свойствами одиночной антенны-мачты, входящей в антенную систему. Наиболее эффективна антенная система, состоящая из четырех антенн АРРТ. Такая антенная система может работать в диапазоне 185...300 м (при этом высота мачт 257 м, расстояние между ними - 70 м) или в диапазоне 300...570 м (при этом высота мачт 257 м, расстояние между мачтами 80..90 м). В диапазоне 1000...2000 м антенная система может быть использована для ненаправленного вещания. В этом случае все антенны-мачты включаются параллельно и питаются синфазно.

Антенная система СВ 4+4 представляет собой два ряда антенн типа АМШП по четыре в ряду (рис. 4.10) и имеют разветвленное высокочастотное заземление. Общая площадь, занимаемая одной антенной системой, составляет примерно 25 га. Четыре антенны-мачты в одном ряду питаются от радиопередатчика, а четыре других - выполняют роль пассивного рефлектора. Расстояние между вибраторами в ряду 110 м, а между рядами - 75 м. Рабочий диапазон волн антенной системы с указанными размерами 186...572 м. Конструкция антенной системы позволяет управлять диаграммой направленности в горизонтальной плоскости в пределах $\pm 30^\circ$. Направленные свойства в вертикальной плоскости определяются направленными свойствами одиночной антенны-мачты, входящей в антенную систему.

В диапазонах СЧ и НЧ применяются несимметричные экранированные фидеры, которые по принципу своего действия не создают значительных уровней напряженности поля в окружающем пространстве и поэтому не

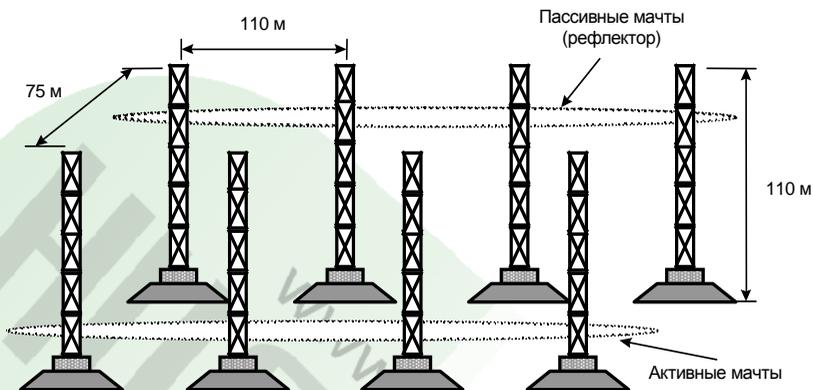


Рис. 4.10. Конструкция антенной системы СВ 4+4

представляют особого интереса с точки зрения электромагнитного прогнозирования излучающих объектов.

4.3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА БЛИЖНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Антенны-мачты. При решении задач электромагнитного прогнозирования антенны СЧ и НЧ диапазона можно считать тонкопроволочными структурами, что позволяет каждый излучающий вибратор или провод представить совокупностью множества элементарных электрических вибраторов (ЭЭВ). Соответственно уровень и структура электромагнитного поля в произвольной точке пространства будет определяться суперпозицией полей всех ЭЭВ.

В разделе 3.1 приведены аналитические выражения для составляющих ЭМП вертикального ЭЭВ, ориентированного параллельно оси Z (рис. 3.2). Считая $\gamma = r, z$, любую цилиндрическую составляющую поля (3.20) можно записать в виде E_{γ}^B .

Поля несимметричных вибраторов - антенн-мачт определяются интегрированием составляющих E_{γ}^B по их длине с учетом распределения токов.

Для антенн типа АМНП (рис. 4.3), АМШП (рис. 4.4), АМВП (рис. 4.5) и АРПТ (рис. 4.6) цилиндрическая компонента в обобщенном представлении имеет вид:

$$E_{\gamma}^{AM} = \int_0^l E_{\gamma}^B d\tau, \quad (4.1)$$

где индекс AM в обозначении составляющей напряженности поля в левой части указывает на связь с типом антенны (в данном случае AM - антенна-мачта), $d\tau$ - элемент длины антенны, расположенный на вертикальной оси мачты, l - высота антенны-мачты.

Выражение (4.1) в сочетании с формулами для расчета E_γ^B представляет собой обобщенную математическую модель излучения антенн-мачт типа АМНП, АМШП, АМВП, АРРТ.

Практическое применение модели (4.1) предполагает, что предварительно решен вопрос о законе распределения тока по антенне. Существует много методов расчета распределения тока по длине вибраторных антенн [35, 36], однако для задач, рассматриваемых в рамках настоящей монографии, можно ограничиться предположением о синусоидальном законе распределения тока. Следует заметить, что основные фундаментальные исследования по теории вибраторных антенн были выполнены именно в предположении о синусоидальном характере распределения тока. Анализ, выполненный в [37] показал, что учет распределения тока, полученного методом интегральных уравнений, не приводит к существенным изменениям в результатах оценки ближних полей вибраторных антенн.

Амплитуда тока I , текущего по вибратору, в пучности его распределения при известных: мощности радиопередатчика P , КПД антенны η_a и фидера η_ϕ , сопротивлении излучения антенны R_Σ , определяется по формуле:

$$I = \sqrt{\frac{2P\eta_a\eta_\phi}{R_\Sigma}}. \quad (4.2)$$

Основная трудность нахождения амплитуды тока заключается в определении сопротивления излучения антенны с учетом реальных параметров почвы. Анализ влияния реальной почвы на сопротивление излучения линейных проводов дан в [38]. Многолетняя инженерная и эксплуатационная практика показала, что для расчета сопротивления излучения антенн СЧ и НЧ диапазонов вполне приемлемо допущение об идеальной проводимости почвы. Этим допущением всегда пользуются и при решении задач электромагнитной экспертизы излучающих объектов (в части определения R_Σ).

Использованные предпосылки (идеальная проводимость почвы и синусоидальное распределение тока) сводят задачу нахождения сопротивления излучения антенны-мачты и амплитуды тока в ней к хорошо изученной задаче о несимметричном вибраторе над идеально проводящей поверхностью. Заметим, что принятое допущение идеальной проводимости почвы распространяется только на задачу расчета сопротивления излучения антенны и амплитуды тока. Напряженность электрического поля рассчитывается с учетом реальных параметров.

Отдельные составляющие E_γ^B (см. раздел 3.1) не синфазны, что объясняется комплексным характером поверхностного импеданса почвы. Это же можно сказать и о составляющих, которые определяют поле рассматриваемых антенн E_γ^{AM} . В рамках задач электромагнитного прогнозирования целесообразно рассматривать худший случай - случай синфазности всех составляющих, когда уровень суммарного поля будет максимальным. Суммарное значение напряженности электрического поля в произвольной точке можно записать в виде:

$$E_\Sigma^{AM} = \sqrt{|E_r^{AM}|^2 + |E_z^{AM}|^2} = \sqrt{\sum_\gamma |E_\gamma^{AM}|^2}. \quad (4.3)$$

Г- и Т-образные антенны. В этих антеннах наряду с вертикальной частью есть и горизонтальная. Обобщенную математическую модель излучения Г- и Т-образных антенн удобно строить на основе выражений (3.3) для горизонтального элементарного электрического вибратора (E_x^G, E_y^G, E_z^G) и (3.22) для вертикального - (E_x^B, E_y^B). Декартовы составляющие, созданные в произвольной точке пространства вертикальным и горизонтальным проводом антенны можно записать в обобщенном виде (при $\gamma_1 = x, y, z$ - для вертикального провода и $\gamma_2 = x, y, z$ - для горизонтального провода):

$$E_{\gamma_1}^{B\Pi} = \int_0^h E_{\gamma_1}^B d\tau_1, \quad (4.4)$$

$$E_{\gamma_2}^{Г\Pi} = \int_0^l E_{\gamma_2}^G d\tau_2, \quad (4.5)$$

где $d\tau_1$ и $d\tau_2$ элементы длины вертикального и горизонтального провода, совпадающие с их осями, h – длина вертикального провода, l – длина горизонтального провода.

Распределение тока на вертикальной части Г- и Т-образных антенн совпадает с распределением на вертикальных несимметричных вибраторах нижнего питания с емкостной нагрузкой. Распределение тока на горизонтальной части аналогично распределению на линейном симметричном вибраторе с синфазным питанием плеч.

Декартовы составляющие поля Г- и Т-образных антенн $E_\gamma^{ГТА}$ можно записать в виде:

$$E_\gamma^{ГТА} = E_{\gamma_1}^{B\Pi} + E_{\gamma_2}^{Г\Pi}. \quad (4.6)$$

Суммарное значение напряженности поля при условии синфазного сложения составляющих:

$$E_{\Sigma}^{ГТА} = \sqrt{\sum_{\gamma} |E_{\gamma}^{ГТА}|^2} \quad (4.7)$$

Антенные системы: антенна с рефлектором, СВ 2+2 и СВ 4+4. Для многовибраторных антенных систем: антенна с рефлектором (рис. 4.8), СВ 2+2 (рис. 4.9), СВ 4+4 (рис. 4.10) составляющие напряженности электрического поля определяются суммированием соответствующих компонент, создаваемых каждым элементом (мачтой). Любая цилиндрическая составляющая поля антенной системы может быть представлена в обобщенном виде:

$$E_{\gamma}^{AC} = \sum_{i=1}^k E_{\gamma}^A + \sum_{i=1}^k E_{\gamma}^{\Pi}, \quad (4.8)$$

где $\gamma = r, z$; k - число активных (пассивных) мачт (для антенны с рефлектором $k = 1$, для СВ 2+2 $k = 2$, для СВ 4+4 $k = 4$).

Значения E_{γ}^A и E_{γ}^{Π} определяются в соответствии с (4.1).

При анализе ближних полей антенных систем необходимо помнить о возможном изменении режима их работы - переключении направления максимального излучения. Переключение достигается соответствующим выбором активных и пассивных излучателей, а также необходимой фазировкой питания за счет элементов настройки. Все это необходимо учитывать при расчетах распределений токов по отдельным вибраторам.

Распределение токов по элементам антенны (активным и пассивным мачтам) определяется либо известными методами анализа многовибраторных систем [36], либо задается таким, как на соответствующих одиночных мачтах, из которых состоит антенная система.

Суммарное значение напряженности электрического поля в произвольной точке можно представить в виде

$$E_{\Sigma}^{AC} = \sqrt{\sum_{\gamma} |E_{\gamma}^{AC}|^2}. \quad (4.9)$$

Напомним, что использование принципа суперпозиции, предполагает суммирование в едином координатном базисе.

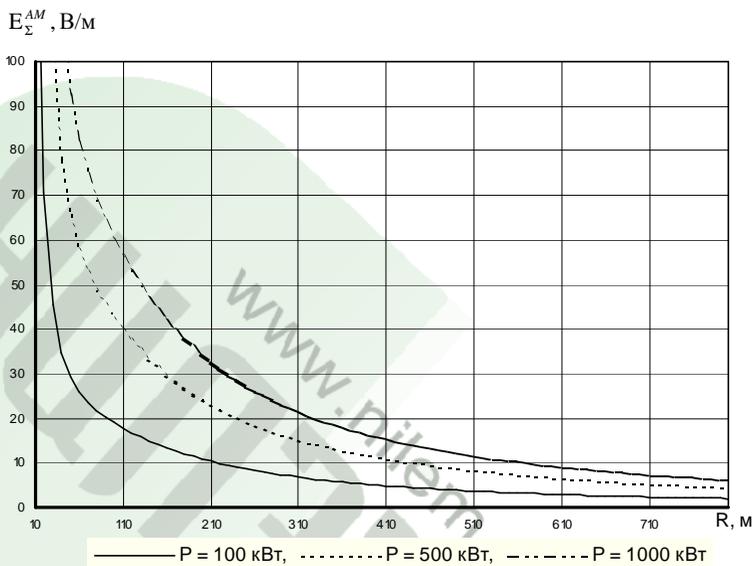
4.4. Электромагнитная обстановка вблизи технических средств НЧ и СЧ диапазонов

Рассмотрим как изменяется ЭМП вблизи различных антенн НЧ и СЧ диапазонов. На рис. 4.11 а, б приведены зависимости суммарного значения напряженности поля от расстояния для антенны АМНП высотой 100 м на длине волны 200 м при сухой почве на высотах 2 и 20 метров соответственно для различных излучаемых мощностей. Эти зависимости монотонные, и суммарное поле для антенн таких типов слабо зависит от высоты точки наблюдения. Естественно, что с увеличением излучаемой мощности поле возрастает пропорционально корню квадратному из мощности. Монотонность зависимостей иногда нарушается для коротких длин волн в непосредственной близости от антенн (рис. 4.12), что объясняется проявлением интерференционных явлений полей от различных участков антенны.

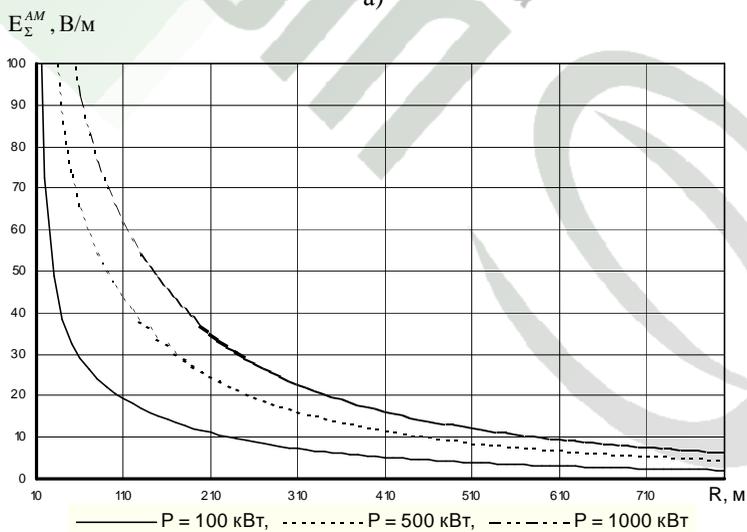
На рис. 4.13 приведен пример весьма важных для понимания сути электромагнитного прогнозирования зависимости суммарного поля от параметров почвы для АМНП при излучаемой мощности 500 кВт на высоте 2 м. Разброс и неопределенность параметров почвы приводят к соответствующей погрешности в определении поля при реальном электромагнитном прогнозировании. Эта погрешность в зависимости от расстояния может достигать 6 дБ. С точки зрения санитарно-гигиенической электромагнитной экспертизы излучающих объектов НЧ и СЧ диапазонов, если для обследуемых территорий не определены преимущественные параметры почвы, прогнозирование необходимо проводить для наихудшего случая, т.е. для сырой почвы ($\epsilon = 20$, $\sigma = 0,1$ См/м).

Санитарно-защитные зоны для антенн в виде одиночных вертикальных вибраторов и одиночных антенн-мачт представляют собой окружности с центром в месте расположения антенны. По зависимостям ЭМП от расстояния легко определяется радиус санитарно-защитной зоны по предельно допустимому уровню ЭМП, который для диапазона НЧ составляет 25 В/м, а для диапазона СЧ - 15 В/м.

На рис. 4.14 показаны санитарно-защитные зоны для типовой Т-образной антенны, длина плеча горизонтальной части которой равна 44 м, высота вертикальной части - 29 м. Расчеты проводились на длине волны 850 м для сухой почвы ($\epsilon = 3$, $\sigma = 0,001$ См/м). Конфигурация зон согласуется с представлением о хорошей равномерности излучения Т-образной антенны в горизонтальной плоскости.



а)



б)

Рис. 4.11. Распределение поля вблизи АМНП в зависимости от излучаемой мощности: а - на высоте 2 м; б - на высоте 20 м.

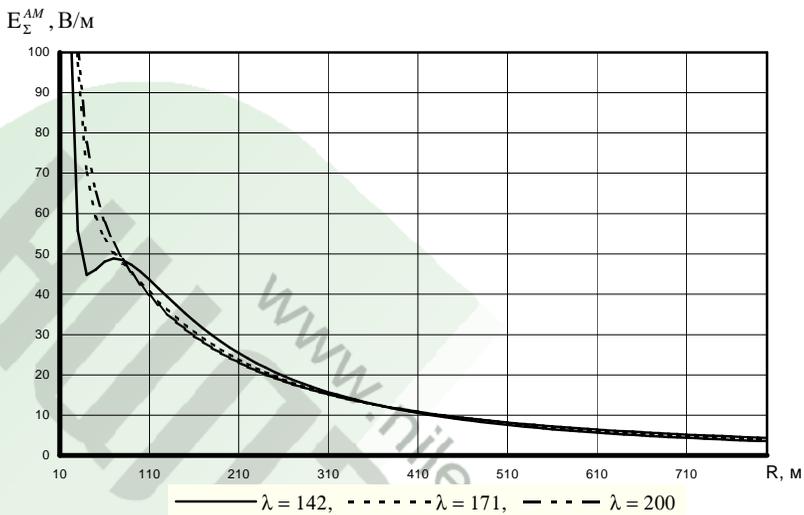


Рис. 4.12. Распределение поля вблизи АМНП в зависимости от длины волны, м

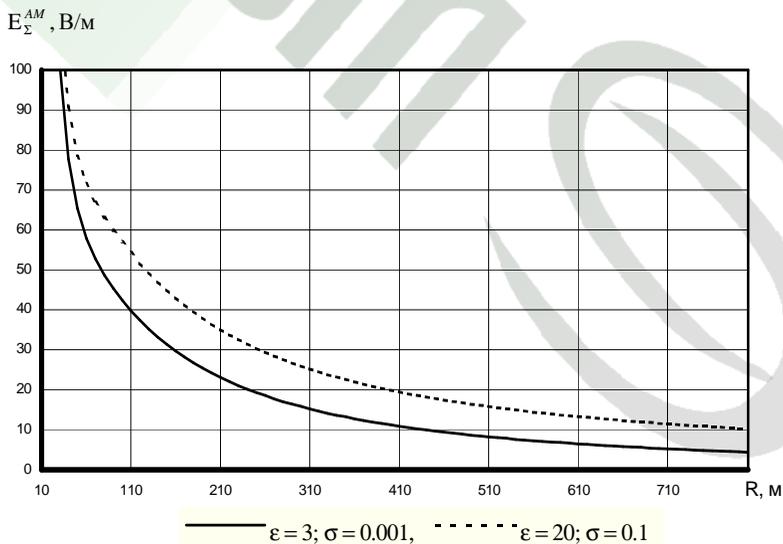
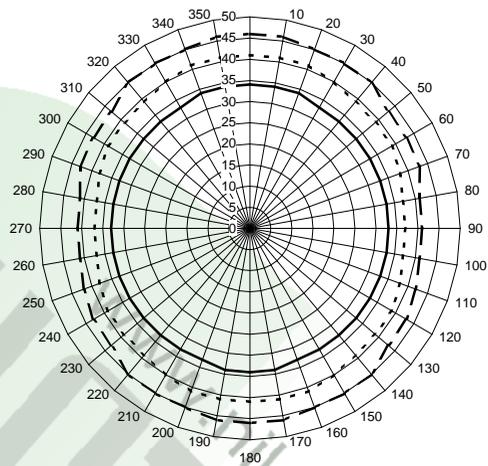
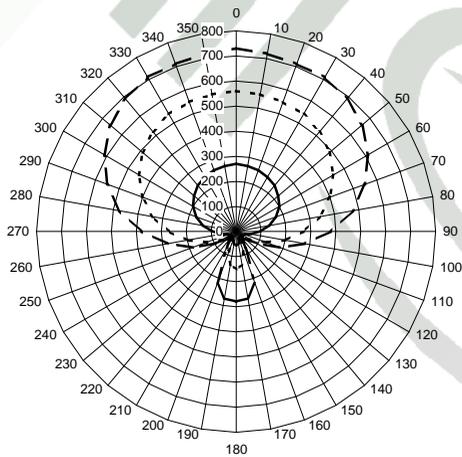


Рис. 4.13. Распределение поля вблизи АМНП в зависимости от параметров почвы, σ в См/м



— $P = 7 \text{ кВт}$, - - - $P = 20 \text{ кВт}$, - · - $P = 50 \text{ кВт}$

Рис. 4.14. Границы санитарно-защитных зон Т-образной антенны для различных излучаемых мощностей



— $P = 100 \text{ кВт}$, - - - $P = 500 \text{ кВт}$, - · - $P = 1000 \text{ кВт}$

Рис. 4.15. Границы санитарно-защитных зон антенны с рефлектором для различных излучаемых мощностей

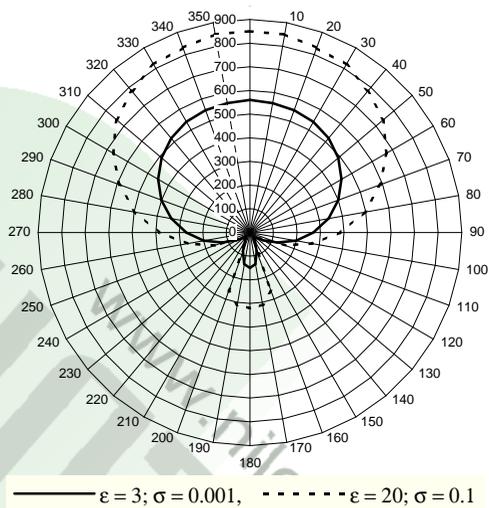


Рис. 4.16. Границы санитарно-защитных зон антенны с рефлектором для различных типов почв (σ в См/м)

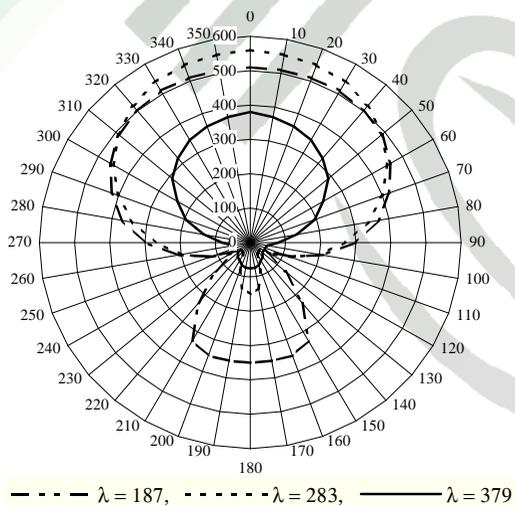


Рис. 4.17 Границы санитарно-защитных зон антенны с рефлектором на различных длинах волн, м

На рис. 4.15-4.17 приводятся зависимости санитарно-защитных зон (высота точки наблюдения 2 м) антенны с рефлектором (направленной антенны) в зависимости от излучаемой мощности, типа почвы и длины волны в рабочем диапазоне. Излучаемая мощность для зависимостей, приведенных на рис. 4.16 и 4.17 составляет 500 кВт. Характер всех зависимостей повторяет характер диаграмм направленности этой антенны с четко выраженным направлением максимального излучения.

ИЗЛУЧАЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ВЧ ДИАПАЗОНА

5.1. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ВЧ ДИАПАЗОНА

К диапазону высоких частот (ВЧ) в соответствии с международным регламентом радиосвязи относятся частоты от 3 до 30 МГц. Им соответствует диапазон радиоволн от 10 до 100 м, называемый декаметровым (в отечественной технической литературе он часто называется коротковолновым). На распространение радиоволн ВЧ диапазона существенное влияние оказывает поверхность Земли и ионосфера – ионизированная область атмосферы, расположенная на высотах, превышающих 50 км. В соответствии с этим принято различать земную волну и волну ионосферную (рис. 5.1).

Основным видом распространения радиоволн ВЧ диапазона является распространение путем отражения от ионосферы (ионосферная волна). Земная волна сильно поглощается в полупроводящей почве: уже на расстоянии нескольких десятков километров от источника излучения ее энергия становится недостаточной для приема передаваемых сообщений с приемлемым качеством.

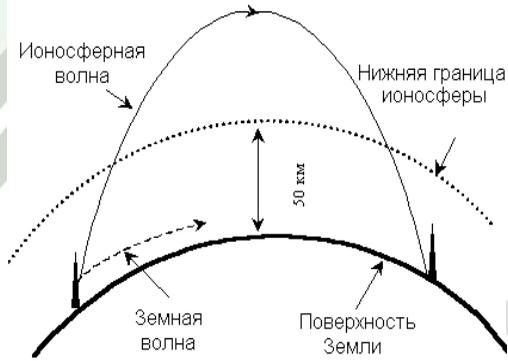


Рис. 5.1 Распространение радиоволн ВЧ диапазона в атмосфере Земли

Отражение радиоволн в ионосфере обусловлено наличием в ней ионизированных слоев, которым присвоены названия D, E, F (рис. 5.2) и происходит, как правило, в области слоя F, расположенной на высотах 200...400 км. Траектория распространения радиоволны от пункта передачи к пункту приема, прохождение по которой сопровождается одним отражением от ионосферы, называется ионосферным скачком. Протяженность радиолинии, измеренная вдоль поверхности Земли, в этом случае может быть от нескольких сотен километров до 2000...4000 км. Траектория радиоволны

может быть образована несколькими ионосферными скачками. В этом случае протяженность радиолинии существенно возрастает и может составлять многие тысячи километров (возможно даже огибание радиоволн Земного шара – явление кругосветного эха).

Ионосфера обладает существенной пространственно-временной неоднородностью – электронная концентрация слоев изменяется не только по высоте, но и по сезонам, месяцам и даже в течение суток. Это приводит к изменению условий отражения радиоволн от ионосферы и условий поглощения. Радиоволны различных частот проходят через ионосферу по различным траекториям и испытывают разное затуханием. С точки зрения обеспечения минимальной энергетики радиолинии выгодно работать на тех частотах, которые имеют наименьшее ослабление в ионосфере.

Для каждой декаметров радиолинии, как правило, выделяется несколько фиксированных радиочастот. На каждый месяц составляется волновое расписание, которое регламентирует, на каких из выделенных радиочастот следует работать в различные часы суток. Число переходов с одной частоты на другую (перестроек) для каждого передатчика может достигать 5...10 в сутки.

Переход на новую рабочую частоту может потребовать замены антенны. Поэтому каждый передатчик должен иметь возможность работать на одну из нескольких антенн. Для этих целей используется антенный коммутатор.

Знание волнового расписания – непременное условие для проведения электромагнитной экспертизы передающих радиостанций ВЧ диапазона.

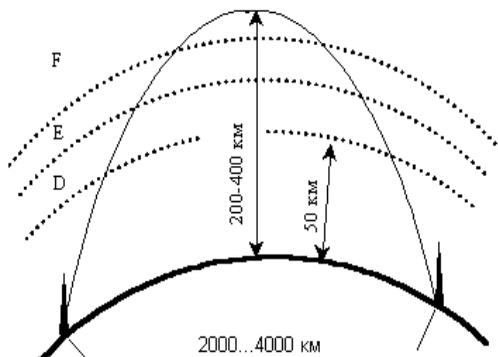


Рис. 5.2 Ионосферное распространение радиоволн ВЧ диапазона

Весь диапазон ВЧ можно разбить на три поддиапазона:

- дневные частоты (12...30 МГц);
- ночные частоты (3...8,6 МГц);
- промежуточные частоты (8,6...12 МГц), используемые в часы полувосхвещения точек отражения от ионосферы.

Такое деление частот является условным, поскольку границы между поддиапазонами сильно зависят от времени года, фазы 11-летнего периода

солнечной активности и географического положения конечных пунктов радиотрассы.

Применение дневных (относительно высоких) частот возможно вследствие того, что в дневные часы освещенность ионосферы максимальна, электронная концентрация в слое F достигает больших значений, и от этого слоя могут отражаться радиоволны высоких частот. Эти радиоволны испытывают незначительное поглощение в слоях D и E. Применение ночных (относительно низких) частот обусловлено тем, что с наступлением темноты электронная концентрация в слое F уменьшается и для эффективного отражения от ионосферы частота используемых волн должна быть понижена. С наступлением темноты уменьшается электронная концентрация и в слое E, а слой D вообще исчезает. Поэтому ночью поглощение радиоволн даже относительно низких частот не является чрезмерно большим.

Нормальные условия распространения нарушаются при возникновении так называемого спорадического слоя E_s, который может возникать в любое время суток и обладает в ряде случаев весьма значительной электронной концентрацией. Он становится отражающим слоем, поскольку расположен на уровне нормального слоя E – ниже слоя F. В этом случае слой F перестает оказывать влияние на распространение радиоволн.

Границы частотного диапазона, в пределах которого может находиться рабочая частота декаметровый радиолонии, определяются: верхняя – условиями отражения от ионосферы, нижняя – условиями поглощения. Верхняя граница – максимальная применимая частота (МПЧ), которая для данных условий отражается от ионосферы. Нижняя граница – наименьшая применимая частота (НПЧ), при которой надежность работы радиолонии оказывается минимально допустимой. Наряду с МПЧ и НПЧ при составлении волнового расписания используется понятие оптимальной рабочей частоты (ОРЧ). Обычно ее выбирают из условия $ОРЧ = (0,8...0,9) МПЧ$ и она является верхним пределом рабочего диапазона частот при составлении волнового расписания.

Обзор методов определения МПЧ, расчета НПЧ и ОРЧ приведен в [39]. Там же можно познакомиться с другими характерными особенностями распространения волн ВЧ диапазона: наличием замираний принимаемых сигналов, образованием зон молчания вокруг передатчиков, образованием радиозаха, влиянием 11-летнего периода солнечной активности, влиянием геомагнитных возмущений. Учет этих особенностей важен при расчете радиолоний и не существенен для решения задач электромагнитной экспертизы.

5.2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗЛУЧАЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ВЧ ДИАПАЗОНА

5.2.1. Радиопередатчики

К техническим средствам ВЧ диапазона относят радиосистемы передачи, предназначенные для организации линий декаметрового радиосвязи на различных уровнях взаимоувязанной сети связи России (магистральном, зонавом), межконтинентальной радиосвязи, звукового вещания для удаленных районов страны и за рубеж, передачи программ звукового вещания удаленным радиостанциям, резервных каналов различных систем передачи, радиосвязи с подвижными объектами.

Все радиосистемы имеют свою специфику в функциональном построении, технических характеристиках, возможностях. Однако они едины в следующем – все являются источником электромагнитного излучения. Уровень интенсивности излучения вблизи объектов определяется очень многими факторами, главные из которых: мощность и частота излучения, тип передающей антенны, ее пространственная ориентация и высота подвеса относительно земной поверхности, электрофизические параметры почвы.

Прежде чем перейти к изложению метода анализа оценки электромагнитной обстановки вблизи радиотехнических станций ВЧ диапазона, целесообразно дать хотя бы самые общие сведения об основных технических средствах станций.

Каждая радиопередающая станция оснащается соответствующими радиопередатчиками, антеннами и различным вспомогательным оборудованием. Радиопередатчики и вспомогательное оборудование размещаются в одном или нескольких технических зданиях. Передающие антенны размещаются на специальной территории, называемой антенным полем. Антенны связаны с техническим зданием соединительными линиями (фидерами).

Электропитание радиостанций осуществляется по ЛЭП (основной и резервной), для резервирования линий часто предусматривается автономная электростанция. Линии электропередачи на радиостанции заканчиваются трансформаторной подстанцией или высоковольтным распределительным устройством.

Основным оборудованием радиопередающих станций являются радиопередатчики для радиовещания и для радиосвязи. Для диапазона ВЧ подобная классификация радиопередатчиков в некоторой степени условна и полностью справедлива только для радиопередатчиков большой мощности (свыше 100 кВт). Менее мощные радиопередатчики часто используются как для целей вещания, так и для радиосвязи.

Радиопередатчики ВЧ диапазона – это сложные устройства, содержащие возбудитель, формирующий радиочастотный сигнал, и усилитель мощности этого сигнала. Они оснащены системой управления, блокировки и сигнализации, системой воздушного, водяного или пароиспарительного охлаждения радиоламп, колебательных контуров и других тепловыделяющих элементов, различными устройствами защиты. Для обеспечения возможности работы передатчика с различными антеннами (в соответствии с волновым расписанием) предусматривается система антенной коммутации.

Дальность радиосвязи или размеры зон обслуживания радиовещательных станций во многом определяется мощностью радиопередатчика. Для вещательных радиопередатчиков диапазона ВЧ установлены величины номинальной мощности 50, 100, 250, 500 и 1000 кВт. Для радиопередатчиков магистральной радиосвязи – 1, 5, 20, 100 и 150 кВт.

Диапазон рабочих частот для вещательных радиопередатчиков в соответствии с полосой частот, отведенной для радиовещания, составляет 3,95...26,1 МГц. Связные радиопередатчики имеют диапазон частот 1,5...30,0 МГц.

В табл. 5.1 и 5.2. приведены перечни типовых связных и вещательных радиопередатчиков и их основные параметры.

Таблица 5.1

Типовые магистральные радиопередатчики и их основные параметры

| Наименование показателя | Радиопередатчики магистральной радиосвязи | | | | | |
|------------------------------|---|------------|-------------------|----------------------|----------|---------|
| | ПКМ-1 «Снежинка» | «Фрегат» | ПКМ-5 «Циклон» | ПКМ-20 «Молния-3» | ПКМ-30С | ПКМ-100 |
| Диапазон рабочих частот, МГц | 2...20 | 1,6...27,5 | 3...30 | 3...30 | 2,5...30 | 4...30 |
| Номинальная мощность, кВт | 1 | 1 | 5 | 20 | 30 | 100 |

Таблица 5.2

Типовые вещательные радиопередатчики и их основные параметры

| Наименование показателя | Вещательные радиопередатчики | | |
|------------------------------|------------------------------|-------------|-------------|
| | ПКВ-100 | ПКВ-250 | ПКВ-500 |
| Диапазон рабочих частот, МГц | 3,95...26,1 | 3,95...26,1 | 5,95...22,4 |
| Номинальная мощность, кВт | 100 | 250 | 500 |

На сетях сухопутной радиосвязи общего и специального назначения используются отечественные радиостанции, данные о которых приведены в табл. 5.3 [40].

Типовые радиостанции сухопутной радиосвязи общего и специального назначения и их основные параметры

| Наименование показателя | Тип радиостанции | | | |
|------------------------------|------------------|------------|---------------------|-----------------------|
| | «Кристалл - Н» | P-161-МБ-1 | P-161- 5P (P-161-5) | «Каштан» «Каштан-ЗНХ» |
| Диапазон рабочих частот, МГц | 2...10 | 1,5...30 | 1,5...30 | 2...12 |
| Выходная мощность, Вт | 50 или 30 | 1000 | 5000 | 1000 |

5.2.2. Передающие антенны

Основные требования, предъявляемые к передающим антеннам технических средств ВЧ диапазона, сводятся к следующему:

1. Антенны должны либо иметь возможность изменять направление главного излучения в вертикальной плоскости, либо иметь достаточно широкую (не уже 10°) диаграмму направленности в вертикальной плоскости. Необходимость выполнения этого требования объясняется тем, что зоны оптимальных углов излучения и приема Δ в вертикальной плоскости зависят от протяженности трассы и высоты отражающего ионизированного слоя. На трассах протяженностью 2000...4000 км оптимальные углы $\Delta = 3...21^\circ$, а на трассах свыше 4000 км – $\Delta = 3...12^\circ$.

2. Поляризация излучаемых радиоволн при работе ионосферной волной должна быть, как правило, горизонтальной. Это вызвано тем, что антенны с вертикальной поляризацией требуют металлизации земли вблизи антенны, их диаграммы направленности существенно зависят от параметров почвы, значительная доля энергии, излучаемая вдоль поверхности земли, поглощается почвой.

3. Диаграммы направленности должны иметь малый уровень боковых лепестков. Это способствует уменьшению помех, создаваемых другим радиостанций ВЧ диапазона.

4. Антенны должны быть диапазонными. Данное требование объясняется естественным стремлением уменьшить общее число антенн на радиоцентре.

На радиопередающих станциях ВЧ диапазона используется очень много разных типов антенн. Их можно классифицировать по различным признакам. Ниже рассматриваются наиболее распространенные антенны: слабонаправленные, направленные (ромбические, синфазные) и широкополосные (логопериодические).

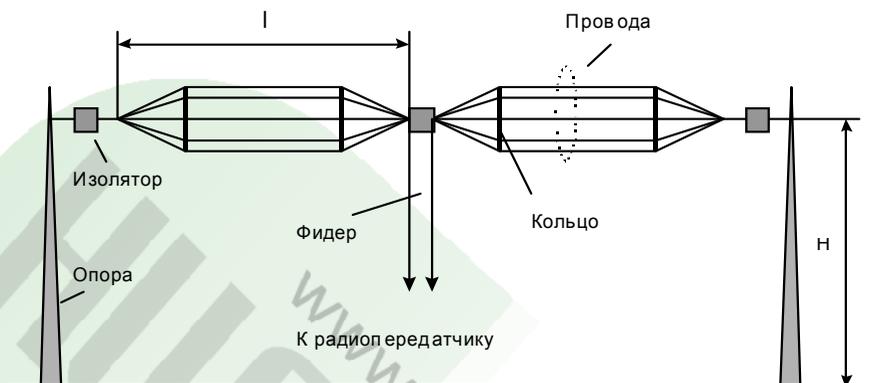


Рис. 5.3. Антенна в виде диполя Надененко

Слабонаправленные антенны. Они могут быть использованы только при ограниченных мощностях передатчиков – до 5 кВт, поскольку из-за широкой диаграммы направленности создают помехи другим радиостанциям. Их можно применять для радиосвязи на расстояниях до 600 км. Слабонаправленные антенны располагаются на территории антенного поля вблизи технического здания с тем, чтобы длина питающего фидера не превышала 300 м. Приведем краткую характеристику основных типов слабонаправленных антенн.

1. Симметричный вибратор с пониженным волновым сопротивлением для использования в широком диапазоне волн (диполь Надененко) – рис. 5.3. Антенна маркируется – ВГД l/H . Здесь ВГД – вибратор горизонтальный диапазонный; l – указывает длину плеча вибратора, м; H – высоту подвеса, м. Например, ВГД 10/15 – обозначает антенну в виде горизонтального диапазонного вибратора с длиной плеча 10 м и высотой подвеса 15 м.

Диполь Надененко выполняется из 6...12 параллельных биметаллических проводов диаметром 3, 4 или 6 мм, расположенных по образующей цилиндра с радиусом $R = 0,5...0,75$ м.

Волновое сопротивление диполя ВГД выбирается в пределах 250...600 Ом. Рабочий диапазон волн антенны ВГД $\lambda = (1,7...3,0)l$, т.е. антенна имеет диапазон рабочих частот примерно с двукратным перекрытием ($f_{\text{макс}}/f_{\text{мин}} = 2$).

2. Симметричный вибратор с шунтом для использования в относительно широком диапазоне волн. Обозначается ВГДШ l/H (здесь Ш – шунт). На рис. 5.4 изображен симметричный вибратор с шунтовым питанием

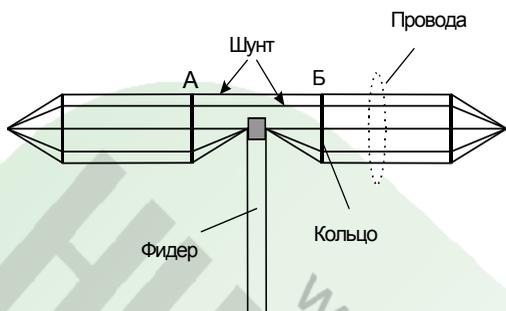


Рис. 5.4. Симметричный вибратор с шунтовым питанием

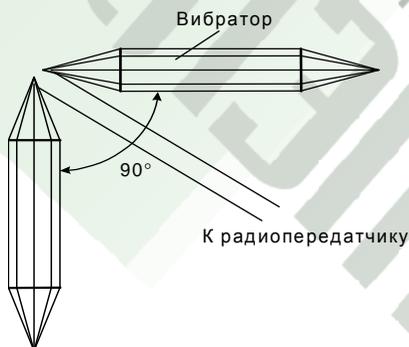


Рис. 5.5. Угловая антенна

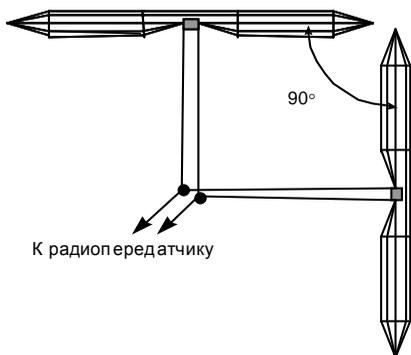


Рис. 5.6. Антенна ВГДШ 2У

(ВГДШ). Этот вибратор рекомендуется использовать в диапазоне $\lambda = (1,67 \dots 6,25)l$.

3. Симметричный горизонтальный вибратор с пониженным волновым сопротивлением в широком диапазоне волн, плечи которого перпендикулярны друг другу, схематично изображен на рис. 5.5. Обозначается эта антенна УГД l/H – угловая антенна и имеет наиболее равномерное излучение в горизонтальной плоскости при $l \approx 0,5\lambda$.

Антенны ВГД, ВГДШ и УГД используют на внутризоновых линиях радиосвязи протяженностью 400...600 км. Наиболее применяемые типы антенн этого класса приведены в табл. 5.4

4. Антенна ВГДШ 2У, выполненная из двух антенн ВГДШ, расположенных под углом 90° друг к другу. Принцип построения такой антенны понятен из рис. 5.6. Она имеет более равномерное излучение в горизонтальной плоскости.

5. Антенна турникетная зенитного излучения (АТЗИ) образована двумя парами антенн типа ВГД, расположенными под углом 90° друг к другу так, как это показано на рис. 5.7. Электрический контакт в каждой из четырех крестообразных групп отсут-

стует, так как по вертикали они смещены. В отличие от рассмотренных выше антенн АТЗИ имеет более высокий коэффициент усиления, возможность получения вращающейся поляризации, а также применения более низких опор. Однако АТЗИ имеет более сложную схему питания, которая на рисунке не показана, а также высокочастотное заземление размером $100 \times 100 \text{ м}^2$ из сетки проводов. Применяется АТЗИ в диапазоне 60...80 м для организации местного радиовещания.

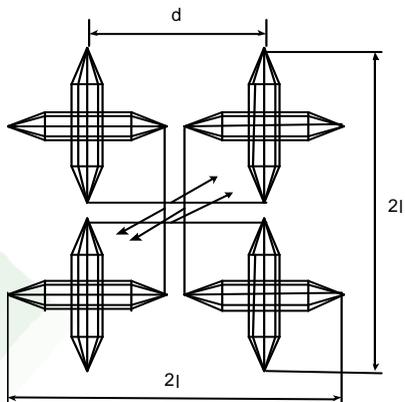


Рис. 5.7. Антенна зенитного излучения

Слабонаправленные антенны обычно подвешиваются на деревянных или трубчатых асбоцементных опорах с оттяжками. Оттяжки мачт разбиваются на секции такелажными изоляторами. Длина секций оттяжек должна быть не более четверти самой короткой волны рабочего диапазона. В тросах, поддерживающих вибраторы, на расстоянии 2...3 м от концов вибратора вводят дополнительные изоляторы. Расстояние между мачтами при подвесе между ними одного вибратора выбирают равным $2l + (6...8) \text{ м}$.

Таблица 5.4

| Тип антенны | Рабочий диапазон волн, м | Примечание |
|--|---|--|
| ВГДШ 6/10 ВГДШ 8/13 ВГДШ 16/23 ВГДШ 24/24 | 12,0...37,5 16,0...50,0 32,0...100,0 48,0...150,0 | $\lambda_{\text{мин}} = 2l$ $\lambda_{\text{макс}} = 6,25l$ l – длина плеча вибратора |
| ВГД 6/10 ВГД 8/13 ВГД 16/23 ВГД 24/24 | 9,6...22,2 12,8...29,6 25,6...59,2 38,4...88,7 | $\lambda_{\text{мин}} = 1,6l$ $\lambda_{\text{макс}} = 3,7l$ l – длина плеча вибратора |
| УГД 8/11,5 УГД 12/10,8 УГД 16/16 УГД 20/19,5 УГД 32/21,9 | 12,6...21,4 18,9...32,0 25,1...42,7 31,4...53,5 50,3...85,5 | $\lambda_{\text{мин}} = 1,57l$ $\lambda_{\text{макс}} = 2,67l$ l – длина плеча вибратора |

Направленные антенны

1. Простейшей направленной антенной является горизонтальная ромбическая антенна, показанная на рис. 5.8. К одному из острых углов ромба подводится фидер, а к другому подключается активное сопротивление (поглощающая линия), равное волновому сопротивлению антенны. При этом в проводах антенны устанавливается режим бегущей волны. Как у всех антенн бегущей волны, в ромбической антенне обеспечиваются однонаправленное излучение и мало меняющееся волновое и входное сопротивление в широком диапазоне частот. Максимальное излучение получается в вертикальной плоскости, проходящей через вершины острых углов ромба.

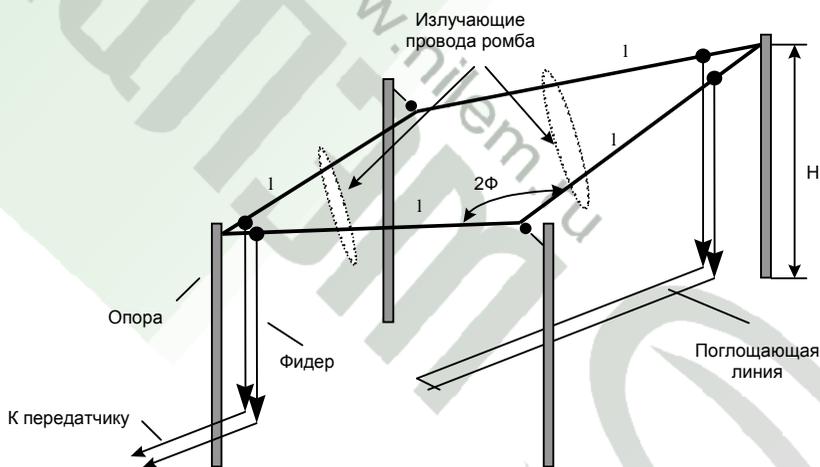


Рис. 5.8. Одиночная ромбическая антенна РГ

При надлежащем выборе длины стороны ромба и тупого угла в направлении, совпадающем с большой диагональю в сторону нагрузочного сопротивления, поля от всех сторон ромба складываются синфазно, т.е. в этом направлении имеет место максимальное излучение. Характеристики направленности ромбических антенн имеют большое количество боковых лепестков значительной величины, особенно в горизонтальной плоскости, что приводит к рассеиванию энергии излучения. Условное обозначение ромбической антенны – РГ Φ/A (В), где Φ – половина тупого угла ромба, градусы; $A = l/\lambda_0$, l – длина стороны ромба, м; λ_0 – оптимальная длина рабочей волны, м; $B = H/\lambda_0$, H – высота подвеса ромба над поверхностью земли, м. Например, маркировка РГ 65/4 (1) означает – горизонтальная ромбическая антенна с половиной тупого угла 65° при $A = 4$ и $B = 1$ (так

при $\lambda_0 = 12,5$ м $l = 50$ м и $H = 12,5$ м). В практических конструкциях антенн каждая сторона ромба выполняется из двух (реже нескольких) проводов, соединенных вместе в вершинах острых углов и расходящихся к вершинам тупых углов по вертикали на величину $h = 0,03l$.

Ромбические антенны, как правило, подвешиваются на деревянных мачтах. В случае применения металлических мачт их относят от полотен антенн на расстояния не менее $5 \dots 8$ м.

Улучшенными электрическими параметрами обладает двойная ромбическая антенна, состоящая из двух полотен простых ромбических антенн, смещенных в направлении малой диагонали на расстояние порядка λ_0 и соединенных параллельно в вершинах острых углов. Высота подвеса полотен ромбов отличается на $2 \dots 3$ м. На рис. 5.9 приведена схема, поясняющая принцип построения двойной ромбической антенны. Обозначается эта антенна также, как и простая ромбическая антенна, но с добавлением буквы Д (двойная) – РГД Ф/А(В).

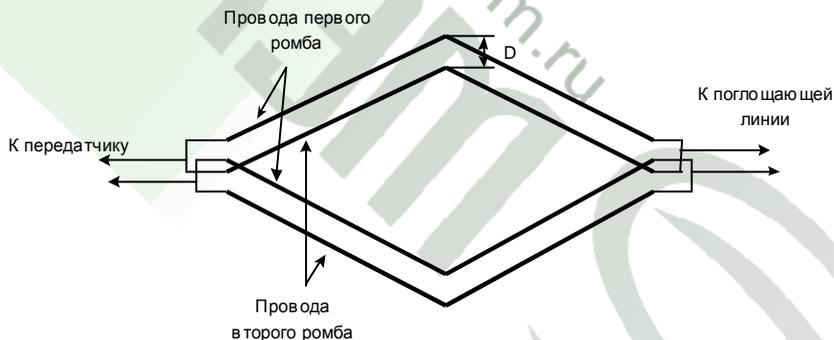


Рис. 5.9. Двойная ромбическая антенна РГД

Ромбические антенны хорошо согласуются с питающим фидером во всем ВЧ диапазоне. Поэтому их рабочий диапазон ограничивается только ухудшением направленных свойств и уменьшением коэффициента усиления по мере отхода от оптимальной волны. Это наиболее распространенный тип передающих антенн, применяемых в диапазоне ВЧ на магистральных радиоприемниках. Простота конструкции, работа в широком диапазоне волн, отсутствие настроек и регулировок, сравнительно небольшая стоимость – все эти качества присущи ромбическим антеннам. В табл. 5.5 приведены наиболее распространенные двойные ромбические антенны, рекомендуемые к применению на магистральных линиях связи.

| Протяженность трассы, км | Тип антенны | Строительная длина волны, м | Рабочий диапазон волн, м |
|--------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Свыше 4000 | РГД 70/6 (1,25) | 15 | 10...21 |
| | РГД 65/4 (1) | 25 | 16,7...37,4 |
| | | 40 | 28...72 |
| 2000...4000 | РГД 65/4 (1) | 12,5 | 8,76...22,5 |
| | | 22 | 15,8...40,5 |
| | | 35 | 25,6...63 |
| 1000...2000 | РГД 65/2,8 (0,6) | 22 | 18,7...37,4 |
| | | 43 | 32,2...64,4 |
| 600...1000 | РГД 57/1,7 (0,5) | 20 | 12...32 |
| | | 40 | 24...64 |

2. Синфазные антенны представляют собой решетки, составленные из симметричных вибраторов (рис. 5.10). Наличие в этих антеннах рефлектора (активного диапазонного РАД, пассивного настроенного – РН или аperiодического – РА) позволяет получить одностороннюю направленность излучения. На рис. 5.10 показано полотно синфазной антенны, имеющей два этажа и четыре вибратора в каждом этаже. Конструкция рефлектора не показана. В общем случае полотно имеет m этажей вибраторов и n полуволновых вибраторов в каждом этаже. Вибраторы выполняются с пониженным волновым сопротивлением $W_0 = 280...470$ Ом из трех или более проводов диаметром 4...6 мм. Резонансная длина такого вибратора $2l \approx 0,82\lambda_0$.

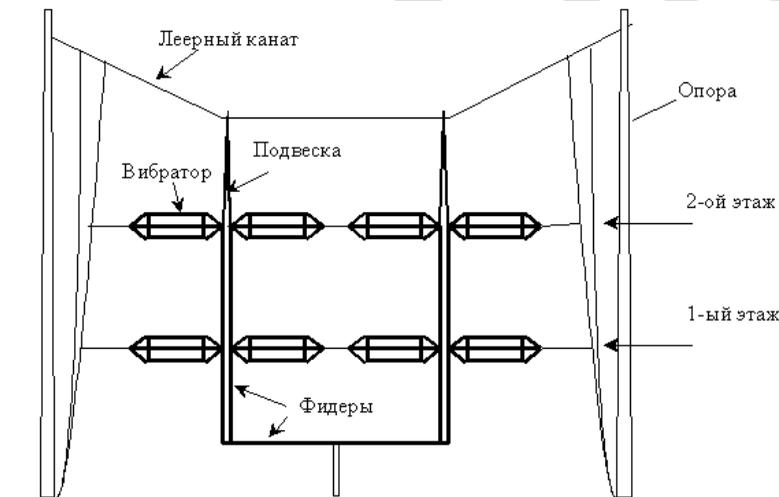


Рис. 5.10. Синфазная горизонтальная диапазонная антенна

Синфазная горизонтальная диапазонная антенна с настроенным пассивным рефлектором обозначается СГД m/n РН. Полотно настроенного рефлектора является точной копией полотна антенны. Расстояние между вибраторами антенны и рефлектора выбирают равным $(0,22...0,25) \lambda_0$. Антенны с настроенным рефлектором требуют перестройки рефлектора при смене длины волны. Профиль антенны СГД $2/4$ РН схематично представлен на рис. 5.11а.

Синфазная горизонтальная диапазонная антенна с аperiodическим рефлектором обозначается СГД m/n РА. Аperiodический рефлектор выполняется в виде плоского экрана из проводов диаметром 4 мм, расположенных параллельно оси вибраторов. Размеры рефлектора превышают размеры полотна антенны. Расстояние между проводами рефлектора выбирают в пределах $(0,035...0,07) \lambda_0$. Профиль антенны СГД $2/4$ РА схематично представлен на рис. 5.11б.

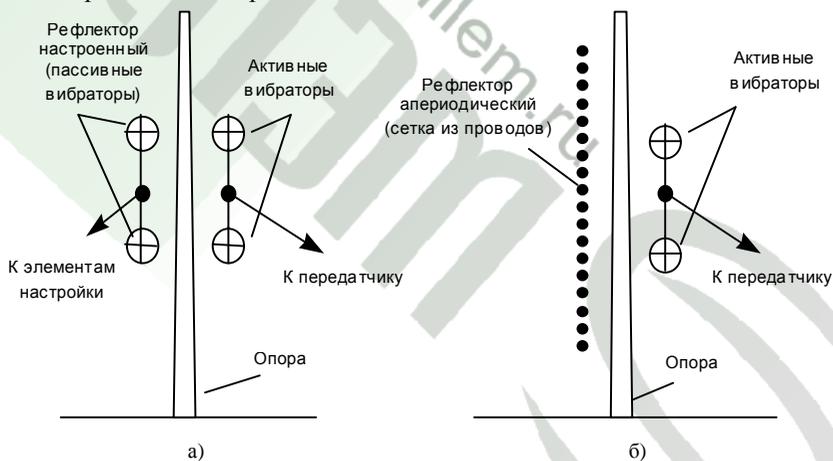


Рис. 5.11. Различные типы рефлекторов синфазных антенн
а – антенна СГД $2/4$ РН, б – антенна СГД $2/4$ РА

Синфазная горизонтальная диапазонная антенна с активным диапазонным рефлектором обозначается СГД m/n РАД. Полотно рефлектора является точной копией полотна антенны. Расстояние между вибраторами антенны и рефлектора выбирают равным $(0,22...0,25) \lambda_0$. Антенны с активным рефлектором не требуют перестройки рефлектора при смене длины волны. Профиль антенны СГД $2/4$ РАД соответствует представленному на рис. 5.11а, но с той разницей, что полотно рефлектора через соответствующие устройства подключено к радиопередатчику.

Антенны типа СГД имеют весьма сложную схему питания (тем сложнее, чем больше в антенне этажей и вибраторов в этаже). Специальными

конструктивными решениями удается обеспечить согласование антенны с фидером в диапазоне волн $\lambda = (0,8...2) \lambda_0$.

Ширина главного лепестка диаграммы направленности в горизонтальной плоскости синфазной антенны φ_0 определяется числом вибраторов в одном этаже и длиной волны. С увеличением числа вибраторов в этаже диаграмма направленности сужается. Так, например, на оптимальной волне при $n=4$, $\varphi_0=30^\circ$, а при $n=8$, $\varphi_0=15^\circ$. С укорочением длины волны диаграмма направленности сужается, а с удлинением – расширяется.

Диаграмма направленности в вертикальной плоскости определяется в основном числом этажей, средней высотой подвеса антенного полотна над землей и длиной волны. С увеличением числа этажей или укорочением длины волны основной лепесток диаграммы направленности в вертикальной плоскости сужается, а с увеличением средней высоты подвеса антенны направление максимума излучения приближается к земле.

Для магистральных линий радиосвязи рекомендуется использовать антенны СГД1/2РА, СГД1/2РН, СГД1/4РА, СГД1/4РН, СГД2/4РА, СГД2/4РН, СГД4/4РА, СГД4/4РН. Для внутризоновых линий радиосвязи (длина трассы 400...600 км) рекомендуется использовать антенну СГД1/2РА.

Высокий КПД, малая интенсивность боковых лепестков и возможность независимого формирования диаграмм направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях позволяет применять синфазные антенны для радиовещания. В зависимости от протяженности трассы для радиовещания рекомендуется применять синфазные антенны в соответствии с табл. 5.6. В табл. 5.7...5.9 приведены данные по сочетанию мощностей радиопередатчиков и некоторых типов антенн ВЧ диапазона.

Таблица 5.6

| Протяженность трассы, км | Тип антенны | Строительная длина волны, м | Рабочий диапазон волн, м | Высота подвеса нижнего этажа |
|--------------------------|-------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 6000 и более | СГД8/8РА | 19,5 | 13,8...19,9 | λ_0 |
| | | 34 | 24,84...50,84 | λ_0 |
| 4000...6000 | СГД4/4РА | 12 | 11,5...19,9 | $(0,75...1) \lambda_0$ |
| | | 26 | 24,84...42,25 | $(0,75...1) \lambda_0$ |
| | | 40 | 48,4...68,2 | $(0,75...1) \lambda_0$ |
| 2000...4000 | СГД4/4РА | 12 | 11,5...19,9 | $(0,5...0,75) \lambda_0$ |
| | | 26 | 24,84...42,25 | $(0,5...0,75) \lambda_0$ |
| | | 40 | 48,4...68,2 | $(0,5...0,75) \lambda_0$ |
| 1000...2000 | СГД2/4РА | 18 | 13,5...37,0 | $0,5\lambda_0$ |
| | | 40 | 30,0...82,5 | $0,5\lambda_0$ |
| 600...1000 | СГД1/4РА | 21 | 15,0...0 34 | $0,5\lambda_0$ |
| | | 50 | 38,0...76,0 | $0,5\lambda_0$ |
| 400...600 | СГД1/2РА | 24 | 18,7...36,0 | $0,5\lambda_0$ |
| | | 50 | 39,0...76,0 | $0,5\lambda_0$ |

Таблица 5.7.

| Мощность передатчика, кВт | ВГД | УГД | РГД 57/1,7 (0,5) | РГД 65/2,8 (0,6) | РГД 65/4 (1) | РГД 70/6 (1,25) | РГД 75/6 (1,2) |
|---------------------------|-----|-----|------------------|------------------|--------------|-----------------|----------------|
| 1 | + | + | - | - | - | - | - |
| 5 | + | + | + | + | + | + | + |
| 20 | - | - | + | + | + | + | + |
| 50 | - | - | + | + | + | + | + |
| 100 | - | - | + | + | + | + | + |
| 150 | - | - | + | + | + | + | + |

Таблица 5.8

| Тип антенны | Мощность передатчиков радиосвязи, кВт | | | | |
|-------------|---------------------------------------|----|----|-----|-----|
| | 5 | 20 | 50 | 100 | 150 |
| СГД 1/2 РА | + | + | - | - | - |
| СГД 1/2 РН | + | + | - | - | - |
| СГД 1/4 РА | + | + | - | - | - |
| СГД 1/4 РН | + | + | - | - | - |
| СГД 2/4 РА | - | - | + | + | + |
| СГД 2/4 РН | - | - | + | + | + |
| СГД 4/4 РА | - | - | + | + | + |
| СГД 4/4 РН | - | - | + | + | + |

Таблица 5.9

| Тип антенны | Мощность передатчиков радиовещания, кВт | | | | | |
|-------------|---|-----|-----|-----|------|------|
| | 50 | 100 | 250 | 500 | 1000 | 2000 |
| СГД 2/4 РА | + | + | - | - | - | - |
| СГД 2/4 РН | + | + | - | - | - | - |
| СГД 4/4 РА | + | + | - | - | - | - |
| СГД 4/4 РН | + | + | - | - | - | - |
| СГД 4/8 РА | + | + | + | - | - | - |
| СГД 4/8 РН | + | + | + | - | - | - |
| СГД 8/8 РА | - | - | + | + | + | + |
| СГД 8/8 РН | - | - | + | + | + | + |
| СГД 8/16 РА | - | - | + | + | + | + |
| СГД 8/16 РН | - | - | + | + | + | + |

Логопериодические антенны. Эти антенны относятся к классу широкодиапазонных. Электрические параметры таких антенн слабо изменяются в заданном рабочем диапазоне частот. Несмотря на большое разнообразие

конструктивных решений ЛПА состоят, как правило, из двух частей – линии питания и подключенных к ней излучающих вибраторов переменной длины.

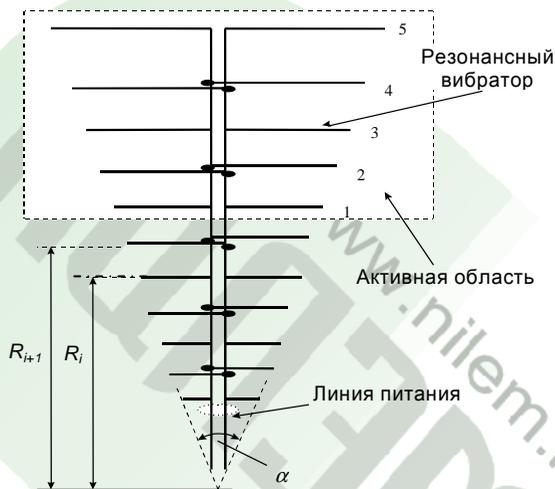


Рис. 5.12. Схема простой вибраторной логопериодической антенны

вдоль ЛПА, располагаясь каждый раз в том месте, где поперечные размеры антенны близки к $0,5\lambda$. При этом электрические размеры «активной области» и распределение токов в ее пределах практически сохраняется неизменным. Вследствие этого электрические параметры в пределах рабочего диапазона слабо зависят от частоты.

Схема простой вибраторной ЛПА показана на рис. 5.12 [35]. Антенна состоит из группы параллельных симметричных вибраторов, расположенных в одной плоскости. Длина вибраторов и их расстояние от вершины антенны образуют геометрическую прогрессию со знаменателем τ , называемым периодом ЛПА: $R_i/R_{i+1} = \tau$. При изменении длины рабочей волны изменяется и длина резонансного вибратора, а вместе с этим и «активная область» перемещается

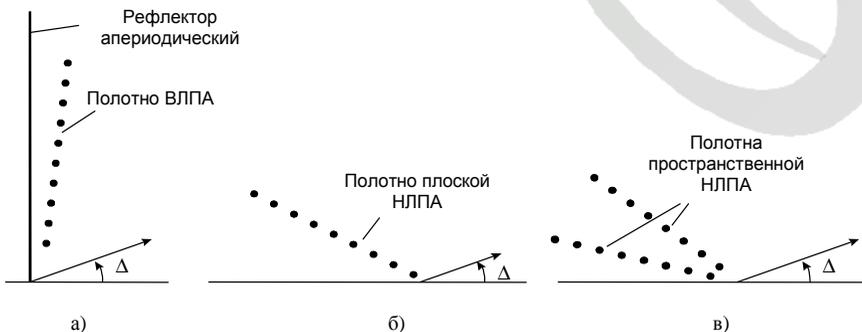


Рис. 5.13. Некоторые типы логопериодических антенн ВЧ диапазона

Логопериодические антенны по своему принципу действия являются относительно слабонаправленными, так как «активная область» включает только небольшую часть всех излучателей антенны (обычно от трех до пяти). В настоящее время в качестве передающих антенн для радиосвязи и радиовещания используются ВЛПА – вертикальные логопериодические антенны (рис. 5.13а), плоские НЛПА – наклонные логопериодические антенны (рис. 5.13б) и пространственные НЛПА (рис. 5.13в).

5.2.3. Фидеры для передающих антенн ВЧ диапазона

Электрическую цепь, по которой энергия радиочастотного сигнала передается от радиопередатчика к антенне, называют фидером. В диапазоне ВЧ в качестве передающих наиболее часто используются симметричные двухпроводные, четырехпроводные неперекрещенные и четырехпроводные перекрещенные воздушные фидеры (рис. 5.14). Фидеры такого типа отличаются простотой и поэтому получили преимущественное распространение. Симметричные двухпроводные линии пропускают мощность до 50 кВт, четырехпроводные – до 100 кВт (при волновом сопротивлении 300 Ом) и до 250 кВт (при волновом сопротивлении 120 Ом). Фидеры выполняются из биметаллических проводов диаметром 4...6 мм. При больших уровнях мощности провода заменяют проволочными цилиндрами, состоящими из нескольких проволок. Фидеры крепятся на высоте не менее 3 м от поверхности земли на деревянных, асбоцементных или железобетонных опорах. Длина фидеров обычно сотни метров, но, как правило, не превышает 1000 м.

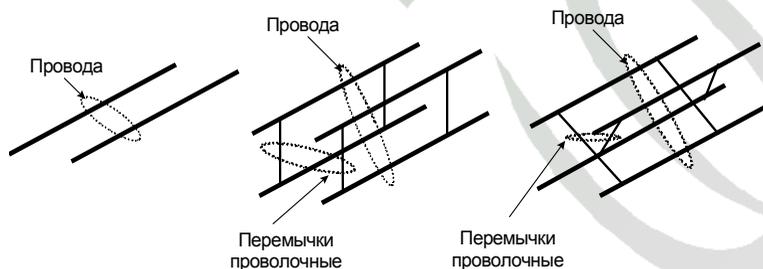


Рис. 5.14. Некоторые типы фидеров ВЧ диапазона

Условное обозначение симметричных фидеров состоит из букв «Ф» (фидер), цифр и букв, обозначающих число проводов (числитель), число проволок в проводе (знаменатель), волновое сопротивление, буквы «К» (если фидер перекрещенный).

Пример условного обозначения симметричного многопроволочного перекрещенного фидера с числом проволок в проводе, равном 5, волновым сопротивлением 120 Ом: фидер Ф4/5 120 К.

Из теории открытых симметричных линий [36] известно, что часть энергии, передаваемой по фидеру, излучается в окружающее пространство. Таким образом, фидеры относятся к числу устройств, которые в значительной степени определяют электромагнитную обстановку (по крайней мере, на антенном поле).

5.3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА БЛИЖНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

5.3.1. Ближние поля слабонаправленных антенн

При решении задач электромагнитного прогнозирования антенны ВЧ диапазона можно считать тонкопроволочными структурами, что позволяет каждый излучающий вибратор или провод представить совокупностью множества элементарных электрических вибраторов (ЭЭВ). Соответственно уровень и структура электромагнитного поля в произвольной точке пространства будет определяться суперпозицией полей всех ЭЭВ.

В разделе 3.1 приведены аналитические выражения для горизонтального ЭЭВ, ориентированного параллельно оси X (рис. 3.1). Считая $\xi = x, y, z$, любая декартова составляющая поля (3.2) может быть представлена в обобщенном виде, как E_{ξ}^{Γ} .

Поля симметричных вибраторов – линейного (рис. 5.15а) и уголкового (рис. 5.15б) – определяются интегрированием составляющих E_{ξ}^{Γ} по длине плеч с учетом распределения токов по вибраторам.

Для антенн типа ВГД (рис. 5.3) и ВГДШ (рис. 5.4), являющихся линейными симметричными вибраторами, любая компонента имеет вид:

$$E_{\xi}^{ЛСВ} = \int_{-l}^l E_{\xi}^{\Gamma} d\tau. \quad (5.1)$$

Для уголкового антенны типа УГД (рис. 5.5), являющейся уголковым симметричным вибратором:

$$E_{\xi}^{УГД} = \int_0^l E_{\xi}^{\Gamma} d\tau_1 + \int_0^l E_{\xi}^{\Gamma} d\tau_2. \quad (5.2)$$

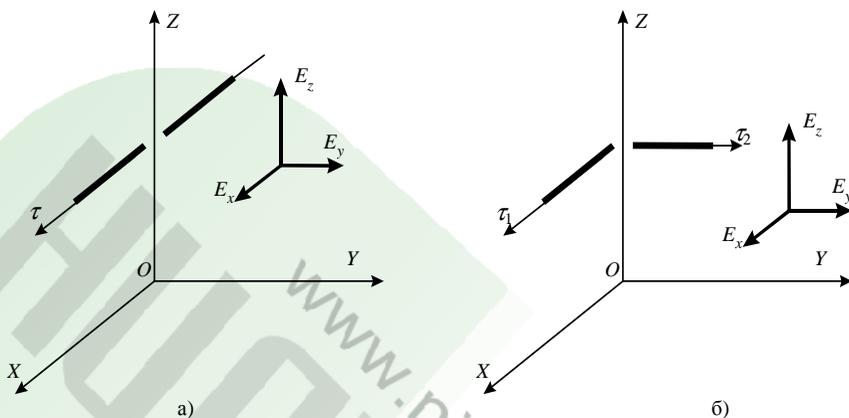


Рис. 5.15. Линейный и уголкоый вибраторы в декартовой системе координат

Системы координат и направления вспомогательных осей τ, τ_1, τ_2 показаны на рис. 5.15. Выражения (5.1) и (5.2) в сочетании с формулами для расчета E_{ξ}^T представляют собой обобщенные математические модели излучения слабонаправленных антенн типа ВГД, ВГДШ и УГД.

Практическое применение этих моделей, предполагает априори знание закона распределения тока по длине плеч вибраторов. Существует много строгих методов расчета тока [35,36], однако для задач, рассматриваемых в рамках настоящей книги, можно ограничиться синусоидальным законом распределения тока. Анализ [38] показал, что учет распределения тока, полученный методом интегральных уравнений, позволяет уточнить структуру поля лишь в направлениях близких к осевым при $l/\lambda > 0,3$, что представляется не существенным при электромагнитной экспертизе реальных объектов. Амплитуда тока, текущего по вибратору, в пучности его распределения определяется по формуле (4.2).

Многолетняя инженерная и эксплуатационная практика показала, что для расчета сопротивления излучения вибраторных антенн ВЧ диапазона при высотах подвеса вибраторов более $0,25\lambda$ вполне приемлемо допущение идеальной проводимости почвы. Им всегда пользуются и при решении задач электромагнитной экспертизы излучающих объектов, потому что практически для всех конструкций антенн выполняется условие подвеса вибратора на высоте более $0,25\lambda$.

Использованные допущения (идеальная проводимость почвы и синусоидальное распределение тока) сводят задачу нахождения сопротивления излучения и амплитуды тока горизонтального линейного симметричного

вибратора к хорошо изученной задаче о двух параллельных связанных вибраторах с синусоидальным распределением тока. При этом разнос вибраторов в пространстве равен удвоенной высоте подвеса антенны над землей. Напомним, что принятое допущение идеальной проводимости почвы распространяется только на задачу расчета сопротивления излучения антенны. Напряженность электрического поля рассчитывается с учетом реальных параметров.

При решении задач электромагнитного прогнозирования обычно предполагают синфазность всех составляющих, (в этом случае уровень суммарного поля будет максимальным). Суммарное (эффективное) значение напряженности электрического поля, создаваемого линейным симметричным вибратором в произвольной точке, можно записать в виде:

$$E_{\Sigma}^{LCB} = \sqrt{|E_x^{LCB}|^2 + |E_y^{LCB}|^2 + |E_z^{LCB}|^2} = \sqrt{\sum_{\xi} |E_{\xi}^{LCB}|^2} \quad (5.3)$$

- для антенн типа ВГД и ВГДШ;

$$E_{\Sigma}^{УГД} = \sqrt{\sum_{\xi} |E_{\xi}^{УГД}|^2} \quad (5.4)$$

- для антенны УГД.

Для антенн типа ВГДШ 2У (рис. 5.6) и АТЗИ (рис. 5.7) составляющие напряженности электрического поля определяются суммированием соответствующих компонент, создаваемых каждым линейным симметричным вибратором, входящим в антенную систему. Любая декартовая составляющая поля этих антенных систем (АС) может быть представлена в виде:

$$E_{\xi}^{AC} = \sum_{i=1}^k E_{\xi}^{LCB}(i), \quad (5.5)$$

где $\xi = x, y, z$; k – число линейных симметричных вибраторов, входящих в антенную систему ($k = 2$ для антенны ВГДШ 2У, $k = 4$ для антенны типа АТЗИ).

Суммарное значение напряженности электрического поля в произвольной точке можно представить в виде:

$$E_{\Sigma}^{AC} = \sqrt{\sum_{\xi} |E_{\xi}^{AC}|^2}. \quad (5.6)$$

Следует помнить, что использование принципа суперпозиции, предполагает суммирование в едином координатном базисе.

Результаты исследования ближних полей слабонаправленных антенн приведены в одном из последующих разделов.

5.3.2. Ближние поля многовибраторных антенн

Поле излучения антенных решеток, состоящих из совокупности излучающих элементов – линейных симметричных вибраторов (рис. 5.11 и рис. 5.13), в общем случае определяется суммой полей этих вибраторов с учетом амплитудных, фазовых и поляризационных соотношений. При этом следует учитывать вибраторы, образующие не только антенное полотно (АП), но и полотно рефлектора (ПР). Поле каждого вибратора должно вычисляться с учетом реальных параметров подстилающей поверхности (почвы) по методике, приведенной в разделе 5.3.1. Наличие аperiodического рефлектора у некоторых антенн не нарушает общности изложенного подхода, потому что его влияние можно заменить влиянием зеркального отображения активного антенного полотна. Другими словами, зеркальное отображение можно рассматривать как виртуальное рефлекторное полотно.

Любая декартова составляющая синфазных горизонтальных антенн (СГ) определяется по формуле:

$$E_{\xi}^{CG} = \sum_{i=1}^{q=m \times n} E_{\xi}^{LCB-АП}(i) + \sum_{i=1}^{q=m \times n} E_{\xi}^{LCB-ПР}(i), \text{ при } \xi = x, y, z, \quad (5.7)$$

где m и n – количество этажей вибраторов и вибраторов в этаже синфазной антенны; первая сумма – вклад в ξ -ую составляющую поля линейных симметричных вибраторов антенного полотна, вторая сумма – вклад реальных линейных симметричных вибраторов полотна рефлектора (для антенн СГД РН и СГД РАД) или виртуальных вибраторов – зеркальных изображений активных в аperiodическом рефлекторе (для антенны СГД РА).

Суммарное значение напряженности поля в произвольной точке пространства при условии синфазности составляющих запишется в виде:

$$E_{\Sigma}^{CG} = \sqrt{\sum_{\xi} |E_{\xi}^{CG}|^2}. \quad (5.8)$$

Определение амплитуд токов, протекающих по каждому из вибраторов антенной решетки, является хорошо изученной задачей теории антенн [36]. При расчете токов приходится учитывать влияние не только рефлектора, но и зеркального изображения всей антенны относительно земной поверхности (земля при решении этой задачи предполагается идеально проводящей).

Методика расчета ближних полей логоperiodических антенн, являющихся как и синфазные антенны многовибраторными, аналогична приве-

денной – в расчетной точке суммируются декартовы составляющие всех вибраторов $E_{\xi}^{ЛПА}$ и их зеркальных отображений относительно аperiodического рефлектора (если таковой имеется, например, ВЛПА – рис. 5.13а).

В результате любая составляющая поля логопериодической антенны будет иметь вид:

- для плоской НЛПА (рис. 5.13б)

$$E_{\xi}^{НЛПА} = \sum_{i=1}^k E_{\xi}^{ЛСВ-АП}(i), \quad (5.9)$$

где k – число линейных симметричных вибраторов в антенном полотне;

- для пространственной НЛПА (рис. 5.13в)

$$E_{\xi}^{НЛПА} = \sum_{i=1}^{k_1} E_{\xi}^{ЛСВ-АП1}(i) + \sum_{i=1}^{k_2} E_{\xi}^{ЛСВ-АП2}(i), \quad (5.10)$$

где $k_{1,2}$ – число линейных симметричных вибраторов в первом и втором антенном полотне (АП1 и АП2);

- для ВЛПА (рис. 5.13а)

$$E_{\xi}^{ВЛПА} = \sum_{i=1}^k E_{\xi}^{ЛСВ-АП}(i) + \sum_{i=1}^k E_{\xi}^{ЛСВ-ПР}(i), \quad (5.11)$$

где k – число линейных симметричных вибраторов в антенном полотне.

Суммарное значение напряженности поля, создаваемое любой логопериодической антенной, в произвольной точке пространства при условии синфазности составляющих запишется в виде:

$$E_{\Sigma}^{ЛПА} = \sqrt{\sum_{\xi} |E_{\xi}^{ЛПА}|^2}, \quad \text{при } \xi = x, y, z. \quad (5.12)$$

Расчет распределения токов по вибраторам можно выполнить в соответствии с рекомендациями, приведенными, например, в [35].

Суммирование всех составляющих необходимо выполнять в едином базисе.

Результаты исследования ближних полей многовибраторных антенн приведены в последующих разделах.

5.3.3 Ближние поля ромбических антенн

К анализу ромбических антенн также применим принцип суперпозиции полей отдельных элементов – длинных проводов, обтекаемых бегущей волной тока. Любую составляющую поля, создаваемую проводом (рис. 5.16), можно определить путем интегрирования составляющих E_{ξ}^{Γ} ($\xi = x, y, z$) по его длине l :

$$E_{\xi}^{\Pi} = \int_0^l E_{\xi}^{\Gamma} d\tau. \quad (5.13)$$

Аналитическое выражение тока в каждом проводе антенны (рис. 5.17) можно записать в следующем виде:

$$I(1) = I_0 e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\tau}, \quad I(2) = -I_0 e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\tau}, \quad I(3) = I_0 e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(l+\tau)}, \quad I(4) = -I_0 e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(l+\tau)}, \quad (5.14)$$

где I_0 – амплитуда тока, не зависящая от координаты τ точки на оси провода.

Непосредственному расчету напряженности электрического поля предшествует решение задачи определения амплитуды тока, протекающего по проводам ромбической антенны. Как и в случае вибраторных антенн, при расчете тока ключевым моментом является расчет сопротивления излучения ромбической антенны. Одним из возможных способов его определения является расчет комбинации собственных и взаимных сопротивлений проводов, обтекаемых бегущей волной тока, входящих в ромбическую антенну, с учетом допущения идеальной проводимости почвы. При анализе простой ромбической антенны с учетом влияния идеально проводящей почвы можно выделить 8 взаимодействующих проводов, а при анализе двойной ромбической антенны – 16. Количество взаимных и собственных сопротивлений проводов ромба, которое необходимо учесть при расчете сопротивления излучения составляет 32 для простой и 128 для двойной ромбической антенны. В [35] приведено общее интегральное выражение для расчета взаимного сопротивления произвольно ориентированных линейных вибраторов. Ис-

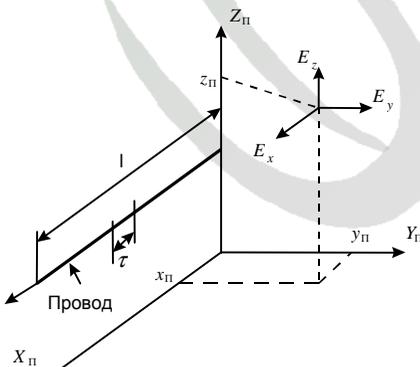


Рис. 5.16. Длинный провод, обтекаемый бегущей волной тока

пользование этого выражения позволяет, пользуясь методами численного интегрирования, рассчитать сопротивление излучения любой ромбической антенны. Расчет амплитуды тока в проводах антенны выполняется по формуле (4.2).

Обозначим декартовые составляющие напряженности электрического поля, создаваемые каждым проводом ромба через $E_x^{\Pi}(\mu), E_y^{\Pi}(\mu), E_z^{\Pi}(\mu)$, где $\mu=1,2,3,4$ номер провода. Следует иметь в виду, что использование математической модели провода для нахождения поля одиночной ромбической антенны возможно только при условии преобразования координат точки наблюдения x_p, y_p, z_p (рис. 5.17) в координаты $x_{\Pi}, y_{\Pi}, z_{\Pi}$

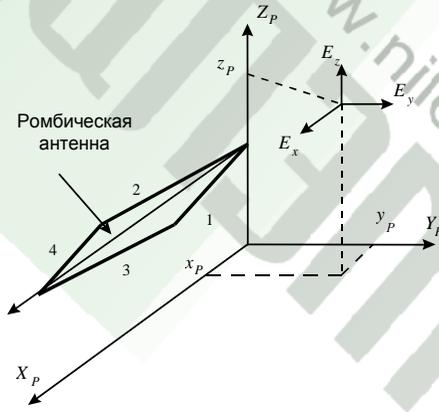


Рис. 5.17. Одиночная ромбическая антенна в декартовой системе координат

(рис. 5.16). В итоге отдельные составляющие каждого из четырех проводов оказываются привязанными к своей (индивидуальной) системе координат $X_{\Pi}, Y_{\Pi}, Z_{\Pi}$.

Составляющие напряженности электрического поля одиночной ромбической антенны РГ (рис. 5.17) определяются суммированием полей отдельных элементов – четырех сторон (проводов) ромба. Суммирование должно выполняться с учетом того, что аналитические выражения составляющих напряженности электрического

поля отдельных проводов, $E_x^{\Pi}(\mu), E_y^{\Pi}(\mu), E_z^{\Pi}(\mu)$, записанные в системе координат $X_{\Pi}, Y_{\Pi}, Z_{\Pi}$ (рис. 5.16), необходимо преобразовать к системе координат исследуемой ромбической антенны X_p, Y_p, Z_p (рис. 5.17). В результате все искомые составляющие будут иметь общий координатный базис.

В конечном итоге декартовые составляющие напряженности электрического поля одиночной ромбической антенны записываются в следующем виде:

$$E_x^{PГ} = \cos \beta \sum_{\mu=1}^4 E_x^{\Pi}(\mu) + \sin \beta [-E_y^{\Pi}(1) + E_y^{\Pi}(2) + E_y^{\Pi}(3) - E_y^{\Pi}(4)], \quad (5.15)$$

$$E_y^{PG} = \sin \beta [-E_x^{\Pi}(1) + E_x^{\Pi}(2) + E_x^{\Pi}(3) - E_x^{\Pi}(4)] + \cos \beta \sum_{\mu=1}^4 E_y^{\Pi}(\mu), \quad (5.16)$$

$$E_z^{PG} = \sum_{\mu=1}^4 E_z^{\Pi}(\mu), \quad (5.17)$$

где $\beta = 90^\circ - \Phi$ (Φ – половина тупого угла ромба).

Суммарное значение напряженности поля, создаваемого ромбической антенной, в произвольной точке пространства при условии синфазности составляющих запишется в виде:

$$E_{\Sigma}^{PG} = \sqrt{\sum_{\xi} |E_{\xi}^{PG}|^2}, \quad \text{при } \xi = x, y, z. \quad (5.18)$$

В случае анализа ближних полей антенны РГД декартовы составляющие напряженности электрического поля можно определить по формулам:

$$E_{\xi}^{PGD} = E_{\xi}^{PG1} + E_{\xi}^{PG2}, \quad (5.19)$$

где $\xi = x, y, z$; $PG1$, $PG2$ – первый и второй ромб (рис. 5.9).

Суммарное значение напряженности поля, создаваемое антенной РГД в произвольной точке пространства при условии синфазности составляющих запишется в виде:

$$E_{\Sigma}^{PGD} = \sqrt{\sum_{\xi} |E_{\xi}^{PGD}|^2}, \quad \text{при } \xi = x, y, z. \quad (5.20)$$

Суммирование составляющих необходимо выполнять в едином базисе. Результаты исследования ближних полей ромбических антенн приведены в последующих разделах.

5.3.4. Ближние поля фидеров

В основу метода анализа ближних полей фидеров также положено решение задачи об излучении горизонтального ЭЭВ, расположенного над почвой с реальными электрофизическими параметрами, в сочетании с принципом суперпозиции полей, создаваемых элементарными излучателями [41]. Каждый провод фидера – это длинный провод (рис. 5.16) с распределением тока:

$$I_{\tau} = I_0 \left[e^{-\gamma \tau} + \frac{1-k}{1+k} e^{\gamma \tau} \right], \quad (5.21)$$

где I_0 – ток в точке питания; $\gamma = \beta + j\alpha$ – коэффициент распространения (β – коэффициент потерь, α – коэффициент фазы); k – коэффициент бегущей волны характеризующий согласование фидера с антенной).

Любую составляющую напряженности электрического поля, создаваемую отдельным проводом фидера, можно записать в виде (5.13), а суммарное значение напряженности поля, создаваемого совокупностью всех проводов фидера в произвольной точке пространства при условии синфазности составляющих запишется в виде:

$$E_{\xi}^{\phi} = \sqrt{\sum_{i=1}^{\mu} |E_{\xi}^{\Pi}(i)|^2}, \quad (5.22)$$

где μ – число проводов в фидере.

Суммирование составляющих необходимо выполнять в едином базисе.

5.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА ВБЛИЗИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ВЧ ДИАПАЗОНА

5.4.1. Санитарные зоны некоторых типовых антенн

Электромагнитную обстановку вблизи антенн ВЧ диапазона рассмотрим на примере зависимости границ санитарных зон от различных факторов [23,42].

На рис. 5.18...5.21 представлены санитарные зоны слабонаправленной типовой вибраторной антенны ВГД 6/10 (азимутальный угол 0° соответствует направлению, перпендикулярному оси вибратора):

- рис. 5.18 – зависимость санитарно-защитных зон от излученной мощности;
- рис. 5.19 – зависимость санитарно-защитных зон от параметров почвы;
- рис. 5.20 – зависимость зон ограничения застройки от излученной мощности;
- рис. 5.21 – зависимость зон ограничения застройки от параметров почвы.

На рис. 5.22...5.25 представлены санитарные зоны слабонаправленной типовой вибраторной антенны УГД 8/11,5, которая имеет хорошую равномерность излучения в горизонтальной плоскости (азимутальный угол 0° соответствует направлению по биссектрисе угла раскрытия антенны):

- рис. 5.22 – зависимость санитарно-защитных зон от излученной мощности;
- рис. 5.23 – зависимость санитарно-защитных зон от параметров почвы;

- рис. 5.24 – зависимость санитарно-защитных зон от длины волны;
- рис. 5.25 – зависимость зон ограничения застройки от излученной мощности.

На рис. 5.26...5.29 представлены санитарные зоны типовой антенны СГД 2/4 РА (азимутальный угол 0° соответствует направлению максимального излучения антенны):

- рис. 5.26 – зависимость санитарно-защитных зон от излученной мощности;
- рис. 5.27 – зависимость санитарно-защитных зон от параметров почвы;
- рис. 5.28 – зависимость санитарно-защитных зон от длины волны;
- рис. 5.29 – зависимость зон ограничения застройки от параметров почвы.

На рис. 5.30...5.32 представлены санитарные зоны типовой ромбической антенны РГД 65/4 1 (азимутальный угол 0° соответствует направлению максимального излучения антенны):

- рис. 5.30 – зависимость санитарно-защитных зон от излученной мощности;
- рис. 5.31 – зависимость санитарно-защитных зон от параметров почвы;
- рис. 5.32 – зависимость зон ограничения застройки от параметров почвы.

На рис. 5.33...5.36 представлены санитарные зоны типовой антенны СГД 4/4 РА (азимутальный угол 0° соответствует направлению максимального излучения антенны):

- рис. 5.33 – зависимость санитарно-защитных зон от излученной мощности;
- рис. 5.34 – зависимость санитарно-защитных зон от параметров почвы;
- рис. 5.35 – зависимость зон ограничения застройки от излученной мощности;
- рис. 5.36 – зависимость зон ограничения застройки от длины волны.

На рис. 5.37 и 5.38 представлены санитарные зоны типовой антенны СГД 8/8 РА (азимутальный угол 0° соответствует направлению максимального излучения антенны):

- рис. 5.37 – зависимость санитарно-защитных зон от излученной мощности;

- рис. 5.38 – зависимость зон ограничения застройки от излученной мощности;

Отметим основные закономерности изменения санитарных зон типовых антенн ВЧ диапазона.

1. При увеличении излучаемой мощности все санитарные зоны расширяются во всех направлениях.

2. При переходе от почвы с низкой проводимостью (сухой почвы) к почве с хорошей проводимостью (сырой почве) санитарные зоны могут резко изменяться. Причем трудно выявить общие для всех антенн и случаев тенденции. Так, например, для антенн ВГД 6/10 (рис. 5.19), СГД 2/4 РА (рис. 5.27) и СГД 4/4 РА (рис. 5.34) в одних направлениях санитарно-защитные зоны увеличиваются, а других уменьшаются, а для антенн УГД 8/11,5 (рис. 5.23) и РГД 65/4 1 (рис. 5.31) – увеличиваются во всех направлениях. Можно с уверенностью отметить, что в направлениях максимального излучения наихудшим случаем (максимальные санитарные зоны) для синфазных антенн является сухая почва.

3. При увеличении высоты точки наблюдения санитарные зоны по конфигурации приближаются к диаграммам направленности антенн в горизонтальной плоскости в дальней зоне – ВГД 6/10 (рис. 5.20 и 5.21), СГД 2/4 РА (рис. 5.29), РГД 65/4 1 (рис. 5.32), СГД 4/4 РА (рис. 5.35 и 5.36) и СГД 8/8 РА (рис. 5.38). Это объясняется уменьшающимся влиянием составляющих поля, зависящих от параметров земной поверхности. Зоны ограничения застройки зависят от высоты, хотя слабо зависят от параметров почвы.

4. Для всех направленных антенн наблюдается сильная зависимость санитарных зон от длины волны в пределах рабочего диапазона. В направлениях максимального излучения в коротковолновой части рабочего диапазона длин волн санитарные зоны имеют максимальную протяженность, что естественно, поскольку электрические размеры антенн максимальны, а следовательно максимален коэффициент усиления антенн. Несколько другие результаты по слабонаправленным антеннам объясняются их сравнительно небольшой средней высотой подвеса, и, следовательно, при переходе к длинноволновой части рабочего диапазона длин волн эта высота еще более уменьшается, и влияние земной поверхности проявляется сильнее.

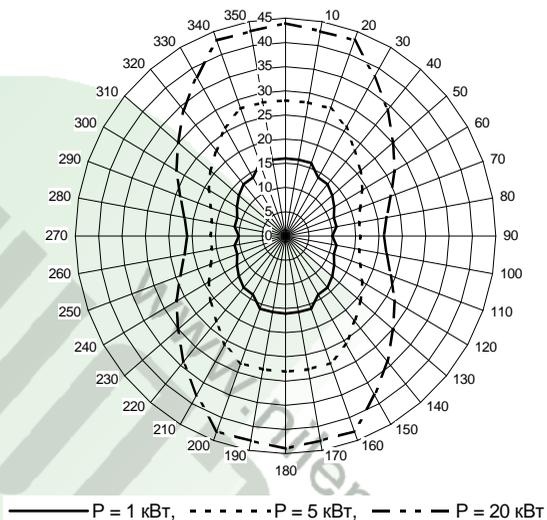


Рис. 5.18. Санитарно-защитные зоны антенны ВГД 6/10 в зависимости от излученной мощности (длина волны 16 м, почва сухая)

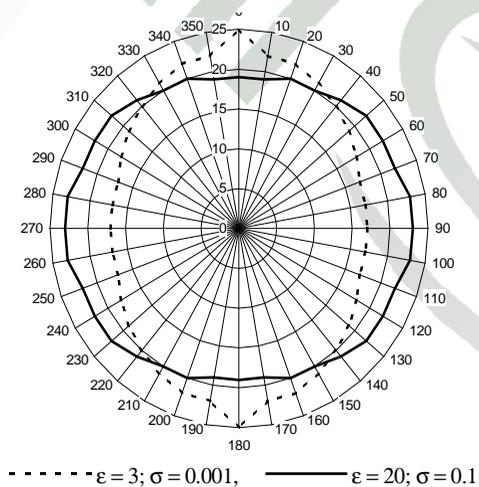


Рис. 5.19. Санитарно-защитные зоны антенны ВГД 6/10 в зависимости от параметра в земной поверхности (излученная мощность 5 кВт, длина волны 22,2 м, σ в См/м)

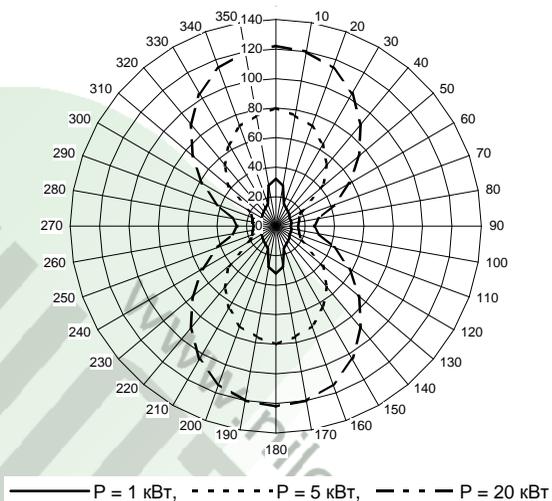


Рис. 5.20/ Зоны ограничения застройки на высоте 20 м для антенны ВГД 6/10 в зависимости от излученной мощности (длина волны 16 м, почва сухая)

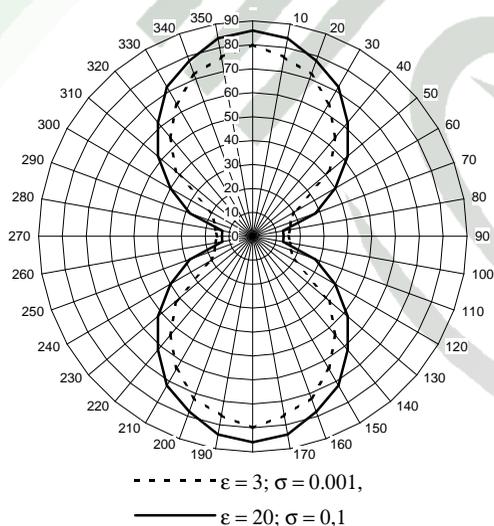


Рис. 5.21. Зоны ограничения застройки на высоте 20 м для антенны ВГД 6/10 в зависимости от параметров земной поверхности (излученная мощность 5 кВт, длина волны 16 м, σ в См/м)

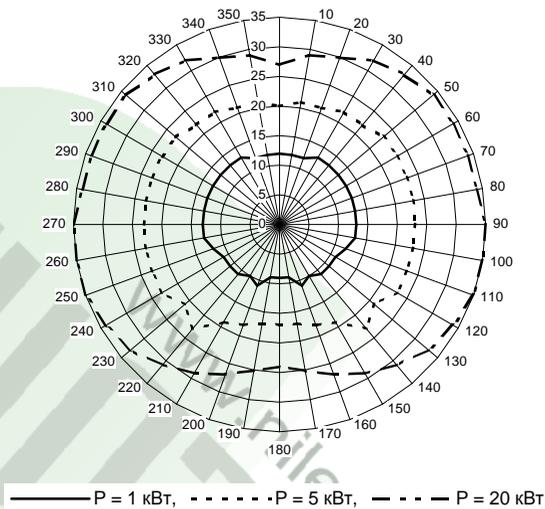


Рис. 5.22. Санитарно-защитные зоны антенны УГД 8/11,5 в зависимости от излученной мощности (длина волны 21,4 м, почва сухая)

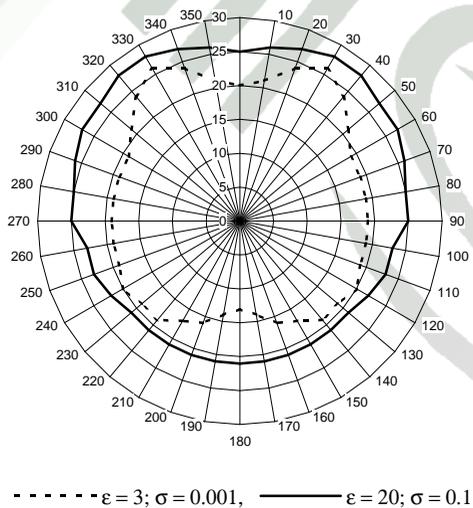


Рис. 5.23. Санитарно-защитные зоны антенны УГД 8/11,5 в зависимости от параметров земной поверхности (излученная мощность – 5 кВт, длина волны 12,6 м, σ в См/м)

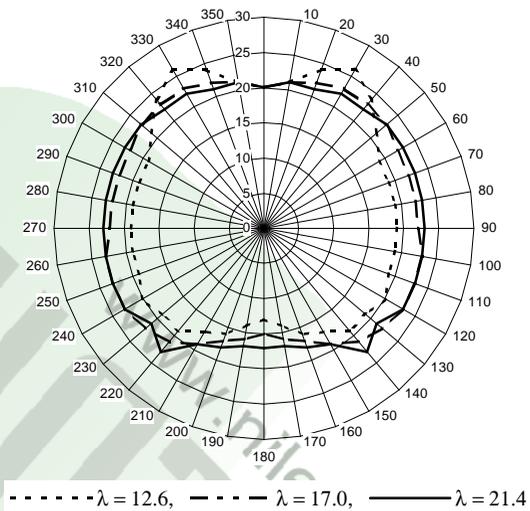


Рис. 5.24. Санитарно-защитные зоны антенны УГД 8/11,5 в зависимости от длины волны в метрах (излученная мощность – 5 кВт, почва сухая)

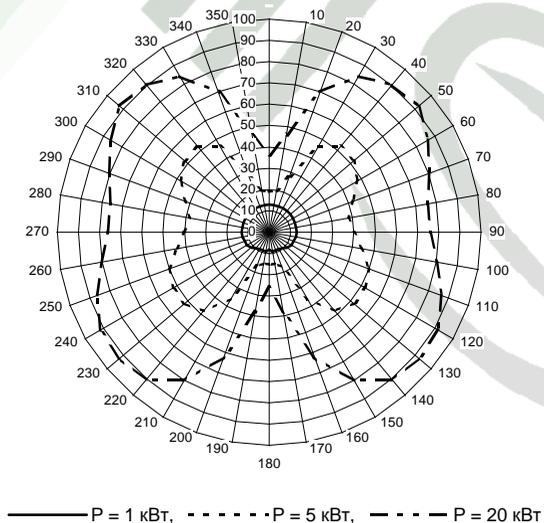
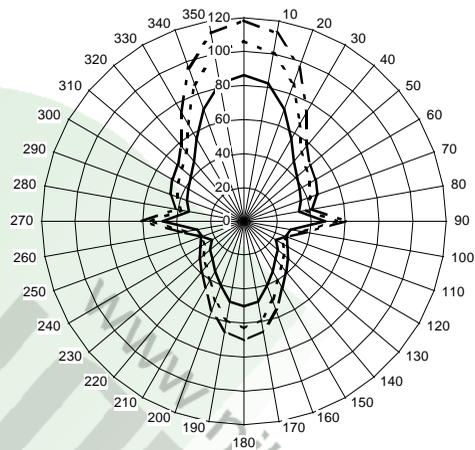
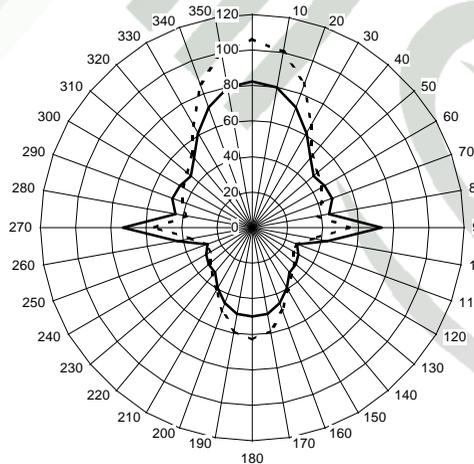


Рис. 5.25. Зоны ограничения застройки на высоте 20 м для антенны УГД 8/11,5 в зависимости от излученной мощности (длина волны 17 м, почва сухая)



— P = 50 кВт, - - - P = 100 кВт, - · - P = 150 кВт

Рис. 5.26. Санитарно-защитные зоны для антенны СГД 2/4 РА в зависимости от излученной мощности (длина волны 25 м, почва сухая)



- - - ε = 3; σ = 0.001, — ε = 20; σ = 0.1

Рис. 5.27. Санитарно-защитные зоны для антенны СГД 2/4 РА в зависимости от параметров почвы (длина волны 25 м, излученная мощность 100 кВт, σ в См/м)

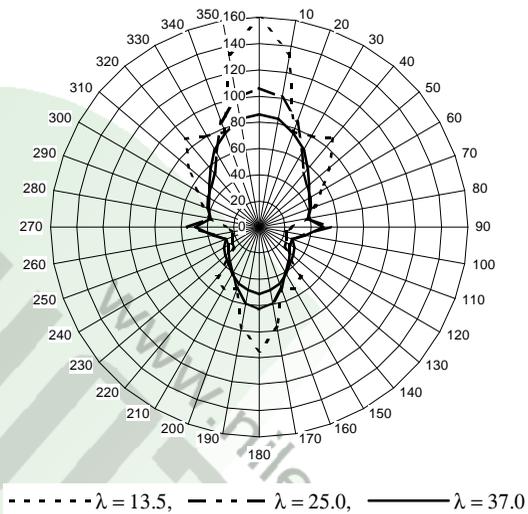


Рис. 5.28. Санитарно-защитные зоны для антенны СГД 2/4 РА в зависимости от длины волны в метрах (излученная мощность 100 кВт, почва сухая)

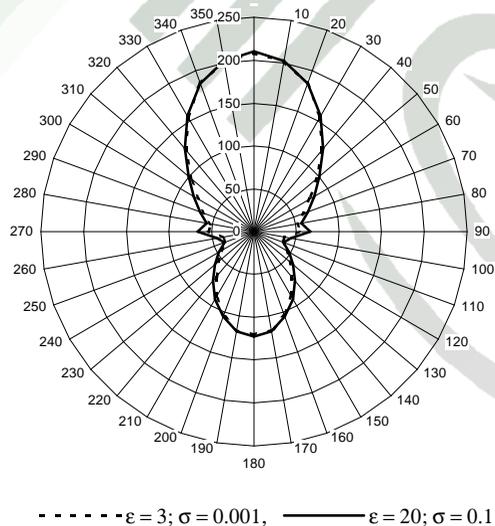


Рис. 5.29. Зоны ограничения застройки на высоте 20 м для антенны СГД 2/4 РА в зависимости от параметров почвы (длина волны 37 м, излученная мощность 100 кВт, σ в См/м)

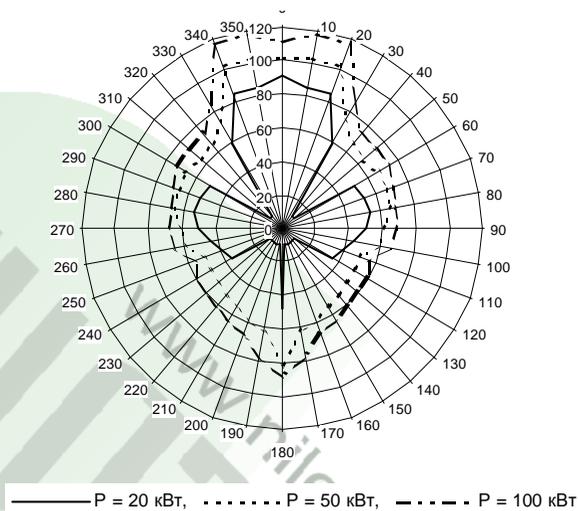


Рис. 5.30. Санитарно-защитные зоны для антенны РГД 65/4 1 в зависимости от излученной мощности (длина волны 40,5 м, почва сухая)

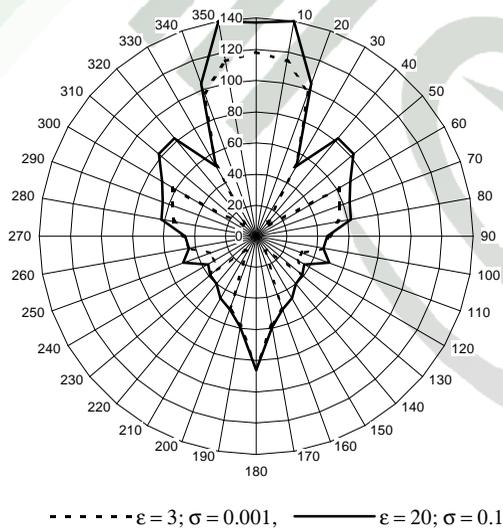


Рис. 5.31. Санитарно-защитные зоны для антенны РГД 65/4 1 в зависимости от параметров почвы (длина волны 28 м, излученная мощность 50 кВт, σ в См/м)

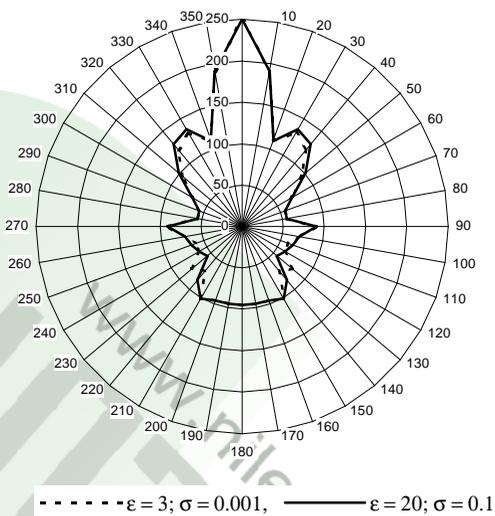


Рис. 5.32. Зоны ограничения застройки на высоте 20 м для антенны РГД 65/4 1 в зависимости от параметров почвы (длина волны 28 м, излученная мощность 50 кВт, σ в См/м)

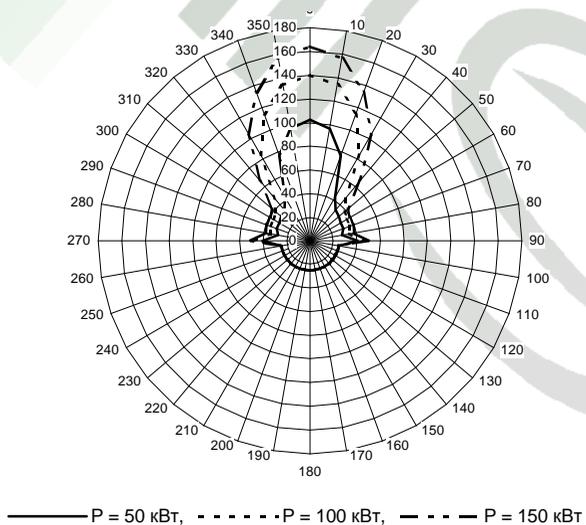


Рис. 5.33. Санитарно-защитные зоны для антенны СГД 4/4 РА в зависимости от излученной мощности (длина волны 42,3 м, почва сухая)

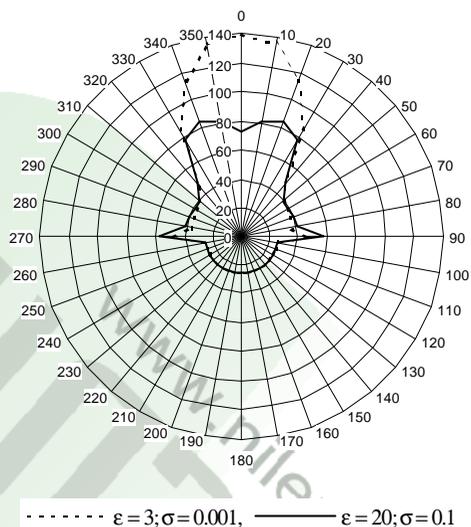


Рис. 5.34. Санитарно-защитные зоны для антенны СГД 4/4 РА в зависимости от параметров почвы (длина волны 42,3 м, излученная мощность 100 кВт, σ в См/м)

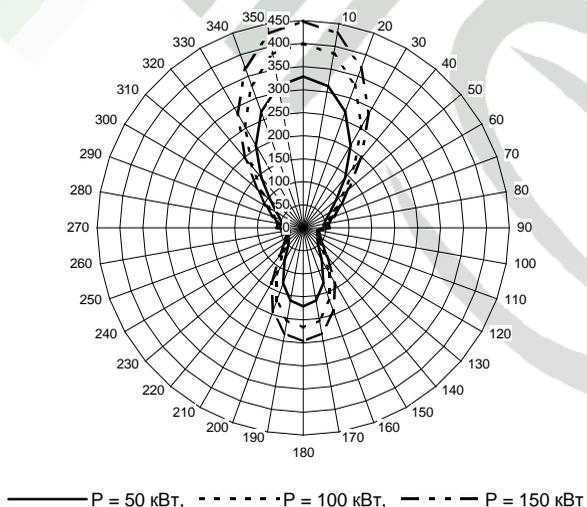


Рис. 5.35. Зоны ограничения застройки на высоте 20 м для антенны СГД 4/4 РА в зависимости от излученной мощности (длина волны 42,3 м, почва сухая)

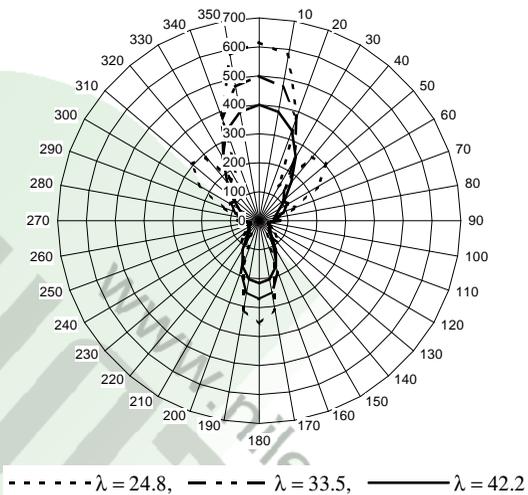


Рис. 5.36. Зоны ограничения застройки на высоте 20 м для антенны СГД 4/4 РА в зависимости от длины волны в метрах (излученная мощность 100 кВт, почва сухая)

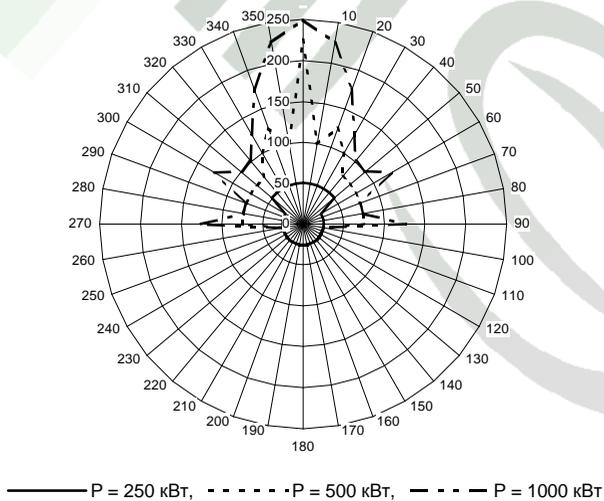


Рис. 5.37. Санитарно-защитные зоны для антенны СГД 8/8 РА в зависимости от излученной мощности (длина волны 38 м, почва сухая)

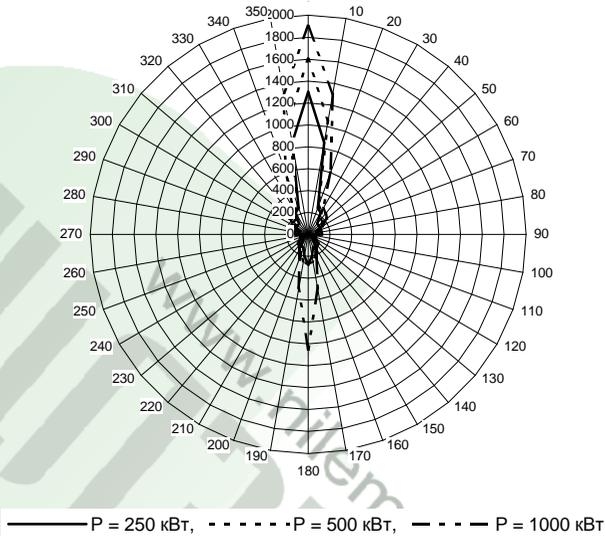


Рис. 5.38. Зоны ограничения застройки на высоте 20 м для антенны СГД 8/8 РА в зависимости от излученной мощности (длина волны 38 м, почва сухая)

5.4.2. Электромагнитные поля вблизи фидеров

Для целей электромагнитной экологии в первую очередь интересна напряженность поля вблизи фидеров на расстояниях до 10...20 метров [41], что в коротковолновой части ВЧ диапазона составляет $(1...2)\lambda$, а в длинноволновой – $(0,1...0,2)\lambda$. Очевидно, что такие расстояния недопустимо считать дальней зоной.

Ряд общих закономерностей проанализируем на примере двухпроводного фидера длиной 10λ , расположенного на высоте 3 м над поверхностью раздела. На рис. 5.39 и 5.40 линиями постоянного уровня в В/м изображены зависимости отдельных составляющих E_x , E_y и E_z поля, а также суммарной величины E_{Σ} от координат точки наблюдения (высоты над поверхностью раздела H и расстояния от фидера r) в середине фидера, в плоскости, перпендикулярной его оси, при $\lambda=10$ м, токе в фидере 10 А и КБВ = 1. На всех рисунках точками показано расположение проводов, а знаками «+» и «-» показаны их фазы питания.

Система координат расположена таким образом, что составляющие E_x и E_y находятся в горизонтальной плоскости, причем E_x параллельна, а E_y

перпендикулярна проводам фидера, E_z перпендикулярна поверхности раздела.

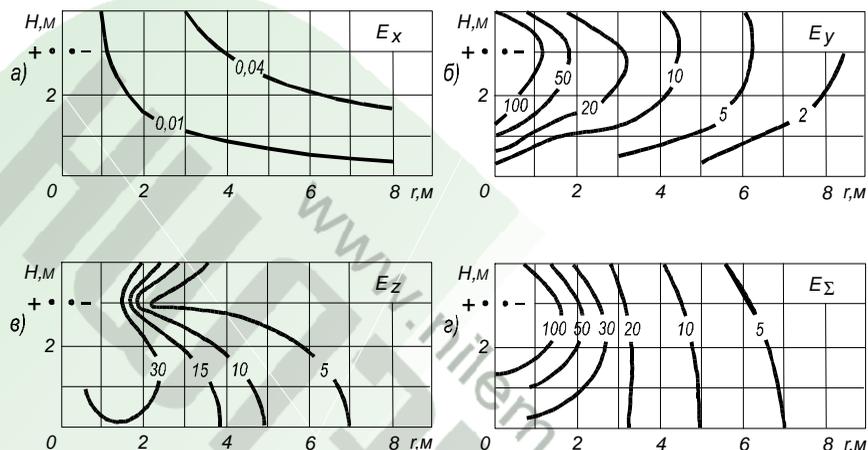


Рис. 5.39. Структура поля вблизи двухпроводного фидера, расположенного над идеально проводящей поверхностью раздела

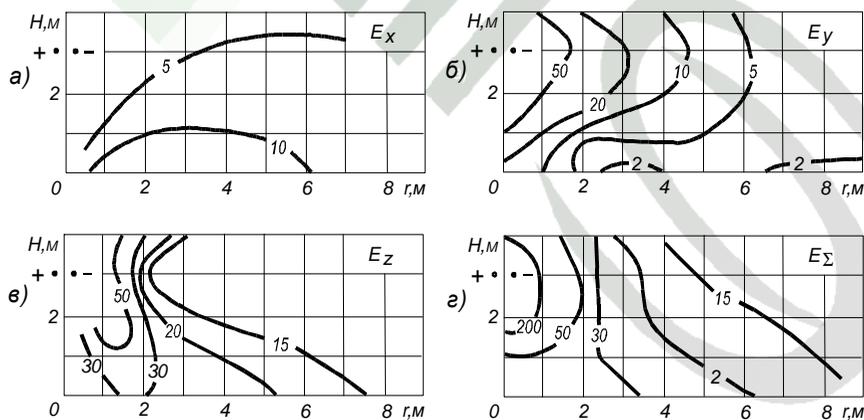


Рис. 5.40. Структура поля вблизи двухпроводного фидера, расположенного над земной поверхностью с параметрами сухой почвы

На рис. 5.39 рассмотрен случай идеальной проводимости поверхности раздела: тангенциальные составляющие E_x и E_y на самой поверхности равны нулю, и поле полностью определяется вертикальной составляющей E_z .

С увеличением высоты от 1 м составляющая E_y растет и становится соизмеримой с E_z . Составляющая E_x на расстояниях 10...20 м от фидера на 3...4 порядка меньше E_y и E_z .

Переход к реальной земной поверхности (рис. 5.40) с параметрами сухой почвы $\varepsilon = 3$ и $\sigma = 0,001$ См/м, приводит к резкому увеличению напряженности поля на поверхности раздела за счет составляющих E_y и, главным образом, E_x .

Отметим, что согласно расчетам изменение λ в пределах ВЧ диапазона практически не влияет на структуру поля проводных фидеров.

Рис. 5.41 иллюстрирует изменение структуры поля вблизи фидера при учете синфазной волны. По сравнению с режимом по противофазной волне (см. E_z на рис. 5.40) наблюдается значительное увеличение E_Σ в пределах рассматриваемых расстояний, если ток синфазной волны равен 0,2 от тока противофазной волны. В этом случае наблюдается резко выраженная асимметрия структуры поля вблизи фидера. При расчете напряженности поля затухание волн не учитывалось. Однако можно предположить, что противофазная волна будет иметь меньшее затухание, чем синфазная. Следовательно, ее энергетический вклад уменьшается по мере распространения вдоль фидера, что, в свою очередь, приводит к уменьшению асимметрии поля.

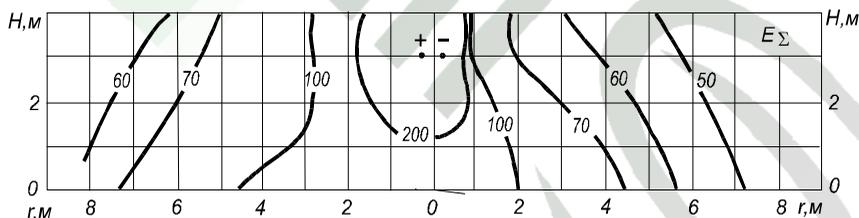


Рис. 5.41. Структура поля вблизи двухпроводного фидера, расположенного над земной поверхностью с параметрами сухой почвы, с учетом синфазной волны

В теории и практике антенно-фидерных устройств хорошо известно, что при прочих равных условиях работа на четырехпроводный перекрещенный фидер обеспечивает значительно лучшие энергетические характеристики линии передачи, чем в случае четырехпроводного неперекрещенного фидера. На рис. 5.42 и 5.43 показано распределение поля по различным составляющим вблизи неперекрещенного четырехпроводного фидера и перекрещенного соответственно. Поля рассчитывались для одинаковых условий и режимов работы: почва сухая $\varepsilon = 3$ и $\sigma = 0,001$ См/м, $\lambda = 10$ м, высота подвеса нижних проводов фидера 3 м, ток по каждому проводу фи-

дера в режиме противофазных волн равен 10 А. Переход к перекрестному фидеру приводит примерно к десятикратному уменьшению уровня всех составляющих, в том числе и на поверхности раздела. Практически это проявляется в снижении потерь в четырехпроводном фидере, вызванных свойствами земной поверхности и излучением фидера.

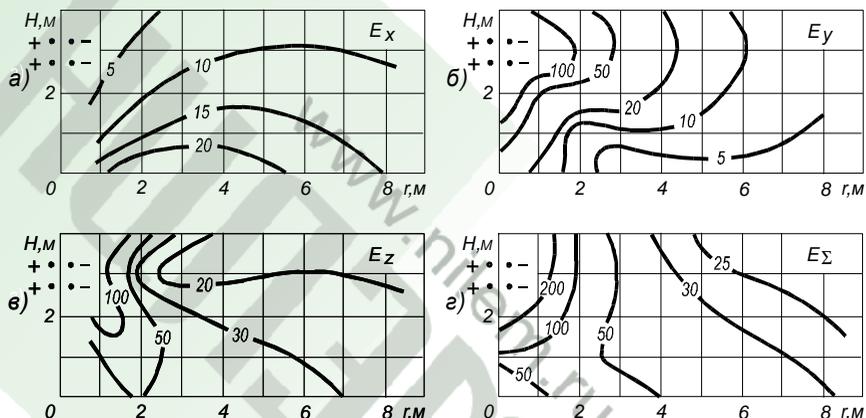


Рис. 5.42. Структура поля вблизи четырехпроводного неперекрещенного фидера, расположенного над земной поверхностью с параметрами сухой почвы

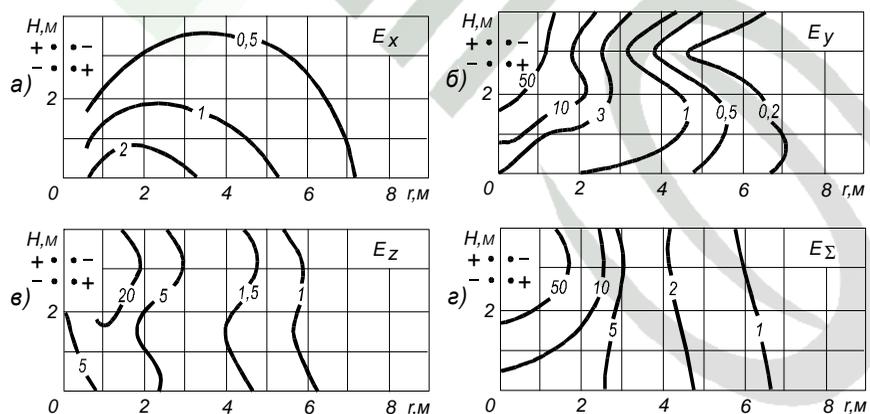


Рис. 5.43. Структура поля вблизи четырехпроводного перекрещенного фидера, расположенного над земной поверхностью с параметрами сухой почвы

Как показали расчеты, уменьшение КБВ в четырехпроводном перекрещенном фидере до 0,7 лишь на 15...20% увеличивает уровень всех составляющих, в том числе и суммарной составляющей. Структура поля при этом практически не изменяется.

ИЗЛУЧАЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОВЧ И УВЧ ДИАПАЗОНОВ

6.1. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ОВЧ И УВЧ ДИАПАЗОНОВ

К диапазону очень высоких частот (ОВЧ) и ультравысоких частот (УВЧ) в соответствии с международным регламентом радиосвязи относятся частоты от 30 до 300 МГц (10...1 м – метровые волны) и от 300 до 3000 МГц (1...0,1 м – дециметровые волны) соответственно. В отечественной технической литературе эти диапазоны часто называли диапазоном ультракоротких волн (УКВ).

Радиоволны этих диапазонов распространяются в основном по прямолинейным траекториям. Они слабо дифрагируют вокруг Земли и слабо отражаются от тропосферы. Эти частоты превышают максимально применимые частоты при ионосферном распространении радиоволн, потому они не испытывают регулярных отражений от ионосферы, уходя в космическое пространство.

Радиус действия систем передачи, работающих в этих диапазонах ограничен в основном пределами прямой (оптической) видимости между передающей и приемной антенной (рис. 6.1).

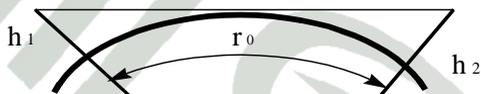


Рис. 6.1. К расчету расстояния радиовидимости

Незначительная дифракция радиоволн (огибание сферической Земли у горизонта) и слабая рефракция (отклонение направления распространения радиоволн от прямолинейного) в нижних слоях тропосферы несколько увеличивают расстояние радиовидимости (примерно на 15%), которое рассчитывается по формуле:

$$r_0 = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (6.1)$$

где r_0 – расстояние радиовидимости в км, h_1 и h_2 – высоты подвеса передающей и приемной антенн в м.

С точки зрения электромагнитной экологии представляют интерес ЭМП в непосредственной близости от излучающих технических средств. Расчеты и опыт электромагнитной экспертизы излучающих объектов ОВЧ и УВЧ диапазонов показывают, что для этих целей необходимо знание ЭМП на расстояниях приблизительно до 1000 м. В пределах таких расстояний по-

верхность Земли можно рассматривать как плоскую поверхность. На рис. 6.2 в точке A на высоте h_1 над Землей расположена передающая антенна, а в точке B – приемная. Расстояние между ними r .

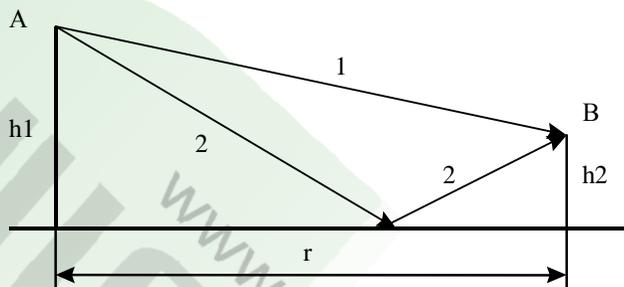


Рис.6.2. Двухлучевая модель распространения радиоволн в ОВЧ и УВЧ диапазонах

В точке приема имеет место явление интерференции прямой (1) и отраженной от поверхности Земли (2) радиоволн, которые в этих случаях иногда называют лучами. Интерференция приводит к тому, что вблизи излучающих технических средств этого диапазона ЭМП имеет резко осциллирующий характер. Положение максимумов и минимумов напряженности поля, а также их количество зависят от высоты подвеса передающей антенны, высоты точки наблюдения и длины волны. Величина максимумов поля может изменяться в зависимости от параметров поверхности отражения и достигать удвоенного значения интенсивности прямого луча. На рис. 6.3 приведена зависимость интерференционного множителя F от расстояния, которая иллюстрирует характер изменения напряженности поля вблизи излучающих технических средств ОВЧ и УВЧ диапазонов.

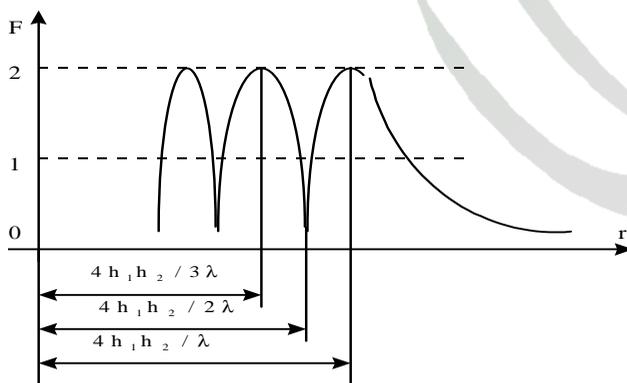


Рис. 6.3. Зависимость множителя распространения радиоволн от расстояния при двухлучевой модели распространения

На распространение радиоволн влияет и их поляризация. Поля, создаваемые различными мешающими источниками, такими, как промышленные устройства, зажигание автомашин, а также создаваемые за счет отражения от вертикальных стен зданий, деревьев и других вертикальных поверхностей, имеют вертикальную поляризацию радиоволн [43]. Этот фактор явился основной причиной выбора для телевизионного вещания, как правило, горизонтальной поляризации поля.

6.2. ХАРАКТЕРИСТИКА И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИЗЛУЧАЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

6.2.1. Технические средства телевидения

В диапазонах ОВЧ и УВЧ основными техническими средствами, существенно влияющими на биологически значимую электромагнитную обстановку, являются технические средства телевидения, частотно модулированного (ЧМ) вещания и подвижной связи различных назначений и стандартов.

Зоной обслуживания (полезной зоной) вещательного передатчика называется территория, в пределах которой напряженность поля, создаваемая передатчиком, обеспечивает прием вещания на массовую приемную аппаратуру в L , %, точек приема с определенным качеством в течение определенного (полезного) процента времени $T_{\text{пол}}$, % [47].

Согласно международным рекомендациям принимают $T_{\text{пол}}=90$ %, а в течение отрезка времени $T_{\text{пом}} = 10\%$ допускается наличие заметных помех.

Критерием качества приема при наличии только природных и промышленных помех является превышение минимально допустимой напряженности поля $E_{\text{мин}}$ полем полезного передатчика $E_{\text{пол}}$ – в пределах полезной зоны должно выполняться условие $E_{\text{пол}} > E_{\text{мин}}$.

В табл. 6.1 приведены принятые в России уровни $E_{\text{мин}}$ на границе полезной зоны в зависимости от диапазона.

Таблица 6.1

| Телевизионный диапазон | I | II | III | IV и V | ОВЧ ЧМ |
|-----------------------------|----|----|-----|--------|--------|
| $E_{\text{мин}}$, дБ/мкВ/м | 50 | 54 | 57 | 70 | 46 |

К техническим средствам ОВЧ и УВЧ диапазонов, излучение которых вносит существенный вклад в электромагнитную обстановку городов и населенных пунктов, в первую очередь относят радиосистемы передачи, предназначенные для организации телевидения, радиовещания и радиосвязи с подвижными объектами.

Прежде, чем перейти к изложению метода анализа оценки электромагнитной обстановки вблизи радиотехнических станций ОВЧ и УВЧ диапазонов, целесообразно дать хотя бы самые общие сведения об основных технических средствах передающих технических средств этих диапазонов.

Для телевизионного вещания в соответствии с [44] отведены пять участков частот в диапазонах ОВЧ и УВЧ:

- 41...68 МГц – I-й диапазон;
- 87,5...100 МГц – II-й диапазон;
- 162...230 МГц – III-й диапазон;
- 470...582 МГц – IV-й диапазон;
- 582...960 МГц – V-й диапазон.

Телевизионная сеть России работает в соответствии с частотным планом размещения передающих телевизионных станций. Этот план служит основой для развития передающей телевизионной сети. При выборе места для строительства передающих телевизионных станций до последнего времени руководствовались только требованиями электромагнитной совместимости и практически не принимали во внимание проблемы электромагнитной экологии.

Организация телевизионного вещания обеспечивается комплексом различных технических средств, составляющих телевизионную передающую сеть, основу которой составляют передающие телевизионные станции. В соответствии с [43] передающие телевизионные станции обычно называются передающей станцией (ПС), ретрансляционной телевизионной станцией (РТС) или радиотелевизионной передающей станцией, центром (РПС, РТПС, РТПЦ). Передающая телевизионная станция является конечным звеном телевизионной передающей сети, обеспечивая передачу радиосигналов вещательного телевидения, создаваемых в телевизионном центре. В состав передающей телевизионной станции входят телевизионная радиостанция, опора (мачта или башня) для размещения антенн телевизионной радиостанции и соответствующие строения и службы.

По мощности радиосигнала изображения на выходе телевизионного радиопередатчика станции условно подразделяют на мощные (более 1 кВт) и малой мощности (менее 1 кВт).

Радиус действия передающей телевизионной станции, в силу специфики распространения радиоволн метрового и дециметрового диапазонов, используемых для телевизионного вещания, незначительно превышает расстояние прямой видимости между передающей и приемной антеннами. Это расстояние зависит в основном от высоты подъема антенн над поверхностью Земли. Мощность же передатчика определяет только напряженность поля в зоне прямой видимости. Поэтому для увеличения зоны действия пе-

редающей телевизионной станции антенну следует устанавливать на высоких опорах с использованием также и естественных высот местности. В качестве типовых применяют опоры высотой 230 и 350 м и телевизионные радиопередатчики мощностью в канале изображения 5, 25 и 50 кВт. В этом случае радиус уверенного приема передающей телевизионной станции составляет 60...100 км. В связи с этим для обеспечения повсеместного приема телевидения на больших территориях необходимо сооружать большое число передающих станций, отстоящих друг от друга на расстояние не более 100...150 км.

В табл. 6.2 приведен перечень типовых телевизионных радиостанций и передатчиков и их основные параметры. По принятой терминологии телевизионная радиостанция отличается от телевизионного радиопередатчика тем, что в ее состав входят высокочастотный фидер и передающая антенна.

Таблица 6.2

Типовые телевизионные радиостанции и передатчики

| Название радиостанции или передатчика | Телевизионный диапазон, диапазон частот или каналы | Пиковая мощность видео/номинальная мощность звука, кВт |
|---------------------------------------|--|--|
| «Якорь» | 1...5 | 5/1,5 |
| «Ураган» | 1...5 | 50/15, 50/7,5 |
| «Игла» | 6...12 | 5/1,5 |
| «Зона» | 6...12 | 5/1,5 |
| «Зона-II» | 6...12 | 5/0,6 |
| «Лен», «Дон» | 6...12 | 50/15, 50/7,5 |
| «Ладога» | 21...39 | 25/5 |
| ТВ-IV-V-20/4 | 470...638 МГц | 20/4 |
| ТВ-IV-V-25 | IV...V диапазоны | 10 - 25/1 - 2,5 |
| АТРС-I-II-5/0,5 | 48,5...100 МГц | 5/0,5 |
| АТРС-III-5/0,5 | 174...230 МГц | 5/0,5 |
| АТРС-I-II-III-50/5 | 48,5...100 МГц | 50/5 |
| «Ильмень 2-1» | 470...638 МГц | 25/2,5 - 5 |
| «Ильмень 2-2» | 638...790 МГц | 25/2,5 - 5 |
| «Рица» | 470...638 МГц | 5/0,5 |
| «Лама» | 638...790 МГц | 5/0,5 |
| «Сиваш» | IV - V диапазоны | 1/0,1 |
| «Эльгон» | 48,5...100 МГц | 1/0,1 |
| «Баскунчак» | 174...230 МГц | 1/0,1 |
| ТВР-100 | II - III диапазоны | 0,1/0,01 |
| ТВП-IV-V-1 | 470...790 МГц | 1/0,1 |
| ТВП-IV-20 | 470...638 МГц | 20/4 |
| ТВП-IV-V-25 | 470...790 МГц | 25/2,5 |
| «Онега-1» | IV - V диапазоны | 1/0,1 |

Разновидностью телевизионных радиостанций является телевизионный ретранслятор. Если сигнал вещательного телевидения для ретранслятора получают от передающей телевизионной станции большой мощности по эфиру, то такой ретранслятор называют эфирным. В состав его должно входить приемное устройство и передатчик, обеспечивающий переизлучение сигнала на другом телевизионном канале. Если сигнал вещательного телевидения получают по радиорелейному каналу, то ретранслятор называют радиорелейным. Телевизионные ретрансляторы, как правило, имеют выходную мощность по каналу изображения менее 1 кВт и обычно называются ретрансляторами малой мощности [43].

Релейные ретрансляторы устанавливаются на промежуточных пунктах радиорелейных линий для обеспечения телевидением небольших районов и поселков. Эфирные ретрансляторы используются для расширения зоны приема телевидения основных, обычно мощных, станций. Телевизионные ретрансляторы успешно используются также для создания нормальных условий приема в теневых зонах, образуемых рельефом местности в радиусе действия мощных станций: в домах, расположенных у крутых и высоких берегов рек или за возвышенностями в пределах города, в поселках размещенных в низинах и особенно гористой местности, где поселки, как правило, находятся в ущельях. Приемная антенна ретранслятора устанавливается на возвышенности, где уровень сигнала высок и устойчив. Излучение передающей антенны направляется на затененную зону.

Широко используются также ретрансляторы, принимающие сигналы, передаваемые через искусственные спутники Земли [43].

В табл. 6.3 приведен перечень современных типовых телевизионных эфирных и радиорелейных ретрансляторов и их основные параметры.

Таблица 6.3

Типовые телевизионные ретрансляторы

| Название телевизионного ретранслятора или передатчика | Телевизионный диапазон | Мощность, Вт |
|---|-------------------------|--------------|
| ПТВ-10 | I-II-III-IV-V диапазоны | 10 |
| РТВ-1 | I-II-III-IV-V диапазоны | 1 |
| РТВ-Р-1 | I-II-III-IV-V диапазоны | 1 |
| РТВ-Р-10 | I-II-III-IV-V диапазоны | 10 |
| РТВ-Р-100 | I-II-III-IV-V диапазоны | 100 |
| РТВ-Э-1 | I-II-III-IV-V диапазоны | 1 |
| РТВ-Э-10 | I-II-III-IV-V диапазоны | 10 |
| РТВ-Э-100 | I-II-III-IV-V диапазоны | 100 |

6.2.2. Технические средства радиовещания с частотной модуляцией

Для звукового радиовещания с частотной модуляцией используются две полосы частот в ОВЧ-диапазоне: 66...74 МГц и 100...108 МГц.

Исторически сложилась ситуация, когда технические средства радиовещания с частотной модуляцией и телевидения размещались территориально на одной площадке, а антенны устанавливались на единой опоре (мачте или башне). В связи с бурным развитием этих технических средств и появлением большого количества как телевизионных, так и радиовещательных станций, сейчас часто наблюдается раздельное размещение технических средств телевидения и радиовещания с частотной модуляцией.

Передачики радиовещания с частотной модуляцией строятся на тех же принципах, что и передачики каналов звукового сопровождения телевизионного передатчика.

В табл. 6.4 приведен перечень некоторых передатчиков звукового вещания с частотной модуляцией и их основные параметры.

Таблица 6.4

Типовые передатчики ЧМ радиовещания

| Название передатчика | Диапазон частот, МГц | Выходная мощность, кВт |
|----------------------|----------------------|------------------------|
| «Дождь-1» | 66...73 | 3,2 |
| «Дождь-2» | 66...73 | 4 |
| «Мед» | 67...73 | 15 |
| «Тенгиз-С» | 66...74, 88...108 | 2 |
| «Блиц-5» | 66...74 | 1,1 |
| «Иней-1» | 100...108 | 1 |
| «Иней-4» | 100...108 | 4 |
| РЧМ-0,03 | 66...74, 100...108 | 0,03 |
| РЧМ-0,1 | 66...74, 100...108 | 0,1 |
| РЧМ-0,25 | 66...74, 100...108 | 0,25 |
| РЧМ-0,5 | 66...74, 100...108 | 0,5 |
| «Росинка» | 65,9...74, 100...108 | 0,001 и 0,03 |
| «Роса» | 65,9...74, 100...108 | 0,1 и 0,25 |
| «Роса-250 ПТ» | 100...108 | 0,25 |
| ПЧМ-30 | 66...74, 100...108 | 0,03 |

6.2.3. Технические средства сухопутной подвижной связи

Сухопутная подвижная связь реализуется в виде сетей сотовой, транкинговой и персональной (пейджинговой связи).

Системы сотовой связи создаются в крупных населенных пунктах, где число потенциальных пользователей заведомо велико и сеть будет рентабельной. Это наиболее дорогая разновидность подвижной связи.

Сеть сотовой связи строится в виде совокупности ячеек (сот), обслуживающих определенную территорию. На схемах ячейки обычно изображают в виде равновеликих шестиугольников, хотя на практике они таковыми не являются в силу влияния застройки, рельефа, и т. п.

В центре каждой ячейки находится базовая станция (БС). Основными техническими средствами БС являются приемопередатчик и антенна. В случае высокой плотности населения в зоне расположения БС ячейка разбивается на ряд секторов (обычно 3, реже 6). В каждом секторе функционирует свой приемопередатчик и своя антенна с характеристикой направленности соответствующей формы. В случае трехсекторной антенны ширина диаграммы направленности антенны каждого сектора в горизонтальной плоскости должна быть 120° , а шестисекторной – 60° . Антенны располагаются либо на крыше здания, либо на специальной опоре. Как в односекторной ячейке, так и в каждом секторе многосекторной антенны может устанавливаться несколько приемопередатчиков на разные несущие частоты. Это делается для увеличения емкости системы.

В России наиболее распространенными являются стандарты сотовой связи AMPS, NMT 450, GSM, CDMA. Основные (с позиции электромагнитной экологии) технические характеристики систем сотовой подвижной связи приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Основные характеристики некоторых систем сотовой связи

| Стандарт | AMPS | NMT 450 | GSM | CDMA |
|--|-----------|-------------|-----------|-----------|
| Полоса частот БС – МС, МГц. | 869...894 | 463...467,5 | 935...960 | 869...894 |
| Полоса частот МС – БС, МГц. | 824...849 | 553...457,5 | 890...915 | 824...849 |
| Максимальная мощность излучения БС, Вт | 100 | 50 | 50 | 50 |

Максимальная выходная мощность передатчиков мобильных станций (МС), выпускаемых различными фирмами находится в пределах 0,5...8 Вт для носимых вариантов и 15...20 Вт, устанавливаемых в транспортных средствах. Так, например, в рамках стандарта GSM принято 5 классов МС: 1 класс (для транспортных средств) – 20 Вт, 2 класс – 8 Вт, 3 класс – 5 Вт, 4 класс – 2 Вт, 5 класс – 0,8 Вт.

Системы транкинговой связи предназначены для создания корпоративных сетей (связь в интересах отдельных ведомств, служб, организаций – скорой медицинской помощи, милиции, пожарной охраны, аэропортов, вокзалов и т. п.). Основное отличие транкинговых сетей от сотовых состоит в

том, что ни предоставляют абонентам меньший набор услуг, но за счет этого проще и дешевле.

Одна из первых отечественных систем транкинговой связи – «Алтай» до сих пор работает в диапазоне 330 МГц. Самой же распространенной системой в России на сегодняшний день является система стандарта (протокола) Smartrunk. Она может работать в диапазонах 160 МГц, 330 МГц, 450 МГц. Мощность базовой станции обычно не превышает 25 Вт.

Системы стандарта MPT 1327 рекомендованы Государственным комитетом Российской Федерации по телекоммуникациям в качестве основного. Ведущие позиции среди подобных систем занимает система «ACTIONET». Она может работать в диапазонах 160 МГц, 330 МГц, 400 МГц, 800 МГц. Базовая станция имеет регулируемую выходную мощность в пределах 5...50 Вт. Выходная мощность МС в зависимости от варианта: 1...5 Вт для носимого варианта, 5...25 Вт – при установке в транспортном средстве, 1...25 Вт – для стационарного варианта.

Пейджинговые системы предназначены, как правило, для односторонней связи с абонентами с целью передачи на миниатюрные абонентские приемники (пейджеры) коротких буквенно-цифровых сообщений. Наиболее известным широко применяемым в мире является стандарт кодирования сигналов для пейджера POCSAG. В последние годы все более широкое распространение находят стандарты FLEX и ERMES. Стандарт ERMES рекомендован в качестве единого стандарта России.

Передатчики базовых станций пейджинговой связи, выпускаемые различными фирмами, работают в диапазонах 150 МГц, 170 МГц, 280 МГц, 330 МГц, 400 МГц, 500 МГц, 930 МГц и имеют выходную мощность 5...350 Вт. В некоторых случаях используются усилители с выходной мощностью до 500 Вт.

6.2.4. Обзор антенн телевидения, ЧМ радиовещания и подвижной связи

Требования к направленности. Технические средства телевидения, радиовещания и подвижной связи предназначены для создания электромагнитного поля в точках, где находится телевизионный или радиоприемник, т.е. там, где находится человек. При этом регламентируется минимальная напряженность поля $E_{\text{мин}}$ на границе зоны обслуживания, а в других точках и вблизи антенн напряженность поля может быть значительно больше.

Характеристика направленности антенн в горизонтальной плоскости выбирается по конфигурации зоны обслуживания. Для равнинной или слабопересеченной местности, как правило, в горизонтальной плоскости формируется ненаправленная (круговая) характеристика направленности. Реальная характеристика всегда отличается от круговой (рис. 6.4).

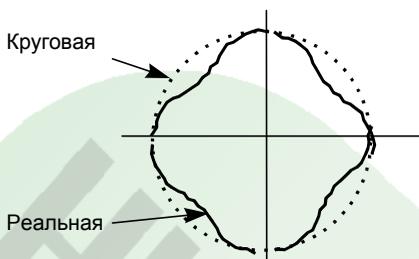


Рис. 6.4. Характеристика направленности в горизонтальной плоскости

Для оценки этого отличия вводится параметр, характеризующий неравномерность характеристики:

$$\Delta = \frac{E_{\text{мин}}}{E_{\text{макс}}}$$

В случае размещения технических средств телевидения и радиовещания в гористой местности или на побережье для лучшего использования излученной мощности и устранения переотражений сигналов формируется направленная в горизонтальной плоскости характеристика.

В вертикальной плоскости характеристика направленности должна, во-первых, уменьшить излучение электромагнитной энергии в свободное пространство в секторе углов выше горизонта. С этой целью главный лепесток характеристики наклоняют к Земле на угол ϕ , который зависит от высоты подвеса антенны и составляет величину до $1...2^\circ$ (рис.6.5). Наклон характеристики направленности, как правило, обеспечивают изменением амплитудно-фазового распределения питания антенной системы.



Рис. 6.5. Иллюстрация наклона диаграммы направленности в вертикальной плоскости

Во-вторых, форма характеристики направленности должна обеспечивать равномерную напряженность поля в зоне обслуживания. Такому требованию удовлетворяет, так называемая, косекансная характеристика направленности, которая обеспечивает убывание напряженности поля пропорционально квадрату расстояния.

Коэффициент усиления антенн должен быть как можно большим. Реальные значения коэффициентов усиления изменяются в пределах 6...10 для низкочастотной части телевизионного диапазона и до 50 в высокочастотной части.

Размещение антенн. На рис. 6.6 приводится классическое размещение антенн телевидения и радиовещания на типовой телевизионной башне. Верхнюю часть башни занимала турникетная антенна. Антенны этого класса весьма эффективны для целей получения круговых характеристик направ-

ленности. Однако, имеется возможность размещения на башне или мачте только одной такой антенны, поэтому до последнего времени это была обычно антенна I...V телевизионных каналов, размеры которой при прочих равных условиях самые большие. Эти антенны были разработаны в 3-х и 6-ти этажных вариантах [45]. Ниже по телу башни размещались панельные антенны более высоких телевизионных каналов, размеры и конструктивные особенности которых зависели от частоты канала и требований к зоне обслуживания. Для ЧМ радиовещания обычно использовались либо панельные антенны, либо специально разработанная для этих целей угловая антенна.

Интенсивное развитие эфирного телевидения, заключающееся в основном в повсеместном увеличении каналов телевизионного вещания, заставило пересматривать размещение антенн на типовых башнях [26]: стали использовать нижнюю часть тела башни (уровни ниже 100 м), разработали и размещают оригинальные конструкции антенн, больше используют совмещение каналов в одной антенне, антенны стали размещать на крышах домов, вспомогательных мачтах и т.д.

Турникетная антенна. Передающая турникетная антенна телевидения – это вертикальная конструкция, состоящая из набора крестообразных плоскостных вибраторов (рис. 6.7), которые бывают двух типов: П-образные и Ж-образные (рис. 6.8).

Круговая характеристика направленности в горизонтальной плоскости обеспечивается противофазным питанием отдельных вибраторов, а увеличение коэффициента усиления достигается увеличением количества этажей вибраторов до 3-х или 6-ти. Для снижения ветровых нагрузок вибраторы изготавливают из прутьев.

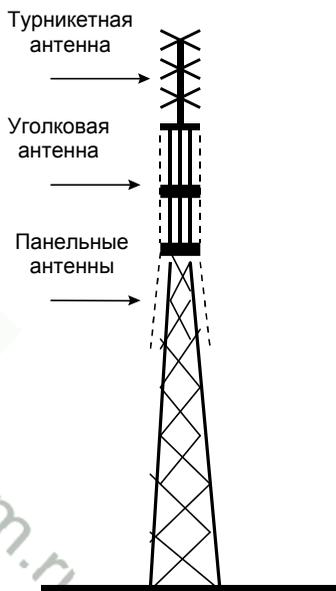


Рис.6.6. Размещение антенн на типовой телевизионной башне

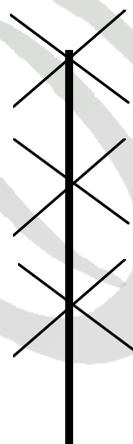


Рис. 6.7. Схема трехэтажной турникетной антенны

Панельные антенны. Панельная антенна – это одна из разновидностей вибраторных антенн. Несколько полуволновых или волновых вибраторов конструктивно объединяют в один блок, который кроме вибраторов содержит металлический решетчатый рефлектор. Вибраторы располагаются на расстоянии $\lambda/4$ от рефлектора. Расстояние между полуволновыми вибраторами выбирается около $0,5\lambda$, а между волновыми – $0,5..0,7\lambda$. Такой блок называют панелью, а количество вибраторов обычно выбирают 2 или 4 в метровом диапазоне и 4 или 8 в дециметровом диапазоне. На рис. 6.9 изображен двухвибраторный блок панельной антенны. Для увеличения направленности (увеличения коэффициента усиления) на каждой грани призматической опоры устанавливают несколько панелей друг над другом. Количество этажей вибраторов в многоэтажной панельной антенне может достигать 24.

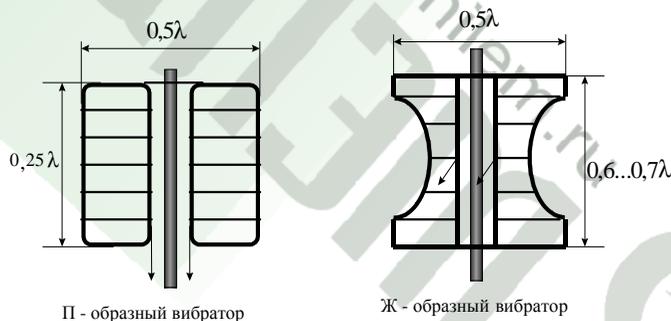


Рис. 6.8. Типы плоскостных вибраторов, применяемых для туникетных антенн телевизионного вещания

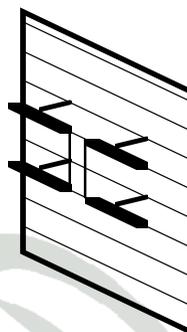


Рис. 6.9. Отдельный двухвибраторный блок панельной антенны

Для выполнения требований по равномерности характеристики направленности и для формирования необходимой характеристики направленности в горизонтальной плоскости панели одного этажа по-разному размещают на различных гранях призмы. На рис. 6.10 показаны некоторые варианты расположения панелей одного этажа в сечении призматической опоры. Варианты 1, 2, 3 – для достижения лучшей равномерности характеристики направленности в горизонтальной плоскости на призмах различного сечения для различных каналов. Варианты 4, 5 – для получения различных характеристик направленности в горизонтальной плоскости. Этого достигают изменением количества панелей в этаже, изменением наклона панелей, перераспределением мощности в панелях одного этажа и т.д.

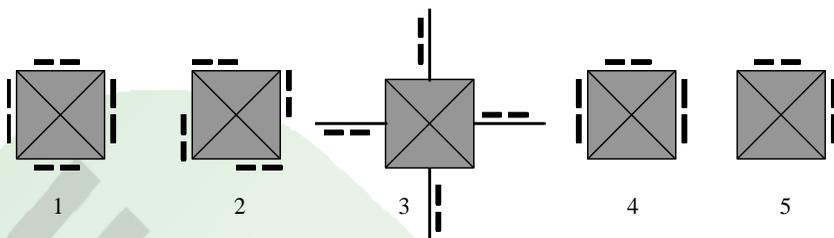


Рис. 6.10. Варианты размещения блоков панельных антенн одного этажа

Угловая антенна. Эта антенна до последнего времени была самой распространенной антенной для ЧМ радиовещания в диапазоне 66...74 МГц. Она разрабатывалась в 3-х и 6-ти этажных вариантах для типовой башни 3803 КМ-4 при установке ее в сечении $1,75 \times 1,75 \text{ м}^2$. Схема расположения вибраторов одного этажа приведена на рис. 6.11.

Для лучшей равномерности характеристики направленности в горизонтальной плоскости применены угловые волновые вибраторы – угол между плечами вибратора 120° . Волновой вибратор допускает применение непосредственного крепления к металлической башне, что обеспечивает жесткость конструкции и грозозащиту.

В настоящее время при реконструкции башен эти антенны повсеместно убирают, заменяя их на панельные при многократном использовании антенн.

Вибраторные антенны. В инженерной практике в качестве передающих антенн ОВЧ и УВЧ диапазонов для телевидения, ЧМ вещания и подвижной радиосвязи используется множество разновидностей простых вибраторных антенн. На рис. 6.12 приведены примеры размещения симметричных и несимметричных вибраторов на теле металлической башни. Отдельные металлические части конструкции башни могут выполнять роль пассивного рефлектора.

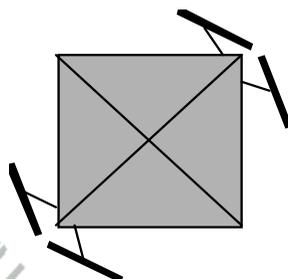


Рис. 6.11. Расположение вибраторов одного этажа угловой антенны

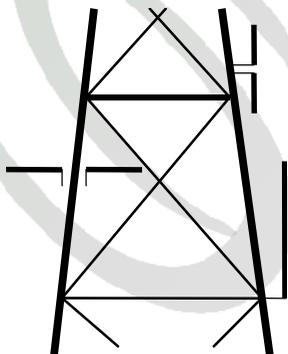


Рис. 6.12. Примеры размещения простых вибраторных антенн на теле башни

На рис. 6.13 приведены некоторые распространенные конструкции простых вибраторных передающих антенн ОВЧ и УВЧ диапазонов:

1 – несимметричный вертикальный вибратор, длину которого с целью получения максимально возможного коэффициента усиления обычно выбирают равной $5/8\lambda$;

2 – несимметричные вертикальные вибраторы с противовесами различной конструкции;

3 – симметричный вертикальный вибратор;

4 – несимметричный вертикальный вибратор с пониженным волновым сопротивлением и противовесом;

5 – системы вертикальных симметричных вибраторов и коллинеарные антенны.

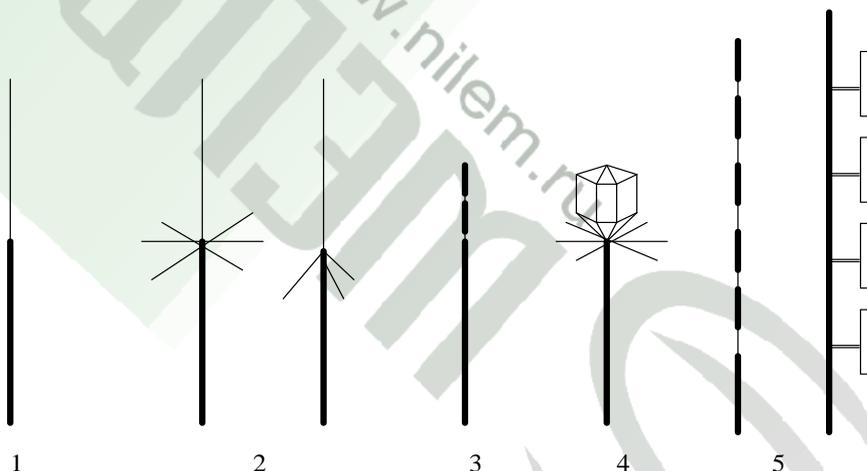


Рис. 6.13. Некоторые распространенные конструкции передающих антенн систем подвижной связи

Все эти антенны имеют круговую характеристику направленности в горизонтальной плоскости.

6.3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА БЛИЖНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В практике санитарно-гигиенической и экологической экспертизы излучающих объектов ОВЧ и УВЧ диапазонов чаще всего приходится иметь дело с расчетом электромагнитной обстановки в дальней зоне излучения. Исключение составляют случаи, когда приходится прогнозировать обстановку в непосредственной близости от антенн – на крышах зданий и мачтах, где

установлены антенны, и где предполагается нахождение обслуживающего персонала.

Расчет напряженности поля вблизи антенн технических средств ОВЧ и УВЧ диапазонов рекомендовано проводить [21, 46, 47] по формуле:

$$E = \frac{\sqrt{30PG\eta}}{R} k_{\phi} F(\alpha) F(\varphi), \quad (6.1)$$

где E – напряженность поля, В/м; P – мощность на входе антенно-фидерного тракта, Вт; G – коэффициент усиления антенны относительно изотропного излучателя в направлении максимального излучения; η – коэффициент потерь в антенно-фидерном тракте; R – расстояние от антенны до расчетной точки (наклонная дальность), м; $F(\alpha)$ – нормированная диаграмма направленности в вертикальной плоскости; $F(\varphi)$ – нормированная диаграмма направленности в горизонтальной плоскости; α, φ – угловые координаты точки наблюдения; $k_{\phi} = 1,15 \dots 1,3$ коэффициент, учитывающий двухлучевую модель распространения в условиях статистически неоднородной среды.

При переходе от напряженности поля к плотности потока энергии (ППЭ), что необходимо, например, для анализа электромагнитной обстановки вблизи технических средств подвижной связи, можно воспользоваться формулой пересчета для дальней зоны:

$$ППЭ = E^2 / 3,77, \quad (6.2)$$

где E подставляется в В/м, а ППЭ получается в мкВт/см².

Для дальней зоны функции $F(\alpha)$ и $F(\varphi)$ имеют смысл паспортной диаграммы направленности. Анализ опыта проведения электромагнитной экспертизы показывает, что часто техническая документация на излучающие технические средства не имеет необходимого набора данных по направленным свойствам антенн (диаграммы направленности и коэффициент усиления), а также данных по антенно-фидерному тракту. В таких случаях прогнозирование становится весьма затруднительным и даже практически невозможным. Такая ситуация возникает при проведении электромагнитного прогнозирования вблизи технических средств, поставляемых зарубежными фирмами, специальных технических средств, технических средств, оборудованных нестандартными антеннами и т. д.

В связи с этим вполне обоснованным может быть подход, когда диаграммы направленности $F(\alpha)$ и $F(\varphi)$ определяются в каждом конкретном случае из набора реальных часто существующих ситуаций.

Для диаграмм напряженности в вертикальной плоскости можно выделить четыре таких ситуации.

Первая соответствует случаю, когда в технической документации приводятся диаграммы направленности (обычно в графическом виде). Понятно, что следует пользоваться этими диаграммами. При этом для применения

вычислительной техники следует подготовить входные файлы, в которых диаграммы направленности представляются в виде двумерных массивов (угол – значение диаграммы направленности). Значение диаграммы направленности в произвольной точке определяется обычно известными методами интерполяции.

Вторая из возможных ситуаций возникает при использовании в качестве передающей антенны симметричного или несимметричного вибраторов с противовесом. При отсутствии в технической документации диаграмм направленности можно рассчитать ее по известному соотношению для линейного симметричного вибратора:

$$F(\alpha) = \frac{\cos[kl \cdot \sin(\alpha - \psi)] - \cos kl}{(1 - \cos kl) \cos(\alpha - \psi)}, \quad (6.3)$$

где l – длина плеча вибратора, k – волновое число, ψ – здесь и ниже угол наклона максимума диаграммы направленности от горизонта.

Третья ситуация возникает при использовании антенн в виде решеток излучателей, которые весьма широко используются для технических средств телевидения, радиовещания и подвижной связи. В этом случае можно рассчитать диаграмму направленности в вертикальной плоскости, взяв из известных соотношений только множитель, учитывающий направленные свойства решетки в вертикальной плоскости:

$$F(\alpha) = \frac{\sin \left[n \cdot \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \sin(\alpha - \psi) \right]}{n \cdot \sin \left[\frac{\pi d}{\lambda} \cdot \sin(\alpha - \psi) \right]}, \quad (6.4)$$

где n – количество этажей в решетке излучателей, d – расстояние между излучателями.

Наконец, четвертая ситуация встречается в случае полного отсутствия в технической документации параметров и диаграмм направленности антенн, а осмотр антенн либо невозможен, когда антенны установлены в трудно доступных местах, либо бесполезен, когда антенны закрыты обтекателями, скрывающими конструкцию. В этом случае можно рекомендовать расчет по формулам расчета диаграммы направленности для равномерно возбужденной синфазной нити тока в виде [48]:

$$F(\alpha) = \left| \frac{\sin u}{u} \right| \text{ для } u = \frac{\pi a}{\lambda} \cdot \sin(\alpha - \psi), \quad (6.5)$$

где a – вертикальный размер антенны.

При этом величину a можно либо измерить, либо рассчитать по известному коэффициенту направленного действия D по формуле:

$$a \approx \frac{\lambda \cdot D}{2} . \quad (6.6)$$

Проще дело обстоит с диаграммой напряженности в горизонтальной плоскости. Здесь характерными являются три ситуации.

Первая не отличается от рассмотренной для диаграммы направленности в вертикальной плоскости, когда диаграмма направленности известна из технической документации.

Вторая – возникает в том случае, когда антенна обладает явно ненаправленными свойствами в горизонтальной плоскости и можно принять $F(a) = 1$.

Третья ситуация возникает в случае использования антенн с секторными диаграммами направленности. Для секторных диаграмм направленности (антенны с такими диаграммами широко используются в сотовых системах связи), когда известна ширина диаграммы направленности по половинной мощности $2\varphi_{0,5}$, расчет в пределах главного лепестка можно вести по широко распространенной в инженерной практике аппроксимации вида:

$$F(\alpha) = \cos^n(\varphi) , \quad (6.7)$$

где величина n определяется по $2\varphi_{0,5}$ из условия $\cos^n(\varphi_{0,5}) = 0,7$.

Специалисты, владеющие сравнительно сложным математическим аппаратом электродинамики, при расчетах направленных свойств антенн ОВЧ и УВЧ диапазонов могут воспользоваться рекомендациями приведенными в [21].

6.4. КОНЦЕПЦИЯ УЧЕТА В РАСЧЕТАХ БЛИЖНИХ ПОЛЕЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЛИ КРЫШИ

Следует различать два случая:

- идеально проводящая бесконечная плоскость (антенна устанавливается на земле или опоре);
- идеально проводящая плоскость конечных размеров (антенна устанавливается над крышей).

1. Для идеально проводящей бесконечной плоскости имеем случай обычной двухлучевой модели (лучи 1 и 2) без упрощения по расстоянию (рис. 6.14). Фазовый центр антенны находится в точке A .

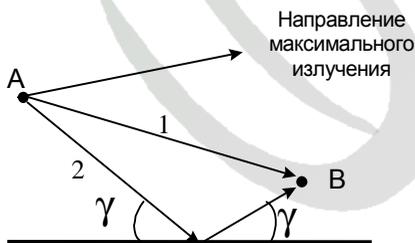


Рис. 6.14. Двухлучевая модель распространения радиоволн

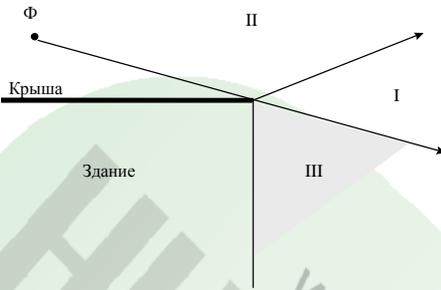


Рис. 6.15. Деление пространства на зоны, соответствующие геометрической теории дифракции

дения в зонах I, II или III для реальных конфигураций крыш и различного размещении антенны относительно крыши. Предполагается, что проекция фазового центра антенны всегда попадает на поверхность крыши.

Идеально проводящая бесконечная плоскость. В точке *B* прямой и отраженный лучи будут иметь различную интенсивность за счет разных углов по диаграмме направленности передающей антенны и различных расстояний (рис. 6.2).

Расстояние *AB* (наклонная дальность) легко рассчитывается при известных координатах точек *A* и *B*. Путь, проходимый отраженной волной *ACB*, вычисляется:

$$ACB = \sqrt{h_1^2 + \left(\frac{h_1 \cdot r}{h_1 + h_2}\right)^2} + \sqrt{h_2^2 + \left(r - \frac{h_1 \cdot r}{h_1 + h_2}\right)^2}. \quad (6.8)$$

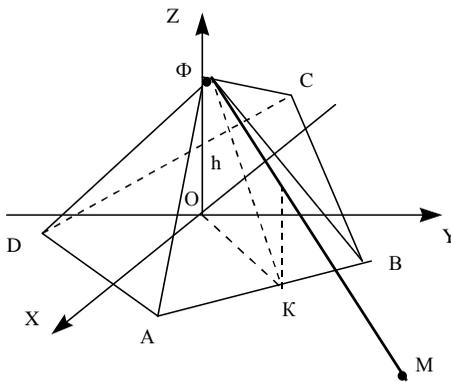


Рис. 6.16. Геометрическая постановка задачи

2. Для идеально проводящей плоскости конечных размеров выделяем три зоны, соответствующие приближению геометрической оптики (рис. 6.15).

I зона – в этой зоне учитывается только прямой луч.

II зона – это зона интерференции, в которой учитываются оба луча – прямой и отраженный.

III зона – зона тени, в которой предполагается отсутствие поля.

Ставится задача определения условий нахождения точки наблюдения

в зонах I, II или III для реальных конфигураций крыш и различного размещении антенны относительно крыши. Предполагается, что проекция фазового центра антенны всегда попадает на поверхность крыши.

Идеально проводящая бесконечная плоскость. В точке *B* прямой и отраженный лучи будут иметь различную интенсивность за счет разных углов по диаграмме направленности передающей антенны и различных расстояний (рис. 6.2).

Расстояние *AB* (наклонная дальность) легко рассчитывается при известных координатах точек *A* и *B*. Путь, проходимый отраженной волной *ACB*, вычисляется:

$$ACB = \sqrt{h_1^2 + \left(\frac{h_1 \cdot r}{h_1 + h_2}\right)^2} + \sqrt{h_2^2 + \left(r - \frac{h_1 \cdot r}{h_1 + h_2}\right)^2}. \quad (6.8)$$

В точке *A* целесообразно предположить синфазное сложение для напряженностей поля. Плотность потока энергии рассчитывается по суммарной напряженности поля. Это будет наихудший случай с точки зрения электромагнитной экологии.

Плоская параллельная земле крыша. На рис. 6.16 в декартовой системе координат в плоскости *XOY* располагается плоская идеально проводящая поверхность (крыша) *ABCD*. На высоте *h* над поверхностью рас-

положена антенна, фазовый центр которой обозначен через Φ . Необходимо вывести условия нахождения точки наблюдения в одной из трех зон – I, II или III относительно кромок плоскости $ABCD$.

Координаты фазового центра Φ : $x_\Phi = 0, y_\Phi = 0, z_\Phi = h$.

Координаты точки наблюдения M : x_M, y_M, z_M .

В исходных данных необходимо фиксировать положение крыши в пространстве. Это можно сделать, например, ориентацией оси Y на север. При этом следует выделить сектора азимутальных углов, соответствующие отдельным кромкам крыши (рис. 6.17): $\Delta\varphi_1$ – кромка AB , $\Delta\varphi_2$ – кромка BC , $\Delta\varphi_3$ – кромка CD , $\Delta\varphi_4$ – кромка AD .

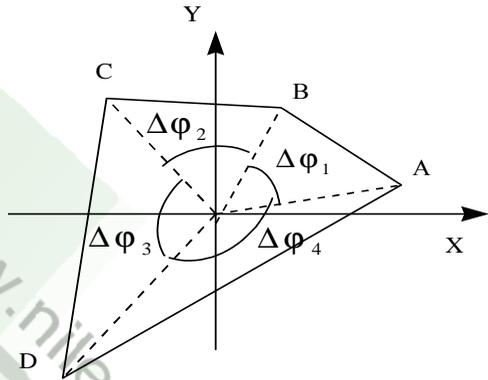


Рис. 6.17. Угловые сектора кромок крыши

В выбранной системе координат необходимо задать координаты углов крыши: $A(x_a, y_a, z_a)$, $B(x_b, y_b, z_b)$, $C(x_c, y_c, z_c)$, $D(x_d, y_d, z_d)$. Для плоской параллельной земле крыши $z_a = z_b = z_c = z_d = 0$.

Уравнения кромок крыши, как уравнения прямых проходящих через две точки, будут иметь вид (на примере кромки AB):

$$\frac{y - y_a}{y_b - y_a} = \frac{x - x_a}{x_b - x_a}. \quad (6.9)$$

Или в другом виде:

$$y = \left(\frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \right) x + \frac{y_a(x_b - x_a) - x_a(y_b - y_a)}{x_b - x_a}. \quad (6.10)$$

Обозначим:

$$k_{ab} = \left(\frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \right) - \text{угловой коэффициент уравнения кромки } AB, \\ a_{ab} = \frac{y_a(x_b - x_a) - x_a(y_b - y_a)}{x_b - x_a} - \text{свободный член уравнения кромки } AB, \quad (6.11)$$

В результате получим четыре уравнения кромок крыши в виде:

$$y = k_{ab}x + a_{ab}, \quad y = k_{bc}x + a_{bc}, \quad y = k_{cd}x + a_{cd}, \quad y = k_{da}x + a_{da}. \quad (6.12)$$

Направление на точку наблюдения φ является исходной величиной, поэтому легко записать уравнение прямой проходящей через начало координат под углом φ к оси X :

$$y = k_{\varphi} \cdot x,$$

где $k_{\varphi} = \operatorname{tg} \varphi$. (6.13)

Далее появилась возможность определить координаты точки K , как точки пересечения прямой (6.13) и одной из кромок (6.12), например, кромки AB :

$$x_k = \frac{a_{ab}}{k_{\varphi} - k_{ab}}, \quad y_k = \frac{k_{\varphi} a_{ab}}{k_{\varphi} - k_{ab}}; \quad (6.14)$$

Запишем уравнение прямой, проходящей через точки Φ и M :

$$\frac{x}{x_m} = \frac{y}{y_m} = \frac{z - h}{z_m - h}. \quad (6.15)$$

Или в другом виде:

$$\frac{y}{x} = \frac{y_m}{x_m},$$

$$z = \frac{z_m - h}{x_m} x + h. \quad (6.16)$$

Далее определим координаты точки пересечения прямой ΦM и перпендикуляра к плоскости $ABCD$ в точке K (рис. 6.18). Обозначим эту точку S :

$$x_s = x_k, \quad y_s = y_k, \quad z_s = \frac{z_m - h}{x_m} x_s + h. \quad (6.17)$$

Определим длину отрезка ΦS :

$$d_{\Phi S} = \sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2}. \quad (6.18)$$

Определим длину отрезка ΦM (наклонная дальность) и его направляющий косинус по отношению к оси Z :

$$d_{\Phi M} = \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + (h - z_m)^2}. \quad (6.19)$$

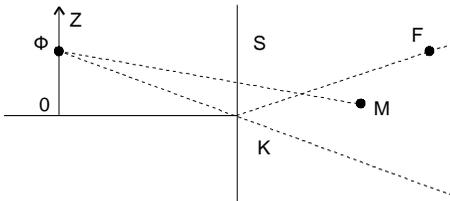


Рис. 6.18. К определению положения точки наблюдения M

$$\cos \gamma_{\Phi M} = \frac{z_m - h}{d_{\Phi M}}.$$

Первое условие определения положения точки наблюдения M :

если $d_{\Phi M} \leq d_{\Phi S}$ и $z_m > 0$, точка M всегда находится в пределах крыши над или на ней, т.е. в зоне интерференции.

Второе условие определения положения точки наблюдения M :
если $d_{\text{фм}} \leq d_{\text{фс}}$ и $z_{\text{м}} \leq 0$, точка M находится под крышей в пределах здания и расчету не подлежит.

Определим длину отрезка ΦK и его направляющий косинус по отношению к оси Z :

$$d_{\Phi K} = \sqrt{x_{\text{к}}^2 + y_{\text{к}}^2 + h^2}, \quad (6.20)$$

$$\cos \gamma_{\Phi K} = \frac{z_{\text{к}} - h}{d_{\Phi K}}.$$

Третье условие определения положения точки наблюдения M :

если $d_{\text{фм}} > d_{\text{фс}}$ и $\cos \gamma_{\text{фм}} = \frac{z_{\text{м}} - z_{\text{ф}}}{d_{\text{фм}}} < \cos \gamma_{\Phi K} = \frac{z_{\text{к}} - z_{\text{ф}}}{d_{\Phi K}}$, то точка M находится в зоне III, т.е. в зоне геометрической тени.

Запишем уравнение прямой, проходящей через точки Φ и K :

$$\frac{x - x_{\text{ф}}}{x_{\text{к}} - x_{\text{ф}}} = \frac{y - y_{\text{ф}}}{y_{\text{к}} - y_{\text{ф}}} = \frac{z - z_{\text{ф}}}{z_{\text{к}} - z_{\text{ф}}}. \quad (6.21)$$

Обозначим через F точку с координатами $x_{\text{f}} = 2x_{\text{к}}$, $y_{\text{f}} = 2y_{\text{к}}$, $z_{\text{f}} = z_{\text{ф}} = h$. Эта точка находится на граничном луче между зонами I и II на высоте, равной высоте подвеса фазового центра антенны h .

Запишем уравнение прямой, проходящей через точки K и F :

$$\frac{x - x_{\text{к}}}{x_{\text{ф}} - x_{\text{к}}} = \frac{y - y_{\text{к}}}{y_{\text{ф}} - y_{\text{к}}} = \frac{z - z_{\text{к}}}{z_{\text{ф}} - z_{\text{к}}}. \quad (6.22)$$

Принцип определения условий попадания точки наблюдения M в зону II заключается в том, что сравнивается координата $z_{\text{м}}$ с координатами z_{I} и z_{II} , соответствующими точкам, находящимся на пограничных лучах зон и имеющими другие координаты, равные $x_{\text{м}}$ и $y_{\text{м}}$.

Воспользовавшись уравнениями (6.21) и (6.22) получим координаты z_{I} и z_{II} контрольных точек:

$$z_{\text{I}} = \frac{x_{\text{м}}(z_{\text{к}} - h)}{x_{\text{к}}} + h \quad \text{или} \quad z_{\text{I}} = \frac{y_{\text{м}}(z_{\text{к}} - h)}{y_{\text{к}}} + h,$$

$$z_{\text{II}} = \frac{(x_{\text{м}} - x_{\text{к}})(h - z_{\text{к}})}{x_{\text{ф}} - x_{\text{к}}} + z_{\text{к}} \quad \text{или} \quad z_{\text{II}} = \frac{(y_{\text{м}} - y_{\text{к}})(h - z_{\text{к}})}{y_{\text{ф}} - y_{\text{к}}} + z_{\text{к}}. \quad (6.23)$$

Четвертое условие определения положения точки наблюдения M (это условие дублирует третье):

если $d_{\text{фм}} > d_{\text{фс}}$ и $z_{\text{м}} < z_{\text{I}}$, то точка M находится в зоне III, т.е. в зоне геометрической тени.

Пятое условие определения положения точки наблюдения M :

если $d_{\Phi M} > d_{\Phi S}$ и $z_M \geq z_{II}$, то точка M находится в зоне I, т.е. в зоне интерференции.

Шестое условие определения положения точки наблюдения M :

если $d_{\Phi M} > d_{\Phi S}$ и $z_I \leq z_M < z_{II}$, то точка M находится в зоне II, т.е. в зоне только прямого луча.

Плоская наклонная крыша. На рис. 6.19 в декартовой системе координат в плоскости XOY располагается плоская идеально проводящая поверхность (крыша) $ABCD$. На высоте h_1 над поверхностью крыши расположена антенна, фазовый центр которой обозначен через Φ . Расстояние до крыши h . На этом рисунке совмещены две системы координат – одна XOY , а другая $X_1Y_1Z_1$. Система координат $X_1Y_1Z_1$ получена из XYZ параллельным переносом в точку O и поворотом в плоскости YOZ на угол α .

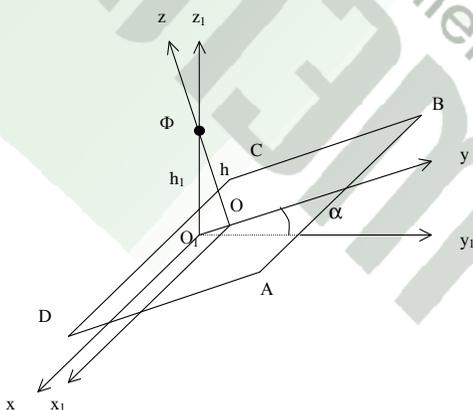


Рис. 6.19. Плоская наклонная крыша в декартовой системе координат

Смещение центра системы координат из точки O_1 в точку O произведено на величины $y_0 = h_1 \sin \alpha \cdot \cos \alpha$ и $z_0 = h_1 \sin^2 \alpha$. Расстояние фазового центра до крыши рассчитывается $h = h_1 \cos \alpha$.

Смещение и поворот системы координат позволяет свести задачу о наклонной крыше к задаче о плоской параллельной земле крыше.

Новые координаты некоторых точек:

- координаты фазового центра антенны Φ : $x_{\Phi} = 0$, $y_{\Phi} = 0$, $z_{\Phi} = h$;

- координаты точки наблюдения M :

$$x_M = x'_M,$$

$$y_M = y'_M \cos \alpha + z'_M \sin \alpha - y_0, \quad (6.24)$$

$$z_M = -y'_M \sin \alpha + z'_M \cos \alpha - z_0;$$

– координаты углов крыши:

$$\begin{aligned}x_a &= x_a^I, y_a = y_a^I \cos \alpha + z_a^I \sin \alpha - y_0, z_a = -y_a^I \sin \alpha + z_a^I \cos \alpha - z_0; \\x_b &= x_b^I, y_b = y_b^I \cos \alpha + z_b^I \sin \alpha - y_0, z_b = -y_b^I \sin \alpha + z_b^I \cos \alpha - z_0; \quad (6.25) \\x_c &= x_c^I, y_c = y_c^I \cos \alpha + z_c^I \sin \alpha - y_0, z_c = -y_c^I \sin \alpha + z_c^I \cos \alpha - z_0; \\x_d &= x_d^I, y_d = y_d^I \cos \alpha + z_d^I \sin \alpha - y_0, z_d = -y_d^I \sin \alpha + z_d^I \cos \alpha - z_0.\end{aligned}$$

В этих выражениях координаты с верхним индексом I относятся к системе координат $X_1Y_1Z_1$. Далее алгоритм расчета как для плоской параллельной земле крыши.¹

¹ При смещении координат с поворотом вокруг оси x изменяются угловые секторы кромок крыши. Предлагается не загромождать алгоритм этой геометрической задачей, а делать это на этапе задания исходных данных.

ИЗЛУЧАЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СВЧ И КВЧ ДИАПАЗОНОВ

7.1. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН СВЧ И КВЧ ДИАПАЗОНОВ

В соответствии с международной классификацией радиочастот СВЧ (3...30 ГГц) и КВЧ (30...300 ГГц) диапазонов соответствуют диапазоны длин радиоволн соответственно и 0,01...0,1 м и 0,001...0,01 м. Такие радиоволны распространяются от источника излучения к месту приема подобно волнам света – в виде прямолинейных лучей. Необходимым условием для распространения радиоволн является отсутствие на их пути экранирующих (затеняющих) препятствий. Связано это с тем, что такие радиоволны обладают крайне слабой способностью дифрагировать на препятствиях (огнивать препятствия). Считается, что радиус действия технических средств СВЧ и КВЧ диапазонов ограничивается расстоянием прямой видимости.

Другими словами, передающая и приемная антенна должны находиться на одной прямой – «видеть» друг друга. На наземных линиях радиосвязи расстояние прямой видимости определяется высотой подвеса передающей и приемной антенн и обычно не превышает 40...60 км. Правда, это обстоятельство не мешает строить наземные линии радиосвязи протяженностью сотни и тысячи километров. В этом случае используется принцип последовательной ретрансляции сигналов. Так строятся радиорелейные линии связи прямой видимости. Радиоволны нижней части СВЧ диапазона (до 3...5 ГГц) обладают свойством рассеяния на неоднородностях тропосферы. Тропосфера – это нижняя часть атмосферы Земли (от нескольких сотен метров до 10...12 км). В ней всегда есть локальные объемные неоднородности, вызванные различными физическими процессами. Эти неоднородности обладают свойством переизлучения радиоволн, падающих на них. Энергия переизлучения волн может улавливаться приемной антенной, находящейся далеко за пределами прямой видимости. Механизм тропосферного рассеяния радиоволн позволяет создавать так называемые тропосферные радиорелейные линии с расстоянием между станциями передачи и приема 200...400 км.

Для рассматриваемых диапазонов характерно явление интерференции (наложения) радиоволн прямых, идущих к месту приема непосредственно от источника излучения, и отраженных от тех или иных объектов (поверхности земли, зданий и т.п.).

На распространение радиоволн СВЧ и КВЧ диапазонов заметное влияние оказывают метеорологические процессы, происходящие вдоль трассы

радиолинии: дождь, снег, туман. Считается, что эти влияния тем сильнее, чем выше частота (короче длина волны).

7.2. ХАРАКТЕРИСТИКА И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИЗЛУЧАЮЩИХ СРЕДСТВ

К техническим средствам СВЧ и КВЧ диапазона относятся различные радиосистемы передачи и радиолокационные комплексы. Среди радиосистем наиболее широкое применение нашли радиорелейные системы передачи прямой видимости (РРСП ПВ), тропосферные радиорелейные системы передачи (ТРРСП) и спутниковые системы передачи (ССП). Все они, как правило, предназначены для организации соответствующих каналов связи. Радиолокационные комплексы находят применение при дальнем обнаружении объектов, в радионавигации, в радиоастрономии и т.п.

Все радиосистемы имеют свою специфику в функциональном построении, технических характеристиках, возможностях. Однако они едины в следующем – все являются источниками электромагнитного излучения. Уровень интенсивности излучения вблизи радиотехнических объектов определяется целым рядом факторов: мощностью и частотой излучения, типом антенны, ее ориентацией и высотой подвеса, режимом работы.

Прежде чем перейти к изложению метода анализа оценки электромагнитной обстановки вблизи радиотехнических объектов СВЧ и КВЧ диапазонов, целесообразно рассмотреть общие принципы действия основных технических средств.

Радиорелейные системы передачи прямой видимости

Принцип использования РРСП ПВ поясняется на рис. 7.1. Наземные станции размещаются одна относительно другой на расстояниях, не превышающих прямую видимость между антеннами. Высоты подвеса антенн обычно в пределах 15...100 м. При этом расстояния между станциями линий в пределах 40...60 км. Вся цепочка станций состоит из оконечных радиорелейных станций (ОРС), промежуточных (ПРС) и узловых (УРС). На каждой станции размещается приемопередающее оборудование и антенны. На одной опоре может быть несколько антенн – возможно применение РРСП ПВ различных диапазонов, ответвление от основной линии.

Через одну антенну одновременно могут работать несколько радиопередатчиков на близких частотах одного диапазона (многовольный режим работы системы) или даже на частотах разных диапазонов, например, 4 и 6 ГГц (режим совмещения диапазонов). Все эти факторы следует учитывать при анализе электромагнитной обстановки вблизи станций РРСП ПВ. Не-

которые частотные и энергетические характеристики типового оборудования РРСП ПВ, а также геометрические и электрические параметры антенн, применяемых в этих системах, приведены в табл. 7.1. [49,50].

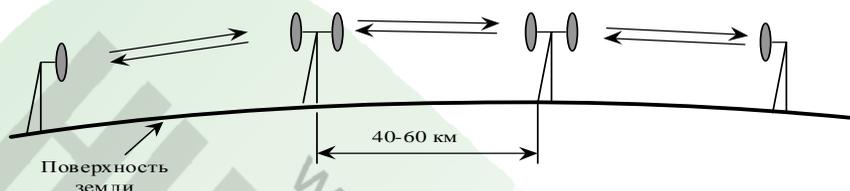


Рис. 7.1. Принцип работы РРСП ПВ

Таблица 7.1

Характеристика типового оборудования РРСП ПВ

| № пп | Тип РРСП | Средняя длина волны, см | Мощность передатчика одного ствола, Вт | Тип антенны | Диаметр апертуры | КНД, дБ |
|------|-------------|-------------------------|--|-------------|------------------|---------|
| 1 | Курс-2М | 15,8 | 1,6 | АДЭ-5 | 5 | 37,9 |
| 2 | Курс-4 | 8,2 | 0,5 | РПА | - | 39,5 |
| | | | | АДЭ-5 | 5 | 43,5 |
| | | | | АДЭ-3,5 | 3,5 | 40,7 |
| 3 | Курс-6 | 5,07 | 7,5 | РПА | - | 43 |
| | | | | АДЭ-3,5 | 3,5 | 44,8 |
| | | | | ПАС | 3,9 | 40 |
| 4 | Курс-8 | 3,7 | 0,4 | АДЭ-2,5 | 2,5 | 44 |
| | | | | ПАС | 3,9 | 43 |
| 5 | Радуга-4 | 8,2 | 4 | РПА | - | 39,5 |
| | | | | АДЭ-3,5 | 3,5 | 40,7 |
| | | | | ПАС | 3,9 | 40 |
| | | | | АДЭ-5 | 5 | 43,5 |
| 6 | Радуга-6 | 5,07 | 3 | РПА | - | 43 |
| | | | | АДЭ-3,5 | 3,5 | 44,8 |
| | | | | ПАС | 3,9 | 40 |
| 7 | Ракита-8 | 3,07 | 0,6 | АДЭ-2,5 | 2,5 | 44 |
| | | | | ПАС | 3,9 | 43 |
| 8 | Радан | 2,7 | 0,1 | ПА | 1,5 | 45 |
| 9 | Комплекс-5М | 2,7 | 0,5 | ПА | 1,5 | 45 |

В табл. 7.1 указаны четыре типа антенн: РПА – рупорно-параболическая антенна; АДЭ – антенна двухзеркальная с эллиптическим переизлучателем; ПАС – перископическая антенная система; ПА – параболическая антенна однозеркальная осесимметричная;

Рассмотрим принцип работы отдельных антенн [49], что важно для понимания методики оценки электромагнитной обстановки вблизи них.

Зеркалом антенны ПА служит вырезка из параболоида вращения (рис. 7.2), в фокусе которого помещен облучатель. Сферическая волна, исходящая из фокуса, отражается от поверхности зеркала и трансформируется в плоскую. В плоскости, проходящей через кромку зеркала и называемой апертурой антенны, фаза поля постоянна, а амплитуда соответствует распределению поля по волновому фронту волны, падающей на зеркало.

Более высокие электрические характеристики обеспечивают двухзеркальные антенны, например, типа АДЭ (рис. 7.3). Сферическая волна, излучаемая первичным облучателем, переотражается вспомогательным зеркалом в направлении основного квазипараболического зеркала.

Систему «первичный облучатель – вспомогательное зеркало» можно рассматривать как некий воображаемый (виртуальный) излучатель, находящийся в области фокуса основного зеркала.

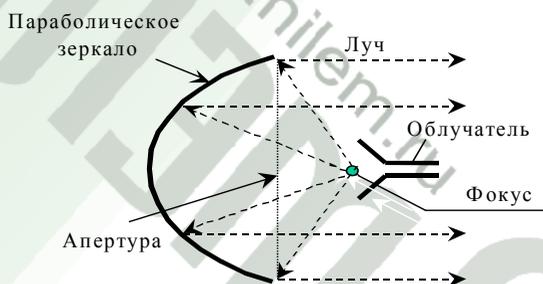


Рис. 7.2. Принцип работы однозеркальной параболической антенны

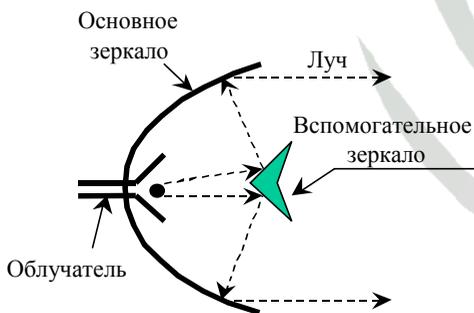


Рис. 7.3. Принцип работы двухзеркальной параболической антенны

Антенна РПА представляет собой параболическое зеркало (вырезку из параболоида вращения) с вынесенным рупорным облучателем, объединенными в единую конструкцию (рис. 7.4). Широко используемые типы РПА

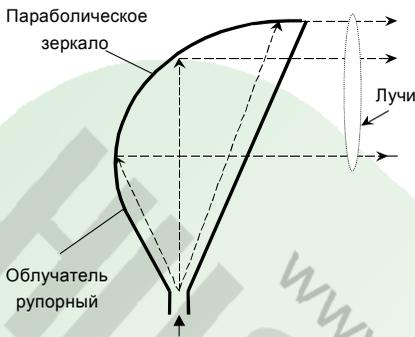


Рис. 7.4. Принцип действия РПА

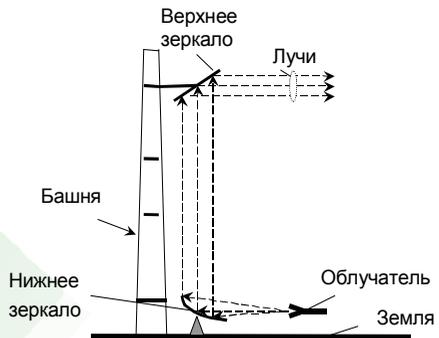


Рис. 7.5. Принцип действия ПАС

можно рассматривать как антенны с квадратной апертурой размера $2,7 \times 2,7 \text{ м}^2$.

Принцип построения ПАС поясняется на рис. 7.5. Основные элементы ПАС - облучатель, нижнее зеркало, имеющее параболическую или эллипсоидную поверхность, и верхнее плоское зеркало.

Тропосферные радиорелейные системы передачи

Принцип действия ТРРСП иллюстрируется на рис. 7.6. Основные особенности – это большие интервалы между станциями (200...400 км), большое ослабление и глубокие замирания радиосигнала.

Общая характеристика типового оборудования ТРРСП приведена в табл. 7.2.

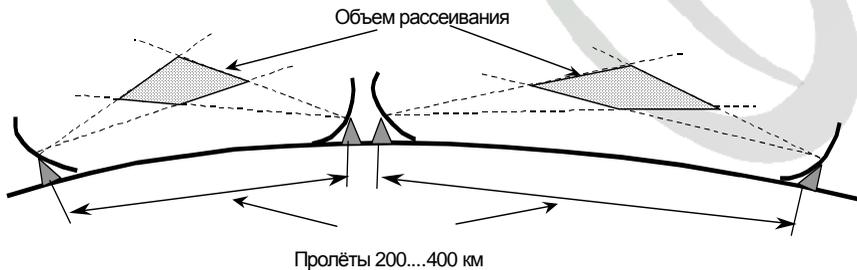


Рис. 7.6. Принцип действия ТРРСП

Характеристика типового оборудования ТРПС

| № пп | Тип ТРПС | Средняя длина волны, см | Мощность, Вт и число передатчиков | Тип антенны | Размер апертуры, м ² | КНД, дБ |
|------|------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|---------|
| 1 | Горизонт-М | 30 | 3000х2 | Несимметричная параболическая антенна | 20х20 | 43 |
| 2 | ТР-120 | 30 | 5000х2 | | 30х30 | 47 |
| 3 | ДТР-12 | 30 | 10000х2 | | | |

Большое ослабление сигнала компенсируется использованием мощных радиопередатчиков, чувствительных радиоприемников, высокоэффективных антенн, специальных технологий приемопередачи. В ТРПС широко применяется способ передачи, когда одно и то же сообщение передается одновременно двумя радиопередатчиками на двух различных частотах через две отдельные антенны. Антенны используются в основном несимметричные параболические однозеркальные с вынесенным облучением (рис. 7.7), что позволяет устранить влияние реакции зеркала на согласование, уменьшить затенение раскрыва по сравнению осесимметричными антеннами.

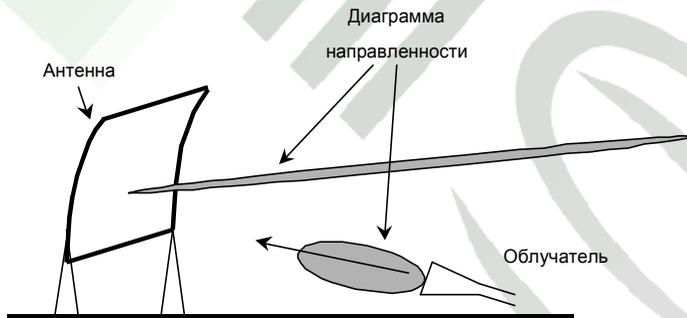


Рис. 7.7. Принцип действия антенной системы ТРПС

Антенны ТРПС представляют собой сложные инженерные сооружения с раскрывом 20х20 м² при высоте подвеса нижней кромки над землей 8 м или 20 м и с раскрывом 30х30 м² при высоте нижней кромки 10 м и 20 м.

В качестве облучателя используется пирамидальный рупор с раскрывом 1х1 м² или 0,8х0,8 м².

Спутниковые системы передачи

Принцип использования ССП схематично показан на рис. 7.8. По существу ССП является разновидностью РРСП ПВ, в которой промежуточная станция-ретранслятор находится на борту ИСЗ.

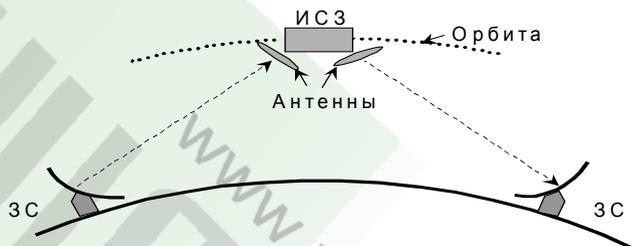


Рис. 7.8. Принцип действия ССП

В основном применяются два вида орбиты ИСЗ: эллиптическая и геостационарная. Однако в последнее время интенсивно разрабатываются системы с низкими и средними круговыми орбитами. В качестве передающих антенн земных станций (ЗС) ССП чаще всего используются осесимметричные двухзеркальные параболические антенны. Диаметр большинства антенн лежит в пределах 7...32 м, а коэффициент усиления – в пределах 49...60 дБ [51, 52]. Направление максимального излучения составляет не менее нескольких градусов по отношению к поверхности земли. В том случае, когда ССП работает через ИСЗ, находящийся на эллиптической орбите, используются поворотные антенны, обеспечивающие слежение за спутником по мере его орбитального перемещения.

Некоторые частотные и энергетические характеристики радиопередатчиков земных станций ССП приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Характеристика типового оборудования земных станций ССП

| № пп | Наименование | Средняя длина волны, см | Мощность передатчика, Вт |
|------|--------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 | Градиент | 4,9 | 3000 (10000) |
| 2 | Гравий | 48,4 | 20 |
| 3 | Геликон | 4,9 | 4000 |
| 4 | Грунт | 4,9 | 200 |
| 5 | Галактика-1 | 2,1 | 1500 |
| 6 | Галактика-2 | 2,1 | 240 |

7.3. ТИПЫ АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН

Апертурные антенны можно разделить на две больших группы. Первая группа – это антенны с круглой апертурой, вторая – с прямоугольной. К первой группе относятся одно- и двухзеркальные осесимметричные антенны - параболоиды вращения (см. рис. 7.2 и рис. 7.3). Ко второй группе относятся антенны в виде:

- симметричной вырезки из параболоида вращения (рис. 7.9);
- несимметричной вырезки из параболоида вращения (рис. 7.10);
- пирамидального рупора (рис. 7.11);
- параболического цилиндра (рис. 7.12).

Так же ко второй группе можно отнести рупорно-параболическую (см. рис. 7.4) и перископическую антенны (см. рис.7.5).

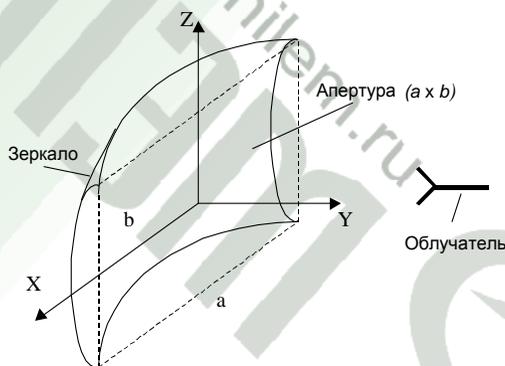


Рис. 7.9. Симметричная вырезка из параболоида вращения

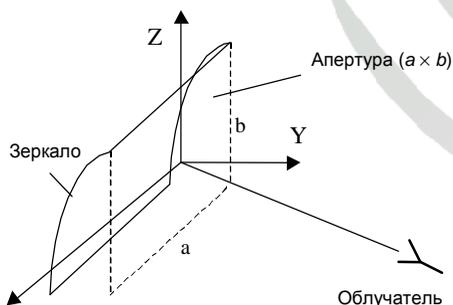


Рис. 7.10. Несимметричная вырезка из параболоида вращения

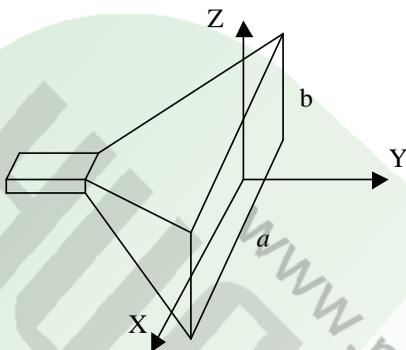


Рис. 7.11. Пирамидальный рупор

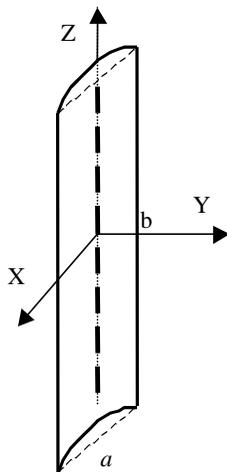


Рис. 7.12. Параболический цилиндр

7.4. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ ВБЛИЗИ АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН – ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Выражение для расчета ППЭ апертурной антенны в произвольной точке пространства в рамках энергетического подхода к решению задачи можно представить в следующем виде:

$$П_{\Sigma} = П_a + П_{обл} + П_{диф} + П_{пр}, \quad (7.1)$$

где $П_a$ – апертурная составляющая;

$П_{обл}$ – составляющая, определяемая излучением облучателя;

$П_{диф}$ – составляющая, обусловленная токами, протекающими по кромке зеркала (дифракционными токами);

$П_{пр}$ – составляющая, возникающая в результате прохождения энергии сквозь основное зеркало антенны, если оно имеет решетчатую структуру.

Все пространство вблизи антенны можно условно разделить на три характерные области (рис. 7.13). Для определения продольных границ санитарно-защитных зон наибольший интерес представляет область I. В теории антенн эту область принято называть областью главного и ближних боковых лепестков. Значение ППЭ здесь определяется, в основном, апертурной составляющей и составляющей от облучателя.

В заднем полупространстве антенны расположена область II. В этой области поле обусловлено только дифракционными эффектами первичного поля облучателя на кромке основного зеркала. Если зеркало выполнено в виде решетчатой структуры, то к дифракционному полю добавится поле, прошедшее в область II сквозь ячейки.

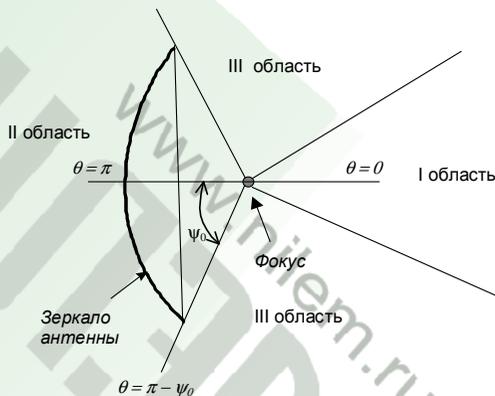


Рис. 7.13. Области анализа ППЭ

В области III необходимо учитывать и апертурную составляющую, и составляющую от облучателя, и дифракционную составляющую.

Условимся, что область I имеет границы $\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq 0$, область II – $\pi - \psi_0 < \theta \leq \pi$, область III – $\frac{\pi}{6} < \theta \leq \pi - \psi_0$.

Для решения задач электромагнитной экологии используется понятие усредненной модели апертурной антенны. Такая модель впервые предложена авторами [55] и базируется на ряде допущений:

- амплитудное распределение поля по апертуре задается в виде:

$$f(r) = 0,316 + 0,684 \left[1 - \left(\frac{2r}{d} \right)^2 \right], \quad (7.2)$$

где: r – текущее значение координаты на диаметре апертуры, d – диаметр апертуры;

- облучатель и антенна имеют характеристики направленности с осевой симметрией относительно направлений их максимального излучения;

- характеристика направленности облучателя однозеркальной антенны или системы «облучатель - вспомогательное зеркало» двухзеркальной ан-

тенны вне сектора углов перехвата энергии основным зеркалом считается неизменной и равной 0,316 (по напряженности поля);

- апертура имеет затенение (рис. 7.14), характеризуемое коэффициентом затенения $d_T/d = 0,1$ (d_T – диаметр «теневого диска», d – диаметр апертуры).

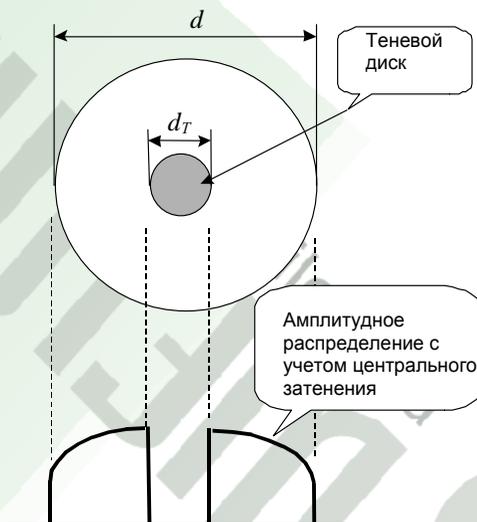


Рис. 7.14. Амплитудное распределение поля по апертуре

7.5. МЕТОД РАСЧЕТА ППЭ В ОБЛАСТИ I

7.5.1. Основы расчета

Плотность потока энергии апертурной антенны в расчетной точке M представим в виде двух составляющих:

$$\Pi_{\Sigma} = \Pi_a + \Pi_{obl},$$

где Π_a – апертурная составляющая ППЭ (рис. 7.15, а);

Π_{obl} – составляющая ППЭ, определяемая непосредственно излучением облучателя (рис. 7.15, б).

В предположении осевой симметрии характеристик направленности облучателя и антенны составляющие ППЭ будут иметь вид:

$$\Pi_a = \frac{P}{4\pi R^2} D_0 B^2(R) F^2(\theta, R), \text{ Вт/м}^2; \quad (7.3)$$

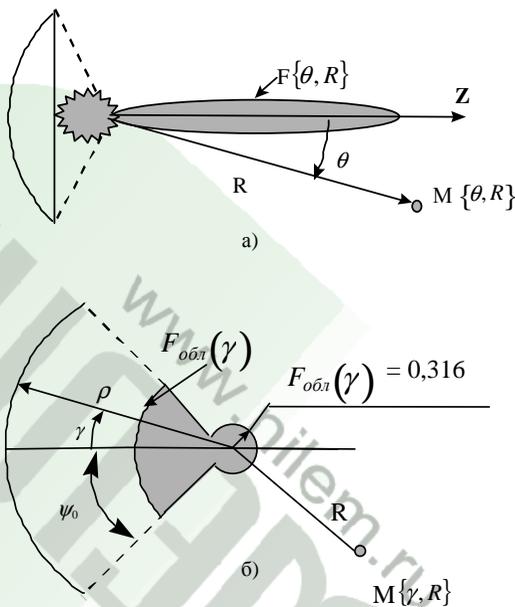


Рис. 7.15. К расчету апертурной составляющей ППЭ (а) и составляющей ППЭ облучателя (б)

$$P_{obl} = \frac{P}{4\pi R^2} D_{obl} F_{obl}^2(\gamma), \text{ Вт/м}^2, \quad (7.4)$$

где P – мощность, излучаемая антенной, Вт;

D_0 – КНД антенны в направлении максимального излучения в дальней зоне;

$B^2(R)$ – функция, учитывающая изменение КНД по мере перехода расчетной точки из ближней зоны в дальнюю (волновую);

$F^2(\theta, R)$ – нормированная характеристика направленности антенны по мощности;

θ, R – сферические координаты расчетной точки;

D_{obl} – КНД облучателя в направлении его максимального излучения;

$F_{obl}^2(\gamma)$ – нормированная характеристика направленности облучателя по мощности (угол $\gamma = 180^\circ - \theta$).

Существенно отметить, что КНД и характеристика направленности апертуры являются функциями расстояния R , а те же параметры облучателя-

ля не зависят от R – считается, что расчетная точка по отношению к облучателю всегда находится в дальней зоне.

Методика расчета характеристики направленности предполагает использование переменных u и x . Переменная u – обобщенная угловая координата, переменная x – относительное расстояние. Они записываются в виде:

$$u = (\pi d \sin \theta) / \lambda ; \quad (7.5)$$

$$x = R / R_{cp} , \quad (7.6)$$

где d – диаметр апертуры, м;

λ – длина волны, м;

$R_{cp} = 2d^2 / \lambda$ – граничное расстояние, начиная с которого можно считать, что расчетная точка находится в дальней зоне.

С учетом введения обобщенных координат выражение (7.3) принимает вид:

$$P_a = \frac{P\lambda^2}{16\pi d^4} D_0 \frac{B^2(x)}{x^2} F^2(u, x), \text{ Вт/м}^2. \quad (7.7)$$

Перевод размерности ППЭ Вт/м² в мкВт/см² осуществляется в (7.7) умножением на 100.

Переход от абсолютных значений величины ППЭ к относительным (децибелам относительно 1 мкВт/см²) позволяет записать последнее выражение следующим образом:

$$P_a = 10 \lg \frac{P\lambda^2}{d^4} + 10 \lg D_0 + 20 \lg \left[\frac{B(x)}{x} \right] + 20 \lg F(u, x) + 3, \text{ дБ}, \quad (7.8)$$

где: $\frac{B(x)}{x}$ – функция, учитывающая изменение КНД в зависимости от относительного расстояния x ;

$F(u, x)$ – нормированная характеристика направленности в обобщенных координатах u, x .

Расчетная точка всегда будет находиться вне секторов углов перехвата энергии облучателя основным зеркалом $0 \leq \gamma \leq \psi_0$ (здесь и ниже секторы углов по γ или θ записаны для верхнего или нижнего полупространства относительно оси симметрии антенны). В соответствии с концепцией усредненной модели антенны в секторе углов $\psi_0 \leq \gamma \leq \pi$ $F_{обл}(\gamma) = 0,316$, а $F_{обл}^2(\gamma) = 0,1$, и выражение (7.4) при переходе к относительным значениям (децибелам относительно 1 мкВт/см²) сводится к виду:

$$P_{обл} = 10 \lg \frac{P}{4\pi R^2} + 10 \lg D_{обл} + 10, \text{ дБ}. \quad (7.9)$$

7.5.2. ФУНКЦИЯ $B(x)/x$

Аналитическое выражение функции $B(x)/x$ для круглой апертуры с амплитудным распределением типа (7.2) имеет вид:

$$\frac{B(x)}{x} = \frac{2b_0}{x(1+\alpha)} \left[b_1 - 2b_0c^2 \sin\left(\frac{\pi}{8x}\right) - 2b_2 \cos\left(\frac{\pi}{8x}\right) \right]^{1/2}, \quad (7.10)$$

где: $b_0 = \frac{8x}{\pi}$; $b_1 = 1 + \alpha^2 + 2b_0^2c^2$; $b_2 = \alpha + b_0^2c^2$; $c = 1 - \alpha$.

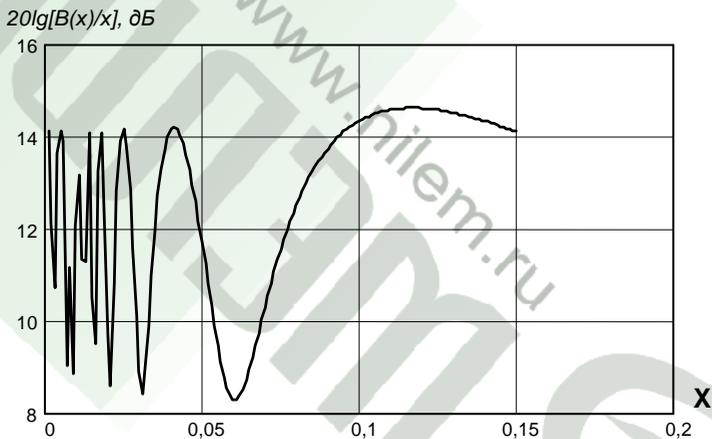


Рис. 7.16. Функция $20 \lg [B(x)/x]$

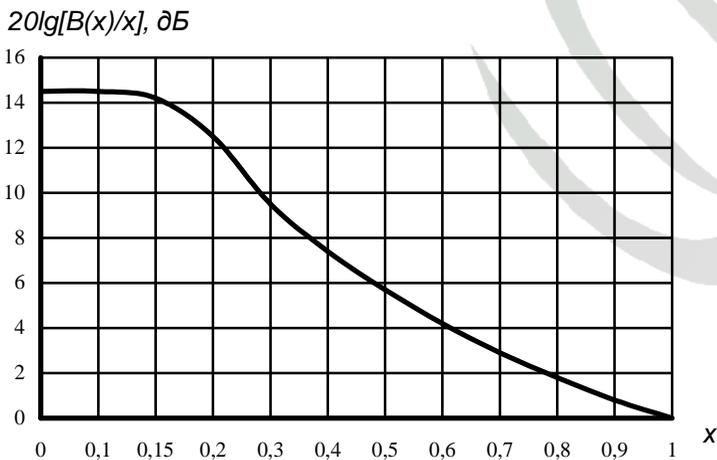


Рис. 7.17. Гарантированная огибающая для функции $20 \lg [B(x)/x]$ (круглая апертура)

Расчет и исследование этой функции (рис. 7.16) показывают, что в области $x < 0,105$ она осциллирующая, а в области $x > 0,105$ – изменяется монотонно. Ввиду специфики задачи оценки электромагнитной обстановки осциллирующую часть функции можно заменить огибающей ее максимумов. График гарантированной огибающей функции приведен на рис. 7.17.

В области $x \geq 1$ справедливо соотношение $20 \lg \left[\frac{B(x)}{x} \right] = -20 \lg x$.

7.5.3. Характеристики направленности $F(u, x)$

На рис. 7.18 показана круглая апертура с центральным затенением. Затенение моделируется отсутствием элементов Гюйгенса в центре апертуры светлый круг. Поле в точке M является суперпозицией полей элементов Гюйгенса ΔS , расположенных на поверхности раскрыва (апертуре).

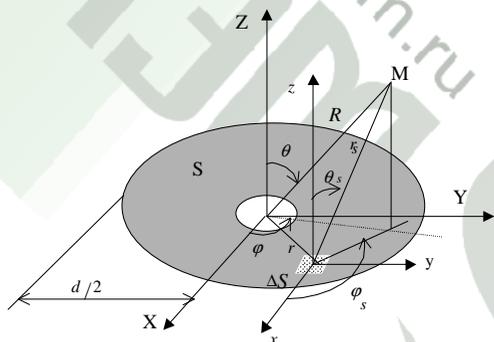


Рис. 7.18. К расчету функции $F(u, x)$

В самом общем виде напряженность электрического поля, создаваемая в точке M всей совокупностью элементов Гюйгенса, находящихся в апертуре, определяется следующей формулой:

$$E = \iint_s \Delta E_s ds, \quad (7.11)$$

$$\text{где } \Delta E_s = -j \frac{E(r) \Delta S}{2\lambda} (1 + \cos \theta_s) \sin \varphi_s \frac{e^{-jkr_s}}{r_s}; \quad (7.12)$$

$$E(r) = 1 - 0,684 \left(\frac{2r}{d} \right)^2. \quad (7.13)$$

Направленные свойства апертуры определяются функцией:

$$F(\theta, R) = \frac{\iint_s \Delta E_s ds}{\max_s \left[\iint_s \Delta E_s ds \right]}. \quad (7.14)$$

Если в (7.14) ввести обобщенные координаты u и x , то направленные свойства апертуры будут характеризоваться функцией $F(u, x)$. Семейство функций $F(u, x)$ в обобщенных координатах u и x является универсальным, поскольку позволяет определить направленные свойства круглых апертур наиболее распространенных на практике размеров (при условии, что их линейные размеры существенно превышают длину волны).

Процесс расчета каждой функции $F(u, x)$ требует значительных затрат времени, которые быстро растут с увеличением отношения d/λ . Пример графика функции $F(u, x)$ приведен на рис 7.19. Функции $F(u, x)$ сильно осциллирующие, поэтому в практических расчетах ППЭ следует использовать их гарантированные огибающие.

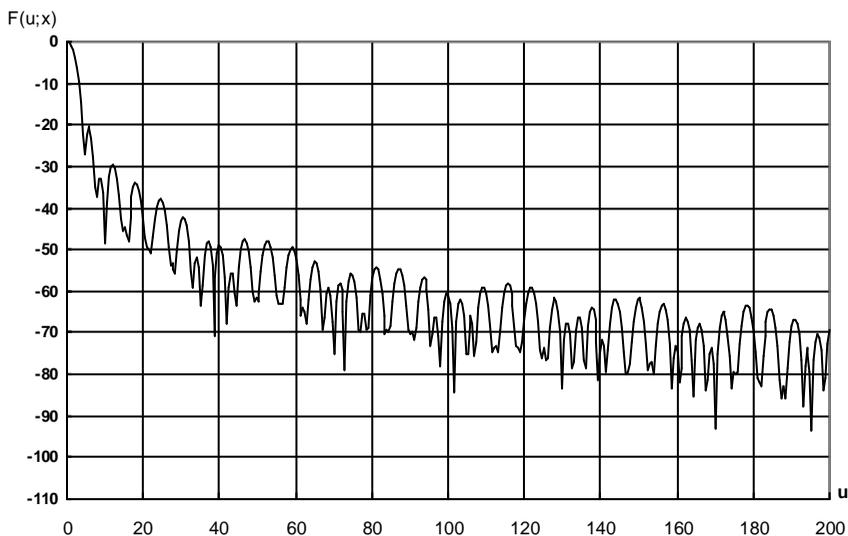


Рис. 7.19. График функции $F(u, x)$ для $x = 1,0$

После обработки результатов серии расчетов были получены гарантированные огибающие функции $F(u, x)$. Параметр u изменялся в пределах 0...760, x – в пределах 0,005...1. Табулированные значения гарантированных огибающих для круглой апертуры приведены в табл. 7.4 и табл. 7.5, которые впервые опубликованы в [56]. Числовые данные этих таблиц универсальны в том смысле, что при $d \gg \lambda$ они справедливы для апертур любых размеров (для рассматриваемого класса технических средств). Примеры графиков гарантированной огибающей приведены на рис. 7.20 и рис. 7.21.

Напомним, что все значения функции $F(u, x)$ рассчитываются в предположении, во-первых, синфазного возбуждения всех элементов апертуры, во-вторых, реализации амплитудного распределения поля возбуждения апертуры по закону (7.2).

Таблица 7.4

Функция $F(u, x)$ – круглая апертура, $u = 0...100$

| u | Параметр x | | | | | | | |
|-----|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,005 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,1 | 0,15 | 1,0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | -2,32 | 2,35 | 2,36 | 2,36 | -1,11 | -2,82 | -4,12 | -4,60 |
| 4 | -3,75 | 2,66 | 2,66 | 2,66 | -1,46 | -5,65 | -9,46 | -16,2 |
| 6 | -4,25 | 1,42 | 1,43 | 1,43 | -2,0 | -9,16 | -15,1 | -21,9 |
| 8 | -3,86 | 0,53 | 0,66 | 0,66 | -2,46 | -12,1 | -19,6 | -25,4 |
| 10 | -3,35 | -0,35 | 0,76 | 0,76 | -3,28 | -15,3 | -22,3 | -27,5 |
| 12 | -3,67 | -0,91 | 1,36 | 1,36 | -4,50 | -19,1 | -24,7 | -29,4 |
| 14 | -5,10 | -1,08 | 2,17 | 2,17 | -6,96 | -21,9 | -26,6 | -30,9 |
| 16 | -5,75 | -0,91 | 2,31 | 0,96 | -10,3 | -24,2 | -28,7 | -32,3 |
| 18 | -6,00 | -0,12 | 2,16 | -0,78 | -14,1 | -26,0 | -30,1 | -33,5 |
| 20 | -6,36 | 0,64 | 1,67 | -2,71 | -14,3 | -27,9 | -31,7 | -34,8 |
| 22 | -5,89 | 1,72 | 0,71 | -4,36 | -16,0 | -29,2 | -32,8 | -35,8 |
| 24 | -4,32 | 2,28 | 0,10 | -5,93 | -18,3 | -30,0 | -34,2 | -36,9 |
| 26 | -3,07 | 2,37 | -0,11 | -7,46 | -20,2 | -32,0 | -35,4 | -38,1 |
| 28 | -2,25 | 2,14 | -0,63 | -10,0 | -22,8 | -33,7 | -36,9 | -39,4 |
| 30 | -1,78 | 1,71 | -1,18 | -12,2 | -25,0 | -35,4 | -38,4 | -41,0 |
| 32 | -1,28 | 0,90 | -3,53 | -14,4 | -26,9 | -36,6 | -40,1 | -42,6 |
| 34 | -1,07 | 0,14 | -5,50 | -16,8 | -29,1 | -37,7 | -41,4 | -43,7 |
| 36 | -1,21 | 0,22 | -7,48 | -19,4 | -30,0 | -38,6 | -42,6 | -45,8 |
| 38 | -1,53 | 0 | -9,28 | -20,6 | -31,0 | -39,4 | -43,8 | -46,9 |
| 40 | -1,67 | 0 | -10,7 | -21,9 | -31,6 | -40,3 | -44,7 | -47,8 |
| 42 | -1,28 | 0,07 | -12,3 | -22,2 | -32,2 | -40,8 | -45,2 | -48,0 |
| 44 | -1,07 | 0,30 | -13,8 | -23,1 | -32,4 | -41,1 | -45,0 | -47,7 |
| 46 | -1,10 | 0,32 | -15,4 | -23,8 | -32,9 | -41,2 | -44,7 | -47,0 |
| 48 | -1,35 | 0,17 | -16,5 | -24,1 | -33,1 | -41,1 | -44,7 | -46,8 |
| 50 | -1,46 | 0,05 | -17,4 | -24,4 | -33,2 | -41,2 | -44,5 | -46,9 |

Окончание табл. 7.4

| | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 52 | -1,57 | 0,00 | -18,2 | -24,8 | -33,5 | -41,1 | -44,5 | -46,9 |
| 54 | -2,10 | -0,25 | -19,1 | -25,5 | -33,9 | -41,2 | -44,8 | -47,0 |
| 56 | -3,35 | -0,70 | -20,0 | -26,2 | -34,3 | -41,6 | -45,3 | -47,4 |
| 58 | -3,35 | -1,20 | -21,1 | -26,8 | -34,8 | -42,0 | -45,9 | -47,8 |
| 60 | -3,21 | -1,50 | -22,1 | -27,3 | -35,4 | -42,9 | -46,6 | -48,5 |
| 62 | -2,78 | -2,02 | -23,2 | -28,1 | -36,3 | -44,0 | -47,7 | -49,5 |
| 64 | -2,57 | -2,78 | -24,4 | -29,4 | -37,6 | -44,7 | -48,7 | -50,6 |
| 66 | -2,35 | -3,59 | -25,5 | -30,4 | -39,0 | -45,9 | -49,7 | -51,6 |
| 68 | -2,46 | -4,50 | -26,6 | -31,1 | -40,1 | -46,9 | -50,4 | -52,6 |
| 70 | -2,82 | -5,23 | -27,5 | -32,0 | -41,4 | -47,8 | -51,3 | -53,5 |
| 72 | -3,21 | -6,28 | -28,1 | -32,3 | -41,8 | -48,3 | -52,0 | -54,2 |
| 74 | -3,46 | -7,37 | -28,7 | -32,8 | -42,0 | -48,7 | -52,2 | -54,6 |
| 76 | -3,37 | -8,61 | -29,0 | -33,0 | -42,4 | -48,7 | -52,6 | -55,0 |
| 78 | -3,46 | -9,75 | -29,2 | -33,2 | -41,7 | -48,4 | -52,5 | -55,7 |
| 80 | -3,72 | -11,0 | -29,5 | -32,9 | -41,2 | -48,1 | -52,5 | -54,7 |
| 82 | -3,89 | -12,1 | -29,3 | -33,0 | -41,2 | -48,0 | -52,2 | -54,2 |
| 84 | -3,64 | -12,9 | -29,4 | -33,0 | -41,2 | -48,1 | -52,2 | -53,9 |
| 86 | -3,60 | -14,4 | -29,6 | -33,1 | -41,3 | -48,2 | -52,0 | -53,9 |
| 88 | -3,78 | -15,8 | -30,1 | -33,4 | -41,6 | -48,4 | -52,2 | -53,8 |
| 90 | -4,00 | -16,9 | -30,7 | -33,8 | -42,2 | -48,9 | -52,1 | -54,1 |
| 92 | -4,14 | -18,1 | -31,2 | -34,3 | -42,6 | -49,3 | -52,4 | -54,4 |
| 94 | -4,25 | -19,3 | -31,9 | -35,0 | -43,2 | -49,9 | -52,9 | -55,3 |
| 96 | -4,42 | -20,4 | -32,5 | -35,7 | -43,8 | -52,0 | -53,9 | -55,7 |
| 98 | -4,89 | -21,6 | -33,2 | -36,4 | -44,4 | -50,6 | -55,0 | -56,8 |
| 100 | -4,46 | -22,8 | -33,0 | -37,7 | -45,6 | -51,2 | -56,4 | -58,1 |

Таблица 7.5

Функция $F(u, x)$ - круглая апертура, $u = 100...300$ (760)

| u | Параметр x | | | | | | | |
|-----|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,005 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,1 | 0,15 | 1,0 |
| 100 | -4,46 | -22,8 | -33,0 | -37,7 | -45,6 | -51,2 | -56,4 | -58,1 |
| 110 | -4,71 | -24,3 | -33,5 | -37,0 | -46,1 | -51,9 | -56,5 | -57,9 |
| 120 | -5,14 | -25,8 | -33,9 | -37,5 | -46,3 | -53,0 | -56,9 | -58,1 |
| 130 | -6,89 | -27,1 | -34,8 | -38,2 | -46,7 | -53,9 | -58,1 | -59,1 |
| 140 | -9,48 | -28,5 | -35,6 | -38,9 | -47,3 | -54,9 | -58,9 | -60,4 |
| 150 | -13,3 | -29,9 | -36,6 | -39,7 | -48,3 | -55,9 | -59,7 | -61,2 |
| 160 | -17,5 | -30,8 | -37,4 | -40,5 | -49,2 | -56,9 | -60,5 | -61,9 |
| 170 | -21,9 | -31,8 | -38,3 | -41,3 | -50,2 | -57,9 | -61,3 | -62,7 |
| 180 | -24,9 | -32,7 | -39,2 | -42,1 | -51,1 | -58,9 | -62,1 | -63,5 |
| 190 | -27,3 | -33,7 | -40,1 | -42,9 | -52,1 | -59,9 | -62,9 | -64,3 |
| 200 | -29,1 | -34,7 | -40,9 | -43,9 | -53,0 | -60,8 | -63,8 | -65,1 |
| 210 | -30,8 | -35,7 | -41,8 | -44,6 | -53,9 | -61,8 | -64,5 | -65,8 |
| 220 | -32,4 | -36,6 | -42,7 | -45,5 | -54,9 | -62,8 | -65,4 | -66,6 |
| 230 | -33,4 | -37,6 | -43,7 | -46,3 | -55,9 | -63,7 | -66,2 | -67,4 |
| 240 | -34,1 | -38,4 | -44,5 | -47,3 | -56,8 | -64,7 | -66,9 | -68,2 |
| 250 | -34,8 | -39,3 | -45,3 | -48,2 | -57,8 | -65,7 | -67,7 | -68,9 |

Окончание табл. 7.5

| | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 260 | -35,7 | -40,0 | -46,1 | -49,1 | -58,7 | -66,6 | -68,6 | -69,7 |
| 270 | -36,9 | -40,7 | -46,9 | -49,8 | -59,7 | -67,5 | -69,4 | -70,5 |
| 280 | -38,1 | -41,7 | -47,9 | -50,7 | -60,6 | -68,4 | -70,2 | -71,3 |
| 290 | -39,4 | -42,7 | -48,7 | -51,6 | -61,6 | -69,2 | -70,9 | -72,0 |
| 300 | -41,1 | -44,4 | -49,9 | -52,8 | -61,7 | -70,1 | -71,8 | -72,8 |
| ... | | | | | | | | |
| 760 | -51,0 | -54,0 | -58,0 | -63,0 | -71,0 | -78,0 | -83,0 | -88,0 |

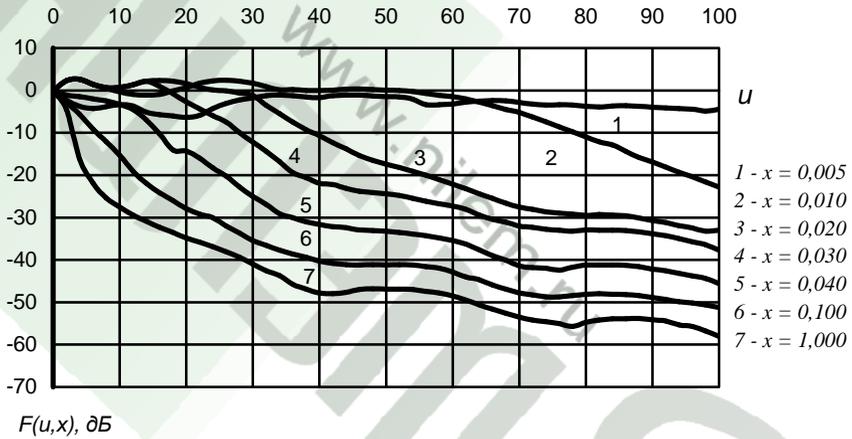


Рис. 7.20. Огибающие функций $F(u, x)$ – круглая апертура, $u = 0 \dots 100$

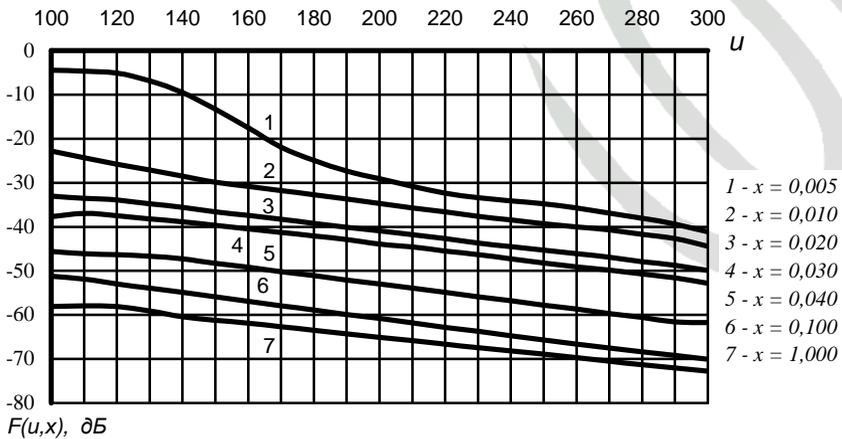


Рис. 7.21. Огибающие функций $F(u, x)$ – круглая апертура, $u = 100 \dots 300$

7.5.4. Гарантированная огибающая характеристики направленности антенны с учетом излучения облучателя

На рис. 7.22 показаны схемы соответственно короткофокусной (а) и длиннофокусной (б) антенн.

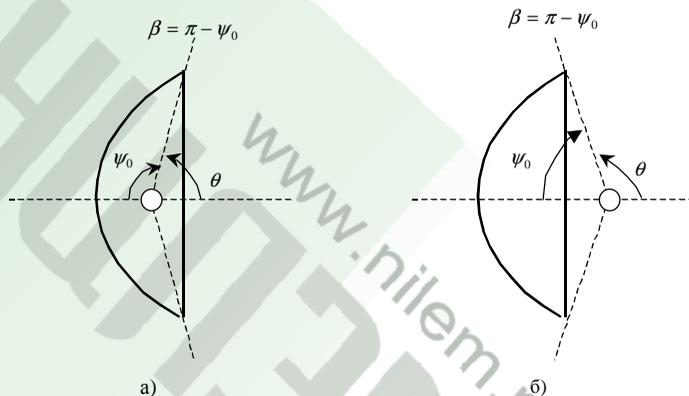


Рис. 7.22. Короткофокусная (а) и длиннофокусная (б) антенны

Для конкретного значения x по кривой $F(u, x)$ можно всегда рассчитать и построить гарантированную огибающую апертурной характеристики направленности $F_a(\theta)$ – рис. 7.23,а (рассматривается случай короткофокусной антенны).

В соответствии с концепцией усредненной модели антенны облучатель в области углов $0 \leq \theta \leq \beta$ имеет характеристику направленности $F_{обл}(\theta) = const = -10$ дБ – рис. 7.23,б.

Совместим две эти характеристики направленности в одной системе координат – рис. 7.23,в. При совмещении следует учесть, что нулевые уровни характеристик направленности отличаются на $\Delta D = D_{обл} - D_0$, дБ. Характеристики направленности будут иметь одинаковый уровень при $\theta = \theta_i$ (в точке пересечения).

В области $0 \leq \theta < \theta_i$ уровень $F_a(\theta)$ превышает $F_{обл}(\theta)$, а в области $\theta_i \leq \theta \leq \beta$ уровень $F_{обл}(\theta)$ превышает $F_a(\theta)$. Примем, что в области $0 \leq \theta < \theta_i$ характеристика направленности усредненной модели будет в основном определяться апертурной составляющей, в области $\theta_i \leq \theta \leq \beta$ – составляющей облучателя, в области $\beta < \theta \leq \pi/2$ – вновь апертурной со-

ставляющей. Тогда характеристика направленности усредненной модели будет иметь вид, представленный на рис. 7.23, в – сплошная линия.

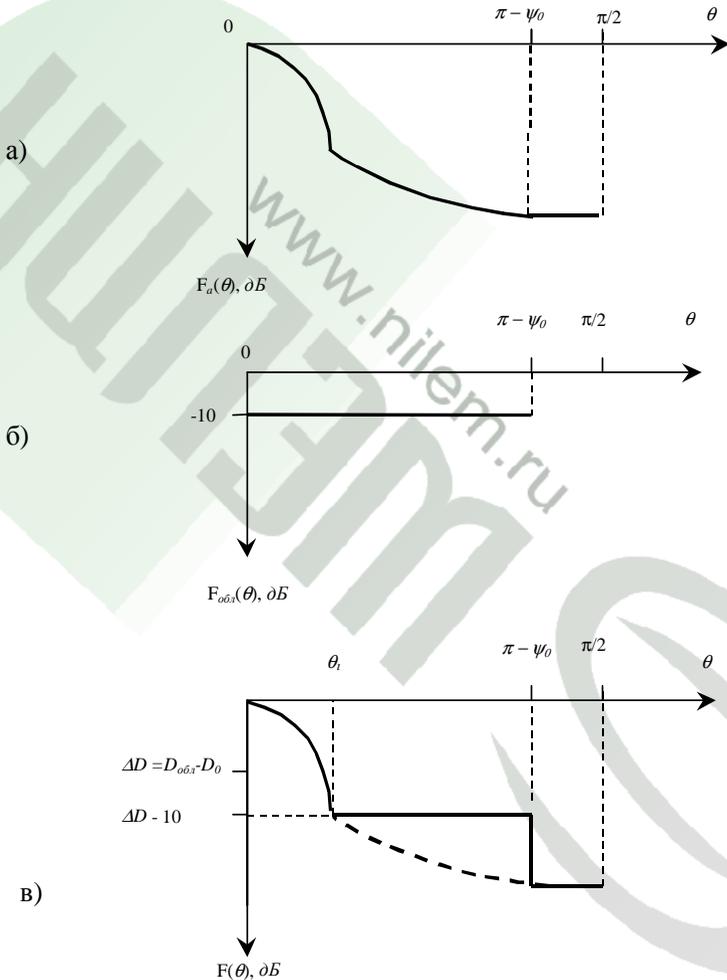


Рис. 7.23. Диаграммы направленности: апертурная (а), облучателя (б), результирующая (в)

Если антенна длиннофокусная (рис. 7.22, б) и $\psi_0 < \pi/2$, то второго сектора углов θ , где направленные свойства будут определяться в основном апертурной составляющей, не будет.

На рис. 7.24 сплошной линией показана характеристика направленности, взятая из [57], прерывистой – построенная с использованием концепции усредненной модели для $x = 1$.

В заключение заметим, что формула (7.8), исходя из физических соображений, применима лишь в секторе углов $0 \leq \theta \leq \pi/2$. Точность расчета по ней будет падать по мере приближения угла θ к $\pi/2$.

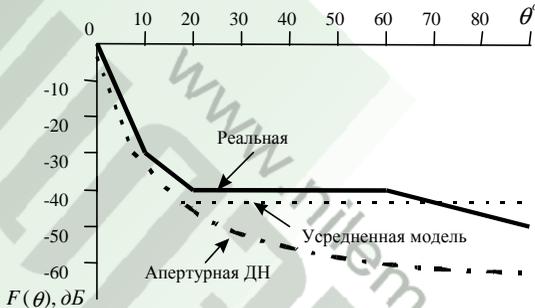


Рис. 7.24. Сравнение диаграмм направленности

7.5.5. Облучатель универсальной модели антенны

Характеристика направленности облучателя параболической антенны однозначно связана с амплитудным распределением поля по апертуре $E(\gamma)$ (см. рис. 7.15.б) [54]:

$$E(\gamma) = F_{обл}(\gamma) / \rho. \quad (7.15)$$

В универсальной модели антенны амплитудное распределение имеет вид (7.2), поэтому:

$$F_{обл}(\gamma) = \rho \left\{ \alpha + (1 - \alpha) \left[1 - \left(\frac{2r}{d} \right)^2 \right] \right\}. \quad (7.16)$$

Известно, что:

$$\rho = \frac{2f}{1 + \cos \gamma}; \quad (7.17)$$

$$r = 2fg(\gamma/2); \quad (7.18)$$

$$d = 4fg \frac{\psi_0}{2}. \quad (7.19)$$

С учетом приведенных выражений нетрудно получить выражение для нормированной характеристики направленности облучателя в области углов $0 \leq \gamma \leq \psi_0$:

$$f_{обл}(\gamma) = \frac{2}{1 + \cos \gamma} \left\{ \alpha + (1 - \alpha) \left[1 - \frac{tg^2 \frac{\gamma}{2}}{tg^2 \frac{\psi_0}{2}} \right] \right\} \quad (7.20)$$

Характеристика направленности облучателя, реализующая амплитудное распределение типа (7.2) и обеспечивающая уровень 0,316 вне сектора углов перехвата энергии зеркалом ($\psi_0 \leq \gamma \leq \pi$), имеет вид:

$$f_{обл}(\gamma) = \frac{2}{1 + \cos \gamma} \left\{ \alpha + (1 - \alpha) \left[1 - \frac{tg^2 \gamma/2}{tg^2 \psi_0/2} \right] \right\} \begin{cases} \gamma < \psi_0 \\ + 0,316 \\ \gamma = 0 \\ \gamma = \psi_0 \end{cases}. \quad (7.21)$$

Симметрия характеристики направленности вокруг оси $\gamma = 0$ позволяет записать следующее выражение для КНД облучателя:

$$D_{обл} = \frac{2}{\int_0^{\pi} f_{обл}^2(\gamma) \sin \gamma d\gamma}. \quad (7.22)$$

На рис. 7.25 приведено значение $D_{обл}$, рассчитанное для усредненной модели антенны с различным значением угла ψ_0 .

В заключение еще раз отметим, что в универсальной модели антенны термин «облучатель» следует понимать как собственно облучатель в однозеркальной антенне, так и систему «облучатель-вспомогательное зеркало» в двухзеркальной антенне.

$D_{обл}, дБ$

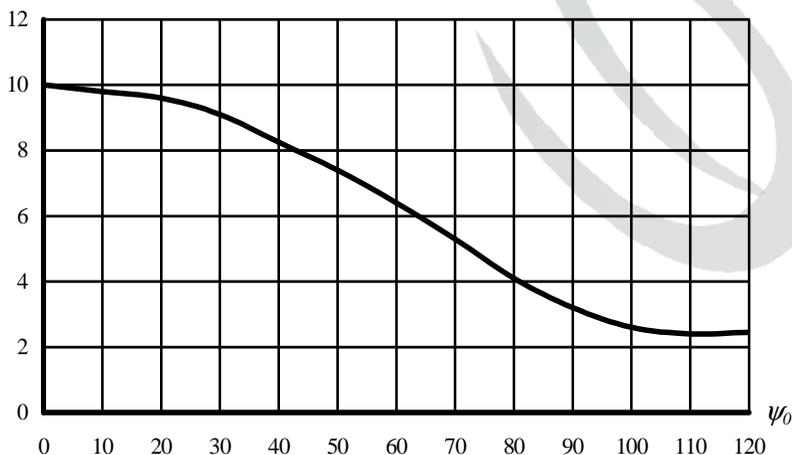


Рис. 7.25. Коэффициент направленного действия облучателя усредненной модели антенны

7.5.6. Порядок расчета ППЭ в области I

Постановку задачи иллюстрирует рис. 7.26, на котором центр апертуры – это O , а его высота над землей – H_A . Угол α характеризует отклонение направления максимального излучения от плоскости горизонта. Ось Y системы координат XYZ совмещена с проекцией направления максимального излучения на плоскость XOY . Горизонтальная плоскость, на которой определяется ППЭ, находится на высоте H_T над землей. Расчетная точка задается либо через координаты ρ (расстояние до точки M вдоль поверхности земли) и φ , либо через y и x .

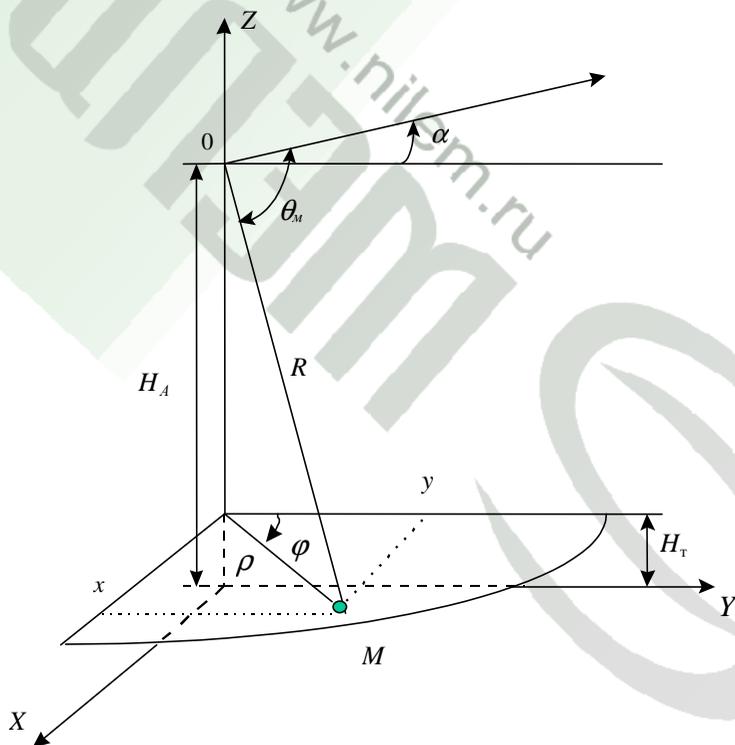


Рис. 7.26. Постановка задачи

Заданными параметрами считаются: P – мощность, излучаемая антенной, Вт; λ – длина волны, м; d – диаметр апертуры, м; D_0 – КНД антенны в направлении максимального излучения в дальней зоне; $2\psi_0$ – угол раскрытия антенны (угол перехвата энергии зеркалом).

В области I рекомендуется следующий порядок расчета:

1. Вычисляется расстояние от центра апертуры до расчетной точки M :

$$R = \sqrt{(H_A - H_T)^2 + \rho^2}. \quad (7.23)$$

2. Рассчитывается угол между направлением максимального излучения и направлением линии «центр апертуры - расчетная точка M »:

$$\theta_M = \arccos\{[\rho \cos \varphi \cos \alpha - (H_A - H_T) \sin \alpha] / R\}. \quad (7.24)$$

3. Определяется граничное расстояние R_{zp} :

$$R_{zp} = 2d^2 / \lambda. \quad (7.25)$$

4. Вычисляются параметры u, x по формулам:

$$u = (\pi d \sin \theta) / \lambda \quad \text{и} \quad x = R / R_{zp}. \quad (7.26)$$

5. По графику рис. 7.17 находится значение функции $20 \lg \left[\frac{B(x)}{x} \right]$, дБ (ее огибающей).

6. По табл. 7.4 или табл. 7.5 находится значение $F(u, x)$, дБ.

7. По формуле (7.8) рассчитывается значение составляющей Π_a :

$$\Pi_a = 10 \lg \frac{P \lambda^2}{d^4} + 10 \lg D_0 + 20 \lg \left[\frac{B(x)}{x} \right] + 20 \lg F(u, x) + 3, \text{ дБ}. \quad (7.27)$$

Расчет ППЭ для относительных расстояний $x < 0,005$ можно выполнять с помощью интерполяции [56]. Для этого сначала по формуле (7.27) вычисляется $\Pi(0,005)$ – величина ППЭ при $x = 0,005$. Далее определяется Π_{Σ} – усредненная величина ППЭ на апертуре [22] по формуле:

$$\Pi_{\Sigma} = 400P / (\pi d^2 0,65) \approx 200P / d^2, \text{ мкВт/см}^2. \quad (7.28)$$

При этом интерполяционная формула принимает вид:

$$\Pi_a(x) = 10^{\left[\lg \Pi(0,005) + \frac{0,005-x}{0,005} \lg \left(\frac{\Pi_{\Sigma}}{\Pi(0,005)} \right) \right]}, \text{ мкВт/см}^2. \quad (7.29)$$

8. По графику рис. 7.25 определяется $D_{обл}$, дБ = $10 \lg D_{обл}$.

9. С помощью формулы (7.9) находим значение составляющей $\Pi_{обл}$:

$$\Pi_{обл} = 10 \lg \frac{P}{4\pi R^2} + 10 \lg D_{обл} + 10, \text{ дБ}. \quad (7.30)$$

10. Суммарная ППЭ рассчитывается по формуле:

$$\Pi_{\Sigma} = 10^{\frac{\Pi_a[\text{дБ}]}{10}} + 10^{\frac{\Pi_{обл}[\text{дБ}]}{10}}, \text{ мкВт/см}^2. \quad (7.31)$$

Предложенная методика и порядок расчета имеют ограничение по минимальному удалению расчетной точки от центра апертуры – $R_{\min} > d/2$.

Повторяя операции, предусмотренные порядком расчета ППЭ, последовательно для различных точек выбранного азимута $\varphi = const$, можно, во-первых, определить как меняется ППЭ вдоль данного азимута, а во-вторых, найти ту точку, где ППЭ равна предельно допустимому уровню. Если подобные точки найти на других азимутальных линиях, проведенных, например, через 10° , то геометрическое место таких точек будет частью границы соответствующей санитарной зоны.

Практическое выполнение этих операций без использования ПЭВМ очень непроизводительно. Автоматизация процесса расчетов не сложна. Основная трудность связана с определением значений огибающей $F(u, x)$. Поскольку огибающие, примеры которых приведены на рис. 7.20 и рис. 7.21, универсальны, то целесообразно из числовых значений табл. 7.4 и табл. 7.5 сформировать соответствующую базу данных и разработать алгоритм поиска значений $F(u, x)$ по предварительно вычисленным параметрам u, x .

7.6. РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ В ОБЛАСТИ II И III

7.6.1. Применение метода геометрической теории дифракции

Известно, что апертурный метод не пригоден для определения поля в области тени (область II). В этой области поле обусловлено дифракционными явлениями на кромке основного зеркала. Недостаточно точные результаты дает также метод Кирхгофа. Не совсем корректной явилась попытка использовать для этих целей коэффициент защитного действия, предпринятая авторами в [56]. Вполне удовлетворительные результаты оценки поля в этой области дает метод геометрической теории дифракции (ГТД). В соответствии с этим методом напряженность поля параболической антенны в области тени E_T определяется в основном напряженностью поля краевых дифракционных лучей, возникающих при падении волны, идущей от облучателя, на кромку зеркала. Физически наглядный способ нахождения E_T предложен Г.З. Айзенбергом [54]. Суть такого способа сводится к следующему. Напряженность поля dE_k , определяемого дифракцией луча на произвольном элементе dl_k кромки антенны, равна напряженности поля, создаваемого таким же элементом бесконечного ребра полуплоскости при условии, что она ориентирована по касательной к поверхности антенны у элемента dl_k , а направление бесконечного ребра совпадает с направлением элемента dl_k (рис. 7.27). При этом предполагается,

что на полуплоскость падает плоская волна, направление распространения которой совпадает с направлением луча, дифрагирующего на элементе dl_x , а напряженность поля плоской волны такая же, как напряженность поля луча.

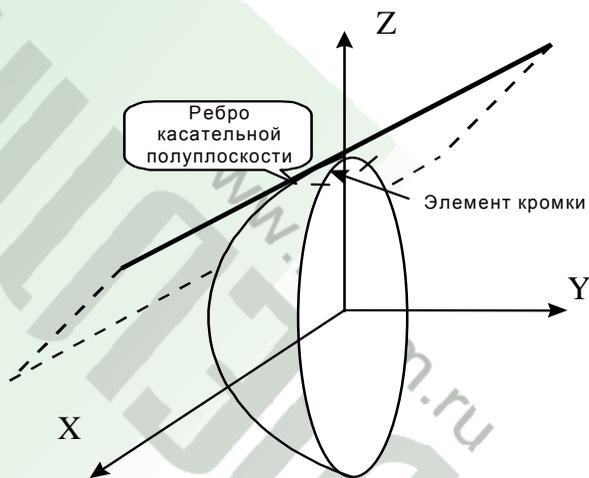


Рис. 7.27. Иллюстрация к методу ГТД

Исходными данными для расчета являются следующие параметры технического средства: мощность излучения P , Вт; длина волны λ , м; диаметр антенны d , м; половина угла раскрыва зеркала ψ_0 ; коэффициент использования поверхности зеркала $k_{ин}$; α – уровень напряженности электрического поля на кромке зеркала. Постановка задачи иллюстрируется на рис. 7.28.

В самом общем виде обусловленные всеми элементами ребра параболической антенны составляющие дифракционного поля имеют вид:

$$E_{\theta} = \int_0^{\pi l} dE_{\theta};$$

$$E_{\varphi} = \int_0^{\pi l} dE_{\varphi}.$$
(7.32)

В свою очередь сферические составляющие dE_θ и dE_φ , создаваемые дифракцией луча на произвольном элементе ребра антенны, являются достаточно сложными функциями.

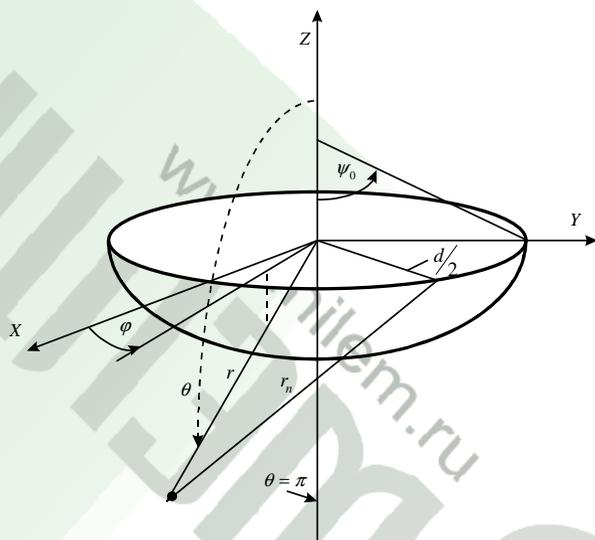


Рис. 7.28. К расчету ППЭ методом ГТД

Последовательность расчетов при использовании метода ГТД следующая:

1. Определяется ряд вспомогательных величин:

$$\begin{aligned}
 \varphi_0 &= \frac{\pi - \psi_0}{2}; \\
 \varphi_1 &= \varphi_0 + \psi_0 + \theta; \\
 \eta_{1,2} &= \pi - (\varphi_1 \mp \varphi_0); \\
 \text{sign} \eta_{1,2} & \quad (\text{sign} \eta = 1, \text{ если } \eta \geq 1, \text{ sign} \eta = -1, \text{ если } \eta < 1); \\
 \beta &= \frac{2\pi}{\lambda}.
 \end{aligned} \tag{7.33}$$

2. Вычисляются функции:

$$m_1 = \text{sign} \eta_1 \exp \left[i \frac{\beta d}{\sin \psi_0} \cos^2 \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_0}{2} \right) \right];$$

$$m_2 = \text{sign} \eta_2 \exp \left[i \frac{\beta d}{\sin \psi_0} \cos^2 \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_0}{2} \right) \right];$$

$$m_3 = \frac{-\exp \left(i \frac{\pi}{4} \right)}{\sin \psi_0} \sqrt{\frac{d}{2\pi \sin \psi_0}}. \quad (7.34)$$

3. Вычисляются специальные функции – интегралы Френеля:

$$\Phi_{1,2} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left[\frac{1-i}{2} - (C(x_{1,2}) - iS(x_{1,2})) \right], \quad (7.35)$$

в которых:

$$x_{1,2} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{\frac{\beta d}{\sin \psi_0}} \left| \cos \left(\frac{\varphi_1 \mp \varphi_0}{2} \right) \right|; \quad (7.36)$$

$$C(x) = \int_0^x \cos \frac{\pi^2}{2} t^2 dt - \text{косинус интеграла Френеля};$$

$$S(x) = \int_0^x \sin \frac{\pi^2}{2} t^2 dt - \text{синус интеграла Френеля}. \quad (7.37)$$

4. Рассчитываются коэффициенты дифракции:

$$D_1 = m_3 (\Phi_1 m_1 - \Phi_2 m_2);$$

$$D_2 = m_3 (\Phi_1 m_1 + \Phi_2 m_2). \quad (7.38)$$

5. Рассчитываются некоторые функции, определяющие дифракцию первичного поля облучателя на регулярной («чистой») кромке зеркала:

$$\gamma_1 = \int_0^{\pi l} \left[D_1 \sin \left(\frac{2s}{d} \right) \cos \theta \sin \left(\varphi - \frac{2s}{d} \right) + D_2 \cos \left(\frac{2s}{d} \right) \cos \left(\varphi - \frac{2s}{d} \right) \right] \frac{\exp(-i\beta r_n)}{r_n} ds;$$

$$\gamma_2 = \int_0^{\pi l} \left[D_1 \sin \left(\frac{2s}{d} \right) \cos \left(\varphi - \frac{2s}{d} \right) + D_2 \cos \left(\frac{2s}{d} \right) \cos \theta \times \right. \quad (7.39)$$

$$\left. \times \cos \left(\varphi - \frac{2s}{d} \right) \right] \frac{\exp(-i\beta r_n)}{r_n} ds$$

В этих выражениях r_n – расстояние от произвольного элемента кромки ds до расчетной точки:

$$r_n = \sqrt{\frac{d^2}{4} + r^2 - dr \cos \left(\varphi - \frac{2s}{d} \right) \sin \theta}, \quad (7.40)$$

где r – расстояние от центра апертуры до расчетной точки (рис. 7.28).

6. Определяется усредненное значение ППЭ в центре апертуры:

$$П_s = \frac{400P}{\pi d^2 k_{ин}^2}, \text{ мкВт/см}^2. \quad (7.41)$$

7. Определяется величина напряженности поля в центре апертуры:

$$E_0 = \sqrt{3,77П_s}, \text{ мкВт/см}^2. \quad (7.42)$$

8. Рассчитываются сферические компоненты дифракционного поля E_θ, E_φ по формулам:

$$\begin{aligned} E_\theta &= E_0 \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda}} \gamma_1; \\ E_\varphi &= E_0 \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda}} \gamma_2, \end{aligned} \quad (7.43)$$

где α – уровень поля на ребре кромки (для усредненной модели антенны $\alpha = 0,316$).

9. Определяются составляющие ППЭ, обусловленные дифракционными компонентами поля E_θ и E_φ , по формулам:

$$\begin{aligned} П_\theta &= \left| \frac{E_\theta^2}{3,77} \right|, \text{ мкВт/см}^2; \\ П_\varphi &= \left| \frac{E_\varphi^2}{3,77} \right|, \text{ мкВт/см}^2. \end{aligned} \quad (7.44)$$

10. В том случае, когда требуется найти декартовы составляющие дифракционного поля, то следует воспользоваться следующими формулами:

$$\begin{aligned} E_x &= E_\theta \cos \theta \cos \varphi - E_\varphi \sin \varphi; \\ E_y &= E_\theta \cos \theta \sin \varphi + E_\varphi \cos \varphi; \\ E_z &= -E_\theta \sin \theta. \end{aligned} \quad (7.45)$$

Изложенный порядок расчета сферических составляющих поля основан на методике, приведенной в [54]. Однако коэффициенты дифракции рассчитываются не по приближенным формулам, а по строгим, полученным Куюмджаном и Патхаком [30].

В секторе углов, принадлежащих области $\pi/6 \leq \theta \leq 180^\circ - \psi_0$ (область III), ППЭ определяется апертурной составляющей, составляющей от излучения облучателя и дифракционной составляющей:

$$П_\Sigma = П_a + П_{обл} + П_{диф}. \quad (7.46)$$

Вклад апертурной составляющей и составляющей от облучателя определяется в полном соответствии с рекомендациями, изложенными в разделе 7.5.

Апертурная составляющая ППЭ в этой области хотя и существует, но не является определяющей при оценке общей электромагнитной обстановки.

Дифракционная составляющая определяется по формулам, приведенным в настоящем подразделе. Ее значение определяется в основном величиной Π_{θ} . Следует заметить, что эта составляющая особенно значительна в секторе углов, примыкающих к направлению «облучатель-кромка». При этом значение $\Pi_{\text{диф}}$ может быть соизмеримым и даже превышать суммарное значение составляющих ППЭ апертуры и облучателя.

7.6.2. Результаты расчетов ППЭ в области II и III

Анализ результатов расчетов ППЭ в области заднего полупространства показывает, что наибольшие значения ППЭ наблюдается при $\theta = 180^\circ$ и в области углов, примыкающих к направлению «облучатель-кромка» $\theta = 180^\circ - \psi_0$.

В табл. 7.6...7.8 приведены значения ППЭ, рассчитанные для направления $\theta = 180^\circ$ (в таблицах записаны округленные значения). Параметры технического средства: $P = 1000$ Вт; $\lambda = 0,05$ м; $k_{\text{ин}} = 0,65$; $\psi_0 = 80^\circ, 90^\circ, 100^\circ$; $\alpha = 0,316$.

Таблица 7.6

| П(180°) мкВт/см ² при: $P = 1000$ Вт; $\lambda = 0,05$ м; $\psi_0 = 80^\circ$, $k_{\text{ин}} = 0,65$; $\alpha = 0,316$ | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------|-----|----|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| d, м | Расстояние r, м | | | | | | | | | | | |
| | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 |
| 1 | 330 | 121 | 62 | 37,5 | 25,2 | 18 | 13,5 | 10,5 | 8,4 | 6,9 | 5,8 | 4,9 |
| 3 | 271 | 112 | 60 | 37 | 24,8 | 17,8 | 13,4 | 10,4 | 8,4 | 6,9 | 5,7 | 4,9 |
| 5 | 200 | 98 | 55 | 35 | 24 | 17,4 | 13,2 | 10,3 | 8,3 | 6,8 | 5,7 | 4,8 |
| 7 | 144 | 82 | 50 | 33 | 23 | 17 | 13 | 10,1 | 8,2 | 6,7 | 5,6 | 4,8 |
| 9 | 104 | 67 | 44 | 30 | 22 | 16 | 12,4 | 9,9 | 8 | 6,6 | 5,5 | 4,7 |
| 11 | 78 | 55 | 39 | 27 | 20 | 15 | 12 | 9,6 | 7,8 | 6,5 | 5,3 | 4,6 |

Таблица 7.7

| П(180°) мкВт/см ² при: $P = 1000$ Вт; $\lambda = 0,05$ м; $\psi_0 = 90^\circ$, $k_{\text{ин}} = 0,65$; $\alpha = 0,316$ | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------|----|----|----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|
| d, м | Расстояние r, м | | | | | | | | | | | |
| | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 |
| 1 | 264 | 96 | 50 | 30 | 20 | 14,4 | 11 | 8,5 | 6,8 | 5,5 | 4,6 | 3,9 |
| 3 | 217 | 90 | 48 | 29 | 19,8 | 14,3 | 10,8 | 8,4 | 6,7 | 5,5 | 4,6 | 3,9 |
| 5 | 160 | 78 | 44 | 28 | 19 | 14 | 10,6 | 8,3 | 6,6 | 5,5 | 4,6 | 3,85 |
| 7 | 115 | 66 | 40 | 26 | 18 | 13,5 | 10,3 | 8,1 | 6,5 | 5,4 | 4,5 | 3,8 |
| 9 | 84 | 54 | 35 | 24 | 17 | 13 | 10 | 7,9 | 6,4 | 5,3 | 4,5 | 3,7 |
| 11 | 62 | 44 | 31 | 22 | 16 | 12,3 | 9,6 | 7,7 | 6,3 | 5,2 | 4,4 | 3,7 |

Таблица 7.8

| П(180°) мкВт/см ² при: $P = 1000$ Вт; $\lambda = 0,05$ м; $\psi_0 = 100^\circ$; $k_{un} = 0,65$; $\alpha = 0,316$ | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------------------|----|----|----|------|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| $d, \text{ м}$ | Расстояние $r, \text{ м}$ | | | | | | | | | | | |
| | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 |
| 1 | 232 | 85 | 44 | 27 | 18 | 13 | 9,5 | 7,4 | 6 | 4,9 | 4,1 | 3,4 |
| 3 | 191 | 79 | 42 | 26 | 17,5 | 12,5 | 9,4 | 7,4 | 5,99 | 4,8 | 4,1 | 3,4 |
| 5 | 141 | 69 | 39 | 25 | 17 | 12,2 | 9,3 | 7,3 | 5,8 | 4,8 | 4 | 3,4 |
| 7 | 101 | 58 | 35 | 23 | 16 | 12 | 9 | 7,1 | 5,7 | 4,7 | 3,9 | 3,4 |
| 9 | 73 | 48 | 31 | 21 | 15 | 11,4 | 8,8 | 7 | 5,6 | 4,7 | 3,9 | 3,3 |
| 11 | 54 | 39 | 27 | 19 | 14 | 11 | 8,4 | 6,7 | 5,5 | 4,6 | 3,8 | 3,2 |

Данные, приведенные в таблицах, хорошо аппроксимируются выражением:

$$П(180^\circ) = \frac{2,5P}{\pi(r + 0,1d \sin \psi_0)^2} \left[0,1 \sin \psi_0 - 20 \lg \left(\sin \frac{\psi_0}{2} \right) \right], \text{ мкВт/см}^2. \quad (7.47)$$

На расстояниях $r > 2d$ погрешность расчета по этой формуле не превышает (15...20)% по сравнению с расчетом по методу ГТД.

В табл. 7.9 приведены значения $П_\Sigma(180^\circ - \psi_0)$, рассчитанные для направления $\theta = 90^\circ$. Параметры технического средства: $P = 1000$ Вт; $\lambda = 0,05$ м; $k_{un} = 0,65$; $\psi_0 = 90^\circ$; $\alpha = 0,316$.

Таблица 7.9

| П(90°) мкВт/см ² при: $P = 1000$ Вт; $\lambda = 0,05$ м; $\psi_0 = 90^\circ$; $k_{un} = 0,65$; $\alpha = 0,316$ | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|
| $d, \text{ м}$ | Расстояние $r, \text{ м}$ | | | | | | | | | | | |
| | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 |
| 1 | 498 | 177 | 90 | 54,5 | 36,4 | 26,1 | 19,6 | 15,2 | 12,2 | 10 | 8,3 | 7 |
| 3 | 567 | 180 | 89 | 53,2 | 35,4 | 25,7 | 18,9 | 14,7 | 11,8 | 9,6 | 8 | 6,8 |
| 5 | 1110 | 201 | 93 | 54,4 | 35,8 | 25,4 | 19 | 14,7 | 11,7 | 9,6 | 8 | 6,77 |
| 7 | - | 264 | 102 | 57 | 36,8 | 25,8 | 19,2 | 14,8 | 11,8 | 9,6 | 8 | 6,75 |
| 9 | - | 596 | 121 | 61,6 | 38,5 | 26,6 | 19,6 | 15 | 11,9 | 9,7 | 8 | 6,7 |
| 11 | - | - | 167 | 69,6 | 41,1 | 27,7 | 20,1 | 15,3 | 12,1 | 9,8 | 8 | 6,8 |

Анализ расчетных данных показывает, что максимальное значение ППЭ в направлении «облучатель-кромка» хорошо аппроксимируется выражением:

$$П_\Sigma(180^\circ - \psi_0) = -\frac{80}{(r - 0,1d)^2} \lg \left(\sin \left(\frac{\psi_0}{2} \right) \right), \text{ мкВт/см}^2. \quad (7.48)$$

Характерная картина изменения ППЭ вблизи антенны в области заднего полупространства приведена на рис. (7.29....7.31).

$\Pi, \text{мкВт/см}^2$

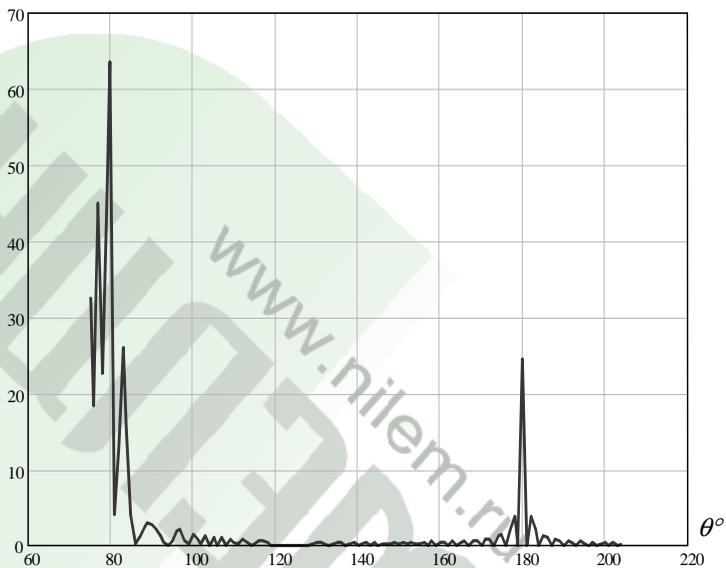


Рис. 7.29. Результаты расчета ППЭ
($d = 1 \text{ м}$; $\psi_0 = 80^\circ$; $P = 1000 \text{ Вт}$; $r = 9 \text{ м}$; $\lambda = 0,05 \text{ м}$)

$\Pi, \text{мкВт/см}^2$

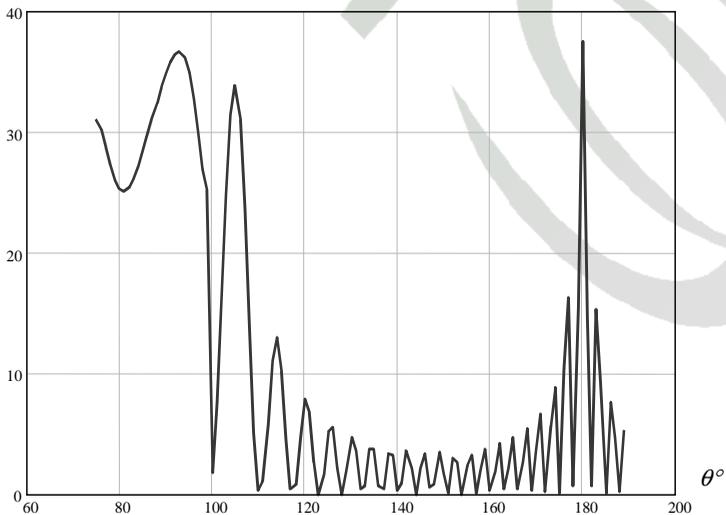


Рис. 7.30. Результаты расчета ППЭ для случая
($d = 1 \text{ м}$; $\psi_0 = 100^\circ$; $P = 1000 \text{ Вт}$; $r = 9 \text{ м}$; $\lambda = 0,05 \text{ м}$)

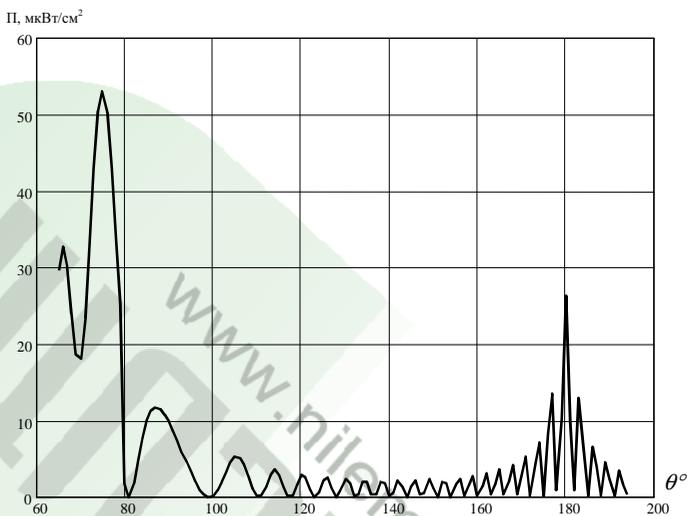


Рис. 7.31. Результаты расчета РДЭ для случая ($d = 1$ м; $\psi_0 = 100^\circ$; $P = 1000$ Вт; $r = 9$ м; $\lambda = 0,05$ м)

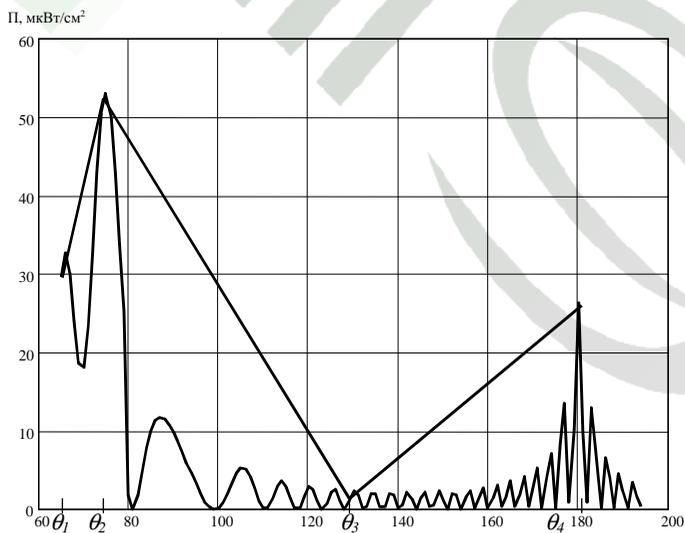


Рис. 7.32. Применение линейной интерполяции при расчете РДЭ ($d = 1$ м; $\psi_0 = 100^\circ$; $P = 1000$ Вт; $r = 9$ м; $\lambda = 0,05$ м)

Однако при практическом прогнозировании следует иметь в виду, что максимальное значение ППЭ может не совпадать точно с направлением «на кромку» $\theta = 180^\circ - \psi_0$ (рис. 7.30 и рис. 7.31). Этот эффект проявляется тем заметнее, чем меньше отношение d/λ .

Практическое прогнозирование электромагнитной обстановки в секторе углов $180^\circ - \psi_0 - 15^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ можно проводить путем линейной интерполяции между значениями ППЭ, рассчитанными для углов:

$$\theta_1 = 180^\circ - \psi_0 - 15^\circ, \quad \theta_2 = \theta_{\text{макс}}, \quad \theta_3 = \theta_{\text{макс}} + \frac{180^\circ - \theta_{\text{макс}}}{2}, \quad \theta_4 = 180^\circ.$$

Пример подобной интерполяции приведен на рис. 7.32.

7.7. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ППЭ ВБЛИЗИ АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ РАСКРЫВОМ

7.7.1. Антенна с квадратной апертурой

В [55, 56] для расчета ППЭ апертурных антенн с квадратным раскрывом предлагается использовать концепцию «усредненной модели антенны» (по аналогии с апертурными антеннами круглого раскрыва). При этом, в частности, предлагается считать характеристику направленности апертуры не зависящей от координаты φ (рис. 7.33). Это означает, что распределение амплитуды поля по апертуре антенны также не зависит от координаты φ .

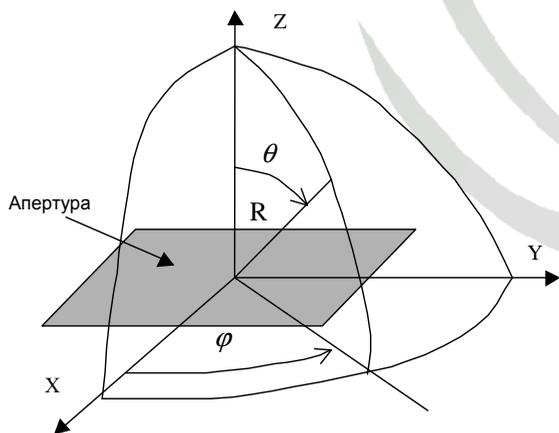


Рис. 7.33. К расчету характеристики направленности прямоугольной апертуры

Общая расчетная формула для нахождения ППЭ имеет вид (7.1). Физический смысл отдельных составляющих прежний. В предположении осевой симметрии ДН облучателя и антенны ППЭ не зависит от координаты φ . При этом составляющие Π_a и $\Pi_{обл}$ в децибелах относительно 1 мкВт/см² будут иметь вид:

$$\Pi_a = 10 \lg \frac{P \lambda^2}{a^4} + 10 \lg D_0 + 20 \lg \frac{B(x)}{x} + 20 \lg F(u, x) + 3, \text{ дБ}, \quad (7.49)$$

$$\Pi_{обл} = 10 \lg \frac{P}{4\pi R^2} + 10 \lg D_{обл} + 10, \text{ дБ}, \quad (7.50)$$

где: P – мощность, излучаемая антенной, Вт;

λ – длина волны, м;

a – сторона квадрата апертуры антенны, м;

D_0 – КНД антенны в направлении максимального излучения в волновой зоне (величина безразмерная);

$\frac{B(x)}{x}$ – функция, учитывающая изменение КНД квадратной апертуры в зависимости от расстояния;

$F(u, x)$ – нормированная ХН квадратной апертуры в координатах u, x ;

θ, R – сферические координаты расчетной точки;

$u = (\pi a \sin \theta) / \lambda$ – обобщенная координата угла;

$x = R / R_{сп}$ – относительное расстояние;

$R_{сп} = 2a^2 / \lambda$ – граничное расстояние;

$D_{обл}$ – КНД облучателя в направлении его максимального излучения (величина безразмерная).

Из теории антенн [54] известно, что для апертуры, приведенной на рис. 7.33, расчет функции $F(u, x)$ в одной из главных плоскостей (XOZ) или (YOZ) сводится к расчету характеристики направленности линейного синфазного источника. Распределение амплитуды тока вдоль источника совпадает с распределением амплитуды поля вдоль соответствующей оси апертуры.

В [55,56] принято распределение в виде «косинуса на пьедестале»:

$$f(\tau) = 0,316 + 0,684 \cos \frac{\pi \tau}{a}, \quad (7.51)$$

где: a – сторона квадрата, τ – текущее значение координаты вдоль любой стороны апертуры.

Функции $F(u, x)$ сильно осциллирующие, поэтому в практических расчетах ППЭ следует использовать их гарантированные огибающие. После обработки результатов серии расчетов были получены гарантированные огибающие функции $F(u, x)$. Параметр u изменялся в пределах 0...760, x – в пределах 0,005...1. Табулированные значения гарантированных огибающих для квадратной апертуры приведены в табл. 7.10 и табл. 7.11, которые впервые опубликованы в [56]. Числовые данные этих таблиц универсальны в том смысле, что при $a \gg \lambda$ они справедливы для апертур любых размеров (для рассматриваемого класса технических средств). Примеры графиков гарантированной огибающей приведены на рис. 7.34 и рис. 7.35.

Таблица 7.10

Функция $F(u, x)$ – квадратная апертура, $u = 0...100$

| u | Параметр x | | | | | | | | |
|-----|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,005 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 1,0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0,71 | -1,89 | -5,60 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0,21 | -2,73 | -5,90 | -13,3 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0,97 | -6,73 | -11,4 | -20,4 |
| 8 | 0 | 0 | -0,16 | -0,30 | -0,76 | -2,06 | -11,4 | -17,2 | -23,4 |
| 10 | 0 | 0 | -0,31 | -0,48 | -1,81 | -3,59 | -14,8 | -20,3 | -26,0 |
| 12 | 0 | 0 | -0,47 | -0,95 | -2,83 | -5,74 | -18,2 | -22,9 | -28,0 |
| 14 | 0 | 0 | -0,53 | -1,70 | -4,73 | -8,62 | -21,4 | -25,4 | -29,5 |
| 16 | 0 | -0,12 | -0,74 | -2,52 | -6,94 | -11,8 | -24,0 | -27,4 | -30,8 |
| 18 | 0 | -0,36 | -1,02 | -3,67 | -9,53 | -14,8 | -25,8 | -29,1 | -31,8 |
| 20 | 0 | -0,54 | -1,45 | -5,19 | -12,2 | -16,9 | -27,3 | -30,1 | -32,7 |
| 22 | 0 | -0,62 | -1,77 | -6,95 | -14,7 | -19,7 | -28,3 | -30,9 | -33,6 |
| 24 | 0 | -0,78 | -2,31 | -8,37 | -17,1 | -21,2 | -29,0 | -31,9 | -34,2 |
| 26 | 0 | -0,82 | -3,15 | -10,7 | -19,3 | -22,3 | -29,8 | -32,6 | -34,8 |
| 28 | 0 | -0,86 | -3,81 | -13,6 | -21,5 | -24,9 | -30,5 | -33,4 | -35,6 |
| 30 | 0 | -1,00 | -5,34 | -15,4 | -22,9 | -26,2 | -31,3 | -34,1 | -36,2 |
| 32 | -0,11 | -1,12 | -6,96 | -17,8 | -25,1 | -27,4 | -31,9 | -34,5 | -36,7 |
| 34 | -0,31 | -1,26 | -8,83 | -19,5 | -26,2 | -28,2 | -32,4 | -35,0 | -37,1 |
| 36 | -0,36 | -1,38 | -10,6 | -21,8 | -27,3 | -29,3 | -32,8 | -35,4 | -37,5 |
| 38 | -0,42 | -1,60 | -11,6 | -22,4 | -28,1 | -29,9 | -33,1 | -35,8 | -37,9 |
| 40 | -0,48 | -1,76 | -14,1 | -23,7 | -28,9 | -30,6 | -33,6 | -36,1 | -38,2 |
| 42 | -0,48 | -1,90 | -15,9 | -25,1 | -29,3 | -31,1 | -34,1 | -36,4 | -38,5 |
| 44 | -0,48 | -2,04 | -17,5 | -26,0 | -30,0 | -31,6 | -34,4 | -36,9 | -38,9 |
| 46 | -0,55 | -2,20 | -18,9 | -26,8 | -30,4 | -32 | -34,9 | -37,2 | -39,4 |
| 48 | -0,55 | -2,40 | -19,9 | -27,6 | -30,8 | -32,6 | -35,4 | -37,6 | -39,8 |
| 50 | -0,64 | -2,88 | -21,2 | -28,1 | -31,2 | -33,2 | -35,6 | -38,1 | -40,0 |
| 52 | -0,67 | -3,08 | -22,3 | -28,5 | -31,5 | -33,6 | -36,1 | -38,3 | -40,4 |
| 54 | -0,77 | -3,30 | -23,6 | -28,9 | -32,0 | -33,9 | -36,4 | -38,6 | -40,6 |
| 56 | -0,79 | -3,56 | -24,4 | -29,2 | -32,3 | -34,3 | -36,8 | -39,1 | -41,0 |
| 58 | -0,89 | -3,94 | -25,2 | -29,6 | -32,5 | -34,6 | -37,1 | -39,4 | -41,3 |
| 60 | -0,95 | -4,46 | -25,8 | -30,0 | -32,9 | -34,9 | -37,3 | -39,6 | -41,4 |

Окончание табл. 7.10

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 62 | -1,01 | -4,94 | -26,8 | -30,3 | -33,3 | -35,1 | -37,4 | -39,8 | -41,6 |
| 64 | -1,06 | -5,56 | -27,4 | -30,6 | -33,5 | -35,4 | -37,8 | -40,0 | -41,8 |
| 66 | -1,11 | -6,44 | -27,9 | -31,1 | -33,8 | -35,6 | -37,9 | -40,3 | -42,1 |
| 68 | -1,15 | -7,26 | -28,4 | -31,5 | -34,1 | -36,0 | -38,2 | -40,5 | -42,4 |
| 70 | -1,18 | -8,38 | -28,8 | -31,6 | -34,3 | -36,2 | -38,5 | -40,6 | -42,6 |
| 72 | -1,29 | -9,36 | -29,3 | -31,9 | -34,6 | -36,4 | -38,6 | -40,9 | -42,7 |
| 74 | -1,35 | -10,6 | -29,8 | -32,3 | -34,9 | -36,6 | -38,8 | -41,0 | -42,8 |
| 76 | -1,39 | -11,9 | -30,0 | -32,7 | -35,1 | -36,7 | -39,0 | -41,2 | -43,0 |
| 78 | -1,45 | -13,0 | -30,2 | -32,9 | -35,3 | -36,8 | -39,1 | -41,5 | -43,3 |
| 80 | -1,68 | -14,2 | -30,7 | -33,2 | -35,5 | -36,9 | -39,3 | -41,7 | -43,5 |
| 82 | -1,77 | -15,5 | -30,9 | -33,4 | -35,7 | -37,2 | -39,5 | -41,8 | -43,5 |
| 84 | -1,96 | -16,5 | -31,4 | -33,6 | -35,4 | -37,3 | -39,6 | -42,0 | -43,7 |
| 86 | -2,13 | -17,4 | -31,9 | -34,0 | -36,1 | -37,5 | -39,8 | -42,3 | -44,0 |
| 88 | -2,34 | -18,4 | -32,2 | -34,2 | -36,2 | -37,8 | -39,9 | -42,4 | -44,2 |
| 90 | -2,58 | -19,8 | -32,5 | -34,5 | -36,4 | -37,7 | -40,0 | -42,5 | -44,5 |
| 92 | -2,64 | -20,8 | -32,9 | -34,7 | -36,6 | -38,0 | -40,1 | -42,7 | -44,7 |
| 94 | -2,77 | -21,8 | -33,3 | -34,9 | -36,7 | -38,0 | -40,3 | -42,9 | -44,9 |
| 96 | -3,05 | -22,7 | -33,6 | -35,1 | -37,1 | -38,3 | -40,4 | -43,0 | -45,1 |
| 98 | -3,06 | -23,7 | -33,8 | -35,5 | -37,3 | -38,5 | -40,5 | -43,1 | -45,3 |
| 100 | -3,44 | -24,8 | -34,1 | -35,8 | -37,7 | -38,8 | -40,6 | -43,3 | -45,4 |

Таблица 7.11

Функция $F(u, x)$ - квадратная апертура, $u = 100...300$ (760)

| u | Параметр x | | | | | | | | |
|-----|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,005 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 1,0 |
| 100 | -3,44 | -24,8 | -34,1 | -35,7 | -37,7 | -38,8 | -40,6 | -43,3 | -45,4 |
| 110 | -3,75 | -27,1 | -34,8 | -36,8 | -38,8 | -40,5 | -42,1 | -45,0 | -46,4 |
| 120 | -4,53 | -29,3 | -35,4 | -37,4 | -39,5 | -41,3 | -42,8 | -45,8 | -47,2 |
| 130 | -5,74 | -30,5 | -36,0 | -37,8 | -40,1 | -41,9 | -43,4 | -46,5 | -47,9 |
| 140 | -8,14 | -31,4 | -36,6 | -38,5 | -40,7 | -42,5 | -44,1 | -47,2 | -48,7 |
| 150 | -11,4 | -32,3 | -37,2 | -39,2 | -41,2 | -43,0 | -44,5 | -47,9 | -49,3 |
| 160 | -15,6 | -33,2 | -37,8 | -39,7 | -41,7 | -43,5 | -44,9 | -48,7 | -49,9 |
| 170 | -19,7 | -34,1 | -38,4 | -40,0 | -42,1 | -44,0 | -45,7 | -49,1 | -50,7 |
| 180 | -22,9 | -35,0 | -39,0 | -40,4 | -42,5 | -44,5 | -46,3 | -49,6 | -51,4 |
| 190 | -25,6 | -35,6 | -39,4 | -41,0 | -42,9 | -45,0 | -46,8 | -50,0 | -52,1 |
| 200 | -27,5 | -36,2 | -39,9 | -41,5 | -43,3 | -45,6 | -47,5 | -50,6 | -52,6 |
| 210 | -29,0 | -36,8 | -40,4 | -42,2 | -44,0 | -46,3 | -48,3 | -51,5 | -53,1 |
| 220 | -30,3 | -37,4 | -41,1 | -42,9 | -44,4 | -47,0 | -49,1 | -51,9 | -53,6 |
| 230 | -31,3 | -38,0 | -41,8 | -43,6 | -45,4 | -47,0 | -49,8 | -52,5 | -54,1 |
| 240 | -32,2 | -38,6 | -42,4 | -44,3 | -46,0 | -48,4 | -50,6 | -53,0 | -54,6 |
| 250 | -33,1 | -39,2 | -43,1 | -45,0 | -46,6 | -49,1 | -51,4 | -53,8 | -55,1 |
| 260 | -34,0 | -39,8 | -43,8 | -45,9 | -47,2 | -50,0 | -52,2 | -54,5 | -56,1 |
| 270 | -34,9 | -40,8 | -44,5 | -46,5 | -48,4 | -51,0 | -53,1 | -55,5 | -56,8 |
| 280 | -36,2 | -41,7 | -45,9 | -47,6 | -49,7 | -52,0 | -54,0 | -56,5 | -57,6 |
| 290 | -37,5 | -42,9 | -47,2 | -48,6 | -51,0 | -53,2 | -54,9 | -57,4 | -58,7 |
| 300 | -38,7 | -44,3 | -48,5 | -49,9 | -52,3 | -54,4 | -56,1 | -58,7 | -60,0 |
| ... | | | | | | | | | |
| 760 | -50,0 | -53,5 | -57,5 | -62,0 | -65,0 | -67,0 | -70,0 | -72,0 | -74,0 |

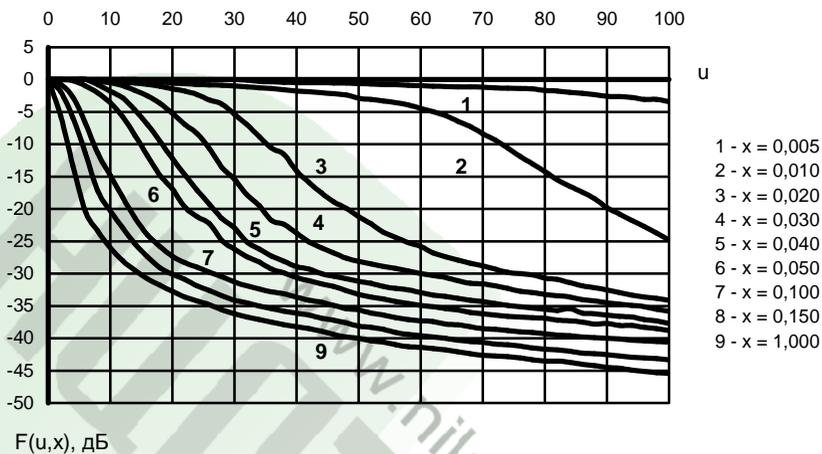


Рис. 7.34. Функция $F(u, x)$ – квадратная апертура, $u = 0 \dots 100$

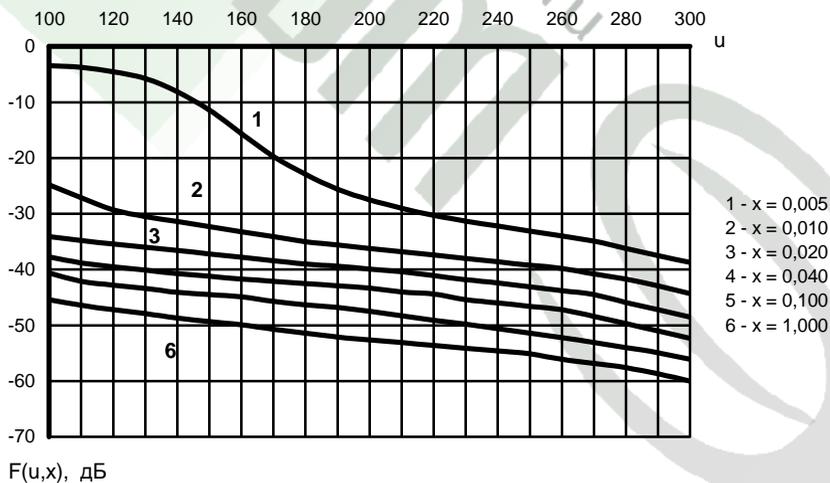


Рис. 7.35. Функция $F(u, x)$ – квадратная апертура, $u = 100 \dots 300$

Аналитическое выражение функции $B(x)/x$ для квадратной апертуры с амплитудным распределением типа «косинуса на пьедестале» получено в [53]:

$$\frac{B(x)}{x} = \frac{4 \left[2\alpha C(u_1) + (1-\alpha) \left\{ [C(u_2) + C(u_3)] \cos \frac{\pi x}{2} + [S(u_2) + S(u_3)] \sin \frac{\pi x}{2} \right\} \right]^2}{\left[2\alpha + \frac{4}{\pi} (1-\alpha) \right]^2} +$$

$$+ \frac{4 \left[-2\alpha S(u_1) + (1-\alpha) \left\{ [C(u_2) + C(u_3)] \sin \frac{\pi x}{2} - [S(u_2) + S(u_3)] \cos \frac{\pi x}{2} \right\} \right]^2}{\left[2\alpha + \frac{4}{\pi} (1-\alpha) \right]^2}, \quad (7.52)$$

где: $u_1 = \frac{1}{2\sqrt{x}}$, $u_2 = \frac{1}{2\sqrt{x}} + \sqrt{x}$, $u_3 = \frac{1}{2\sqrt{x}} - \sqrt{x}$; (7.53)

$$C(u) = \int_0^u \cos \frac{\pi t^2}{2} dt \text{ – косинус интеграла Френеля}; \quad (7.54)$$

$$S(u) = \int_0^u \sin \frac{\pi t^2}{2} dt \text{ – синус интеграла Френеля}. \quad (7.55)$$

Расчет и исследование функции (7.52) показывает, что в области $x < 0,15$ она осциллирующая, а в области $x > 0,15$ – изменяется монотонно. Ввиду специфики задачи оценки электромагнитной обстановки осциллирующую часть функции можно заменить огибающей ее максимумов (рис. 7.36). В области $x \geq 1$ справедливо соотношение $20\lg[B(x)/x] = -20\lg x$.

Расчет ППЭ в области заднего полупространства методом ГТД, как это сделано для круглой апертуры, представляет собой достаточно сложную задачу. В этом случае необходимо решить задачу дифракции волны, создаваемой облучателем, на криволинейной кромке, представляющей собой совокупность четырех линий. Каждая линия – результат пересечения параболической поверхности плоскостью. Подобный подход очень усложнит методику.

Для расчета ППЭ в области заднего полупространства предлагается ввести понятие эквивалентной круглой апертуры. Диаметр эквивалентной апертуры определяется из условия равенства площадей квадратной и круглой апертуры:

$$d_э = \frac{2a}{\sqrt{\pi}} \quad (7.56)$$

Угол раскрыва эквивалентной апертуры определяется по формуле:

$$\psi_0 = 2 \arctg \left[\frac{d_э}{4f} \right], \quad (7.57)$$

где f – фокусное расстояние зеркала.

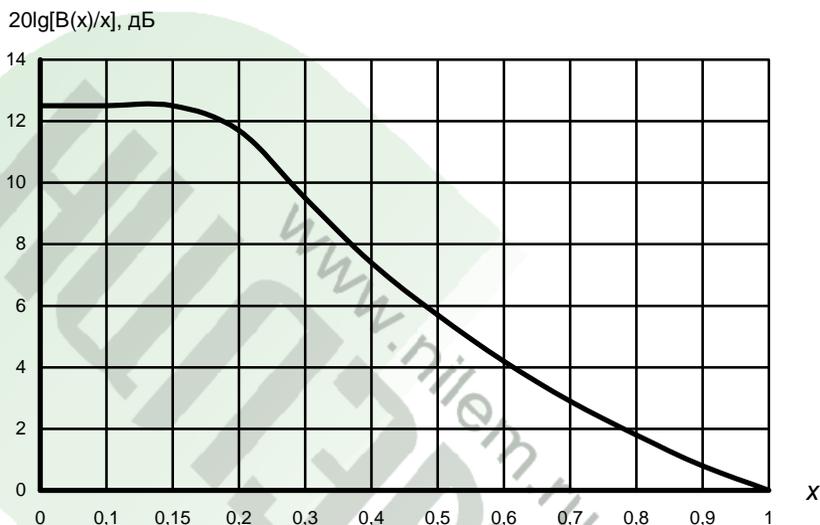


Рис.7.36. График функции $20\lg[B(x)/x]$ для квадратной апертуры

7.7.2. Антенна с прямоугольной апертурой

В случае прямоугольной апертуры со сторонами a и b расчетная формула для апертурной составляющей будет иметь вид:

$$P_a = 10\lg \frac{P\lambda^2}{16\pi a^2 b^2} + 10\lg D_0 + \frac{1}{2} \left[20\lg \frac{B(x_1)}{x_1} + 20\lg \frac{B(x_2)}{x_2} \right] + \frac{1}{2} [20\lg F(u, x_1) + 20\lg F(u, x_2)] + 3, \text{ дБ}, \quad (7.58)$$

где:

$$x_1 = \frac{R\lambda}{2a^2}, \quad x_2 = \frac{R\lambda}{2b^2}. \quad (7.59)$$

Таким образом, выражение (7.58) в сочетании с (7.50), а также базой данных гарантированных огибающих, приведенных в табл. 7.10 и табл. 7.11, позволяет рассчитать значение ППЭ (7.46), апертурной составляющей и составляющей от облучателя.

Диаметр эквивалентной апертуры, необходимый для расчета дифракционной составляющей ППЭ, определяется из условия равенства площадей прямоугольной и круглой апертуры:

$$d_s = 2\sqrt{\frac{ab}{\pi}}. \quad (7.60)$$

Угол раскрыва определяется по формуле (7.57).

7.7.3. Рекомендации по расчету ППЭ вблизи антенн различных конструкций

Если антенна выполнена в виде симметричной вырезки из параболоида вращения (рис. 7.9), то в переднем полупространстве расчет ведется по формулам (7.49) и (7.50) для квадратной апертуры или (7.58), (7.59) для прямоугольной апертуры. Расчет ППЭ в области заднего полупространства ведется с использованием понятия эквивалентной круглой антенны и методики, изложенной в разделе 7.6. Геометрические характеристики эквивалентной апертуры определяются по формулам (7.56) и (7.57) и (7.60).

Антенны в виде несимметричной вырезки из параболоида вращения (рис. 7.10) хотя и не очень типичны, но находят применение, в частности, на тропосферных линиях связи (см. раздел 7.2). В антенных системах тропосферных радиорелейных линий облучатель находится на расстоянии десятков метров от зеркала антенны. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете ППЭ. Методика расчета составляющей P_a соответствует приведенной выше для квадратной апертуры с распределением типа «косинус на пьедестале» [55,56]. Во всех точках, лежащих вне области перехвата энергии зеркалом (включая область заднего полупространства зеркала), составляющая $P_{обл}$ рассчитывается по формуле (7.50).

У типовой РПА (рис. 7.4) апертуру можно считать квадратной с размером $2,7 \times 2,7 \text{ м}^2$. Методика расчета составляющей $P_{обл}$ соответствует приведенной выше для квадратной апертуры с распределением типа «косинус на пьедестале» [55,56]. Во всех точках, лежащих вне области перехвата энергии зеркалом, следет учитывать составляющую ППЭ облучателя, совмещенного конструктивно с зеркалом антенны. Эту составляющую можно рассчитать по формуле (7.50) в предположении, что:

$$2\psi_0 = 35^\circ. \quad (7.61)$$

При расчете ППЭ вблизи рупорной антенны (см. рис. 7.11) методика расчета в области переднего полупространства соответствует приведенной выше для прямоугольной апертуры. Однако при расчете составляющей P_a по формуле (7.58) необходимо учитывать, что распределение амплитуды поля вдоль одной из сторон апертуры может быть близким к равномерному. В этом случае соответствующая функция $B(x)$, входящая в (7.58), рассчитывается по формуле:

$$B(x) = 4x[C^2(v) + S^2(v)], \quad (7.62)$$

$$\text{где: } v = \frac{1}{2\sqrt{x}}; \quad C(v) = \int_0^v \cos \frac{\pi^2}{2} dt; \quad S(v) = \int_0^v \sin \frac{\pi^2}{2} dt. \quad (7.63)$$

Изменится и одна из функций $F(u, x)$, входящих в (7.58):

$$F(u, x) = 2\sqrt{x}[C(q) - iS(q) + C(w) - iS(w)], \quad (7.64)$$

$$\text{где: } q = \frac{1}{2\sqrt{x}} - \frac{2u\sqrt{x}}{\pi}; \quad w = \frac{1}{2\sqrt{x}} + \frac{2u\sqrt{x}}{\pi}; \quad (7.65)$$

$C(v)$, $C(q)$, $C(w)$ – косинусы интеграла Френеля;

$S(v)$, $S(q)$, $S(w)$ – синусы интеграла Френеля.

В области заднего полупространства расчет ППЭ следует вести по формуле (7.50), учитывая, что для антенны данного типа $D_{obl} = D_0$.

Конструкция антенны типа параболический цилиндр (см. рис. 7.12) позволяет предположить, что распределение амплитуды поля вдоль сторон апертуры в главных плоскостях близко к равномерному. Расчет апертурной составляющей в переднем полупространстве (в части вычисления значений функций $B(x)/x$ и $F(u, x)$) не отличается от приведенного выше случая равномерного распределения. Однако в формуле (7.58) необходимо заменить обе функции $B(x)/x$ и обе функции $F(u, x)$, применив формулы (7.62) и (7.64).

В области заднего полупространства расчет ППЭ следует вести по формуле (7.50), учитывая, что $D_{obl} = D_0$.

Перископические антенны обычно строятся по трехэлементной схеме (рис. 7.37) – первичный облучатель (как правило, конический рупор), нижнее зеркало и верхнее зеркало.

Диаметр верхнего зеркала 3,9 м, нижнего 3,2 м. Нижнее зеркало примерно 75% энергии концентрирует в направлении на верхнее зеркало, поэтому вблизи поверхности земли основной вклад в формирование ППЭ дает первичный облучатель. Поэтому расчет ППЭ в точках пространства, где выполняется условие $Y < 0$ (за исключением области конструкции антенны), можно вести по формуле, аналогичной (7.50):

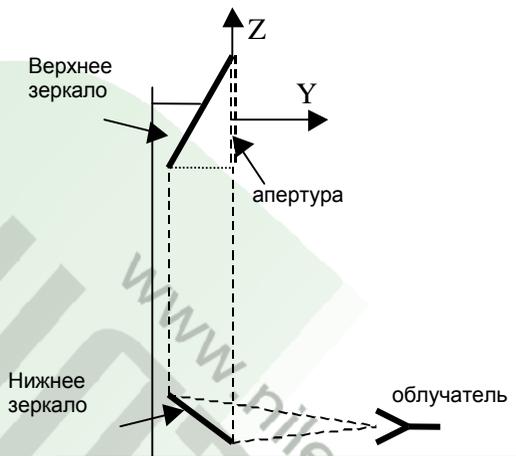


Рис. 7.37. К расчету ППЭ вблизи перископической антенны.

$$P_{обл} = 10 \lg \frac{P}{4\pi R^2} + 10 \lg D_{обл} + 14, \text{ дБ}. \quad (7.66)$$

Расчет ППЭ в области переднего полупространства верхнего зеркала можно вести путем суммирования Π_a и $\Pi_{обл}$. При этом апертурная составляющая верхнего зеркала рассчитывается по формуле для круглой апертуры (7.8) в предположении, что диаметр апертуры составляет 0,7 диаметра зеркала (учтен наклон зеркала).

7.8. АПЕРТУРНЫЕ АНТЕННЫ С РЕШЕЧАТОЙ СТРУКТУРОЙ ЗЕРКАЛА

7.8.1 Общие положения

В целях облегчения зеркала, а также уменьшения давления ветра на него зеркало иногда выполняют не из сплошного металлического листа, а из сетки проводов или параллельных пластин, а также из перфорированных листов (рис. 7.38).

Подобная конструкция создает повышенный (по сравнению с зеркалом из сплошного листа) уровень ППЭ в области заднего полупространства антенны. Это объясняется очевидным фактом просачивания энергии волны, падающей на зеркало со стороны облучателя (рис. 7.39).

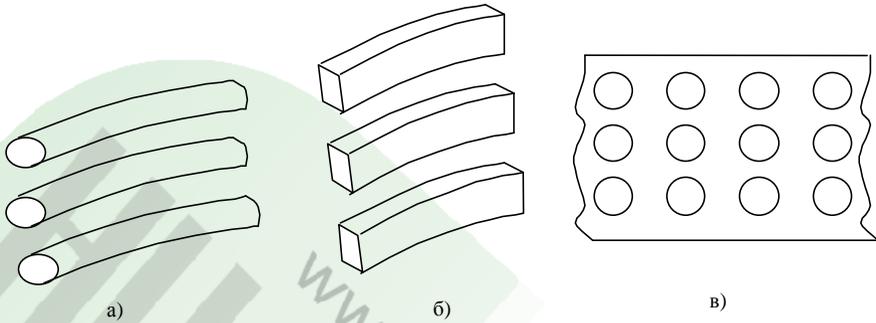


Рис.7.38. Элементы конструкции зеркала антенны

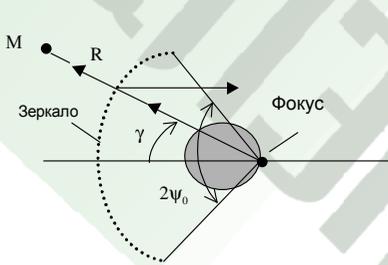


Рис.7.39. Прохождение энергии через зеркало

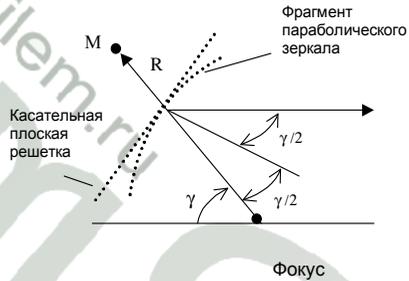


Рис. 7.40. К расчету составляющей P_{np}

При облучении зеркала электромагнитной энергией происходит ее отражение (полезный эффект, связанный с формированием диаграммы направленности антенны) и частичное прохождение в область заднего полупространства. Значение составляющей P_{np} (см. формулу (7.1)) в точке M , находящейся в области заднего полупространства, определяется по формуле:

$$P_{np} = T^2(\gamma) \frac{P}{4\pi R^2} D_{обл} F_{обл}^2(\gamma), \text{ Вт/м}^2, \quad (7.67)$$

где: $T(\gamma)$ – коэффициент прохождения волны через решетчатую структуру (по полю); P – мощность излучения облучателя, Вт; $D_{обл}$ – коэффициент направленного действия облучателя (величина безразмерная); $F_{обл}(\gamma)$ – характеристика направленности облучателя (величина безразмерная), R – расстояние от фазового центра облучателя до расчетной точки, м.

Коэффициент прохождения является функцией угла γ . Угловая зависимость коэффициента прохождения следует из предположения наклонного падения волны на плоскую безграничную решетчатую структуру, касательную к поверхности зеркала в точке падения луча (рис. 7.40).

При падении волны наклонно на решетки из проводов или пластин коэффициент прохождения будет меньше, чем при нормальном падении [75]. При решении задач электромагнитного прогнозирования в расчетной формуле можно исключить угловую зависимость коэффициента прохождения:

$$P_{np} = T^2 \frac{P}{4\pi R^2} D_{обл} F_{обл}^2(\gamma), \text{ Вт/м}^2, \quad (7.68)$$

где T соответствует коэффициенту прохождения по полю при нормальном падении плоской волны на безграничную плоскую решетчатую структуру.

Характеристика направленности облучателя в области углов $0 < \gamma \leq \psi_0$ имеет вид:

$$F_{обл}(\gamma) = \frac{2}{1 + \cos \gamma} \left\{ \alpha + (1 - \alpha) \left[1 - \frac{\text{tg}^2 \frac{\gamma}{2}}{\text{tg}^2 \frac{\psi_0}{2}} \right] \right\}. \quad (7.69)$$

Характеристика направленности облучателя, реализующая амплитудное распределение типа «парабола на пьедестале» (7.2) и обеспечивающая уровень 0,316 вне сектора углов перехвата энергии зеркалом ($\psi_0 \leq \gamma \leq \pi$), имеет вид:

$$F_{обл}(\gamma) = \frac{2}{1 + \cos \gamma} \left\{ 0,316 + 0,684 \left[1 - \frac{\text{tg}^2 \gamma/2}{\text{tg}^2 \psi_0/2} \right] \right\}_{\gamma=0}^{\gamma < \psi_0} + 0,316 \Big|_{\gamma=\psi_0}^{\gamma=\pi}. \quad (7.70)$$

Симметрия характеристики направленности вокруг оси $\gamma = 0$ позволяет записать следующее выражение для КНД облучателя:

$$D_{обл} = \frac{2}{\int_0^\pi F_{обл}^2(\gamma) \sin \gamma d\gamma}. \quad (7.71)$$

Таким образом, для практического применения расчетной формулы (7.68) остается решить вопрос, касающийся нахождения коэффициента прохождения через различные решетчатые структуры.

7.8.2. Расчет коэффициента прохождения

Пусть на проволочную сетку со стороны отрицательных значений x падает плоская волна (рис. 7.41):

$$\vec{E} = \vec{z}_0 E_m e^{-ikx}. \quad (7.72)$$

Формула для расчета коэффициента прохождения по полю имеет вид [76]:

$$T = 1 - \frac{\lambda}{\pi d \left[H_0^{(2)}(k\rho) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} H_0^{(2)}(nkd) \right]}, \quad (7.73)$$

где $H_0^{(2)}(nkd)$, $H_0^{(2)}(k\rho)$ – цилиндрические функции Бесселя 3-го рода (функции Ганкеля), k – волновое число для свободного пространства, d – расстояние между проводами, ρ – радиус проводов в сетке.

В практических случаях построения зеркальных антенн выполняется условие $\rho \ll \lambda$. При этом справедливо:

$$H_0^{(2)}(k\rho) \approx 1 + i \frac{2}{\pi} \ln \frac{\lambda}{1,781\rho}. \quad (7.74)$$

При определении суммы ряда в (7.73) следует учесть, что:

$$\sum_{n=1}^{\infty} H_0^{(2)}(nkd) = \sum_{n=1}^{\infty} J_0(nkd) - i \sum_{n=1}^{\infty} Y_0(nkd), \quad (7.75)$$

где $J_0(nkd)$ и $Y_0(nkd)$ – цилиндрические функции Бесселя 1-го рода и 2-го рода (функция Неймана).

При $d < \lambda$, что всегда выполняется при проектировании отражательных зеркал, имеют место соотношения:

$$\sum_{n=1}^{\infty} J_0(nkd) = \frac{1}{kd} - 0,5; \quad (7.76)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} Y_0(nkd) = -\frac{1}{\pi} \ln \frac{1,781d}{2\lambda} - \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sqrt{n^2 - \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2} - \frac{1}{n} \right). \quad (7.77)$$

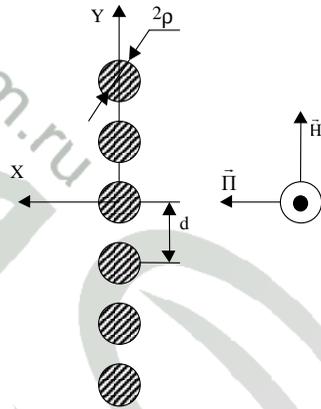


Рис. 7.41. Падение плоской волны на проволочную сетку

Ряд, стоящий в правой части (7.77) сходится достаточно быстро (можно ограничиться не более чем десятью членами).

Приведем пример расчета. Пусть: $\frac{d}{\lambda} = 0,1$, $\frac{\rho}{\lambda} = 0,6$, $\lambda = 10$ см, тогда:

$$H_0^{(2)}(k\rho) \approx 1 + i \frac{2}{\pi} \ln \frac{\lambda}{1,781\pi\rho}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} J_0(nkd) = \frac{1}{kd} - 0,5 = 1,092,$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} Y_0(nkd) = -\frac{1}{\pi} \ln \frac{1,781d}{2\lambda} - \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sqrt{\frac{1}{n^2 - \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2}} - \frac{1}{n} \right) = 0,768,$$

$$|T| = 0,255.$$

В случае выполнения отражательного зеркала в виде поверхности со щелями (рис.7.42) коэффициент прохождения рассчитывается иначе. Если длина щелей поверхности, изображенной на рис. 7.42,а, превосходит длину волны ($t > \lambda$), то обычно считается, что полоски и щели имеют безграничную длину (рис. 7.42,б). Для практически важного случая $d < (0,4 \dots 0,5) \lambda$ формула расчета коэффициента прохождения имеет вид [76]:

$$T = \frac{i2 \frac{d}{\lambda} \ln \left(\sin \left(\frac{\pi\mu}{2} \right) \right)}{1 + i2 \frac{d}{\lambda} \ln \left(\sin \left(\frac{\pi\mu}{2} \right) \right)}, \quad (7.78)$$

где $\mu = 2a/d$

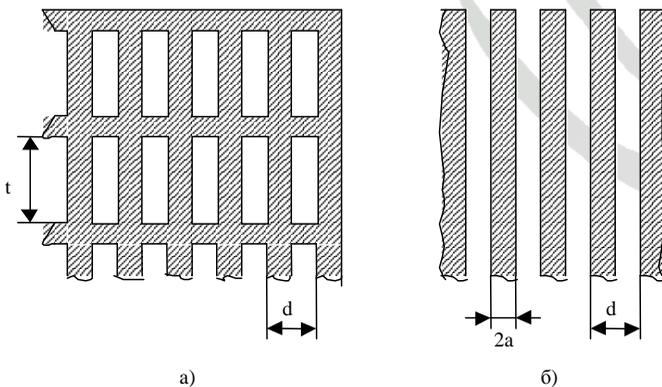


Рис. 7.42. К расчету коэффициента прохождения через поверхность со щелями

Приведем пример расчета. Пусть $\frac{d}{\lambda} = 0,5$, $\mu = 0,8$, тогда $|T| = 0,05$.

Для поверхности с круглыми отверстиями и расстоянии между центрами отверстий $d < (0,3...0,4)\lambda$ формула для расчета коэффициента прохождения имеет вид [76]:

$$|T| = \frac{2\pi D^3}{3\lambda d^2} \cdot 10^{-1,6 \frac{t}{D}}, \quad (7.79)$$

где: d – расстояние между щелями, D – диаметр щели, t – толщина отражающей поверхности.

Приведем пример расчета. Пусть: $D = 1$ см, $d = 2$ см, $\lambda = 8$ см, $t = 0,5$ см, тогда $T = 0,01$.

В заключение заметим, что в тех случаях, когда геометрические параметры решетчатой структуры не позволяют рассчитать коэффициент прохождения или структура отличается от рассмотренных, следует брать $T = 0,01...0,02$. Согласно [77] зеркало можно считать хорошим, если коэффициент прохождения не превышает 0,01.

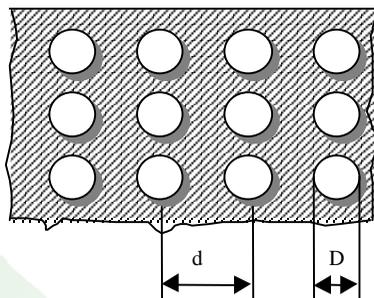


Рис. 7.43. К расчету коэффициента прохождения через поверхность с отверстиями

7.9. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА ВБЛИЗИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СВЧ ДИАПАЗОНА

7.9.1. Расчет ППЭ вблизи станции РРСП прямой видимости

Постановка задачи

Техническое средство – оборудование РРСП ПВ «Радуга-4» на оконечной радиорелейной станции. Работают три радиоствола. Используется антенна АДЭ-5 с углом раскрыва зеркала $2\psi_0 = 210^\circ$. Антенна находится на высоте 50 м.

Сравнить ППЭ в точке M с ПДУ. Точка M расположена в направлении на соседнюю станцию, ее высота над поверхностью земли – 2 м, а удаление от основания мачты – 100 м. Постановка задачи иллюстрируется рис. 7.44.

Порядок решения:

1. По табл. 7.1 определяются:

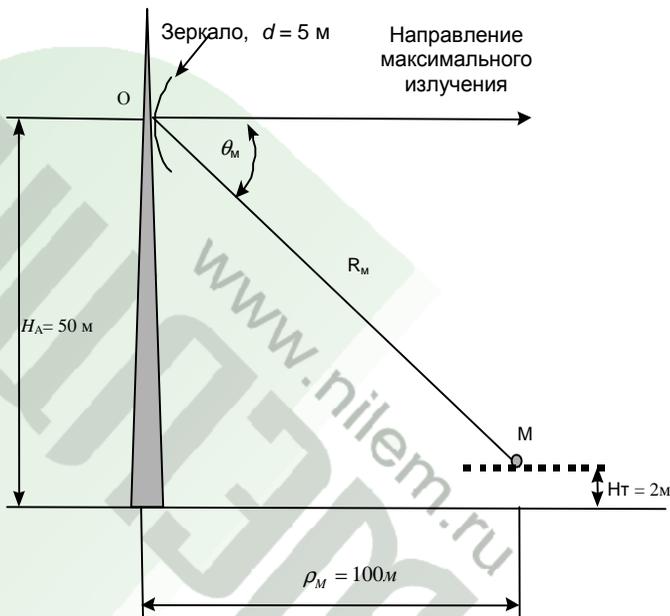


Рис. 7.44. Иллюстрация к примеру расчета ППЭ от антенны РРСП ПВ

- суммарная мощность, излучаемая антенной, $P = 3 \times 4 = 12$ Вт (работают 3 ствола, КПД антенно-фидерного тракта считается равным 1);
- длина волны $\lambda_{\text{ср}} = 0,082$ м;
- диаметр антенны $d = 5$ м;
- КНД антенны АДЭ-5 $D_0 = 43,5$ дБ.

2. Находится расстояние R_M «центр апертуры – точка М» и угол θ_M :

$$R_M = \sqrt{(H_A - H_T)^2 + \rho_M^2} = \sqrt{(50 - 2)^2 + 100^2} = 111 \text{ м};$$

$$\theta_M = \arccos\{\rho_M \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha - (H_A - H_T) \sin \alpha\} / R_M\};$$

При $\varphi = 0$ и $\alpha = 0$: $\theta_M = \arccos \rho_M / R_M = \arccos 100 / 111 = 25,7^\circ$.

3. Находится граничное расстояние $R_{\text{сп}}$:

$$R_{\text{сп}} = 2d^2 / \lambda = 2 \cdot 5^2 / 0,082 = 610 \text{ м}.$$

4. Определяются координаты x и u :

$$x = R_M / R_{\text{сп}} = 111 / 610 = 0,182$$

$$u = (\pi d \sin \theta_M) / \lambda = (\pi \cdot 5 \cdot \sin 25,7^\circ) / 0,082 = 83.$$

5. По табл. 7.4 определяется значение функции $20 \lg F(u, x) = -53$ дБ.

6. По графику рис. 7.16 определяется значение функции $20 \lg [B(x)/x] = 13$ дБ.

7. По формуле (7.8) рассчитывается апертурная составляющая ППЭ:

$$\begin{aligned} P_a &= 10 \lg \frac{P \lambda^2}{d^4} + 10 \lg D_0 + 20 \lg \frac{B(x)}{x} + 20 \lg F(u, x) + 3 = \\ &= 10 \lg (12 \cdot 0,082^2 / 5^4) + 43,5 + 13 - 53 + 3 = -32,4 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

8. По графику рис. 7.25 определяется КНД облучателя:

$$D_{обл}, \partial B = 10 \lg D_{обл} = 2,5 \text{ дБ.}$$

9. По формуле (7.9) рассчитывается составляющая ППЭ от облучателя:

$$\begin{aligned} P_{обл} &= 10 \lg (P / 4\pi R_M^2) + 10 \lg D_{обл} + 10 = \\ &= 10 \lg [12 / (4\pi \cdot 111^2)] + 2,5 + 10 = -28,6 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

10. По формуле (7.31) рассчитывается суммарная ППЭ в точке M :

$$P_\Sigma = 10 \frac{P_a[\partial B]}{10} + 10 \frac{P_{обл}[\partial B]}{10} = 10^{-3,24} + 10^{-2,86} = 0,002 \text{ мкВт/см}^2.$$

Вывод: ППЭ в точке M меньше ПДУ, равного 10 мкВт/см^2 .

7.9.2. Расчет ППЭ вблизи станции ТРРСЦ

Постановка задачи

Техническое средство – оборудование станции ТРРСЦ ТР-120. Используются две антенны НПА $30 \times 30 \text{ м}^2$. Разнос между антеннами 40 м, центры апертур антенн находятся на высоте $H_A = 25$ м над землей.

Оценить ППЭ в точке M , которая расположена в направлении на соседнюю станцию, а ее высота над землей – 2 м. Удаление точки M от линии проекции антенн на поверхность земли 100 м. Постановка задачи иллюстрируется рис. 7.45.

Порядок решения

1. По табл. 7.2 определяются:

– мощность, излучаемая одной антенной $P = 5 \text{ кВт} = 5000 \text{ Вт}$ (при КПД антенно-фидерного тракта равном 1);

– длина волны $\lambda_{cp} = 0,3 \text{ м}$;

– размеры антенны $a \times a = 30 \times 30 \text{ м}^2$;

КНД антенны $D_0 = 47 \text{ дБ}$.

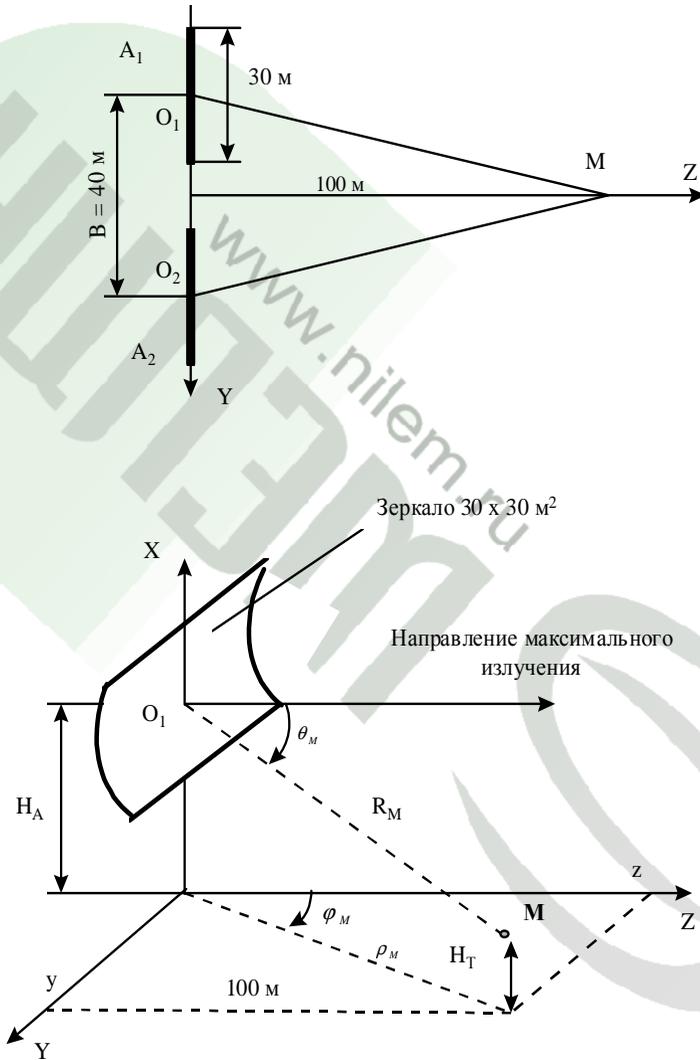


Рис. 7.45. Иллюстрация к примеру расчета ППЭ от антенны ТРПСР

2. Находится расстояние R_M и угол θ_M :

$$R_M = \sqrt{(H_A - H_T)^2 + \rho_M^2} = \sqrt{(H_A - H_T)^2 + z^2 + y^2} =$$

$$= \sqrt{(25-2)^2 + 100^2 + 20^2} = 104,5 \text{ м};$$

$$\theta_M = \arccos\left\{[\rho_M \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha - (H_A - H_T) \sin \alpha] / R_M\right\}.$$

$$\text{Для } \alpha = 0, \varphi = \arctg(y/z) = \arctg(20/100) = 11,31^\circ,$$

$$\rho_M = (z^2 + y^2)^{0,5} = 102 \text{ м}, \quad \theta_M = \arccos\left[\frac{102 \cdot \cos 11,31^\circ}{104,5}\right] = 16,8^\circ.$$

3. Находится граничное расстояние

$$R_{zp} = 2a^2 / \lambda = 2 \cdot 30^2 / 0,3 = 6000 \text{ м}.$$

4. Определяются координаты x и u :

$$x = R_M / R_{zp} = 104,5 / 6000 = 0,017;$$

$$u = (\pi a \sin \theta_M) / \lambda = (\pi \cdot 30 \cdot \sin 16,8^\circ) / 0,3 = 91.$$

5. По графику рис. 7.36 определяется значение функции

$$20 \lg[B(x)/x] = 12,6 \text{ дБ}.$$

6. По табл. 7.10 определяется значение функции $20 \lg F(u, x) = -29 \text{ дБ}$.

7. По формуле (7.49) рассчитывается апертурная составляющая ППЭ:

$$\begin{aligned} \Pi_a &= 10 \lg \frac{PA^2}{a^4} + 10 \lg D_0 + 20 \lg \frac{B(x)}{x} + 20 \lg F(u, x) + 3 = \\ &= 10 \lg(5000 \cdot 0,3^2 / 30^4) + 47 + 12,6 - 29 + 3 = 1,05 \text{ дБ}. \end{aligned}$$

8. Угол раскрыва зеркала антенны с размерами $30 \times 30 \text{ м}^2$ $2\psi_0$ равен 40° . По графику рис. 7.25 определяется $D_{обл}, \text{дБ} = 10 \lg D_{обл} = 9,6 \text{ дБ}$.

9. По формуле (7.50) рассчитывается составляющая ППЭ от облучателя:

$$\begin{aligned} \Pi_{обл} &= 10 \lg(P / 4\pi R_M^2) + 10 \lg D_{обл} + 10 = \\ &= 10 \lg[5000 / (4\pi \cdot 104,5^2)] + 9,6 + 10 = 5,22 \text{ дБ}. \end{aligned}$$

10. По формуле (7.31) рассчитывается ППЭ, создаваемая в точке M антенной A_1 :

$$\Pi_1 = 10 \frac{\Pi_a[\text{дБ}]}{10} + 10 \frac{\Pi_{обл}[\text{дБ}]}{10} = 10^{0,105} + 10^{0,522} = 4,6 \text{ мкВт/см}^2.$$

11. В силу симметрии расположения точки M относительно антенн A_1 и A_2 ППЭ, создаваемая антенной A_2 в точке M , будет равна ППЭ, создаваемой в этой точке антенной A_1 : $\Pi_1 = \Pi_2 = 4,6 \text{ мкВт/см}^2$.

12. Суммарная ППЭ в точке M от совокупности антенн A_1 и A_2 будет равна $\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 = 4,6 + 4,6 = 9,2 \text{ мкВт/см}^2$.

Вывод: ППЭ в точке M близка к ПДУ, равному 10 мкВт/см^2 .

7.9.3. Расчет ППЭ вблизи станции ССП

Постановка задачи

Техническое средство – станция ССП. Передатчик работает на длине волны $\lambda = 0,05$ м. Мощность передатчика $P = 3$ кВт. Используется двухзеркальная параболическая антенна (антенна Кассегрена) с углом раскрыва $2\psi_0 = 180^\circ$ и $D_0 = 50$ дБ. Диаметр апертуры $d = 7$ м. Высота центра апертуры над землей $H_A = 7$ м. Направление максимального излучения составляет с плоскостью горизонта угол $\alpha = 10^\circ$. Рассчитать ППЭ в точках M и N . Исходные данные: $H_M = 2$ м, $\varphi_M = 5^\circ$, $\rho_M = 300$ м, $H_N = 4$ м, $\varphi_N = 120^\circ$, $\rho_N = 17$ м. Определить также границу СЗЗ в области заднего полупространства в направлении противоположном направлению максимального излучения ($\theta = 180^\circ$). Постановка задачи иллюстрируется рис. 7.46.

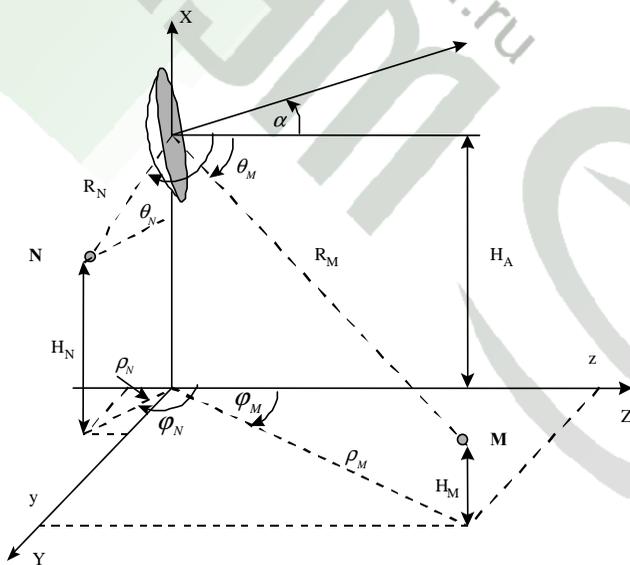


Рис. 7.46. Иллюстрация к примеру расчета ППЭ от антенны ССП

Расчет ППЭ в точке М

1. Находится расстояние R_M и угол θ_M :

$$R_M = \sqrt{(H_A - H_M)^2 + \rho_M^2} = \sqrt{(7-2)^2 + 300^2} \approx 300 \text{ м};$$

$$\theta_M = \arccos\{[\rho_M \cdot \cos \varphi_M \cdot \cos \alpha - (H_A - H_M) \cdot \sin \alpha] / R_M\} = \\ = \arccos\{[300 \cdot \cos 5^\circ \cdot \cos 10^\circ - (7-2) \cdot \sin 10^\circ] / 300\} = 12^\circ.$$

2. Находится граничное расстояние

$$R_{zp} = 2d^2 / \lambda = 2 \cdot 7^2 / 0,05 = 1960 \text{ м}.$$

3. Определяются координаты x и u в точке M :

$$x = R_M / R_{zp} = 300 / 1960 = 0,153;$$

$$u = (\pi d \sin \theta_M) / \lambda = (\pi \cdot 7 \cdot \sin 12^\circ) / 0,05 = 91,4.$$

4. По графику рис. 7.17 определяется значение функции

$$20 \lg [B(x) / x] = 14 \text{ дБ}.$$

5. По табл. 7.4 определяется значение функции $20 \lg F(u, x) = -52,5 \text{ дБ}$.

6. По формуле (7.8) рассчитывается апертурная составляющая ППЭ:

$$\Pi_a = 10 \lg \frac{P \lambda^2}{d^4} + 10 \lg D_0 + 20 \lg \frac{B(x)}{x} + 20 \lg F(u, x) + 3 = \\ = 10 \lg (3000 \cdot 0,05^2 / 7^4) + 50 + 14 - 52,5 + 3 = -10,5 \text{ дБ}.$$

7. По графику рис. 7.25 определяется $D_{обл}, \text{ дБ} = 10 \lg D_{обл} = 3 \text{ дБ}$.

8. По формуле (7.9) рассчитывается составляющая ППЭ от облучателя:

$$\Pi_{обл} = 10 \lg (P / 4\pi R_M^2) + 10 \lg D_{обл} + 10 = \\ = 10 \lg [3000 / (4\pi \cdot 300^2)] + 3 + 10 = -12,8 \text{ дБ}.$$

9. По формуле (7.31) рассчитывается суммарная ППЭ в точке M :

$$\Pi_\Sigma = 10^{-10} + 10^{-10} = 10^{-1,05} + 10^{-1,28} = 0,14 \text{ мкВт/см}^2.$$

Вывод: ППЭ в точке M меньше ПДУ, равного 10 мкВт/см^2 .

Расчет ППЭ в точке N

1. Находится расстояние R_N и угол θ_N :

$$R_N = \sqrt{(H_A - H_N)^2 + \rho_N^2} = \sqrt{(7-4)^2 + 17^2} = 19,2 \text{ м},$$

$$\theta_N = \arccos\{[\rho_N \cdot \cos \varphi_N \cdot \cos \alpha - (H_A - H_N) \cdot \sin \alpha] / R_N\} = \\ = \arccos\{[7 \cdot \cos 120^\circ \cdot \cos 10^\circ - (7-4) \cdot \sin 10^\circ] / 19,235\} = 102^\circ.$$

2. Применение метода ГТД (7.33...7.44) дает значение ППЭ в точке N , равное $0,149 \text{ мкВт/см}^2$.

Вывод: ППЭ в точке N меньше ПДУ, равного 10 мкВт/см^2 .

Определение границы СЗЗ при $\theta=180^\circ$

Применение метода ГТД (7.33...7.44) для $\theta = 180^\circ$ и различных значений R (они отложены в метрах по оси абсцисс) позволяет построить график зависимости $\Pi = f(R)$ и по нему определить искомое расстояние, как значение R , при котором $\Pi = 10$ мкВт/см². Из графика рис.7.47 видно, что искомое расстояние равно 27 м.

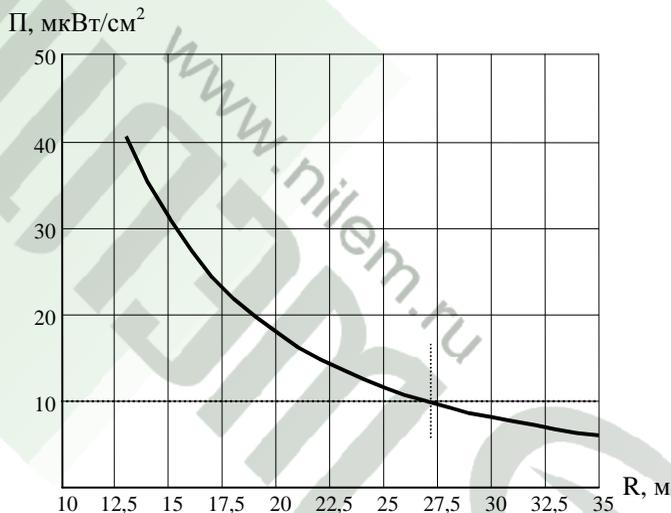


Рис. 7.47. К определению границы СЗЗ

Применение формулы аппроксимации (7.47) дает значение ППЭ в этой точке, достаточно близкое к 10 мкВт/см²:

$$\Pi(180^\circ) = \frac{2,5P}{\pi(r + 0,1d \sin \psi_0)^2} \left[0,1 \sin \psi_0 - 20 \lg \left(\sin \frac{\psi_0}{2} \right) \right] =$$

$$\frac{2,5 \cdot 3000}{3,14 \cdot (27 + 0,1 \cdot 7 \cdot \sin 90^\circ)^2} \left[0,1 \cdot \sin 90^\circ - 20 \lg (\sin 45^\circ) \right] = 9,68 \text{ мкВт/см}^2.$$

7.9.4. Расчет санитарно-защитных зон

На рис. 7.48 изображена апертурная антенна, поднятая на высоту H_a от поверхности земли (плоскость XOY). Направление максимального излу-

чения антенны составляет α° с плоскостью горизонта и имеет проекцию на горизонтальную плоскость, совпадающую с осью OY . Пусть техническое средство и антенна имеют следующие характеристики: мощность передатчика P , кВт; средняя длина волны λ , м диаметр антенны d , м; коэффициент направленного действия D_0 , дБ; угол раскрыва антенны $2\psi_0^\circ$.

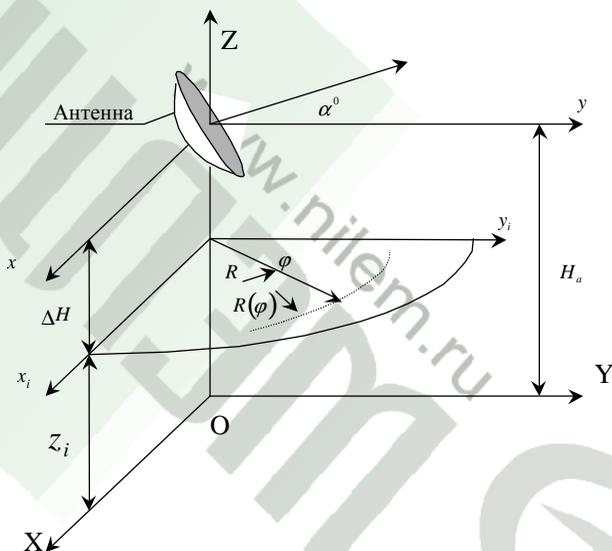


Рис. 7.48. Постановка задачи

Поставим следующую задачу – определить линии постоянного уровня ППЭ, равного 10 мкВт/см^2 , в любой из плоскостей $Z = Z_i$, отвечающих условию:

$$2 \leq Z_i \leq H_a. \quad (7.80)$$

Эти линии будем определять в виде функции $R(\varphi)$ – зависимости расстояния от азимутального угла. Заметим, что расстояние R отсчитывается от оси Z , а угол φ – от проекции направления максимального излучения антенны на плоскость $Z = Z_i$. Линия ППЭ = 10 мкВт/см^2 , определенная на плоскости $Z = 2 \text{ м}$, является границей санитарно-защитной зоны, вне которой ППЭ не превышает предельно допустимого уровня для населения и обслуживающего персонала.

Методика расчета ППЭ в местах размещения технических средств, подобных описанному выше, регламентируется государственным нормативным документом [56] и подробно изложена выше (раздел 7.5). Авторами

создан вариант системы автоматизированного прогнозирования электромагнитной обстановки вблизи объектов, содержащих комплекс подобных технических средств. В состав комплекса могут входить до 25 радиотехнических средств, расположенных произвольным образом на территории объекта.

На рис. 7.49 приведены результаты расчета функции $R(\varphi)$ в плоскости $Z = H_a$ для технического средства – спутниковой системы передачи. В расчетах использовались следующие исходные данные: $P = 10$ кВт; $\lambda = 0,05$ м; $d = 12$ м; $D_0 = 56$ дБ; $2\psi_0 = 180^\circ$; $\alpha = 5^\circ$; $H_a = 20$ м (условимся называть это техническое средство – первым). На этом же рисунке приведены результаты эксперимента. Результаты аналогичного сравнения для технического средства с параметрами: $P = 5$ кВт; $\lambda = 0,05$ м; $d = 2,5$ м;

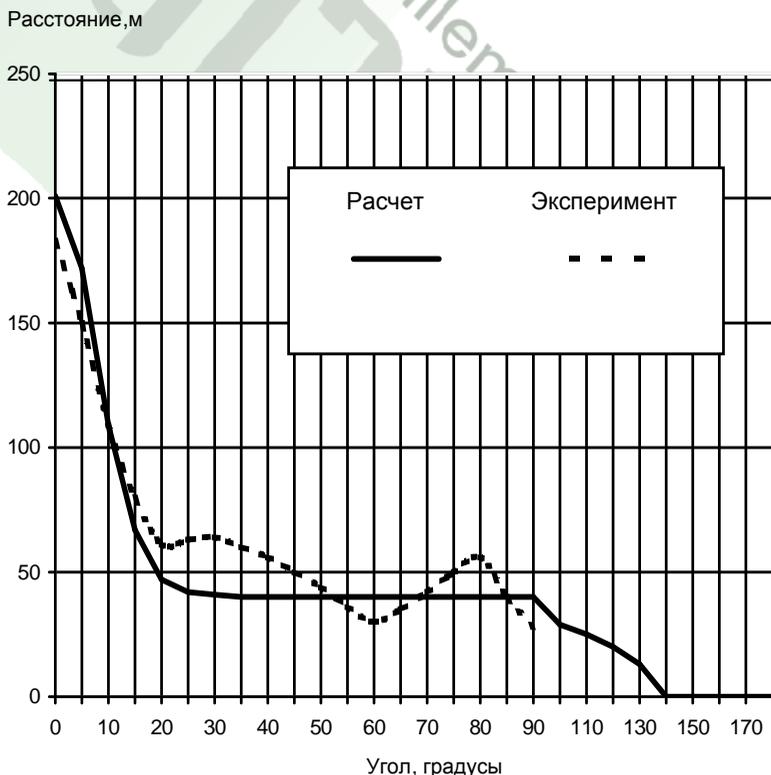


Рис. 7.49. Зона электромагнитной безопасности технического средства 1

$D_0 = 42,3$ дБ; $2\psi_0 = 116^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $H_a = 20$ м; приведены на рис. 7.50 (условимся называть это техническое средство – вторым).

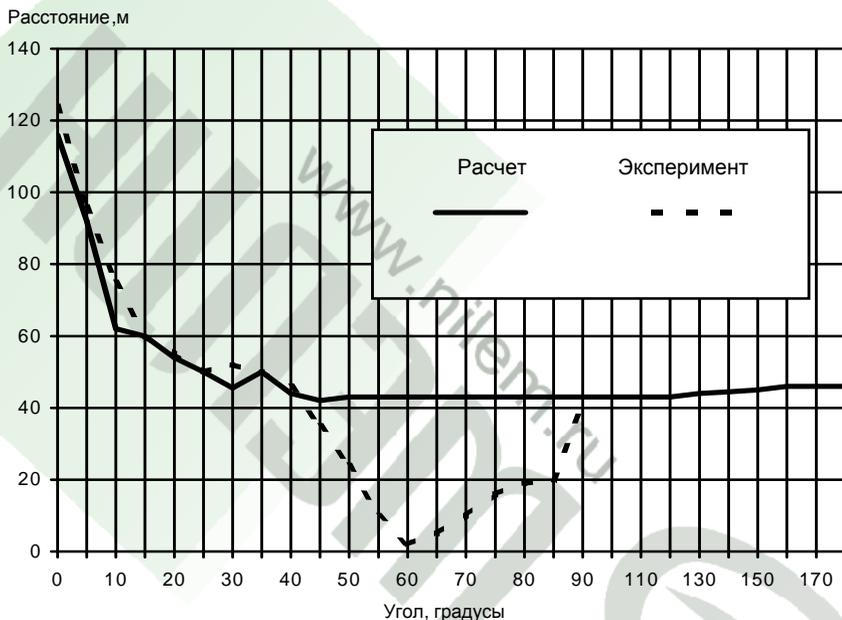


Рис. 7.50. Зона электромагнитной безопасности технического средства 2

Сравнение результатов расчета и эксперимента показывает, что математическая модель, заложенная в используемую систему автоматизированного прогнозирования электромагнитной обстановки, дает вполне удовлетворительные результаты.

На рис. 7.51 приведена серия кривых – семейство функций $R(\varphi)$, каждая из которых соответствует первому техническому средству и рассчитывалась в плоскости $Z = H_a - \Delta H$. Величина ΔH изменялась в пределах 0...16 м. Аналогичная серия кривых представлена на рис. 7.52 для второго технического средства.

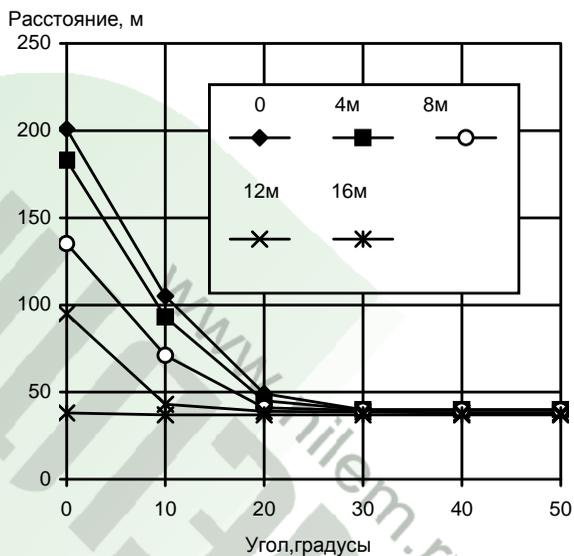


Рис. 7.51. Зоны электромагнитной безопасности технического средства 1

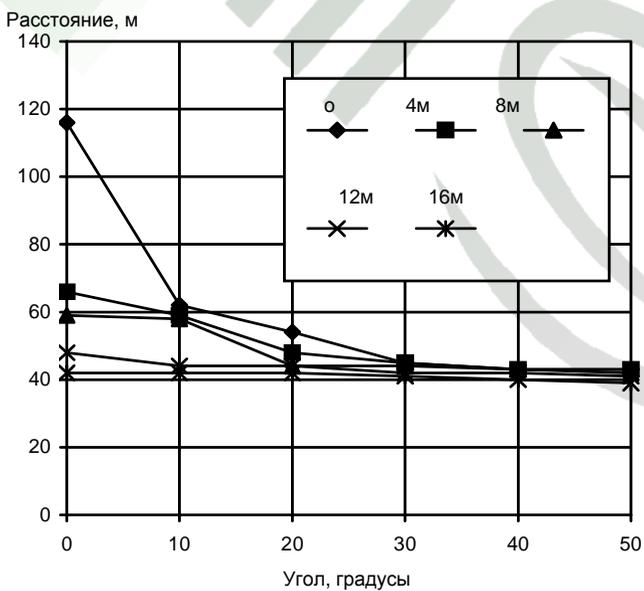


Рис. 7.52. Зоны электромагнитной безопасности технического средства 2

Каждая из кривых, приведенных на этих рисунках, соответствует границе зоны электромагнитной безопасности в соответствующей плоскости Z . Для плоскости $Z = 2$ м такая зона будет санитарно-защитной, а для любой другой плоскости – зоной электромагнитной безопасности. Из анализа кривых следует, что границы этих зон в зависимости от ΔH существенно изменяются лишь в секторе углов $\varphi = \pm (0 \dots 25^\circ)$. Это изменение обусловлено преобладанием апертурной составляющей плотности потока энергии по сравнению с составляющей, определяемой облучателем антенны. Для ориентировочной оценки границы санитарно-защитной зоны в секторе углов $25^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ - \psi_0$ переднего полупространства антенны можно рекомендовать простое соотношение:

$$R_{CЗЗ} \approx 40 \sqrt{P} [\text{кВт}] 10^{-0,0055\psi_0}, \quad (7.81)$$

где $P[\text{кВт}]$ – мощность передатчика технического средства в киловаттах, ψ_0 – половина угла раскрытия антенны в градусах (диаметр антенны d , угол ψ_0 и фокусное расстояние f взаимосвязаны: $d = 4 f \operatorname{tg}(\psi_0 / 2)$).

В секторе углов $180^\circ - \psi_0 \leq \varphi \leq 180^\circ$ значение $R_{CЗЗ}$, как правило, меньше по сравнению со значением, определяемым формулой (7.81). Исключения могут составлять направления на кромку антенны.

В радиорелейных системах передачи прямой видимости мощности передатчиков обычно не превышают единиц и даже долей ватт. Высота подвеса антенн на магистральных и внутризональных линиях обычно 15...100 м. Расчеты показывают, что даже при многоствольном режиме работы системы у поверхности земли (на высоте 2 м) санитарно-защитной зоны нет, что полностью соответствует физическим представлениям.

Радиорелейные системы передачи прямой видимости часто применяются для организации соединительных линий между АТС. При этом антенны могут устанавливаться на крышах зданий и возникает вопрос о размерах их зон электромагнитной безопасности. На рис. 7.53. приведены данные расчета подобных зон для радиорелейной системы передачи, имеющей следующие характеристики: $P = 0,5$ Вт; $\lambda = 0,027$ м; $d = 1,5$ м; $D_0 = 45$ дБ; $2\psi_0 = 160^\circ$; $\alpha = 0^\circ$; $H_a = 4$ м; $m = 2$; (m – число работающих радиостолбов). Границы зоны рассчитывались в плоскости $Z = H_a$, проходящей через направление максимального излучения антенны (верхняя кривая $\Delta H = 0$), где зона имеет наибольшие размеры, и в плоскости $Z = H_a - 0,8$ м (нижняя кривая, $\Delta H = 0,8$ м).

Поскольку на интервалах радиорелейных линий предполагается прямая видимость между антеннами, то в секторе углов близких к направлению

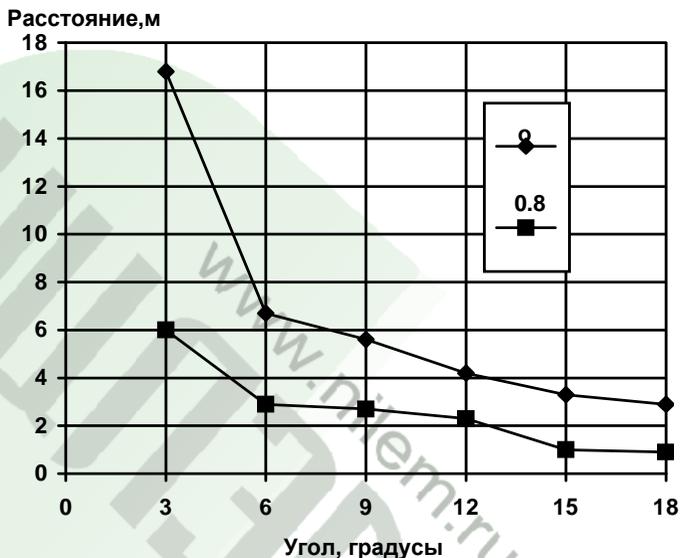


Рис. 7.53. Зоны электромагнитной безопасности РРСР ПВ

максимального излучения ($\pm 6^\circ$) не должно быть затеняющих объектов, в том числе жилых и производственных зданий. Именно в этом секторе углов можно говорить о существовании санитарно-защитной зоны. Вне данного сектора её границы измеряются единицами метров и систему можно считать экологически безопасной. Основной вывод сводится к следующему. Радиорелейные системы передачи прямой видимости можно считать экологически безопасными всюду, за исключением сектора углов $\pm(3...6^\circ)$, непосредственно примыкающих к направлению максимального излучения антенны. В этом случае удаленность границы зоны электромагнитной безопасности может составлять несколько десятков метров.

Настоящий раздел написан по материалам [59].

КОМПЛЕКСЫ ИЗЛУЧАЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОВЕЩАНИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

8.1. СОСТАВ И ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСОВ ИЗЛУЧАЮЩИХ СРЕДСТВ РАДИОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

Современный излучающий телекоммуникационный центр представляет собой комплекс технических средств, в состав которого входят передатчики, антенны, фидеры. Все это может размещаться на выделенной (технической) территории, на крыше здания, на мачте или башне (рис. 8.1 и рис. 8.2). На крупных радиоцентрах количество антенн достигает нескольких десятков, площади антенных полей – десятки гектар. Одиночные излучатели в отрасли связи практически не встречаются за исключением, быть может, слабонаправленных антенн на выделенных радиостанциях.

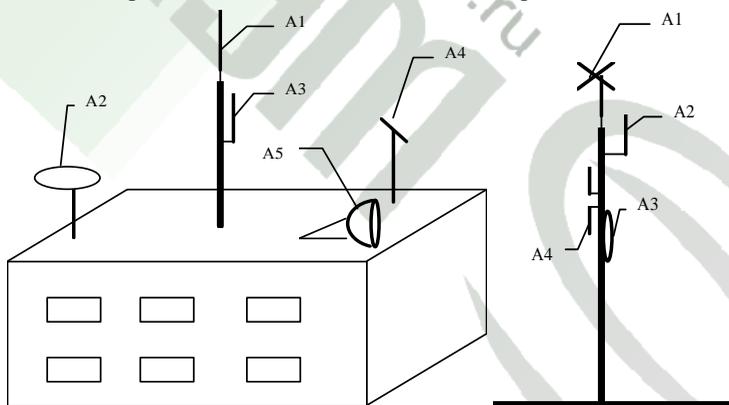


Рис. 8.1. Размещение антенн на крыше здания и мачте

Очень часто в состав радиоцентров входят технические средства различных диапазонов. Так, например, весьма распространенной является ситуация, при которой на радиоцентре размещаются технические средства ВЧ, СЧ и НЧ диапазонов либо технические средства ВЧ диапазона размещаются в непосредственной близости или на опорах технических средств телевидения и радиовещания в диапазоне ОВЧ. В крупных городах на удобных с точки зрения массового обслуживания местах (крыши высотных зданий, различные башни и мачты) устанавливаются антенны весьма раз-

народного телекоммуникационного оборудования – это антенны базовых станций сотовой связи, пейджинговой связи, антенны телевидения и ОВЧ ЧМ вещания, антенны специальной связи и радиорелейных систем передачи прямой видимости, антенны спутниковых систем передачи и т. д.

Трудности анализа электромагнитных ситуаций комплекса технических средств очевидны. Они обусловлены одновременной работой множества разнотипных излучателей, электромагнитные поля которых могут отличаться не только конструкцией и принципами действия, но и интенсивностью, поляризацией, частотами, зависимостью от параметров почвы, а сами антенны могут произвольным образом располагаться на антенных полях.

Несмотря на то, что большинство технических средств, в том числе и антенных устройств, для телекоммуникаций типовые, они размещаются в нетиповых условиях. Индивидуальность реальных объектов с точки зрения электромагнитной экологии проявляется в различии размещения и ориентации отдельных антенн, в особенностях рельефа местности, в несовпадении расписаний смены волн, в неодинаковом наборе технических средств и т. д. Все это определяет значительные сложности и даже невозможность обобщения электромагнитных ситуаций по объектам, в состав которых входят технические средства различных диапазонов. Метод аналогий и экстраполяции практически неприменим для комплексов технических средств.

Еще одним важным моментом в исследовании электромагнитной обстановки комплекса технических средств является взаимное влияние антенных устройств, которое может повлиять на точность электромагнитного прогнозирования. Это влияние может проявляться, во-первых, во взаимном затенении антенн и, во-вторых, в электрическом влиянии, при котором в элементах конструкции пассивных антенн наводятся токи, способные существенно изменить электромагнитную обстановку.

Математическое моделирование, как основной выбранный метод исследования, является мощным и, пожалуй, единственным методом, дающим возможность анализа электромагнитной обстановки комплекса техни-

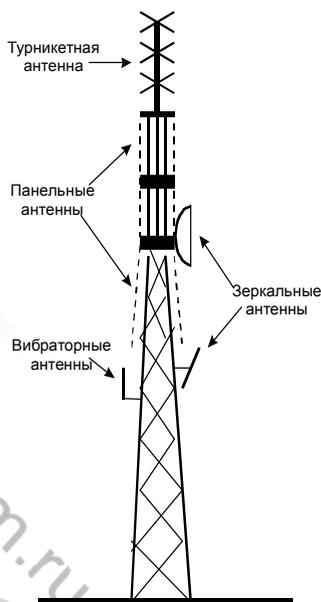


Рис. 8.2. Размещение антенн на телевизионной башне

ческих средств. Для этого необходимо объединение отдельных моделей в единую, так называемую, модель ансамблей, описывающую систему в целом. Исследование электромагнитной обстановки технических средств радиосвязи, радиовещания и телевидения – это проблема не просто сложная, а комплексная, в основе которой лежат различные явления, и для анализа которой должны использоваться различные, но связанные между собой модели. Методы исследования таких проблем относятся к системному анализу.

8.2. САНИТАРНЫЕ ЗОНЫ И САНИТАРНЫЙ ПАСПОРТ ИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

Конечной целью электромагнитного прогнозирования технических средств телекоммуникаций является получение информации, по которой можно судить о качестве окружающей среды и возможности пребывания там человека. Такая информация заложена в картах электромагнитной обстановки, в ситуационных планах объектов с нанесенными границами санитарных зон вокруг излучающих объектов. Получение таких материалов связано, с одной стороны, с электромагнитным прогнозированием, с другой стороны, с критериями оценки качества окружающей среды, которые вводятся гигиеническими нормами и стандартами.

В целях защиты населения от воздействия ЭМП, создаваемого радиотехническими объектами, при необходимости устанавливаются санитарные зоны. Различают два вида санитарных зон – санитарно-защитные зоны (СЗЗ) и зоны ограничения застройки (ЗОЗ). Авторы считают необходимым уточнить определения санитарных зон излучающих объектов по электромагнитному фактору, приведенные в нормативных документах [13].

Санитарно-защитной зоной является площадь, примыкающая к технической территории радиотехнического объекта. Граница санитарно-защитной зоны определяется на высоте до двух метров от поверхности земли по предельно допустимым уровням ЭМП при изолированном и сочетанном характере воздействия или по критериям оценки качества окружающей среды при смешанном и комбинированном характере воздействия.

Зоной ограничения застройки является территория, где на высоте более двух метров от поверхности земли превышаются предельно допустимые уровни ЭМП при изолированном и сочетанном характере воздействия или не обеспечиваются критерии оценки качества окружающей среды при смешанном и комбинированном характере воздействия. Внешняя граница зоны ограничения застройки определяется по максимальной высоте зданий перспективной застройки.

Санитарные зоны излучающих объектов устанавливаются по результатам электромагнитного прогнозирования в соответствии с методиками, которые являются обязательными приложениями соответствующих нормативных документов и стандартов.

Следует обратить внимание на то, что санитарные зоны определяются, как территории, которые могут находиться вблизи технической территории излучающего объекта. Если проводится электромагнитный мониторинг на этих территориях, то согласно всем методическим указаниям (для всех частотных диапазонов и технических средств) для определения санитарных зон расчеты и измерения следует проводить для условий открытых площадок. Весьма часто суть электромагнитного мониторинга искажается, и в качестве его результатов используют только результаты измерений в квартирах, зонах затенения, не принимая во внимание сезонные и суточное изменение напряженности поля.

Каждый радиотехнический объект, излучающий в окружающую среду электромагнитную энергию, должен иметь санитарный паспорт, содержащий следующие данные [13]:

- наименование объекта и его адресные данные;
- год ввода объекта в эксплуатацию и сведения о реконструкции объекта;
- мощность, режимы модуляции и рабочие частоты каждого передатчика;
- типы применяемых антенн, места и высоты их установки, коэффициенты усиления, направления излучения и диаграммы направленности антенн в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
- ситуационный план объекта с указанием границы санитарно-защитной зоны и зоны ограничений застройки;
- материалы расчета распределения уровней ЭМП на территории, прилегающей к радиотехническому объекту;
- протоколы с результатами измерений уровней ЭМП с указанием используемых измерительных приборов;
- заключение специалиста санитарно-эпидемиологической службы по результатам обследования объекта;
- рекомендации по нормализации электромагнитной обстановки (при необходимости);
- результаты выполнения предписаний санитарно-эпидемиологической службы;
- дата обследования объекта.

Санитарный паспорт составляется администрацией радиотехнического объекта, подписывается его руководителем и представителем санитарно-эпидемиологической службы. Паспорт хранится на объекте и предъявляется по специальному предписанию в установленном порядке.

8.3. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ КОМПЛЕКСОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Очень часто излучающие радиотехнические средства различных назначений и частотных диапазонов размещаются недалеко друг от друга либо в пределах одной технической территории. В этом случае необходимо учитывать совместное воздействие ЭМП, отличающихся интенсивностью, частотой, поляризацией, предельно допустимыми уровнями и т.д.

Если радиотехнический объект оборудован несколькими излучающими техническими средствами, работающими в одном нормируемом диапазоне частот, то суммарная напряженность поля E_{Σ} или H_{Σ} в этом диапазоне определяется по формуле:

$$E_{\Sigma} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}, \quad H_{\Sigma} = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + \dots + H_n^2}, \quad (8.1)$$

где $E_1, E_2, \dots, E_n, H_1, H_2, \dots, H_n$ – напряженность поля, создаваемая каждым техническим средством в определяемой точке.

Если в данной точке пространства создается ЭМП, описываемое несколькими несинфазными пространственными компонентами в декартовой $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$ или цилиндрической E_r, E_z и H_{ϕ} системах координат (это характерно для полей вблизи антенн кило-, гекто- и дециметрового диапазонов волн), то напряженность поля от каждого такого n -го технического средства определяется следующим образом:

$$E_n = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}, \quad H_n = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} \quad \text{или} \\ E_n = \sqrt{E_r^2 + E_z^2}, \quad H_n = H_{\phi}. \quad (8.2)$$

Для случая нескольких технических средств, работающих при одной и той же нормируемой плотности потока энергии, суммарная плотность потока энергии $ППЭ_{\Sigma}$ определяется по формуле:

$$ППЭ_{\Sigma} = ППЭ_1 + ППЭ_2 + \dots + ППЭ_n, \quad (8.3)$$

где $ППЭ_1, ППЭ_2, \dots, ППЭ_n$ – плотность потока энергии, создаваемая каждым техническим средством в определяемой точке.

При наличии нескольких источников излучения, работающих в разных нормируемых радиочастотных диапазонах, напряженность поля $E_1, E_2, \dots, E_n, H_1, H_2, \dots, H_n$ и плотность потока энергии $ППЭ_1, ППЭ_2, \dots, ППЭ_n$, создаваемые всеми источниками на границе санитарной зоны, должны соответствовать критерию оценки качества окружающей среды, который иногда называют критерием безопасности (КБ):

$$\begin{aligned}
 KB = & \left(\frac{E_1}{E_{\text{пдв}1}} \right)^2 + \left(\frac{E_2}{E_{\text{пдв}2}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{E_n}{E_{\text{пдв}n}} \right)^2 + \\
 & + \left(\frac{H_1}{H_{\text{пдв}1}} \right)^2 + \left(\frac{H_2}{H_{\text{пдв}2}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{H_n}{H_{\text{пдв}n}} \right)^2 + \\
 & + \frac{\text{ППЭ}_1}{\text{ППЭ}_{\text{пдв}1}} + \frac{\text{ППЭ}_2}{\text{ППЭ}_{\text{пдв}2}} + \dots + \frac{\text{ППЭ}_n}{\text{ППЭ}_{\text{пдв}n}} = 1,
 \end{aligned} \tag{8.4}$$

где $E_{\text{пдв}1}, E_{\text{пдв}2}, \dots, E_{\text{пдв}n}, H_{\text{пдв}1}, H_{\text{пдв}2}, \dots, H_{\text{пдв}n}$ – предельно допустимая напряженность поля для каждого источника; $\text{ППЭ}_{\text{пдв}1}, \text{ППЭ}_{\text{пдв}2}, \dots, \text{ППЭ}_{\text{пдв}n}$ – предельно допустимая плотность потока энергии для каждого источника.

Анализ критериев оценки электромагнитной обстановки излучающих объектов показывает, что установление границ санитарных зон для случая выделенной радиостанции и для случаев, описываемых формулами (8.1) и (8.3), при наличии методик расчета напряженности поля и плотности потока энергии вблизи антенн не представляется сложным. Методы инструментального контроля санитарных зон для этих случаев основаны на непосредственном измерении нормируемого параметра.

Для сложных излучающих объектов, при анализе которых используется критерий (8.4), расчет границ санитарных зон возможен только с широким использованием вычислительной техники, потому что необходим не только многократный просчет напряженности поля и плотности потока энергии каждого технического средства, но и обработка этих значений по (8.4). Определение границ санитарных зон инструментальными методами весьма затруднено, поскольку требует соответствующего комплекта измерительной аппаратуры и оперативной обработки результатов измерений по установленному критерию.

Вопросы установления критериев оценки санитарных зон комплексов разнодиапазонных технических средств, также как и вопросы нормирования воздействующего фактора, являются объектом непрерывных медико-биологических исследований, проводимых как у нас в стране, так и за рубежом. Однако какими бы ни были нормативы и критерии, основой анализа электромагнитной обстановки вблизи излучающего объекта является расчет напряженности поля или плотности потока энергии вблизи одиночного технического средства.

8.4. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

Контроль за соблюдением предельно допустимых уровней электромагнитного поля осуществляется как при эксплуатации и реконструкции радиотехнических объектов, так и на стадии их проектирования. В нормативной документации введено требование, что проектная документация на излучающие объекты в разделе «Мероприятия по охране окружающей среды» должна содержать результаты расчета электромагнитной обстановки, границ санитарных зон, а также исходные данные, использованные при выполнении этих расчетов. Каждый радиотехнический объект, излучающий в окружающую среду электромагнитную энергию, согласно нормам должен иметь санитарный паспорт, который кроме организационных и технических сведений об объекте содержит «ситуационный план объекта с указанием границы санитарно-защитной зоны и зоны ограничений застройки, а также материалы расчета распределения уровней электромагнитного поля на территории, прилегающей к радиотехническому объекту» [13].

Таким образом, результаты прогнозирования электромагнитной обстановки - неотъемлемая часть проектной документации излучающих объектов. Расчеты электромагнитных полей вблизи антенн даже по упрощенным методикам представляют собой трудоемкую работу. В связи с бурным развитием радиосистем и введением в действие новых нормативных и методических документов значительно увеличились объемы работ по электромагнитному прогнозированию. Существенно повысить качество и технико-экономический уровень проектируемых объектов, а также повысить производительность труда, сократить сроки, уменьшить стоимость и трудоемкость проектирования можно, автоматизируя переработку информации, необходимой для проектирования, и используя системы автоматизации проектно-конструкторских работ. Главная роль при этом отводится совершенствованию проектирования на основе применения математических методов и средств вычислительной техники. Применение эффективных, адекватно отражающих существенные особенности математических моделей проектируемых объектов является необходимым условием достижения цели создания автоматизированных систем.

Объединение отдельных методик расчета ближних полей различных излучателей в рамках единой методики позволяет получить математическую модель излучающих средств реального телецентра или радицентра, которая в сочетании с рядом других вспомогательных алгоритмов дает возможность создать систему автоматизированного прогнозирования электромагнитной обстановки (САПР ЭО).

Структурная схема методического обеспечения САПР ЭО приведена на рис. 8.3. Ее основа – это подсистемы расчета полей различных диапазонов и конструкций: подсистема расчета полей НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов, подсистема расчета полей ОВЧ и УВЧ диапазонов и подсистема расчета полей апертурных антенн.

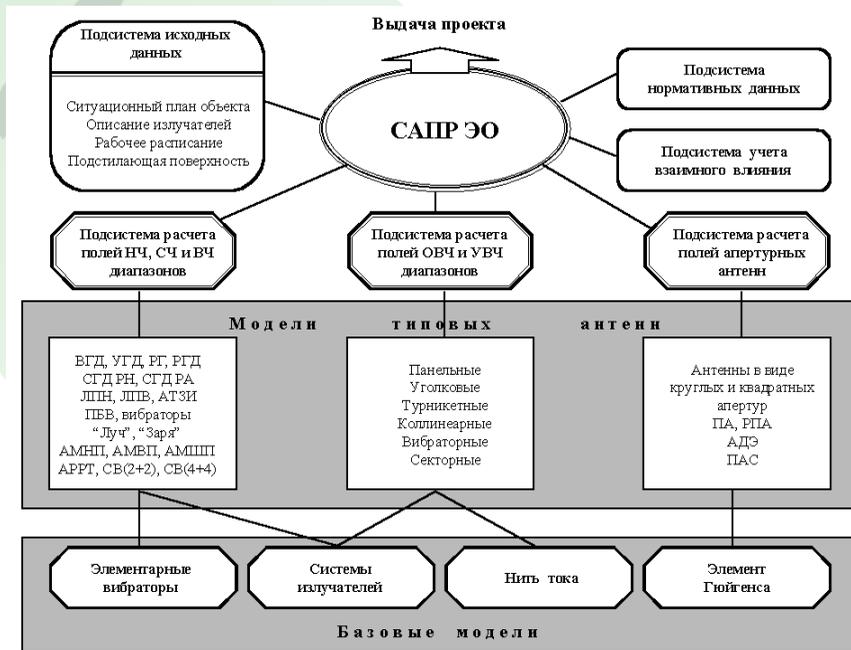


Рис. 8.3. Структурная схема методического обеспечения САПР ЭО

Для подсистемы расчета полей НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов, а также вибраторных антенн ОВЧ и УВЧ диапазонов, в качестве базовой модели используется строгое решение задачи излучения элементарного вибратора в двухслойной среде [28]. Это дает возможность расчета полей по всем составляющим, учитывать электрофизические параметры подстилающих поверхностей (земли, крыш зданий, заземления), использовать фазовые соотношения отдельных компонент для получения паспортных параметров антенн и т. д. Модели типовых антенн получены из базовых путем однократного либо многократного применения принципа суперпозиции для задаваемых априорно или определяемых известными методами распределений токов. Полезная возможность представляется в САПР ЭО введением в качестве базовой модели решения задачи излучения нити с равномерным

распределением тока. Такой моделью можно представить характеристики излучения антенн ОВЧ и УВЧ диапазонов неизвестной конструкции в ближней и дальней зонах.

Подсистема расчета полей апертурных антенн обеспечивает электромагнитное прогнозирование вблизи технических средств радиорелейных систем передачи прямой видимости (РРСП ПВ), тропосферных радиорелейных систем передачи (ТРРСП) и спутниковых систем передачи (ССП) радиовещания, телевидения и радиосвязи диапазона частот 700 МГц...300 ГГц. Модель излучения апертурных антенн базируется на концепции усредненной модели антенны: распределение в раскрыве круглой антенны – «парабола на пьедестале», в раскрыве квадратной антенны – «косинус на пьедестале»; уровень возбуждения основного зеркала в направлении его кромки – минус 10 дБ; затенение круглой апертуры – 10% по диаметру; боковое излучение облучателя – на уровне минус 10 дБ от максимума. Такая модель достаточно хорошо описывает характеристики реальных антенн радиосистем.

Конкретизация объекта в САПР ЭО производится заданием исходных данных (подсистема исходных данных), которые описывают геометрию излучающего объекта, конструктивные и электрические характеристики антенн, условия их размещения, электрофизические параметры подстилающих поверхностей, временные параметры работы и т.д. Все это дополняется подсистемой учета взаимного влияния. Для построения границ санитарных зон вводится информационная подсистема нормативных данных, которая включает предельно допустимые уровни ЭМП и критерии гигиенической оценки электромагнитной обстановки.

Разработанная к настоящему времени законченная версия САПР ЭО позволяет решать практически все вопросы связанные санитарно-гигиенической оценкой электромагнитной обстановки объектов телекоммуникаций.

Возможности совершенствования САПР ЭО весьма широкие – это увеличение номенклатуры анализируемых антенн, детальный анализ взаимного влияния, уточнение распределений токов, учет режимов работы технических средств, расширение целевых возможностей и т.д. Кроме того, перспективы развития САПР ЭО определяются общими направлениями создания систем автоматизированного проектирования. К наиболее важным направлениям развития относится совершенствование графических, имитационных и диалоговых процедур.

Однако обсуждая вопрос создания САПР ЭО, уместно отметить, что они должны создаваться с таким расчетом, чтобы могли вводиться в строй по мере готовности отдельных элементов, блоков, подсистем, т.е. так, что-

бы функционирование, эксплуатация части системы могли начинаться до завершения всей системы. Это положение определено в качестве одного из основных принципов создания САПР.

Технические характеристики и возможности САПР ЭО. Перед САПР ЭО поставлены две основные задачи: расчет полей вблизи излучающих систем, применяемых в телекоммуникациях, и построение границ санитарных зон излучающих объектов.

Однако ориентация на адекватные математические модели значительно расширила возможности системы. Анализ взаимного влияния, расчет параметров излучателей, оптимизация их размещения – эти и другие практически важные и исследовательские задачи можно решать с помощью разработанной САПР ЭО.

Комплекс средств автоматизации проектирования включает в себя методическое, программное, техническое, информационное и организационное обеспечение.

Методическое обеспечение САПР ЭО состоит из методик, алгоритмов и моделей, описанных в настоящей работе.

В подсистеме расчета полей антенн НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов имеется возможность электромагнитного прогнозирования для двадцати пяти типов антенн: ВГДШ, УГД, СГД РН, СГД РА, РГ, РГД, АТЗИ, провода, обтекаемого бегущей волной тока, произвольно ориентированных линейных симметричных и несимметричных вибраторов, логопериодических антенн, антенных систем СВ(1+1), СВ(2+2), СВ(4+4), различных разновидностей антенн-мачт и т.д. Расчет полей всех антенн проводится с учетом полупроводящих свойств поверхности раздела.

Комплекс технических средств НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов в САПР ЭО представляется в виде набора антенн $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n$ (рис. 8.4), причем $N \leq 30$. Каждая антенна может быть любой из перечисленных выше типов и определяется набором конструктивных и технических параметров.

Координаты антенн в системе координат XYZ радиоцентра – x_i, y_i, z_i . Ориентация антенн задается установочным азимутом φ_i , который отсчитывается от оси Y на направление одной из горизонтальных осей (X_i или Y_i) индивидуальных систем координат. Точка наблюдения M имеет координаты x, y, z . Оси Z_i индивидуальных систем координат параллельны оси Z , поэтому преобразование координат точки M в каждую из индивидуальных систем осуществляется с учетом параллельного сдвига и поворота в плоскости XOY системы координат радиоцентра.

Далее для координат x_i, y_i, z_i в точке M рассчитывается поле от каждой антенны по всем составляющим, а также E_i и H_i , которые в зависимости от типа антенн определяются по формулам (8.2).

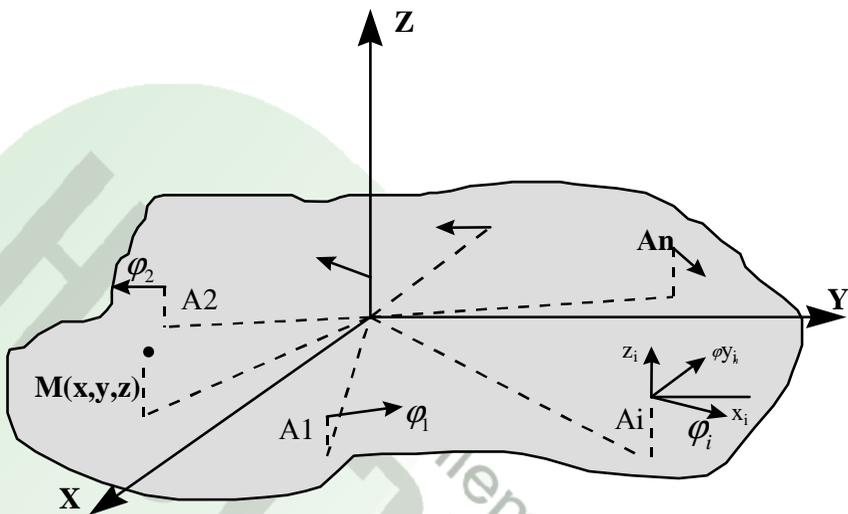


Рис. 8.4. Представление излучающего объекта НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов в декартовой системе координат

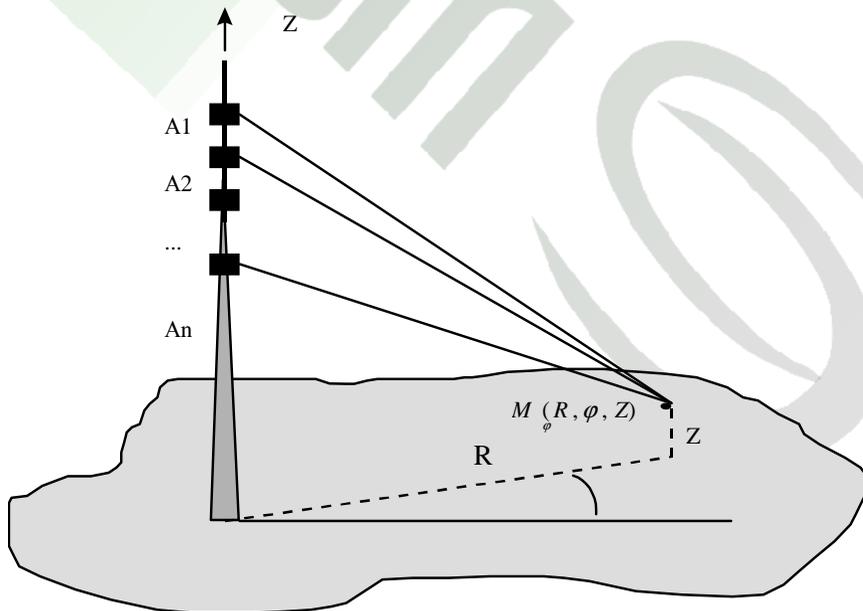


Рис. 8.5. Представление излучающего объекта ОВЧ и УВЧ диапазонов в цилиндрической системе координат

Для решения вопросов электромагнитной экологии рассчитываются эквивалентные значения напряженности поля в каждом диапазоне $E_{НЧ}$, $E_{СЧ}$, $E_{ВЧ}$ и критерий безопасности в соответствии с (8.4).

Комплекс технических средств ОВЧ и УВЧ диапазонов в САПР ЭО представляется в виде набора антенн $A_1, A_2, \dots, A_r, \dots, A_n$, размещаемых на мачте или башне (рис. 8.5).

Для каждой антенны задаются конструктивные, технические и установочные параметры. Количество антенн не более 20. Для точек наблюдения M с координатами R, φ, z рассчитывается поле от каждой антенны с последующим вычислением критерия безопасности по (8.4).

Таким образом, в любой точке пространства возможен анализ поля, создаваемого комплексом антенн, а также оценка вклада каждой антенны по всем составляющим. САПР ЭО дает возможность построения санитарных зон излучающих объектов.

Одна из ветвей САПР ЭО обеспечивает расчет и формирование санитарных паспортов антенн, в которых по желанию пользователя можно получить объемное распределение поля по всем составляющим с произвольным шагом квантования координат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, когда и последняя глава прочитана, читатель вместе с авторами может подвести некоторые итоги в части информативности книги, оценить степень ее необходимости и полезности.

Мы познакомились со специфическим видом антропогенного загрязнения окружающей среды – электромагнитным загрязнением, его основными видами, масштабами. Получили общее представление о биологическом действии электромагнитных полей.

Мы узнали, что не все так безнадежно – существует целая система защиты окружающей среды от радиочастотного излучения. Главной линией «обороны» в системе защитных мероприятий является нормирование электромагнитных полей. С проблемой нормирования тесно смыкаются проблемы расчетного прогнозирования и инструментального контроля.

Мы достаточно подробно рассмотрели методологические основы расчетного прогнозирования электромагнитной обстановки вблизи радиотехнических объектов, работающих в диапазоне от низких до крайне высоких частот. При этом анализировались не только отдельные (изолированные) объекты, но и их комплексы.

Наконец состоялось знакомство с концептуальными основами построения системы автоматизированного прогнозирования электромагнитной обстановки.

Если дать совокупную оценку, то можно сказать, что мы познакомились с сегодняшним состоянием мониторинга окружающей среды по электромагнитному фактору.

Авторы не настолько наивны, чтобы не предугадать серию скептических вопросов. Не является ли все это надуманной проблемой, своеобразной «страшилкой»? А нужна ли такая книга сегодня, когда в России множество других проблем, в том числе и экологических?

На такие и подобные вопросы авторам неоднократно приходилось отвечать в присутствии самой разнообразной аудитории слушателей. Ответ таков - мы твердо уверены, что в экологии мелочей нет. Совсем недавно (по историческим меркам) антропогенное загрязнение мирового океана, атмосферы, космоса тоже считалось не более чем «страшилкой» для обывателя, а сегодня это общепризнанный факт, и приходится констатировать бедственное положение с состоянием окружающей среды в отдельных регионах Земного шара. Отсюда наша уверенность в потенциальной необходимости и полезности книги.

Надеемся, что наш скромный труд будет крупницей вклада в становление и развитие относительно нового научного направления в экологии – электромагнитной экологии.

**Основные нормативные и методические документы,
относящиеся к загрязнению окружающей среды электромагнитной энергией
и действующие в Российской Федерации**
(по состоянию на 1.01.2000)

1. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.2.4 /2.1.8.055 - 96. -М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996. 28с.
2. Временные допустимые уровни (ВДУ) воздействия электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой радиосвязи. ГН 2.1.8 /2.2.4.019 - 94. - М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1995. 8 с.
3. Санитарные нормы и правила защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты. СНиП № 2971-84. -М.: Минздрав СССР, 1984. 8 с.
4. Определение уровней электромагнитного поля, границ санитарно-защитной зоны и зон ограничения застройки в местах размещения передающих средств радиовещания и радиосвязи кило-, гекто- и декаметрового диапазонов. МУК 4.3.044.-96 -М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996. 33 с.
5. Определение уровней электромагнитного поля в местах размещения средств телевидения и ЧМ вещания. МУК 4.3.045-96. -М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996. 15 с.
6. Определение уровней электромагнитного поля в местах размещения передающих средств и объектов сухопутной подвижной радиосвязи ОВЧ и УВЧ диапазонов. МУК 4.3.046-96. - М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996. 7 с.
7. Определение плотности потока мощности электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 700 МГц - 300 ГГц. МУК 4. 3. 680 - 97. - М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1997. - 40 с.

Здесь не приведены документы, относящиеся к электромагнитной безопасности в производственных условиях, на рабочих местах и в быту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бузов А.Л., Сподобаев Ю.М. Электромагнитная экология. Основные понятия и нормативная база. – М.: Радио и связь, 1999. – 78с.
2. Electromagnetic Fields (300 Hz to 300 GHz). Environmental health criteria; 137. Geneva: WHO, 1993. 290 p.
3. Handbook of biological effects of electromagnetic fields/edited by Charles Polk, Elliot Postow. - 2nd ed. Boca Raton, New York, London, Tokyo: CRC Press, 1996. 618 p.
4. Biological effects of electric and magnetic fields/edited by David O. Carpenter, Sinerik Ayrapetyan. - Academic Press, 1994. V.1-369 p. V.2-357 p.
5. William Ralph Bennett, Jr. Health and Low-Frequency Electromagnetic Fields. Yale University, 1996. 189 p.
6. Radiofrequency Radiation Standards. Biological Effects, Dosimetry, Epidemiology, and Public Health Policy/ edited by B.J. Klauenberg, Martino Grandolfo, David N. Erwin. NATO ASI Series, Plenum Press. New York and London, 1995. 455 p.
7. Холодов Ю.А. Шестой незримый океан /Очерки по электромагнитной биологии. -М.: Знание, 1978. -112 с.
8. Суворов Г.А., Пальцев Ю.П., Хунданов Л.Л. и др. Неионизирующие электромагнитные излучения и поля (экологические и гигиенические аспекты)/Под ред. Н.Ф. Измерова. М., "Вооружение. Политика. Конверсия.", 1998. 102 с.
9. Сподобаев Ю.М. Проблемы электромагнитной экологии. Электросвязь, 1992, №3. С8-9.
10. Методические указания по определению напряженности электромагнитного поля и гигиенические требования к размещению коротковолновых передающих радиостанций. – Киев: Минздрав УССР, 1968. –12с.
11. Санитарные нормы и правила размещения радио-, телевизионных и радиолокационных станций. –М.: Минздрав СССР, 1978. – 14с.
12. Электромагнитные поля и общественное здравоохранение. Информационный листок ВОЗ №184. Октябрь 1997. 3с.
13. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ). Санитарные нормы и правила. СанПиН 2.2.4/2.1.8.0-96. -М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996.
14. Временные допустимые уровни (ВДУ) воздействия электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой связи. Гигиенические нормативы. ГН 2.1.8./2.2.4.019-94. -М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1994.
15. Метрологическое обеспечение безопасности труда/Под ред. И.Х. Сологана. Т.1. Измеряемые параметры опасных и вредных производственных факторов. - М.: Изд-во стандартов, 1989. - 240 с.

16. Санитарные нормы дифференцированных по частоте предельно допустимых уровней для населения электромагнитного поля (ОВЧ диапазона волн), создаваемого телевизионными станциями (СН №4262-87). -М.: Минздрав СССР, 1987. -4 с.
17. *Маслов О.Н.* Вероятностное моделирование и нормирование уровней электромагнитного фона. Труды Международной Академии Связи, №2(6), 1998. С12-16.
18. *Маслов О.Н.* Вероятностное моделирование последствий непороговых электромагнитных воздействий. Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Т1, №4, 1998. С30-34.
19. Антенны: (Современное состояние и проблемы)/Под ред. чл.-корр. АН СССР *Л.Д. Бахраха* и проф. *Д.И. Воскресенского*. – М.: Сов. радио, 1979. – 208с.
20. Определение уровней электромагнитного поля, границ санитарно-защитной зоны и зон ограничения застройки в местах размещения передающих средств радиовещания и радиосвязи кило-, гекто- и декаметрового диапазонов. МУК 4.3.044.-96 -М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996. 33с.
21. Определение уровней электромагнитного поля в местах размещения средств телевидения и ЧМ-вещания. МУК 4.3.045-96. -М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996. 15с.
22. *Минин Б.А.* СВЧ и безопасность человека. М., “Сов. радио”, 1974, 352с.
23. *Думанский Ю.Д., Сподобаев Ю.М., Биткин С.В., Романов В.А., Сердюк Е.А.* Санитарно-защитные зоны и зоны ограничения застройки антенн декаметрового диапазона. Гигиена и санитария, 1990, № 7. С. 53-56.
24. *Бондарев И.А., Сподобаев Ю.М., Шерedyкo Е.Ю.* Сравнительный анализ границ санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки типовых антенн декаметрового диапазона длин волн ВГД, УГД, АТЗИ. Деп. в ЦНТИ "Информсвязь", 12.02.92, № 1893-СВ, 42 с.
25. *Мажаров С.Г., Сподобаев Ю.М., Шерedyкo Е.Ю.* Оптимизация параметров антенн ВГД по критериям электромагнитной экологии. Деп. в ЦНТИ "Информсвязь", 12.02.92, № 1892-СВ. - 21 с.
26. Антенно-фидерные устройства: технологическое оборудование и экологическая безопасность / Под ред. *А.Л. Бузова*. - М.: Радио и связь, 1998. - 221 с.
27. *Файнберг Е.Л.* Распространение радиоволн вдоль Земной поверхности. - М., Изд. АН СССР, 1961.- 546с.
28. *Крылов Г.Н.* Цилиндрические, кольцевые и вертикальные антенны. М.-Л., Энергия, 1965, 204с.
29. *Крылов Г.Н.* Методы вычисления электромагнитного поля над плоской землей с конечной проводимостью "Вопросы радиоэлектроники". Серия XII, 1962, с.3 - 27.
30. *Куюмджан, Патхак.* Равномерная геометрическая теория дифракции на идеально проводящей поверхности с ребром. – ТИИЭР, 1974, т. 62, № 11.
31. Каталог «Изделия промышленности средств связи»/Номенклатурный каталог на 1994-1995 гг. Серия 2. Аппаратура радиосвязи, радиовещания и телевидения. – М.: АО «ЭКОС», 1994.

32. Каталог «Изделия промышленности средств связи»/Номенклатурный каталог на 199-1996 гг. Серия 2. Аппаратура радиосвязи, радиовещания и телевидения. – М.: АО «ЭКОС», 1996.
33. Белоусов С.П., Гуревич Р.В., Клигер Г.А., Кузнецов В.Д. Антенны для радиосвязи и радиовещания. Ч.2. Средневолновые и длинноволновые антенны. -М.: Связь, 1980. -120 с.
34. Белоусов С.П. Средневолновые антенны с регулируемым распределением тока. М. Связь, 1974. - 104с.
35. Белоусов С.П., Гуревич Р.В., Клигер Г.А., Кузнецов В.Д. Антенны для радиосвязи и радиовещания. Ч.1. Коротковолновые антенны. - М.: Связь 1978. - 136 с.
36. Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.М. и др. Коротковолновые антенны. - М.: Радио и связь, 1985. - 536с.
37. Сподобаев Ю.М. Ближние поля антенн декаметрового диапазона длин волн: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Москва, 1985.-278с.
38. Князев А.С. Инженерный расчет сопротивлений линейных проводов с учетом влияния реальной земли. Радиотехника, 1960, №9.
39. Калинин А.И., Черенкова Е.Л. Распространение радиоволн и работа радиолиний. - М.: Связь, 1971, 439с.
40. Корпоративные системы спутниковой и КВ связи. Под редакцией А.А. Смирнова. - М: Эко-Трендз, 1997. –132с.
41. Михайлов Ю.А., Сподобаев Ю.М. Исследование полей вблизи фидерных линий декаметрового диапазона. Электросвязь, 1988, №11. С25-27.
42. Сподобаев Ю.М. Санитарно-защитные зоны и зоны ограничений застройки типовых антенн СГД. Деп. в ЦНТИ “Информсвязь” 29.11.84, № 536. –32с.
43. Варбанский А.М. Передающие телевизионные станции. - М.: Связь, 1980. - 328с.
44. Регламент радиосвязи. Международный союз электросвязи. Генеральный Секретариат, 1990.
45. СБ-4-06-78. Сборник справочных материалов по антеннам фидерам передающих телевизионных и УКВ ЧМ вещательных радиостанций. - М.: Главсвязьпроект, ГСПИ, 1978. -91с.
46. Определение уровней электромагнитного поля в местах размещения передающих средств и объектов сухопутной подвижной радиосвязи ОВЧ и УВЧ диапазонов. МУК 4.3.046-96. -М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996. 7с.
47. Калинин А.И., Черенкова Е.Л. Распространение радиоволн и работа радиолиний. – М.: Связь, 1971. –439с.
48. Сподобаев Ю.М., Шередько Е.Ю. Плотность потока мощности поля технических средств телевизионного и УКВ ЧМ вещания. Труды НИИР, 1983, №4. С45-51.
49. Справочник по радиорелейной связи / Под редакцией С.В. Бородича. - М.: Связь. 1976. -240с.

50. Мордухович Л.Г. Радиорелейные линии связи. Курсовое и дипломное проектирование: Учебное пособие для техникумов. - М.: Радио и связь, 1989. – 160 с.
51. Спутниковая связь и вещание: Справочник.-2-е изд., перераб. и доп. / Г.Б. Аскинази, В.Л. Быков, М.Н. Дьячкова и др.; Под редакцией Л.Я. Кантора. - М.: Радио и связь, 1988. – 344 с.
52. Харатишвили Н.Г., Кумыш Э.И., Епанечников В.Ю., Зумбуридзе О.Г. Спутниковое телевидение. Новые методы передачи / Под ред. Н.Г. Харатишвили. - М.: Радио и связь, 1993. – 244 с.
53. Копейкин В.И. К расчету коэффициента направленного действия прямоугольного раскрыва в зоне Френеля. Радиотехника и электроника. - 1967 -Том XII, вып. 1. - С132-136.
54. Антенны УКВ / Под ред. Г.З. Айзенберга. В 2-х ч. Ч.1.- М.; Связь, 1977. - 384с.
55. Сподобаев Ю.М., Кубанов В.П. Метод анализа электромагнитных полей апертурных антенн для решения задач электромагнитной экологии. Электросвязь. - 1996. - №7. – С. 11-14.
56. Определение плотности потока излучения электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 700 МГц - 300 ГГц: Методические указания МУК 4.3.680-97. - М.: «Интерсэн» 1998. – 40 с.
57. Ямпольский В.Г., Фролов О.П. Антенны и ЭМС. - М.: Радио и связь, 1983. - 272 с.
58. Кантор Л.Я., Тимофеев В.В. Спутниковая связь и проблема геостационарной орбиты. - М.: Радио и связь, 1988. -168с.
59. Кубанов В.П., Сподобаев Ю.М., Сподобаев М.Ю. Зоны электромагнитной безопасности вблизи апертурных антенн. Информатика, радиотехника, связь. Сборник трудов ученых Поволжья (материалы научно-технической конференции ПГАТИ). 1998. - Вып. № 3. -С72-76.
60. Сподобаев Ю.М. Методы прогнозирования и картографирования электромагнитных полей технических средств телекоммуникаций в окружающей среде (доклад - рус. и англ.)/Материалы Международного совещания «Электромагнитные поля. Биологическое действие и гигиеническое нормирование». Женева, 1999. - С79-87.
61. Кубанов В.П., Маслов О.Н., Сподобаев Ю.М. Электромагнитная экспертиза – независимость и компетентность. Телекоммуникационное поле регионов. - №3. - 1999. - С. 22-25.
62. Давыдов Б.И., Тихончук В.С., Антипов С.В. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 177 с.
63. Кубанов В.П., Сподобаев Ю.М. Расчетное прогнозирование электромагнитной обстановки в диапазонах НЧ, СЧ и ВЧ. В кн. под ред. А.Л. Бузова “Антенно-фидерные устройства: технологическое оборудование и экологическая безопасность”. - М.: Радио и связь, 1998. - С. 139-149.

64. Кубанов В.П., Сподобаев Ю.М. Расчетное прогнозирование электромагнитной обстановки в диапазонах УВЧ и СВЧ. В кн. под ред. А.Л. Бузова "Антенно-фидерные устройства: технологическое оборудование и экологическая безопасность". - М.: Радио и связь, 1998. - С.163-173.
65. Лавров Г.А. Взаимное влияние линейных вибраторных антенн. - М.: Связь, 1975. - 129с.
66. Электромагнитное загрязнение окружающей среды и здоровье населения России. - М.: Фонд «Здоровье и окружающая среда», 1997. - 91с.
67. Павлов А.Н. Электромагнитные поля и жизнедеятельность/Учебное пособие. - М.: Изд-во МНЭПУ, 1998. - 148с.
68. Шандала М.Г., Зуев В.Г., Ушаков И.Б., Попов В.И. Справочник по электромагнитной безопасности работающих и населения. - Воронеж: Изд-во «Истоки», 1998. - 82 с.
69. Григорьев Ю.Г., Степанов В.С., Григорьев О.А., Меркулов А.В. Электромагнитная безопасность человека/Справочно-информационное издание. - М.: Российский национальный комитет по защите от неионизирующего излучения, 1999. - 151 с.
70. Кузнецов А.Н. Биофизика электромагнитных воздействий. - М.: Энергоатомиздат, 1994. - 254с.
71. Кузнецов А.Н. Биофизика низкочастотных электромагнитных воздействий. - М.: Изд-во МФТИ, 1994. - 164 с.
72. Терещенко А.И. Радиоэлектроника и экология. Сер. «Радиоэлектроника и связь», №8. - М.: Знание, 1989. - 64 с.
73. Агафонов Л.К. Техногенные электромагнитные излучения и их влияние на экосферу Земли // Электросвязь. - 1997. - №9.
74. Гигиена труда при воздействии электромагнитных полей / Под ред. В.Е. Ковшило. - М.: Медицина, 1983.
75. Фрадин А.З. Антенны сверхвысоких частот. - М.: «Советское радио», 1957. - 647 с.
76. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терещин О.Н. Антенны УКВ / Под ред. Г.З. Айзенберга. В 2-х ч. Ч.2. - М.: Связь, 1977. - 288 с.
77. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование антенно-фидерных устройств. - М.- Л.: Изд-во «Энергия», 1966. - 648 с.
78. Маслов О.Н. Электромагнитная безопасность радиоэлектронных средств. Серия изданий «Связь и бизнес», М.: МЦНТИ, 2000. - 82 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие

Глава 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ

ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ..... 5

- 1.1. Электромагнитное загрязнение как частный случай энергетического загрязнения 5
- 1.2. Источники и масштабы электромагнитного загрязнения..... 7
- 1.3. Биологическое действие электромагнитных полей..... 13

Глава 2. СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ОТ РАДИОЧАСТОТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ..... 26

- 2.1. Экологическая опасность технических средств радиосвязи, радиовещания и телевидения 26
- 2.2. Нормирование электромагнитных полей в окружающей среде.... 33
 - 2.2.1. Принципы нормирования электромагнитных полей в окружающей среде 33
 - 2.2.2. Гигиеническое нормирование электромагнитных полей 43
- 2.3. Методологические принципы расчетного прогнозирования электромагнитных полей вблизи излучающих технических средств 50
- 2.4. Методы инструментального контроля электромагнитных полей. 56
- 2.5. Защита окружающей среды от электромагнитных полей..... 60

Глава 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ..... 64

- 3.1. Структура электромагнитного поля горизонтального элементарного электрического вибратора..... 64
- 3.2. Структура электромагнитного поля вертикального элементарного электрического вибратора..... 68
- 3.3. Анализ выполнения граничных условий на идеально проводящей поверхности..... 70
- 3.4. Структура электромагнитного поля элемента Гюйгенса 71

Глава 4. ИЗЛУЧАЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА НЧ И СЧ

ДИАПАЗОНОВ 73

- 4.1. Особенности распространения радиоволн НЧ и СЧ диапазонов.. 73
- 4.2. Характеристика и основные параметры излучающих технических средств..... 75
 - 4.2.1. Радиопередатчики 75
 - 4.2.2. Передающие антенны 76
- 4.3. Методы анализа ближних электромагнитных полей 81
- 4.4. Электромагнитная обстановка вблизи технических средств НЧ и СЧ диапазонов 85

| | |
|--|-----|
| Глава 5. ИЗЛУЧАЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА | |
| ВЧ ДИАПАЗОНА | 91 |
| 5.1. Особенности распространения радиоволн ВЧ диапазона..... | 91 |
| 5.2. Общая характеристика излучающих технических средств ВЧ | |
| диапазона | 94 |
| 5.2.1. Радиопередатчики | 94 |
| 5.2.2. Передающие антенны | 96 |
| 5.2.3. Фидеры для передающих антенн ВЧ диапазона..... | 107 |
| 5.3. Методы анализа ближних электромагнитных полей | 108 |
| 5.3.1. Ближние поля слабонаправленных антенн | 108 |
| 5.3.2. Ближние поля многовibratorных антенн..... | 111 |
| 5.3.3. Ближние поля ромбических антенн | 113 |
| 5.3.4. Ближние поля фидеров | 115 |
| 5.4. Электромагнитная обстановка вблизи технических средств | |
| ВЧ диапазона | 116 |
| 5.4.1. Санитарные зоны некоторых типовых антенн..... | 116 |
| 5.4.2. Электромагнитные поля вблизи фидеров..... | 129 |
| Глава 6. ИЗЛУЧАЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА УВЧ И ОВЧ | |
| ДИАПАЗОНОВ | 133 |
| 6.1. Особенности распространения радиоволн | |
| УВЧ и ОВЧ диапазонов..... | 133 |
| 6.2. Характеристика и основные параметры излучающих | |
| технических средств | 135 |
| 6.2.1. Технические средства телевидения..... | 135 |
| 6.2.2. Технические средства радиовещания с частотной модуляцией..... | 139 |
| 6.2.3. Технические средства сухопутной подвижной связи | 139 |
| 6.2.4. Обзор антенн телевидения, ЧМ радиовещания | |
| и подвижной связи | 141 |
| 6.3. Методы анализа ближних электромагнитных полей | 146 |
| 6.4. Концепция учета в расчетах ближних полей | |
| подстилающей поверхности или крыши..... | 149 |
| Глава 7. ИЗЛУЧАЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СВЧ И КВЧ | |
| ДИАПАЗОНОВ | 156 |
| 7.1. Особенности распространения радиоволн | |
| СВЧ и КВЧ диапазонов | 156 |
| 7.2. Характеристика и основные параметры излучающих средств... .. | 157 |
| 7.3. Типы апертурных антенн..... | 163 |
| 7.4. Анализ электромагнитной обстановки | |
| вблизи апертурных антенн – общие положения | 164 |
| 7.5. Метод расчета ППЭ в области I | 166 |
| 7.5.1. Основы расчета | 166 |
| 7.5.2. Функция $B(x)/x$ | 169 |

| | |
|--|------------|
| 7.5.3. Характеристики направленности $F(u, x)$ | 170 |
| 7.5.4. Гарантированная огибающая характеристики направленности антенны с учетом излучения облучателя | 175 |
| 7.5.5. Облучатель универсальной модели антенны | 177 |
| 7.5.6. Порядок расчета ППЭ в области I | 179 |
| 7.6. Расчет плотности потока энергии в области II и III | 181 |
| 7.6.1. Применение метода геометрической теории дифракции | 181 |
| 7.6.2. Результаты расчетов ППЭ в области II и III | 186 |
| 7.7. Особенности расчета ППЭ вблизи апертурных антенн с прямоугольным раскрытием | 190 |
| 7.7.1. Антенна с квадратной апертурой | 190 |
| 7.7.2. Антенна с прямоугольной апертурой | 196 |
| 7.7.3. Рекомендации по расчету ППЭ вблизи антенн различных конструкций | 197 |
| 7.8. Апертурные антенны с решетчатой структурой зеркала | 199 |
| 7.8.1. Общие положения | 199 |
| 7.8.2. Расчет коэффициента прохождения | 202 |
| 7.9. Электромагнитная обстановка вблизи технических средств СВЧ диапазона | 204 |
| 7.9.1. Расчет ППЭ вблизи станции РРСР прямой видимости | 204 |
| 7.9.2. Расчет ППЭ вблизи станции ТРРСР | 206 |
| 7.9.3. Расчет ППЭ вблизи станции ССП | 209 |
| 7.9.4. Расчет санитарно-защитных зон | 211 |
| Глава 8. КОМПЛЕКСЫ ИЗЛУЧАЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОВЕЩАНИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ..... | 218 |
| 8.1. Состав и особенности размещения комплексов излучающих средств радиочастотного диапазона..... | 218 |
| 8.2. Санитарные зоны и санитарный паспорт излучающих объектов | 220 |
| 8.3. Критерии оценки электромагнитной обстановки комплексов технических средств | 222 |
| 8.4. Принципы построения системы автоматизированного прогнозирования электромагнитной обстановки..... | 224 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 230 |
| Приложение | 231 |
| Литература | 232 |

СПОДОБАЕВ Юрий Михайлович

КУБАНОВ Виктор Павлович

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭКОЛОГИИ

Редактор *В.Г. Шаталов*

Компьютерная верстка *К.И. Савченко*

Подписано в печать 19.04.2000. Формат 60x84 /16.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 14,55.
Тираж 500 экз. Заказ 165.

Издательская лицензия № 010164 от 29.01.97 г.
Издательство «Радио и связь».
103473, Москва, 2-й Щемилковский пер., д. 4/5.

Отпечатано в типографии «Офорт».
443068, Самара, ул. Межевая, 7.
Лицензия ПЛД 67-50 от 29.12.99 г.
