

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического приборостроения

Д. В. Благовещенский

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
1999

ББК 32.86-01
Б 68 УДК621.391.82:
621.371(075)

БЛАГОВЕЩЕНСКИЙ Д. В.

Б 68 Электромагнитная совместимость; Учеб. Пособие / СПбГУАП.
СПб., 1999. 81 с.: ил.

Учебное пособие посвящено рассмотрению проблем электромагнитной совместимости радиоэлектронных систем в рамках специальности "Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования". Приводятся необходимые сведения об электромагнитной обстановке, источниках и рецепторах помех, характере воздействий на электромагнитную совместимость радиосредств. Большое внимание уделяется вопросам помехозащищенности антенных систем, создаваемым ими дальним боковым излучениям, вынесенным защитным экранам. Вопросы экранирования электромагнитных полей как источника помех также отражены в значительном объеме. С позиций электромагнитной совместимости рассмотрены сигналы и помехи, подчеркивается важная роль промышленных помех. Обсуждаются вопросы совместимости в радиопередающих и приемных устройствах. Сформулирован ряд решаемых специалистами в настоящее время проблем электромагнитной совместимости, особенно с использованием вычислительной техники.

Пособие предназначено студентам, изучающим курс "Электромагнитная совместимость радиоэлектронных систем".

Рецензенты: кафедра космической физики и экологии Томского государственного университета; кандидат технических наук доцент **С. И. Иванов**

Утверждено
редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

АП, 1999

1. ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

1.1. Общие замечания

В настоящее время стремительное развитие различного электротехнического и радиоэлектронного оборудования приводит к возрастанию уровней электромагнитных полей, создаваемых ими в окружающем пространстве. Указанные поля являются помехами для других подобных устройств, ухудшая условия их работы и снижая эффективность применения. Становится очевидным, что прогресс в данной области техники все более сдерживается ее количественным ростом. Поэтому дальнейший прогресс требует развития на новом качественном уровне, заключающемся в обеспечении совместного функционирования различных средств.

Новое направление радиоэлектроники, цель которого обеспечить одновременную и совместную работу различного радиотехнического, электронного и электротехнического оборудования получило название электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств (ЭМС РЭС).

Проблема ЭМС очень важна, поскольку улучшение качества работы РЭС зависит не только от новых системных решений, но и от организации совместной работы средств, излучающих или воспринимающих электромагнитную энергию.

Укажем наиболее существенные причины, вызывающие обострение проблемы ЭМС:

- возрастает общее число одновременно действующих радиотехнических устройств, в особенности размещенных на подвижных объектах;
- повышается мощность радиопередатчиков вплоть до десятков мегаватт,
- расширяются полосы частот, используемые современными радиосредствами;
- растет нагрузка диапазона радиочастот, хотя многие его участки уже в настоящее время перегружены;
- внедряются в широких масштабах электронные средства автоматического управления, контроля, диагностики и т.п. на основе аналоговой и особенно цифровой техники, в частности микроЭВМ и микропроцессоров (подобные средства становятся источниками непреднамеренных помех и одновременно подвергаются их действию);
- возрастает оснащенность подвижных объектов средствами радиоэлектроники, в особенности кораблей и самолетов; ^
- ухудшаются условия функционирования радиосредств, установленных на летательных аппаратах, поскольку они часто оказываются в зоне прямой видимости значительного числа наземных радиосредств, расположенных на обширной территории.

На начальных этапах развития техники обеспечение совместной работы средств решалось в основном путем совершенствования отдельных схемных и конструкторских решений и планирования распределения частот, используемых отдельными радиосредствами. В настоящее время отдельных частных мер уже недостаточно, а проблема в целом имеет выраженный системный характер. Каждый специалист в области радиоэлектроники должен знать принципы обеспечения ЭМС РЭС и использовать эти знания в практической работе. При рассмотрении ЭМС должен охватываться широкий спектр вопросов — от специфических особенностей радиотехнических систем до конструирования и технологии производства, причем с учетом технических, экономических, метрологических и организационных аспектов [4, 7, 9]. Необходимо знать причины возникновения помех, свойства и характеристики различных элементов РЭС, влияющие на процессы создания помех и подверженности им, принципы и основные направления обеспечения ЭМС, организационные аспекты, стандарты и нормативные документы.

1.2. Электромагнитная обстановка

При разработке современных радиоэлектронных средств (РЭС) необходимо учитывать условия их эксплуатации, включая электромагнитную обстановку, в которой надлежит работать РЭС.

Электромагнитная обстановка — это совокупность электромагнитных излучений в точке или районе, где размещается РЭС. Электромагнитные излучения могут серьезно нарушить качество работы РЭС. В то же время появление нового РЭС меняет электромагнитную обстановку в точках, где уже расположены работающие средства. Это изменение может ухудшить качество функционирования некоторых из них. Решение задач нормального функционирования РЭС в окружающей электромагнитной обстановке, не оказывая недопустимого воздействия на нее и другие средства, составляет существо проблемы ЭМС.

Известно, что электромагнитные волны используются менее ста лет. Радиовещание, телевидение, радиосвязь, радиолокация, судовождение, радиоуправление летательными аппаратами и подвижными средствами — наиболее известные области их использования. Сейчас электромагнитные колебания применяются в медицине, химии, геологии, метеорологии, освоении космоса и океана. Наблюдается тенденция к резкому количественному и качественному росту радиосредств. Приведем пример роста РЭС в ряде зарубежных стран[1]. США 1936 г. — 600 радиовещательных станций с АМ;

1968 г.-6000 станций с АМ, 1400 станций с ЧМ, 600 ТВ-передатчиков; 1972 г.— 18000 радиовещательных и ТВ-станций;

с 1961 по 1966 гг. число РЛС увеличилось с 3000 до 15000;

1950 г. - 100000 подвижных служб радиосвязи;

1970 г.- 3300000 Подвижных служб радиосвязи;

1975 г.— 5800000 подвижных служб радиосвязи;

1980г— 7000000 подвижных служб радиосвязи;

1981 г.—9 млн передатчиков в сантиметровом и дециметровом диапазоне на подвижных объектах;

Японии 1965 г. — 300000 радиоэлектронных средств;

1981 г.—2000000 подвижных радиоэлектронных средств;

Германии 1960 -1970 гг.—число наземных подвижных служб

увеличилось в 7 раз; Англии 1960 -1970 гг.—

число наземных подвижных служб

увеличилось в 5 раз; Диапазон волн от 10 до 100 м занимает полосу 27 МГц. Если принять ширину полосы радиочастотного канала равной 3 кГц, то в полосе 27 МГц поместится 9000 каналов. Однако сейчас в мире в этом диапазоне насчитывается около 1 млн передатчиков. Число передатчиков в указанном диапазоне продолжает ежегодно расти на 20 тыс. несмотря на перегрузку и помехи.

Помимо роста числа РЭС усложнились также их функции. Особенно непростая электромагнитная обстановка возникает в комплексах, размещенных на ограниченной площади, — суда, самолеты, ИСЗ. Здесь имеет место увеличение объема радиоаппаратуры и числа РЭС. Так количество антенн, с которыми работают РЭС на объекте, может достигать нескольких десятков, а площадь ограничена. В результате расстояния между антеннами не превышают десятков метров. Большое количество РЭС и скученность антенн приводит к помехам, а также наводкам на антеннах от передатчиков. Последние вызывают перегрузки входных каналов радиоприемных устройств (РПУ) и могут вывести их из строя. Особенно сильны помехи в радиолокационном и КВ-диапазонах от мощных передатчиков. Опасны также наводки между антеннами передатчиков. В результате их взаимодействия между собой или с основной частотой излучения передатчика могут возникать помехи на частотах, отличных от рабочих частот передатчиков, и тем самым усложнить работу других РЭС. Возможности обеспечения достигнутой величины развязки между антеннами за счет разноса по расстоянию и их рационального размещения сильно ограничены. Это связано как с размерами самого объекта, так и с наличием на нем различного вида надстроек, вызывающих помехи РПУ за счет переотражений излучений передатчиков, а также приводящих к искажениям диаграмм направленности антенн. В результате чего возникают зоны затенения, в которых излучаемый (или принимаемый) сигнал сильно ослаблен и может даже практически отсутствовать. Таким образом, решение вопроса о размещении антенн на объекте с точки зрения ЭМС является сложной технической задачей.

Рост плотности стационарных и подвижных РЭС сопровождается сокращением территориального разнораспределения между ними. При ограниченном частотном ресурсе радиодиапазонов, в которых эти средства работают, уровень помех на входе РПУ растет и нормальная работа РЭС нарушается. Следовательно, увеличение числа РЭС при ограниченных возможностях частотного разделения радиоканалов является одной из причин проблемы ЭМС - количество изменило качество.

В настоящее время существенно растут мощности радиоизлучений, увеличиваются чувствительности РПУ и увеличиваются коэффициенты усиления антенн. Передатчики имеют мощности, достигающие значений в сотни киловатт и единиц мегаватт в непрерывном режиме. В импульсном режиме мощности могут достигать значений десятков мегаватт. В то же время чувствительность современного РПУ может быть 10^{-14} Вт. Рост мощности передатчиков и повышение чувствительности приемников усложняет их совместную работу. С увеличением мощности передатчика растет также мощность нежелательных излучений. Так, если РЛС имеет мощность РИМП = 5 МВт, то мощность четвертой гармоники ее равна 200 Вт и лежит в диапазоне частот, отведенном для воздушной навигации. Мощности же большинства РЭС, работающих в навигации, составляют менее 200 Вт. В результате работа мощной РЛС может создать значительную помеху работе навигационных средств. Значительные мощности РЛС обычно достигаются использованием магнетронов, клистронов и других подобных приборов. Они отличаются в силу специфики своей работы значительными уровнями нежелательных излучений. В первую очередь это относится к магнетронам, которые наряду с излучениями на гармониках способны генерировать широкополосные помехи. Начаты поиски замены магнетронов мощностью более 5 МВт из-за нежелательных излучений.

Большинство современных радиоприемных устройств кроме основного канала (сигнального) обладают нежелательными каналами приема, например, зеркальным и приема промежуточной частоты. Рост чувствительности РПУ по основному каналу обычно сопровождается ростом чувствительности нежелательных каналов, в которые может попадать излучение передатчика. Наличие нежелательных излучений передатчиков и каналов приема у РПУ, возрастание уровня первых и увеличение чувствительности вторых, является еще одной причиной, породившей ЭМС как дисциплину.

Особо следует отметить проблему контактных помех. Источником таких помех являются элементы, которые в поле облучения ведут себя как параметрические и нелинейные. Подобные элементы преобразуют спектр падающего на них излучения в более широкий. Контактные помехи возникают на подвижных средствах, у которых при движении образуются контакты с переменным сопротивлением, попадающие в поле установленных на них передатчиков. Например, контактные помехи возникают при размещении

радиопередатчиков на автомашинах, поездах и т.п. Серьезную проблему они составляют на судах и самолетах [2].

Увеличение мощности РЭС, использующих направленное излучение, имеет следствием еще один эффект, затрагивающий проблему ЭМС, а именно, рост мощности, излученной в нежелательных направлениях. Хотя усиление современных направленных антенн по главному лепестку может достигать 50 дБ, уровень боковых и задних лепестков диаграммы направленности остается высоким. Для параболических антенн, например, для первого бокового (-20 дБ), для заднего лепестка (-40 дБ) по отношению к главному лепестку. Это означает, что РЛС с мощностью $P = 10$ МВт в импульсе излучает в направлении, противоположном основному, мощность $P = 1$ кВт.

Существенный вклад в формирование электромагнитной обстановки вносят излучения со стороны различного рода энергетических и промышленных установок, которые в силу специфики своей работы являются источниками непреднамеренных помех. Это так называемые индустриальные помехи. К устройствам, создающим индустриальные помехи, относятся генераторы и двигатели постоянного и переменного тока, линии электропередач, сварочные аппараты, системы зажигания, бытовые электроприборы и многие другие. Наличие индустриальных помех часто не позволяет полностью реализовать потенциальные возможности радиоаппаратуры и усложняет совместную работу РЭС. Влияние индустриальных помех особенно заметно в крупных промышленных городах и на подвижных объектах - судах, самолетах.

1.3. Главные определения

Под ЭМС радиоэлектронных средств понимают способность этих средств одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных радиопомех и не создавать недопустимых радиопомех другим радиоэлектронным средствам.

Непреднамеренной считают любую радиопомеху, создаваемую источником искусственного происхождения, не предназначенную для нарушения функционирования РЭС. Часто вместо радиопомех говорят об электромагнитных помехах.

Электромагнитная помеха определяется как нежелательное воздействие электромагнитной энергии, которое ухудшает или может ухудшить показатели функционирования РЭС. Можно считать, что радиопомеха - это электромагнитная помеха в диапазоне радиочастот.

Под радиоэлектронными средствами (РЭС) понимают технические средства, состоящие из одного или нескольких радиопередатчиков и (или) радиоприемных устройств и вспомогательного оборудования. К РЭС относят вещательные радиостанции, радиолокационные станции и т.д. Такое определение РЭС подразумевает, что все компоненты, входящие в эти средства,

находятся территориально в одном месте. Приведенное определение ЭМС выделяет в качестве основного фактора, вызывающего проблему ЭМС, помехи между средствами. Задачу уменьшения уровня помех можно решать не только путем улучшения качества излучений радиопередатчиков и повышения помехоустойчивости приемников, но и путем совершенствования организации работы РЭС и, в частности, рационального распределения частот между средствами. Поэтому в настоящее время проблему совместимости часто рассматривают с позиций эффективного использования спектра, а совокупность РЭС — как некоторую искусственно созданную человеком большую радиосистему.

Далее будем использовать также понятие радиоканала, поскольку его часто удобно рассматривать в качестве элемента большой радиосистемы. Радиоканал, например, образует линия связи: передатчик— пространство распространения— приемник. Один передатчик может образовывать несколько радиоканалов, если он предназначен для передачи информации нескольким приемникам. Типичным примером является радиовещательная станция, обслуживающая множество абонентов — приемников. Основной задачей радиоканала является передача и извлечение информации с заданным качеством. Работающая совокупность РЭС образует набор радиоканалов, между которыми могут образовываться помехи. Для обозначения этого класса непреднамеренных помех будем использовать термин системная помеха (станционная помеха, взаимная, межканальная).

В задачах ЭМС широко используются понятия: источники и рецепторы помех. Источники электромагнитной помехи — класс любых устройств, которые могут создавать электромагнитное излучение. Сюда включают устройства, не предназначенные для излучения электромагнитных волн, например двигатели, системы зажигания и т. п. Рецепторы электромагнитной помехи — это устройства, которые обратимо или необратимо изменяют значения своих параметров под влиянием электромагнитных помех.

При рассмотрении проблемы совместимости в широком плане под радиочастотным ресурсом понимают весь диапазон частот, пригодный для связи, локации и т. д. Его потребителями выступают регионы, страны, области, а также радиослужбы, радиосистемы. Цель радиослужбы — осуществлять передачу и (или) прием радиоизлучения в определенных рамках. К радиослужбам относят радиолокацию, радионавигацию, радиовещание и т. д. Весь радиочастотный ресурс условно разбит на диапазоны (табл. 1.1) [10]. Каждый частотный диапазон соответствует полосе частот $0,3 \cdot 10^n$ — $3 \cdot 10^n$ Гц и включает верхнюю границу. Номера частотных диапазонов соответствуют показателям степени n для каждого диапазона. Частотные диапазоны имеют частотные и метрические наименования (табл. 1.1). К числу нереконструируемых к употреблению терминов относятся сверхдлинные волны (СДВ), длинные волны (ДВ), средние волны (СВ), короткие волны (КВ), ультракороткие волны (УКВ), субмиллиметровые волны.

Таблица 1.1

Номер диапазона	Границы частот	Границы длин волн	Название частотного диапазона	Название диапазона волн
4	3-30 кГц	100-10 км	Очень низкие (ОНЧ)	Мириаметровые или сверхдлинные (СДВ)
5	30-300 кГц	10-1 км	Низкие (НЧ)	Километровые или длинные (ДВ)
6	0,3-3 МГц	1000-100 м	Средние (СЧ)	Гектометровые или средние (СВ)
7	3-30 МГц	100-10 м	Высокие (ВЧ)	Декаметровые или короткие (КВ)
8	30-300 МГц	10-1 м	Очень высокие (ОВЧ)	Метровые (МВ)
9	0,3-3 ГГц	100-10 см	Ультравысокие (УВЧ)	Дециметровые (ДМВ)
10	3-30 ГГц	10-1 см	Сверхвысокие (СВЧ)	Сантиметровые (СМВ)
11	30-300 ГГц	10-1 мм	Крайне высокие (КВЧ)	Миллиметровые (ММВ)
12	0,3-3 ТГц	1-0,1 мм	Гипервысокие (ГВЧ)	Децимиллиметровые

Вопросы использования частот решаются Международным союзом электросвязи (МСЭ) при ООН. При рассмотрении вопросов использования частот различают три понятия: распределение, выделение частот или полос частот и присвоение. Понятие "распределение" относится к службам, "выделение"— к зонам или странам, "присвоение"— к системам и станциям.

1.4. Источники и рецепторы электромагнитных помех

Источники непреднамеренных электромагнитных помех можно разделить на две группы — естественные и искусственные. Их классификация представлена на схеме(рис. 1.1).

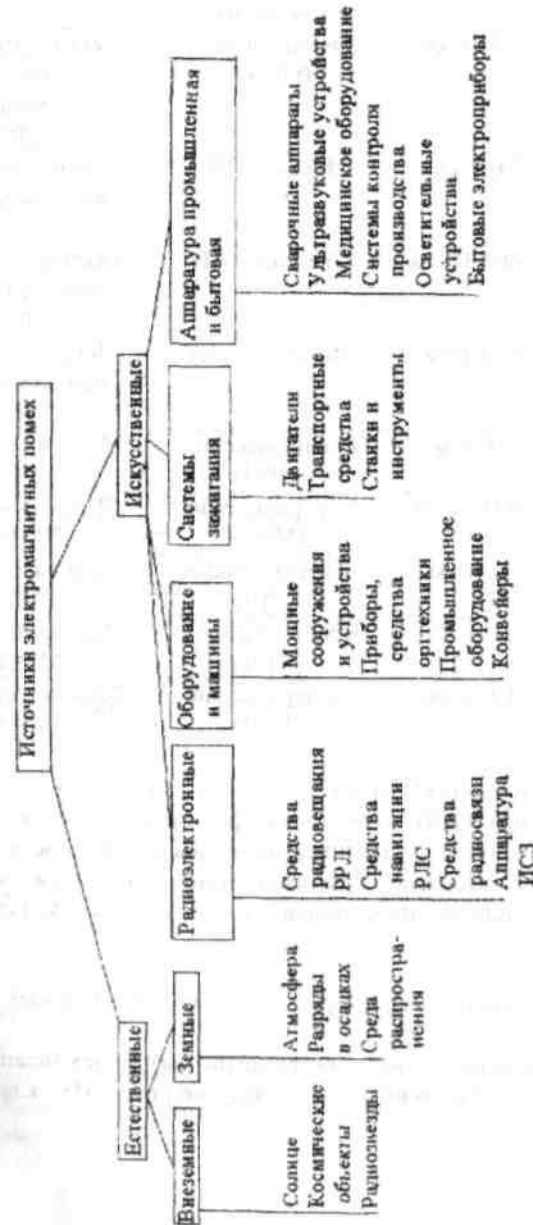


Рис. 1.1

Источники естественных помех могут быть земными и внеземными. Земные -это, в первую очередь, атмосферные помехи и статические разряды. Источниками атмосферных помех являются электрические разряды во время гроз. Спектр помех, создаваемый этими источниками, очень широкий, и они распространяются на большие расстояния. В северных широтах источниками помех являются полярные сияния [11]. Накопление электрических зарядов в осадках и последующий их разряд на элементах антенны, заземления или вблизи антенны также приводят к электромагнитным помехам. К числу естественных источников помех следует отнести также внутренние шумы каналообразующей аппаратуры и искажения сигналов в среде распространения

К внеземным источникам помех относят помехи, обусловленные электромагнитным излучением Солнца, планет, звезд и т. п. В период высокой активности Солнца на нем происходят вспышки с большой энергией, которые приводят к резкому росту электромагнитных помех на Земле. Радиоизлучения планет солнечной системы, звезд и других небесных тел являются источниками дополнительных космических помех и их следует учитывать при определении характеристик приемников, особенно работающих в диапазонах УВЧ, СВЧ и на более высоких частотах.

Источниками искусственных электромагнитных помех являются РЭС, принцип работы которых связан с излучением электромагнитной энергии. Некоторые из них указаны на схеме рис. 1.1.

Электромагнитные помехи для РЭС создают также устройства, не предназначенные для излучения электромагнитной энергии: источники электрической энергии, оборудование и машины, системы зажигания двигателей, аппаратура промышленного и бытового потребления. Помехи, создаваемые этими объектами, образуют широкий класс промышленных помех, с которыми нельзя не считаться при оценке эксплуатационных характеристик РЭС. Интенсивность промышленных помех и ширина спектра различны для разных источников. С промышленными помехами приходится считаться до частот в несколько сотен мегагерц. Расстояния от источника, на которых радиоприемники ощущают воздействие помехи, могут достигать нескольких километров.

Уровень помех измеряют либо в единицах напряженности поля (В/м; мкВ/м; дБмкВ/м и т. д., где последняя означает измерение в децибелах относительно 1 мкВ/м), либо в единицах плотности мощности (Вт/м², дБВт/м² и т. д.). Здесь дБВт/м² означает поток мощности, измеренной в децибелах относительно ватта, через площадку в 1 м². Для характеристики загрузки спектра частот помехой ее измеряют также в единицах, показывающих распределение уровня помехи по частоте, например, дБмВт/м² • кГц).

Классификация, приведенная выше, учитывает связь помехи с ее источником. По спектральным и временным характеристикам выделяют сосредоточенные, импульсные, флуктуационные помехи. Сосредоточенная помеха представляет собой узкополосное колебание, параметры которого

медленно меняются (по сравнению с центральной частотой колебаний) или остаются постоянными во времени. Ее спектр сосредоточен в узкой полосе частот. Источниками помех такого рода являются многие средства связи, например связанные передатчики амплитудно-модулированных колебаний.

Импульсная и флуктуационная помехи относятся к разряду широкополосных. Источниками импульсных помех являются РЭС, работающие с импульсными сигналами, некоторые источники промышленных помех, молнии во время грозы и т. п. Флуктуационную помеху можно рассматривать как предельный случай импульсной помехи, когда происходит наложение во времени случайного числа импульсов со случайными амплитудами. Следовательно, флуктуационная помеха есть случайный процесс. Такой помехой могут быть космические шумы и внутренние шумы радиоаппаратуры.

Помехи искусственного происхождения разделяются на преднамеренные и непреднамеренные. Первые специально создают с целью нарушения нормального функционирования некоторых конкретных РЭС. Создание их и противодействие им входит в круг задач специальной области радиотехники - радиоэлектронное противодействие.

К непреднамеренным помехам относятся помехи, вызванные излучением радиоустройств (промышленные, как отмечалось выше). К непреднамеренным помехам можно отнести также внутренние шумы устройств и приборов. Они обусловлены флуктуационными процессами и всегда существуют в реальных цепях наряду с полезными сигналами, ограничивая возможность использования слабых сигналов. Шумы в проводящих материалах порождаются хаотическим тепловым колебанием кристаллической решетки. Шумы в электровакуумных приборах, помимо теплового, вызваны дробовым эффектом, шумами токораспределения, наведенными шумами сетки и другими факторами. Шумы твердотельных приборов представляют собой комбинацию тепловых шумов в сопротивлении перехода, дробовых шумов в барьерном и в полупроводниковом слоях. Перечисленные флуктуационные процессы имеют случайный характер и проявляются в совокупности как нормальный процесс со спектральной плотностью, практически равномерной в полосе пропускания реального устройства.

Поскольку электромагнитные помехи, внешние по отношению к некоторому устройству, и внутренние шумы энергетически эквивалентны, их часто оценивают с помощью единого параметра, называемого шумовой температурой. Для антенны эта температура T_a измеряется в Кельвинах. Шумовая температура антенны приписывается внутреннему сопротивлению антенны и позволяет определить подводимую к согласованному приемнику мощность принятых антенной шумовых помех $P_{ша}$ приходящуюся на полосу частот B , по следующей формуле:

$$P_{ша} = k T_a \cdot B,$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана.

Введением шумовой температуры антенны осуществляется эквивалентная замена как внешних шумовых помех, так и внутренних шумов тепловыми шумами, создаваемыми в полосе частот B внутренним сопротивлением антенны, находящимся при гипотетической температуре T_a .

На рис. 1.2 приведены усредненные экспериментальные частотные зависимости шумовой температуры антенны T_a соответствующие различным видам помех: внутренние шумы (1), промышленные помехи в городе (2) и сельской местности (3), радиопомехи космического происхождения (4) и атмосферные радиопомехи, $T_0 = 273$ К (5). Как видно из сравнения интенсивностей различных видов помех на рисунке, преобладающее значение имеют непреднамеренные помехи искусственного происхождения.

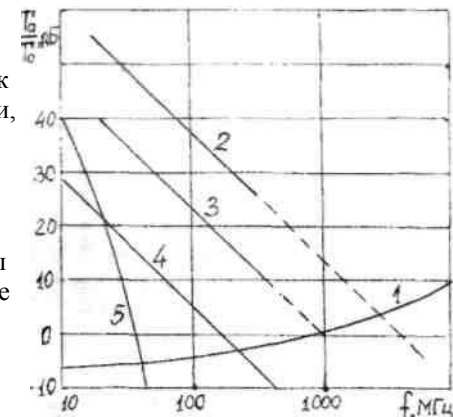


Рис. 1.2

Помехи воздействуют на различные системы и устройства, объединенные обобщенным понятием "рецепторы электромагнитных помех" (см. выше). То есть радиотехнические, электротехнические и электронные средства, создающие в процессе работы электромагнитные помехи, называются источниками помех (ИП), а устройства, подвергающиеся их действию — рецепторами помех или просто рецепторами (РП).

Рецепторы электромагнитных помех, так же как и источники помех, можно разделить на естественные и искусственные (рис. 1.3). В разряд естественных рецепторов входят: человек, животные и растения. Учитывать восприимчивость естественных рецепторов к электромагнитным помехам важно как с точки зрения сохранения здоровья человека, так и для защиты окружающей среды. Установлены нормы для уровней радио и СВЧ-облучения, которые ориентируются на недопустимость психофизиологических и биологических изменений в организме.

Искусственные рецепторы можно разбить на 2 группы: рецепторы, работающие на принципах извлечения полезной информации из окружающего электромагнитного поля, и рецепторы, которые по принципу своей работы не должны реагировать на внешние электромагнитные поля. Первую группу составляют радиоприемные устройства (РПУ). Для них наиболее труднозащитимым от помех является антенный тракт, поскольку поля всех работающих передатчиков создают в антенне приемника токи своих сигналов. Однако антенна и приемное устройство обладают избирательными свойствами: реагируют на сигналы, занимающие определенную полосу частот. Сигналы,

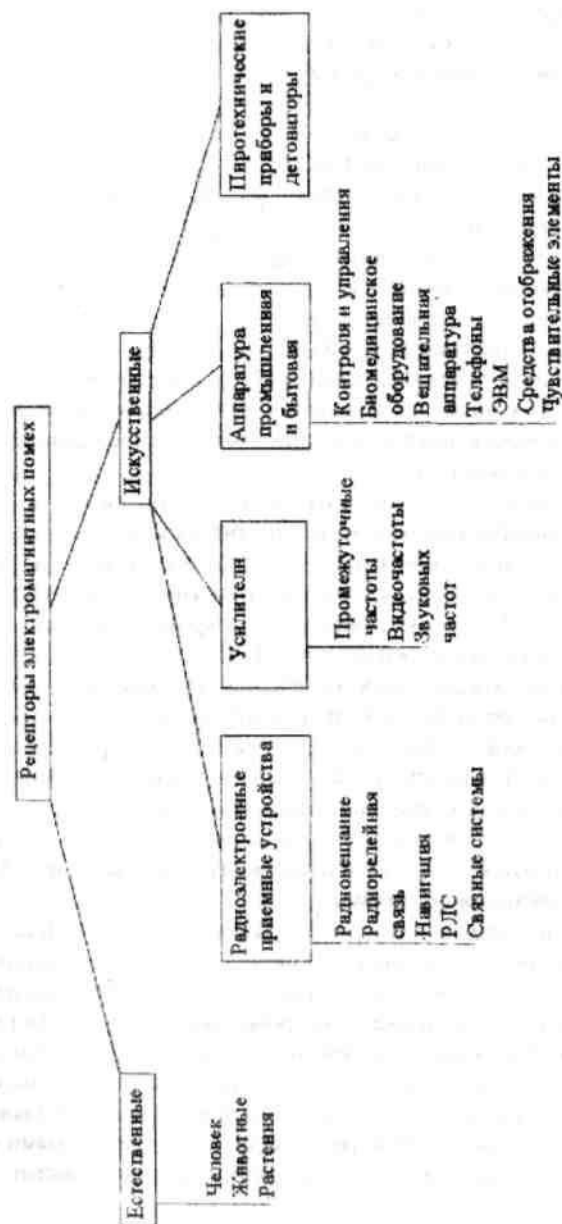


Рис. 1.3

лежащие вне полосы пропускания, сильно подавляются и, если их мощность невелика, практически не проходят на выход. Одними из основных характеристик РПУ являются: полоса пропускания, чувствительность по основному и восприимчивость по нежелательным каналам приема. Чувствительность определяется значением минимально необходимой мощности (мкВт, мВ и т. п.) сигнала на входе приемника (выходе приемной антенны) при котором на выходе приемника обеспечивается требуемое отношение сигнал/шум. Под восприимчивостью нежелательных каналов понимают чувствительность приемника к уровням помех, частоты которых не попадают в полосу частот, занимаемых полезным сигналом. Измеряют ее в децибелах по отношению чувствительности приемника к полезному сигналу.

Помехи могут проникать не только через антенный тракт, но и вследствие наводок на элементы устройства, а также по цепям питания и управления. Снижение уровня таких помех осуществляется экранированием и фильтрацией цепей питания. Как указывалось выше, в процессе работы источник помех оказывает нежелательное воздействие на рецепторы. Это влияние может быть непосредственным или косвенным.

Непосредственное влияние обусловлено передачей электромагнитной энергии помехи от источника к рецептору, которая может осуществляться различным образом. Так, если ИП является радиопередатчиком, а РП радиоприемником, то преобладают излучение и прием нежелательных колебаний этих устройств. В других случаях электромагнитные поля помех создаются токами, протекающими в различных элементах конструкции ИП, существуют в окружающем пространстве в виде свободно распространяющихся или направляемых электромагнитных волн и воздействуют на рецептор за счет появления наведенной ЭДС в элементах его электрических цепей. Конкретный способ осуществления этой нежелательной передачи энергии определяется путем воздействия (распространения) помехи. В отличие от радиосвязи наличие этих путей нежелательно и для устранения непосредственного влияния требуется значительное ослабление помех на пути распространения.

В случае свободно распространяющихся волн уровень помех, воздействующих на рецептор, зависит от мощности ИП, расстояния r до РП, длины волны помехи λ , параметров среды и ряда других факторов. В зависимости от места расположения рецептора относительно ИП пространство вокруг источника помех целесообразно разделить на ближнюю ($r \leq \lambda / 2\pi$), промежуточную и дальнюю зоны.

Дальняя зона характеризуется тем, что в ней энергия передается электромагнитными волнами, свободно распространяющимися в окружающем пространстве. Для них свойственны поперечная структура электрического и магнитного полей, равенство плотностей энергии этих полей, зависимость изменения обеих составляющих поля от расстояния, пропорциональная $1/r$, и постоянство углового распределения интенсивности электромагнитных полей

(для антенн — диаграмма направленности) при изменении расстояния g . Излучение и прием радиопомех могут осуществляться как антеннами радиопередающих и радиоприемных устройств, так и корпусами различных устройств, кабелями (вследствие недостаточного экранирования), элементами монтажных схем, цепями электропитания и управления.

К промежуточной зоне относится область пространства в условных границах $\lambda / 2\pi < r < r_{\max}^2 / \lambda$, где r_{\max} — наибольший из размеров области, в которой локализованы токи ИП или РП (для антенн r_{\max} — наибольший из размеров апертур). Электромагнитные поля, излучаемые отдельными участками токовых областей ИП, имеют практически поперечную структуру и представляют собой распространяющиеся электромагнитные волны, а результирующее поле в точке приема является суперпозицией этих волн. В отличие от случая дальней зоны, фазовые соотношения для данных интерферирующих волн определяются как угловыми координатами, так и расстоянием между ИП и РП. Поэтому напряженность электрического и магнитного полей имеют обычно немонокотонную зависимость от расстояния g .

Ближняя зона характеризуется тем, что плотности энергии электрического и магнитного полей не равны друг другу. В зависимости от типа источника в ближней зоне преобладает либо электрическое, либо магнитное поле. Структура электромагнитного поля не является чисто поперечной. Значения составляющих напряженностей электрического и магнитного полей в ближней зоне изменяются с расстоянием пропорционально $1 / g^2$ и $1 / g^3$. Для данной зоны характерно влияние на РП промышленных помех.

Направляемые электромагнитные волны существуют в кабелях, волноводах и других линиях передачи. Для них характерна возможность распространения без существенного ослабления на значительные расстояния. Влияние источника помех на РП может также происходить и из-за наличия общих элементов в электрических цепях источника помех и рецептора. В этом случае говоря о гальванической связи цепей ИП и РП. Она обусловлена токами проводимости и может возникать из-за неидеальности изоляционных материалов, наличия общих участков в цепях заземления и т. п. Гальваническая связь источников помех и рецепторов является одной из существенных причин воздействия промышленных помех на объектах.

При косвенном влиянии ИП на РП непосредственная передача электромагнитной энергии рецептору отсутствует. Воздействие помехи в этих случаях происходит из-за изменения параметров среды, параметров элементов устройств или режимов работы под действием ИП. Например, под действием излучения мощного радиопередатчика изменяются электродинамические параметры ионосферы, приводя к изменению условий распространения радиоволн в радиолинии, соответствующей рецептору помех. Другим примером является воздействие на РП различных бортовых электротехнических устройств за счет изменения режима энергопотребления:

при включении мощной нагрузки изменяются условия работы различных электронных устройств из-за изменения напряжения электрического питания и возникающих при этом переходных процессов.

1. 5. Воздействие помех на радиоэлектронные средства

Характер воздействия помех на рецептор различен в зависимости от структуры, спектрального состава и энергии помехи. При воздействии на рецептор мощной помехи возможны необратимые отказы аппаратуры, в первую очередь из-за изменения структуры полупроводниковых материалов вплоть до их частичного или полного разрушения. Мощная помеха может существовать в виде одиночного импульса или повторяющейся последовательности импульсов, а также в виде гармонического или шумового непрерывного процесса.

В табл. 1. 2 приведены данные об энергии одиночного импульса, приводящего к разрушению различных элементов электронных схем.

Таблица 1.2

Тип элемента	Энергия импульса, мкДж
Точечный контактный диод	0,01- 12
Низкопотенциальные интегральные микросхемы	10
Маломощные транзисторы	20-100
Мощные транзисторы	1000
Электролитические конденсаторы	60-1000
Резисторы (0.25 Вт)	10000
Реле	1000-100000

При повторяющейся последовательности импульсов или непрерывном колебании выход из строя элементов электронных схем происходит при значительно меньшей энергии помехи, составляющей единицы процентов от значений, указанных в табл. 1.2.

Если действующая помеха не вызывает необратимых изменений в цепях рецептора, то при достаточной интенсивности она может привести к функциональным нарушениям. Свойство рецептора быть подверженным действию помех, реагировать на них, называется восприимчивостью.

Проявление реакции РЭС различно в зависимости от мощности помехи. Если она приводит к перегрузке, к насыщению активных элементов, то в этом случае существенную роль играют свойства этих элементов, их нелинейные характеристики. Вследствие этого качественные показатели РЭС, например РПУ, ухудшаются даже в том случае, когда частота помехи значительно отличается от частоты настройки приемника. Воздействию таких помех

подвержены также многочисленные электронные устройства, не предназначенные для приема внешних электромагнитных полей. Существенно и то, что во многих случаях воздействие помехи обладает так называемым последствием, заключающимся в том, что ее влияние проявляется некоторое время после прекращения воздействия и требуется определенное время для восстановления нормального режима работы рецептора.

При воздействии помех еще меньшей интенсивности, соизмеримых по мощности с полезными сигналами, отмеченные нелинейные явления отсутствуют и принимаемые рецептором мешающие электромагнитные колебания действуют в его цепях наряду с полезным сигналом как аддитивные помехи.

В конечном счете воздействие непреднамеренных помех приводит к ухудшению качественных показателей РЭС. Степень этого влияния определяется уровнем помех, их спектральным составом, статистическими характеристиками, видом аппаратуры и способом обработки информации. Последствиями этого влияния в зависимости от типа и назначения аппаратуры может быть, в частности, снижение качества радиопередачи, ошибки навигационных комплексов, случайное срабатывание радиовзрывателей из-за приема ложных команд и т. д.

1. 6. Факторы воздействия на ЭМС радиоэлектронных средств

В зависимости от места расположения потенциальных ИП и РП целесообразно различать задачи обеспечения ЭМС РЭС, размещенных на одном объекте (корабле, летательном аппарате, узле связи и т. д.), и ЭМС РЭС различных объектов или средств, расположенных на заданной местности. Это разделение связано с различным характером опасных ИП и их влиянием на РП. Кроме того, в зависимости от поставленных целей возможно рассматривать эти задачи на следующих уровнях:

- элемента, блока;
- устройства, представляющего совокупность элементов, блоков (радиоприемников или радиопередатчиков);
- комплекса, радиосистемы — совокупности функционально связанных устройств, предназначенных для определенных целей, или же группы РЭС, выполняющих соответствующие задачи;
- радиослужбы — совокупность устройств (систем), осуществляющих передачу и прием излучений в определенных целях.

Необходимость обеспечения ЭМС РЭС существует на всех перечисленных уровнях, и на каждом из них имеются свои отличительные особенности. Эти особенности связаны с конкретными путями воздействия непреднамеренных электромагнитных помех (НЭМП) на рецептор, методами анализа влияния НЭМП, методами и способами ослабления влияния НЭМП на рецептор.

На любом из рассмотренных уровней воздействия НЭМП на некоторый рецептор определяются следующими обстоятельствами:

1. Существуют источники помех характеризуемые значениями мощностей $P_{\text{ип}}$ на любых частотах, в том числе и на рабочих. Создаваемые РЭС электромагнитные поля можно условно разделить на основные, определяемые назначением средства, и нежелательные, обусловленные его техническим несовершенством. Например, радиопередающее устройство должно создать излучение только в определенной полосе частот, однако в силу ряда причин имеют место нежелательные радиоизлучения за пределами этой полосы.

При учете влияния НЭМП на рецептор необходимо считаться со всеми видами НЭМП: излучаемыми на основной частоте и частотах нежелательных излучений; помехами, создаваемыми цепями питания, управления, коммутации и заземления, а также другими видами промышленных помех. Нежелательные электромагнитные поля, создаваемые некоторыми РЭС, частично ослабляются в самом источнике помех. Ослабление НЭМП в месте их возникновения будем характеризовать коэффициентом ослабления $\xi_{\text{ип}1}$ где индекс 1 определяет принадлежность излучения к основному излучению или одному из видов создаваемых НЭМП.

2. Имеет место передача электромагнитной энергии от ИП к РП. Этот процесс определяется многими факторами: свойствами среды, параметрами антенн, расстоянием между РП и ИП, взаимной ориентацией их антенн, поляризацией излучения и т. д. Излучение и прием НЭМП могут осуществляться антеннами радиоустройств в направлениях, соответствующих главным, боковым или задним лепесткам диаграмм направленности антенн (ДНА), а также корпусами устройств, элементами фидерного тракта, кабелями и т. д. Ослабление НЭМП в среде распространения будем характеризовать коэффициентом ξ_k где k — номер пути воздействия НЭМП на рецептор.

3. Электромагнитная энергия помехи принимается рецептором и оказывает влияние на его функционирование. Рецептор может различным образом реагировать на внешние электромагнитные воздействия. По аналогии с ИП можно говорить об основном механизме воздействия, принципиально необходимом конкретному устройству, и нежелательном, обусловленном техническим несовершенством РП. Так, для радиоприемного устройства основным является прием сигналов в полосе частот, соответствующей спектру передаваемого сообщения, а к неосновным (нежелательным) относят прием по побочным каналам, прием помимо антенн и т. д. Ослабление НЭМП, наблюдаемое при прохождении ее через цепи РП, можно характеризовать коэффициентом $\xi_{\text{рп}s}$, где s — номер канала приема. Значение мощности НЭМП, приведенное ко входу РП с учетом того, что действует помеха 1-го вида по k -му пути воздействия и s -му каналу приема, будет равно

$$P_{\text{рп}} = P_{\text{ип}0} \cdot \xi_{\text{ип}1} \cdot \xi_k \cdot \xi_{\text{рп}s}.$$

где $P_{\text{ипо}}$ - мощность источника помех на рабочей частоте.

Для конкретного РЭС и конкретного типа помех можно указать такой предельный уровень помехи ($P_{\text{рп доп}}$), при котором сохраняется требуемое качество его функционирования: $P_{\text{рп}} \leq P_{\text{рп доп}}$. Такие помехи называются допустимыми. ЭМС в группе средств выполняется, если все создаваемые непреднамеренные помехи являются допустимыми для всех РП рассматриваемой группы.

Нарушение ЭМС для ИП и РП может быть обусловлено:

- несовершенством характеристик ИП (например, наряду с основным излучением радиопередающее устройство создает нежелательные излучения значительной мощности);
- несовершенством характеристик РП (например, из-за малой избирательности приемника могут иметь место побочные каналы приема сигналов);
- недостаточным ослаблением помех вследствие несовершенства экранирования аппаратуры, узлов, блоков РЭС, фидерных трактов передатчиков и приемников;
- нерациональным размещением аппаратуры, фидерных трактов;
- нерациональным распределением частот между РЭС.

Для обеспечения ЭМС очень важно выявить конкретные причины воздействия непреднамеренных помех: найти источники их и пути распространения и определить причины, вызывающие подверженность рецепторов действию определенных помех. С этой целью необходимо более подробно рассмотреть свойства различных РЭС и их элементов с точки зрения создания, распространения НЭМП и подверженности им. В дальнейшем в связи со специфическими особенностями образования различных видов НЭМП выделим случаи создания и приема НЭМП радиотехническими средствами и случаи создания и воздействия на рецепторы промышленных помех.

2. АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ЗАДАЧ ЭМС

2. 1. Антенны и требования к ним

Работы по проблемам ЭМС включают в себя как разработку более помехозащищенных радиосистем, так и вопросы оптимального проектирования их с точки зрения уменьшения создаваемых помех. Большое внимание в этих работах уделяется антеннам. Действительно, осуществляемая антеннами пространственная и в ряде случаев частотная селекция помех, позволяет существенно улучшить ЭМС. Если еще недавно при разработке и конструировании новых антенн основное внимание уделялось их внутренним параметрам, таким как усиление, согласование, диапазонность и т. п. то сейчас невозможно представить себе современную антенну, при разработке которой

не были бы учтены вопросы ЭМС по боковому излучению или приему на рабочих частотах, по излучению (или приему) на гармониках и т. п. В ряде случаев требования к помехозащищенности разрабатываемых антенн оказываются столь жесткими, что выполнение их приводит к некоторому ухудшению внутренних для системы параметров, с чем приходится мириться.

Более того, в настоящее время интенсивно развивается новый класс антенн — так называемые адаптивные, имеющие возможность подстройки под данную помеховую обстановку таким образом, чтобы свести влияние помех до минимума. Все это говорит о том, насколько велика роль антенн в обеспечении ЭМС. Как обнаружилось, из 30 основных параметров радиоэлектронного оборудования, оказывающих влияние на ЭМС, 12 параметров определяются антенной системой.

Существуют две основные проблемы в этой области. Во-первых, необходимо точно знать все характеристики применяемых антенн, которые могут оказать влияние на ЭМС (направленные свойства в основном рабочем диапазоне, внеполосное излучение, поляризационные характеристики, возможность искажения направленных свойств из-за влияния посторонних предметов, стабильность характеристик во времени и т. п.). Многие из перечисленных характеристик, к сожалению, в ряде случаев выпадают из поля зрения, так как являются определяющими для нормальной работы радиосистемы, где используются данные антенны. Однако их роль при нынешнем положении в эфире невозможно переоценить.

Во-вторых, максимальное внимание должно быть уделено улучшению помехозащищенности как вновь разрабатываемых антенн, так и антенн, уже разработанных и находящихся в эксплуатации.

2. 2. Параметры антенн как фактор ЭМС

2.2.1. Излучение антенн

Помехозащищенность антенны определяется в первую очередь ее диаграммой направленности — функцией, характеризующей угловую зависимость амплитуды, фазы и поляризации поля излучения. При рассмотрении диаграммы направленности зеркальных антенн обычно выделяют три пространственные области. В первой из них диаграмма направленности (ДН) в основном определяется токами на излучающей поверхности, точнее, равномерной частью токов. Это так называемая область апертурного излучения. Она содержит главный и несколько первых боковых лепестков. Для расчета ДН в этой области используют апертурный и токовый методы. Во второй области (дальнего бокового излучения) ДН определяется излучением равномерной и неравномерной составляющих тока, прямым полем облучателя и т.л. Для расчета поля в этой области используют дифракционные методы, в основном метод геометрической теории дифракции (ГТД). В третьей

области, области заднего излучения, диаграмма в основном определяется дифракционными эффектами на краях антенны. Для расчета ее также используется метод ГТД [5, 8].

В настоящее время методы анализа и расчета направленных свойств антенн развиты достаточно хорошо. Более того, для некоторых типов антенн разработаны программы расчета на ЭВМ, учитывающие большинство возможных источников излучения. Однако следует иметь в виду, что расчетные формулы, как правило, относятся к идеализированной антенне, по существу, к ее электрической схеме. Направленные свойства реальных антенн из-за появляющихся неточностей в расположении элементов, ошибок при изготовлении поверхностей и других погрешностей в той или иной степени отличаются от результатов расчета. При практическом использовании антенны появляются дополнительные причины, искажающие ее направленные свойства, вызванные наличием опоры и поддерживающих опор конструкций, влиянием расположенных рядом антенн и т. п.

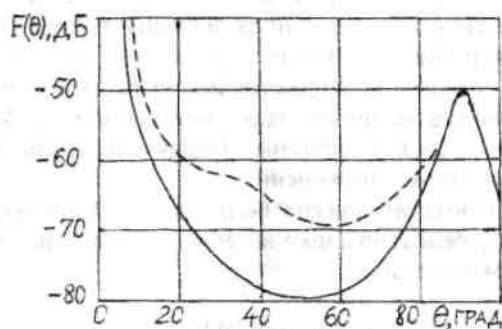


Рис. 2. 1

На рис. 2. 1 в качестве иллюстрации сплошной линией приведена рассчитанная по точным формулам огибающая бокового излучения для рупорно-параболической антенны с усилением 40 дБ. На этом же рисунке пунктиром приведена огибающая боковых лепестков реальной. Наблюдаемое направленное ее свойств объясняется многочисленными

причинами - это неточность выполнения поверхности антенны, влияние защитной крышки, опоры, рамы крепления и других предметов. При оценке влияния направленных свойств антенн на ЭМС, необходимо учитывать все эти факторы, многие из которых могут быть определены только экспериментально. Поэтому бесспорна необходимость использования измерительных антенных полигонов как на этапе разработки антенн, так и при определении ЭМС.

Делались попытки установить какие-либо гарантированные огибающие бокового излучения для антенн того или иного класса. В частности, для апертурных антенн с круглым раскрытием предложено описывать огибающую в переднем полупространстве (относительно изотропного излучателя) формулой

$$F(\Theta) = 52 - 10 \lg(d / \lambda) - 25 \lg \Theta, \text{ дБ},$$

где d - диаметр антенны; Θ - угол в градусах.

Данное выражение справедливо при $\Theta_1 \leq \Theta \leq \Theta_2$ где $\Theta_1 = 100 \lambda / d$, а Θ_2 определяется рис. 2. 2. При $\Theta > \Theta_2$ величина $F(\Theta) = 0$ дБ.

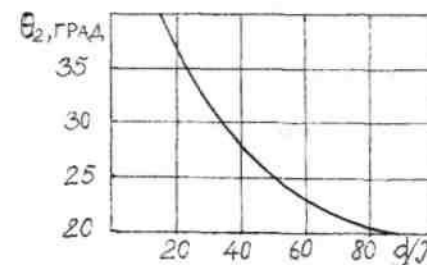


Рис. 2. 2

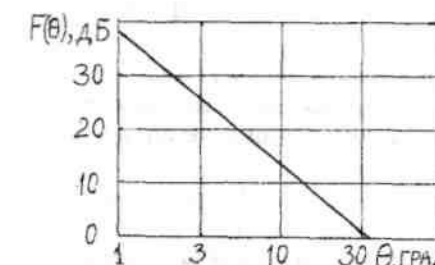


Рис. 2. 3

В тех случаях, когда размер антенны неизвестен, предлагается использовать выражение

$$F(\Theta) = \begin{cases} 38 - 25 \lg \Theta, & 1^\circ < \Theta < 33^\circ, \\ 0, & \Theta > 33^\circ. \end{cases}$$

Указанная зависимость изображена на рис. 2. 3.

2. 2. 2. Критерии помехозащищенности

Если обозначить нормированную диаграмму направленности антенны через $F(\varphi, \Delta)$, где φ и Δ соответственно азимутальный угол и угол места, то вероятность того, что уровень излучения будет превосходить χ , составляет

$$\tilde{F}(\chi) = P \{ |F(\varphi, \Delta)| > \chi \}.$$

Интегральный закон распределения $\tilde{F}(\chi)$ достаточно полно характеризует реальную помехозащищенность антенны при условии, что направление прихода помехи равномерно по углам φ и Δ . В противном случае в последней формуле должна быть введена соответствующая весовая функция, характеризующая вероятностные характеристики помеховой обстановки.

Использование последнего выражения для реальных антенн затруднительно из-за сложности обращения немонотонной функции $F(\varphi, \Delta)$, задаваемой к тому же обычно громоздкими аналитическими выражениями. Однако, если ограничиться случаем асимметричной антенны и предположить, кроме того, что функция $F(\Theta)$, описывающая ее диаграмма, монотонно убывает с ростом Θ (это предположение эквивалентно переходу от

диаграммы к ее огибающей), можно получить достаточно простое выражение для интегрального закона $\tilde{f}(\chi)$

$$\tilde{f}(\chi) = P[F(\Theta) > \chi] = P[\Theta < \psi(\chi)] = 1/\pi^2 \cdot \psi^2(\chi),$$

где функция $\Theta = \psi(\chi)$ является обратной к функции $F(\Theta) = \chi$.

Огибающие ДН зеркальных антенн во многих случаях можно с достаточной точностью аппроксимировать выражением

$$F(\Theta) = 1/(1 + B \cdot \Theta^p),$$

где B и p —числовые параметры. Для такой диаграммы

$$\tilde{f}(\chi) = 1/\pi^2 [(1/\chi - 1)/B]^{2p}.$$

Последнее выражение справедливо, если $\tilde{f}(\chi) \leq 1$, если же $1/\pi^2 [(1/\chi - 1)/B]^{2p} > 1$, то следует считать, что $\tilde{f}(\chi) = 1$. На рис. 2. 4 в качестве иллюстрации приведена огибающая при $B = 3300$ и $p = 2$. Отметим, что

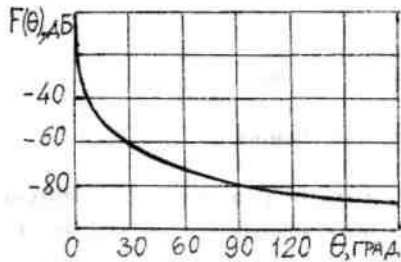


Рис. 2. 4

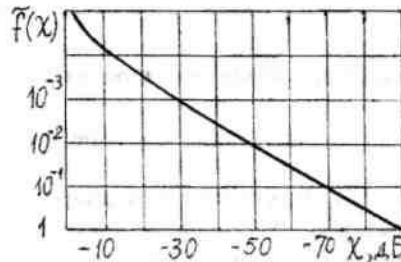


Рис. 2. 5

подобную ДН имеют антенны с очень высокой помехозащищенностью. На рис. 2. 5 приведена интегральная кривая $\tilde{f}(\chi)$ для этой диаграммы. Из нее, в частности, видно, что уровень излучения выше - 50 дБ может наблюдаться с вероятностью 0,01.

Необходимо иметь в виду, что при заданном коэффициенте направленного действия возможности управления формой главного лепестка ограничены, а так как, кроме того, вероятность прихода помехи в секторе главного лепестка обычно мала, то помехозащищенность высоконаправленной антенны в основном определяется уровнем ее бокового излучения. Существует множество критериев, позволяющих с той или иной полнотой охарактеризовать помехозащищенность антенны в секторе ее бокового излучения. Из них следует отметить следующие:

$$K_1 = \max_{\varphi, \Delta} F(\varphi, \Delta); \quad K_2 = [\int_G F^2(\varphi, \Delta) \cdot dG]^{1/2}; \quad K_3 = \int_G F(\varphi, \Delta) \cdot dG,$$

где G —область бокового излучения антенны и $\varphi, \Delta \in G$.

Критерий K_1 классифицирует антенны по уровню максимального бокового лепестка; критерий K_2 — по мощности, излученной в области G ; K_3 — по интегралу напряженности поля в области G . Если помеховая обстановка характеризуется наличием одной помехи, то наиболее точные результаты при сравнении антенн обеспечивает критерий K_3 . Если же имеется большое число помех, направления прихода которых равномерно распределены в пространстве, то лучше сравнивать антенны по критерию K_2 .

Если не исключать возможности прихода помехи в секторе главного лепестка антенны, то сравнение помехозащищенности двух антенн может быть проведено по КНД при наличии многих помех, а при наличии одной помехи — по так называемому КНД по ЭДС. Выбор того или иного подхода к определению сравнительной помехозащищенности антенны определяется назначением и основными параметрами радиосистемы и существующей помеховой обстановкой.

2. 2. 3. Влияние помехозащищенности антенн на характеристики радиосистем

Побочное излучение антенн вызывает помехи другим радиослужбам, работающим в том же или смежном диапазонах частот. Прогнозирование таких помех и их регламентация достаточно сложны, так как требуют анализа совместной работы двух или более радиослужб, относящихся к разным ведомствам и решающих различные задачи. Более просто вопрос о влиянии помехозащищенности проиллюстрировать на примере собственных помех в радиосистеме, когда недостаточная пространственная селективность антенн приводит к ухудшению характеристик этой системы. Наиболее удобно для этой

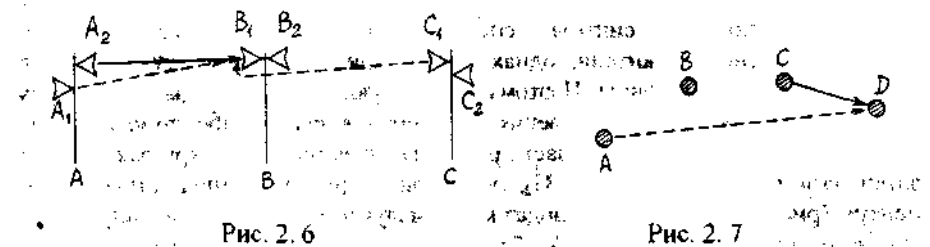


Рис. 2. 6

Рис. 2. 7

цели рассмотреть радиорелейную линию связи (РРЛ), представляющую собой цепочку приемопередающих пунктов. На рис. 2. 6 изображен участок РРЛ, состоящий из трех станций А, В и С. Кроме полезного сигнала от антенны А; станции А, антенна В₁ станции В принимает две помехи от антенн А₁ и С₁. В

связи с используемым на РРЛ двухчастотным планом распределения частот (передача на каждой станции в оба направления идет на одинаковых частотах, частоты передатчиков повторяются через станцию) все эти три сигнала имеют одинаковые частоты и фильтрация помех от антенн A_1 и C_1 может быть обеспечена только направленными свойствами самих антенн. Неполная фильтрация помех приводит к появлению в телефонных каналах дополнительного интерференционного шума. Для того чтобы этот дополнительный шум не оказывал заметного влияния на качественные показатели линии, необходимо, чтобы защитное действие антенн РРЛ, то есть уровень излучения антенн в заднем полупространстве, не превышал -65 ± 75 дБ. Обеспечение столь низкого уровня излучения в широком угловом секторе является сложной технической задачей.

На рис. 2. 7 показана еще одна возможная причина помех на РРЛ. Антенна станции D наряду с полезным сигналом от станции C принимает и помеху от станции A. При двухчастотном плане эти сигналы имеют одинаковые частоты. Обычно уровень помехи AD невелик, так как станции A и D не расположены в зоне прямой видимости. Однако при особых условиях распространения (большая положительная рефракция радиоволн) уровень помехи AD может существенно увеличиться, что приведет к росту интерференционных шумов в каналах связи, причем величина дополнительного шума прямо пропорциональна уровню первых боковых лепестков антенны.

2. 2. 4. Антенны с высокой помехозащищенностью

Для обеспечения высокой помехозащищенности в случае антенн апертурного типа задача может быть сформулирована следующим образом: при заданной форме апертуры необходимо подобрать такое распределение возбуждающего поля, чтобы мощность P_r , излученная в некоторую область пространства Γ , была бы минимальной. Необходимо подобрать распределение поля в раскрыве - это делается математическим путем [5]. В результате создаются способы синтеза специальных ДН, которые улучшают помехозащищенность антенн, однако реализация их требует существенного усложнения схемы антенны. Поэтому существуют иные подходы. Рассмотрим, например, возможность подавления излучения в каком-либо помехоопасном направлении путем затенения части раскрыва антенны. Пусть круглая апертура затенена в двух областях G_1 и G_2 симметрично расположенных относительно центра (рис. 2. 8). Добиться подавления излучения в заданном направлении можно и путем затенения одной области, однако при симметричном затенении сектор подавления можно сделать более широким. На практике целесообразно уточнить величину G экспериментально. Для уменьшения паразитного бокового излучения затеняющие элементы целесообразно выполнять из поглощающего материала.

Апертура в некоторых ситуациях может быть затенена полосками как, как это показано на рис. 2. 9. где κ и ε — соответствующие коэффициенты.

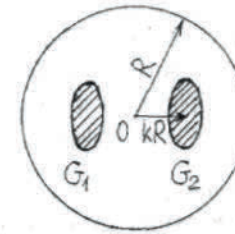


Рис. 2. 8

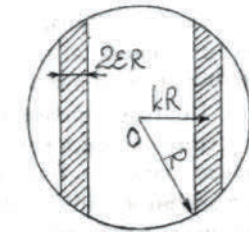


Рис. 2. 9

В качестве примера на рис. 2. 10 приведена исходная диаграмма (сплошная линия) и диаграмма с затенением (пунктир). Направление подавления отмечено стрелкой, где π - помехоопасное направление, а сам УГОЛ $u = \beta R \sin \theta$.

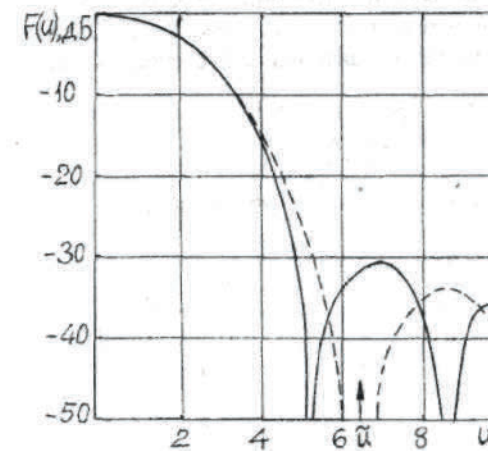


Рис. 2. 10

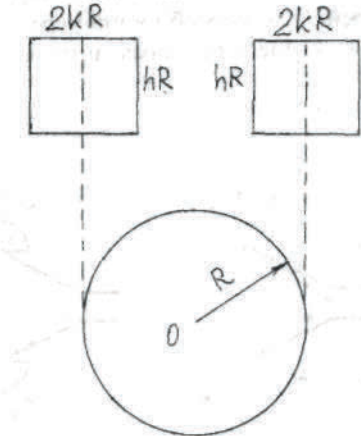


Рис. 2. 11

Существует также способ использования дополнительных излучателей для подавления излучения антенны в каком-либо направлении. На рис. 2. 11 изображена круглая апертура с дополнительными излучателями. Напряженность поля в основном и дополнительном раскрывах, а также размеры дополнительных раскрывов подбираются экспериментально. Для уменьшения размеров дополнительных антенн необходимо увеличивать напряженность поля в них.

2. 3. Дальнее боковое излучение

Более сложной задачей является отыскание распределения интенсивности излучения в угловой области, достаточно далеко отстоящей от главного направления излучения антенны. В этой области искомая характеристика сильно зависит от схемы антенны, ее конструкции, сторонних элементов (в том числе Земли). Поэтому привести единый алгоритм расчета дальнего бокового излучения антенны не представляется возможным.

Основные факторы, определяющие поле излучения антенны в дальнем боковом направлении, это краевые эффекты. Учет влияния края апертуры на характер распределения поля (или токов) можно произвести различными способами: методами моментов, асимптотическим приближением физической оптики, обобщением метода зеркальных изображений, решением интегральных уравнений [5].

Снижение уровня дальнего бокового излучения антенны может быть обеспечено путем уменьшения амплитуды возбуждения контура раскрытия. Для снижения уровня дальнего бокового и заднего излучения антенны могут быть использованы специальные экраны, ослабляющие действие дифракционных полей. Этот способ на примере рупорной антенны показан на рис. 2. 12. Здесь: а - обычная рупорная антенна, б — рупорная антенна со специальными

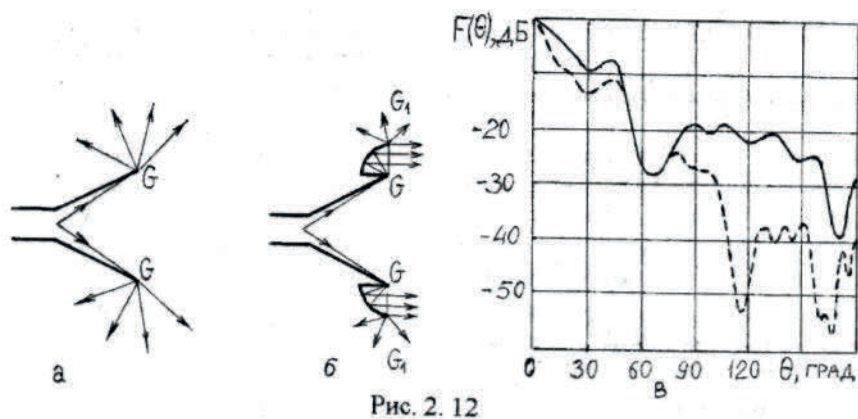


Рис. 2. 12

экранами, выполненными в виде части поверхности параболического цилиндра. Экспериментальные данные, приведенные на рис. 2. 12, в (рупорная антенна — сплошная линия, рупорная антенна с параболическими экранами — пунктирная линия), подтверждают сказанное [5].

Существуют еще два эффективных способа снижения уровня дальнего бокового излучения антенны — деформация контура ее раскрытия и размещение вблизи края апертуры специальных рассеивающих тел, например, переизлучающих пассивных элементов, нагруженных на регулируемые

реактивные сопротивления. В последнем случае в качестве пассивных элементов можно использовать полуволновые диполи или другие слабонаправленные антенны.

2. 4. Помехозащищенность антенн различного типа

2.4. 1. Облучатели

Помехозащищенность направленной антенной системы, зеркальной или решетки, во многом определяется характеристиками слабонаправленных антенн — облучателя или элементов решетки. Рассмотрим облучатели зеркальных антенн в виде рупоров. Предпочтение, отдаваемое последним, объясняется тем, что в подавляющем большинстве случаев в сантиметровом и смежных диапазонах используются различные модификации рупорных антенн, позволяющие при сравнительно простой и технологичной конструкции обеспечить хорошие характеристики. Сам выбор типа рупорного облучателя и его геометрия определяются постановкой задачи. Если основным требованием при конструировании антенны является высокая эффективность, то диаграмма направленности облучателя должна быть близка к столбовой. Если же определяющим фактором является помехозащищенность, рупорный облучатель необходимо выполнить таким образом, чтобы он обеспечивал заданное возбуждение апертуры антенны, причем кромку антенны желательно возбуждать на очень низком уровне.

Простейшие рупорные облучатели — секториальные и пирамидальные,

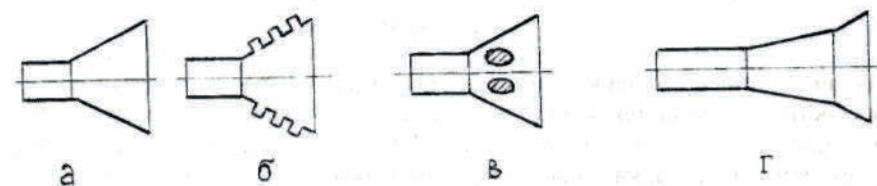


Рис. 2. 13

питаемые прямоугольным волноводом, и конический рупор, питаемый круглым волноводом (рис. 2. 13а)

Специальные рупорные облучатели могут быть выполнены с канавками, (рис. 2.13,б), что позволяет получить осесимметричную диаграмму направленности с куполообразной формой главного лепестка и низким уровнем боковых. Такие антенны применяются в радиосистемах с нешироким рабочим диапазоном. Лучшие результаты с точки зрения оптимизации параметров могут обеспечить рупорные антенны с диэлектрической втулкой (рис. 2.13, в). Подобные антенны позволяют синтезировать практически любую форму главного лепестка диаграммы и все более широко применяются. Основные их

недостатки такие же, как и у рупоров с канавками: сложность конструкции, высокие требования к точности выполнения, узкий частотный диапазон, невозможность использования при больших мощностях.

Рупорные антенны с изломом образующей могут быть как синфазными, так и расфазированным (рис. 2.13,г). Синфазные рупоры с изломом позволяют получить осесимметричную диаграмму направленности с низким боковым излучением. Однако они узкополосны и поэтому применение их ограничено. Расфазированные рупоры с изломом конструктивно просты и обладают хорошими электрическими параметрами в широкой полосе. Они активно применяются в отечественных радиорелейных линиях связи.

Одним из наиболее эффективных и экономических путей улучшения помехозащищенности рупорных антенн является установка за раскрытом рупора пирамидальной или конической насадки, внутренняя поверхность которой покрыта поглощающим материалом. На рис. 2.14а показана конструкция указанной антенны, где 1 — рупор, 2 — насадка. На рис. 2.14,б

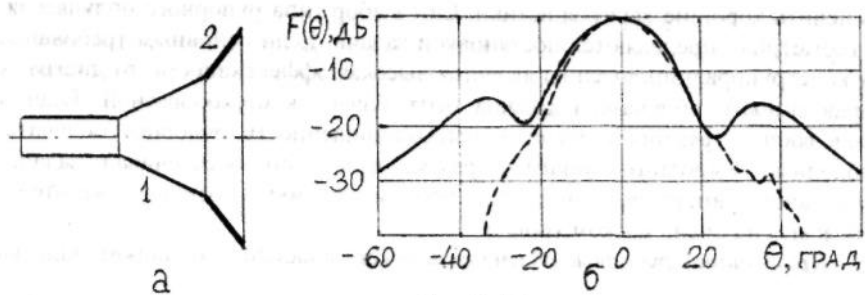


Рис. 2.14

сплошной линией обозначена экспериментальная диаграмма направленности в плоскости E пирамидального рупора, а пунктирной — рупора той же геометрии с поглощающей насадкой. Из рисунка можно видеть высокую эффективность насадки, при этом заметного уменьшения коэффициента усиления не происходит.

2. 4. 2. Осесимметричные зеркальные антенны

Данный класс антенн широко используется в системах связи и других радиослужбах. Наиболее просты параболические (ПА), однако получить в их раскрые хорошее распределение поля трудно. Это а также утечка поля облучателя мимо зеркала и затенение раскрыва определяют невысокую помехозащищенность ПА. Несколько лучшие результаты по уровню бокового излучения можно получить при использовании двух зеркальных антенн — Кассегрена или Грегори (ДАК или ДАТ). Сказанное относится также и к двухзеркальным антеннам с модифицированными поверхностями. Здесь

следует отметить, что обычно модификация зеркал в таких антеннах производится с целью обеспечения максимальной эффективности, при этом общая помехозащищенность антенны может и ухудшиться.

Как отмечалось, существует большое число причин, вызывающих боковое излучение антенны и ухудшающих тем самым ее помехозащищенность.

Регулярные апертурно-дифракционные лепестки, то есть лепестки, вызываемые токами на рабочих поверхностях антенны, определяются распределением амплитуд и фаз этих токов. Чтобы уменьшить побочное излучение этого типа, надо подобрать необходимое распределение токов. Для параболических антенн создание необходимого распределения токов может быть достигнуто только при использовании первичного облучателя со специальной диаграммой направленности. Или могут быть использованы антенны со специальным контуром обреза.

Рассеяние энергии на облучающем устройстве и его креплении как по полю облучателя, так и по полю зеркала может быть значительным. Методом борьбы с ухудшением помехозащищенности из-за указанного фактора является вынос облучателя из апертуры антенны, то есть переход к неосесимметричным антеннам.

Переливные лепестки, определяемые утечкой поля облучателя, оказывают отрицательное влияние на помехозащищенность антенны. Эти лепестки устраняются установкой дополнительных экранов в виде фланцев или бленд, перехватывающих прямое поле облучателя или облучающей системы. Достаточное подавление уровня дальних боковых лепестков может быть достигнуто установкой на кромке основного зеркала или субрефлектора щелевого экрана в виде двух пластин (рис. 2.15,а). Заострение концов полос экрана уменьшает дифракционные эффекты в плоскости подавления.

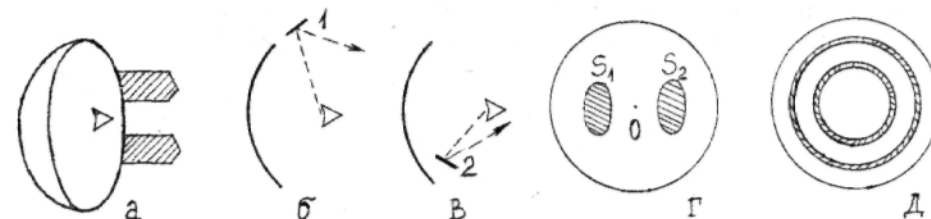


Рис. 2.15

Подавить излучение в заданном направлении можно, используя дополнительные отражатели 1 и 2 (рис. 2.15,б, в). В обоих случаях компенсационный отражатель возбуждается полем излучателя, причем размеры отражателя и его местоположение подбираются экспериментально. На практике компенсационные отражатели удобно устанавливать на кромке зеркала.

Следует иметь в виду, что интегральная помехозащищенность антенны при таком способе подавления излучения ухудшается.

На рис. 2.15.г изображен раскрыв антенны с пластинами S_1 и S_2 из радионепрозрачного материала. Подбором размеров пластин и их положения можно подавлять уровень тою или иного ближнего бокового лепестка.

Осесимметричное подавление бокового излучения можно осуществить с помощью кольцевых затеняющих экранов (рис. 2.15, д). Очевидно, что потери в эффективности в этом случае будут более значительными.

2.4. 3. Методы улучшения помехозащищенности антенн в заднем полупространстве

Данная проблема с точки зрения помехозащищенности важна для радиорелейных линий, где необходимо обеспечить во всей теневой области уровень излучения на 20 - 30 дБ ниже изотропного. Методы снижения теневого излучения включают следующие: уменьшение уровня возбуждения кромки и дифракционной способности кромки, дополнительное затенение дифракционного поля, компенсация полей кромки, расфазировка полей кромки.

Уменьшение уровня возбуждающего кромку поля может быть осуществлено либо созданием в раскрыве специальных распределений, либо нанесением поглощающих материалов на рабочую поверхность зеркала, причем в обоих случаях падает усиление антенны. Достаточно эффективно покрытие поглотителем внутренней поверхности цилиндрической бленды. При этом существенно ослабляется уровень поля от антенны на кромке бленды.

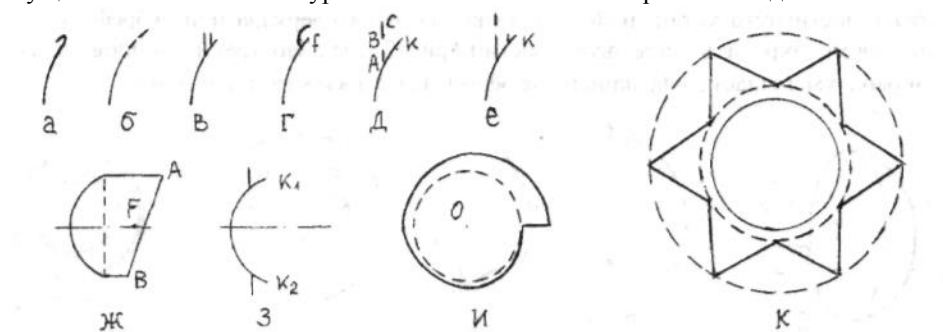


Рис. 2.16

Соответствующие конструкции антенн представлены на рис. 2.16:

1. В ряде случаев целесообразно использование скругления кромок, пример показан на рис. 2.16,а.
2. Дифракционное излучение кромки может быть существенно уменьшено, если переход от металла к свободному пространству выполнить плавным, то есть периферийную область антенны сделать полупрозрачной (рис. 2.16,б).

3. Эффективное ослабление дифракционного поля кромки может быть достигнуто использованием дисковых металлических экранов (рис. 2.16, в).
4. Если профиль экрана выполнить параболическим с фокусом на кромке антенны (рис. 2.16,г), то отраженное от него поле будет сконцентрировано в окрестности главного лепестка антенны и его влияние будет незаметным.
5. Компенсация дифракционных полей кромки может быть осуществлена с помощью щелевого экрана (рис. 2.16,д), при определенных размерах его дифракционного поля на кромках А, В, С компенсируют друг друга в направлении $\theta = 0$.
6. Эффективно использование щелевого экрана совместно со сплошным дисковым экраном (рис. 2.16,е).
7. Подавление теневого излучения расфазировкой дифракционных полей кромки создается применением так называемых скошенных бленд (рис. 2.16,ж).
8. Интенсивное подавление излучения в задней полуплоскости может быть осуществлено с помощью экрана (или фланца), состоящего из двух полудисков (рис. 2.16,з) размеры которых подобраны таким образом, что дифракционные поля от верхнего полудиска сдвинуты по фазе на угол π по отношению к полям от нижнего полудиска ($AK_1 - BK_2 = \lambda/2$).
9. Определенный интерес представляют устройства с плавной расфазировкой дифракционных полей на кромке. Так, если обрез кромки выполнен по спирали (рис. 2.16,и), то фаза полей в направлении $\theta = 0$ изменяется по закону $e^{j\pi r}$ (для $r = 1$ имеет место полная расфазировка).
10. Особый интерес представляют многоугольные экраны, которые наиболее целесообразно использовать в виде фланца на кромке антенны. Хорошие результаты могут быть получены, если выполнить экран в виде многоугольной звезды (рис. 2.16,к). При больших N (число углов) звездчатые экраны обеспечивают интенсивное и широкоугольное подавление излучения, причем чем больше диаметр антенны, тем больше должно быть значение N.

2. 5. Вынесенные защитные экраны

Выше достаточно подробно обсуждались различные методы снижения бокового излучения антенн как во всем пространстве, так и в одном или заранее известных нескольких направлениях.

Последнюю задачу можно также решить и иными методами, а именно, с помощью вынесенных защитных экранов, располагаемых перед антенной по направлению мешающего сигнала. Следует отметить, что идея применения защитных экранов для подавления излучения в нежелательных направлениях давно и плодотворно используется в антенной технике. Так, можно упомянуть о защитном экране для РЛС. Например, подобный экран высотой 30 м, расположенный на расстоянии 150 м от РЛС, осуществляет подавление

отраженного от Земли луча на 20 дБ [5]. Громоздкость данных жранов, стоимость которых нередко соизмерима со стоимостью самой антенны или превышает ее, заставляет искать более простые и экономичные решения.

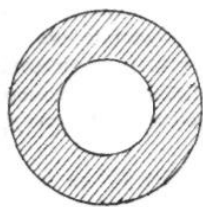


Рис. 2. 17.

Кольцевой экран. Может существенно усилить поле в направлении оси системы из-за наличия зон Френеля, для усиления должна быть выбрана вторая зона. Источником излучения служит сам экран (рис. 2. 17). При других размерах экрана можно получить обратный эффект—глубокое подавление излучения.

Секторный экран. Показан на рис. 2.

18, а. Радиус секторного экрана должен быть равным радиусу первой зоны Френеля. В самом деле, если суммарное поле излучения всех зон Френеля, начиная со второй, дает вклад, равный $-U_0$, а вклад первой зоны Френеля равен $+2U_0$, то достаточно затенить половину

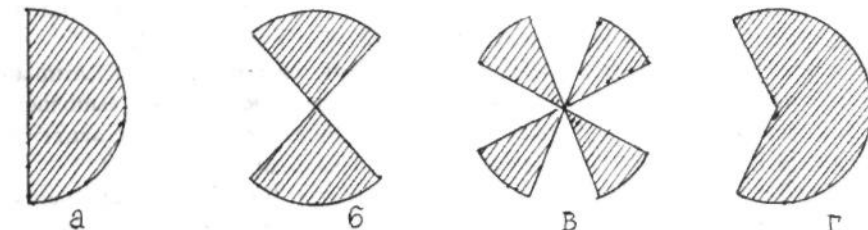


Рис. 2. 18

первой зоны, чтобы получить нулевое значение результирующего поля на оси системы. Поэтому работоспособны и другие модификации секторного экрана, например, показанные на рис. 2. 18,б, в, г.

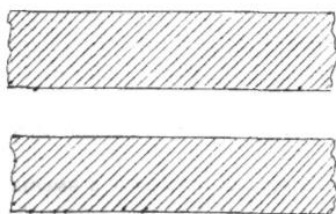


Рис. 2. 19

Щелевой экран. Распределение поля за экраном с заданными параметрами (рис. 2.19), при условии возбуждения его плоской волной, можно рассчитать по формулам, которые выведены аналитически [5]. Протяженности полос экрана здесь приняты бесконечными. Для уменьшения дифракции на боковых краях экрана в случае конечной протяженности полос, что имеет место на практике, их выполняют скошенными.

Фигурные защитные экраны. При

возбуждении экрана сферической волной интенсивность поля на оси за экраном может быть определена по формулам.

также полученным аналитически [5]. Рассмотрено пять различных конфигураций экранов, которые изображены на рис. 2. 20. Профили экранов задаются либо функцией, либо уравнением, либо системой уравнений.

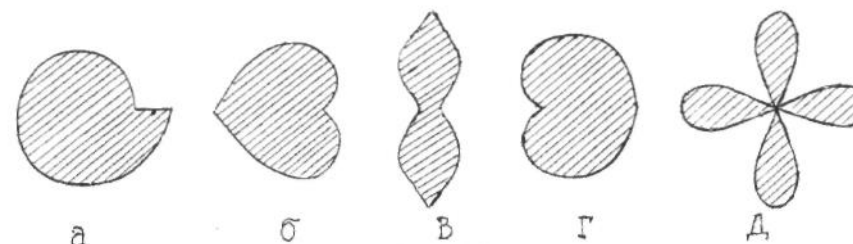


Рис. 2. 20

На рис. 2. 21 в качестве примера пунктирной линией показана диаграмма направленности рупорной антенны с раскрытием $2\lambda \times 2\lambda$. Сплошной линией—диаграмма той же рупорной антенны, но с экраном типа "в" на рис. 2. 20, установленным на расстоянии 20λ перед ней. Как видно из графиков экран типа восьмерки обеспечивает эффективное подавление излучения: ширина провала в диаграмме направленности по уровню -15 и -10 дБ составляет соответственно 10° и 16° .

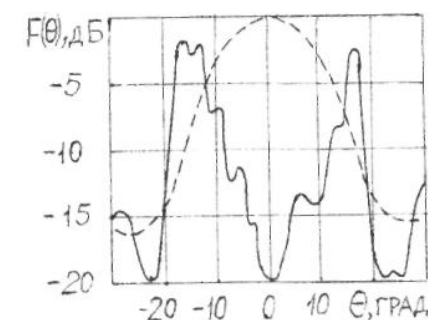


Рис. 2. 21

Установка защитного экрана на практике позволяет существенно снизить уровень побочного излучения антенны (особенно сзади). При достаточно большом расстоянии от рупора до экрана его поверхность практически не затеняет зеркало антенны.

Многосвязные защитные экраны. Рассмотренные выше защитные экраны имеют недостаток: сектор подавления излучения сравнительно невелик. Это обстоятельство затрудняет их использование для защиты от воздействия помех антенн с большим раскрытием. С целью расширения сектора подавления излучения используются многосвязные экраны.

Многокольцевой защитный экран. Он состоит из N радионепрозрачных концентрических колец, внутренние и внешние радиусы которых равны r_{n1} и r_{n2} соответственно (рис. 2. 22, и). Существуют формулы [5], по которым можно определить распределение поля за экраном, облучаемым источником сферической волны, расположенным на расстоянии R_0 от центра жрана. Многокольцевым экранам свойственна многозначность выбора радиусов r_{n1} и

р_{п2} Эта избыточность может быть использована для придания направленным свойствам системы дополнительных возможностей, в частности расширения сектора подавления.

Многощелевой экран. Конфигурация данного типа экрана приведена на рис. 2. 22,5. Он достаточно диапазон и обеспечивает существенно более широкий сектор подавления излучения.

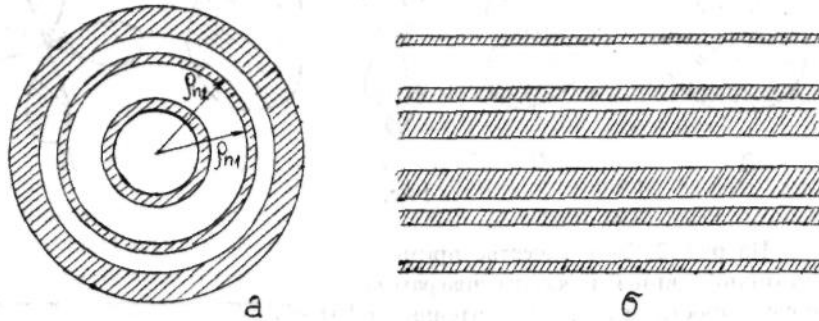


Рис. 2. 22

Экран из фазосдвигающего материала. Обычно выполняется из радиопрозрачного материала, фазовая скорость волн внутри которого отлична от скорости света. Конструкции этого экрана бывают различными, но чаще всего он оформлен в виде круглого диска.

Рассмотренные выше вынесенные защитные экраны находят разнообразное применение. Одна из возможных областей их использования - подавление излучения зеркальных антенн в тех направлениях, в которых поле практически полностью определяется полем излучения облучателя антенны.

3. ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

3.1. Исходные соображения

Экранирование является конструкторским средством ослабления электромагнитного поля помех в пределах определенного пространства и предназначено для увеличения помехозащищенности и обеспечения ЭМС РЭА. Конструкции, реализующие указанные требования, называются экранами. Экраны применяются как для отдельных элементов, функциональных узлов, блоков аппаратуры, так и для радиоэлектронных устройств в целом, которые могут быть либо источниками, либо рецепторами помех. Экранирование является одним из эффективных средств защиты РЭС и аппаратуры от действия мощного электромагнитного излучения, возникающего при атомных и термоядерных взрывах, а также от излучения радиолокационных установок.

работающих в импульсном режиме. Необходимость экранирования должна быть обоснована и рассматриваться только после того, как полностью исчерпаны конструкторские методы оптимальной компоновки аппаратуры.

В общем случае действие электромагнитного экрана как линейной системы характеризуется следующими основными параметрами и характеристиками.

Коэффициент экранирования $K_э$ представляет собой отношение напряженности электрического E_1 или магнитного H_1 поля в какой-либо точке защищаемого пространства при наличии экрана к напряженности E_2 или H_2 воздействующего поля в той же точке при отсутствии экрана

$$K_э = K_{эE} = E_1 / E_2 \quad \text{или} \quad K_э = K_{эH} = H_1 / H_2.$$

На практике действие экрана принято оценивать эффективностью экранирования (экраным затуханием) [3]

$$A = 20 \lg | 1 / K_э | = 20 \lg | E_2 / E_1 |, \text{ дБ.}$$

Эффективность экранирования экрана как линейной системы остается неизменной независимо от расположения помехонесущего электромагнитного поля внутри или вне экрана. Рассмотренный принцип обратимости экрана позволяет при расчетах эффективности экранирования в случае необходимости менять местами источник и рецептор электромагнитного поля.

Электромагнитный экран одновременно с выполнением основной функции, то есть ослабления поля помех, оказывает воздействие на собственные параметры цепей и контуров экранируемого объекта, что связано с перераспределением электромагнитного поля при установке экрана. Это влияние оценивается с помощью коэффициента реакции экрана, под которым понимается отношение напряженности электрического $E_{отр}$ или магнитного $H_{отр}$ отраженного поля в какой-либо точке пространства помехонесущего поля при наличии экрана к напряженности воздействующего поля E или H в той же точке при отсутствии экрана

$$P = E_{отр} / E \quad \text{или} \quad P = H_{отр} / H.$$

Поминальное значение эффективности экранирования рассчитывается исходя из требуемого подавления электромагнитных помех и определяется конкретными условиями проектирования аппаратуры. Но найденному значению эффективности экранирования, а также с учетом допустимых пределов изменения параметров экранируемых элементов определяются материал, геометрические размеры экрана и условия размещения элементов внутри него. При этом необходимо иметь в виду, что эффективность

экранирования в значительной степени зависит от неоднородностей и разрывов экрана, возникающих за счет сварных швов, соединений, отверстий и т. д.

Помимо обеспечения заданной эффективности и коэффициента реакции к экрану могут предъявляться дополнительные конструкторские требования, связанные с особенностями проектируемой аппаратуры.

1. Экран является внешним кожухом аппаратуры и согласно общему ТЗ при его проектировании должны учитываться требования нормального теплового режима, пыле- и влагозащищенности, устойчивости к вибрационным и ударным нагрузкам, эргономики, технологичности конструкции и т.д.
2. Экранируются отдельные элементы и узлы аппаратуры, форма и размеры которых определяют конструкцию экрана. При этом экран должен компоноваться в общем устройстве и обеспечивать нормальный тепловой режим, технологичность конструкции, ремонтпригодность и т. д.
3. Экран проектируется как самостоятельное сооружение для защиты от внешних электромагнитных полей или локализации целого радиоэлектронного комплекса, проведения специальных радиотехнических измерений в условиях, близких к условиям свободного пространства, а также для настройки и регулировки аппаратуры.

3. 2. Характер электромагнитных полей как источника помех

В общем случае функциональные узлы РЭС можно представить в виде совокупности элементарных электрических и магнитных излучателей. При этом электрическими излучателями являются цепи аппаратуры с высоким напряжением и малым током, а магнитными излучателями — цепи с большим током и малой разностью потенциалов. Практически токи, протекающие по этим элементарным излучателям, могут иметь сложную зависимость от времени. Однако на основании принципа суперпозиции будем считать, что излучатели возбуждаются синусоидальными токами, являющимися гармониками общего тока и действие каждой гармоники допустимо рассматривать отдельно.

Помехонесущие электромагнитные поля создаются токами смещения, возникающими за счет разности потенциалов между элементами конструкции (электрический вибратор) и токами проводимости, текущими по этим элементам (магнитный вибратор). Амплитуды этих полей пропорциональны разности потенциалов и токам проводимости и в окружающем пространстве складываются с учетом фаз и направлений [6].

Как показано в курсе электродинамики, на расстоянии от места излучения, большем λ_0 (дальняя зона), образуется плоская однородная волна, у которой в любой точке пространства векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} синфазны, перпендикулярны друг другу и направлению излучения, а отношение \mathbf{E} / \mathbf{H} равно характеристическому сопротивлению среды (воздуха) $Z_{\text{св}} = 120 \pi$.

Интенсивность этого поля при гармонических колебаниях увеличивается пропорционально частоте и уменьшается пропорционально расстоянию до места излучения r

На расстоянии $r < \lambda_0 / 2\pi$ (ближняя зона) заметно увеличиваются относительно других составляющих радиальные составляющие электрического поля E_r (электрический вибратор) и магнитного поля H_r (магнитный вибратор), в связи с чем структура поля сильно меняется и начинает напоминать структуру статического электрического и магнитного полей соответственно. Анализируя уравнения для элементарного электрического вибратора и магнитного вибратора, можно сделать следующие выводы:

1. Поля ближней зоны элементарного электрического излучателя и элементарного магнитного излучателя существенно неравномерны, а их интенсивность быстро убывает с расстоянием (обратно пропорционально кубу и квадрату расстояния).
2. Составляющие напряженности электрического и магнитного полей в ближней зоне сдвинуты по фазе на 90° . Поэтому вектор Пойнтинга оказывается чисто мнимым со средним значением равным нулю, и, следовательно, рассматриваемые поля являются реактивными. В результате перенос помех в ближней зоне происходит за счет явлений электрической и магнитной индукции.
3. Вблизи элементарного электрического излучателя создается электромагнитное поле, основная энергия которого сосредоточена в электрической составляющей (электрическое поле).
4. Характеристическое сопротивление среды (Z_E) в ближней зоне элементарного электрического излучателя: $Z_E = E_\theta / H_\phi = 1 / j\omega\epsilon_0 r$.
5. Вблизи элементарного магнитного излучателя создается электромагнитное поле, основная энергия которого сосредоточена в магнитной составляющей (магнитное поле).
6. Характеристическое сопротивление среды (Z_H) в ближней зоне элементарного магнитного излучателя: $Z_H = E_\theta / H_\phi = -j\omega\mu_0 r$.
7. Характеристическое сопротивление среды для элементарного электрического излучателя Z_E с увеличением расстояния от него уменьшается, а характеристическое сопротивление среды для элементарного магнитного излучателя Z_H увеличивается, и оба стремятся к значению $Z_{\text{св}} = 120 \pi$, достигая его в дальней зоне при $r > \lambda_0 / 2\pi$, где структура полей преобразуется в структуру поля плоской волны. График зависимости Z_E и Z_H от расстояния дан на рис. 3.1.

В соответствии с рассмотренными особенностями электромагнитного поля в дальней и ближней зонах экраны, предназначенные для его ослабления, делятся на электромагнитные, электростатические и магнитостатические. При этом не происходит какой-либо противопоставления отдельных видов экранирования, подобно тому как электро- и магнитостатические поля являются частными случаями электромагнитного поля.

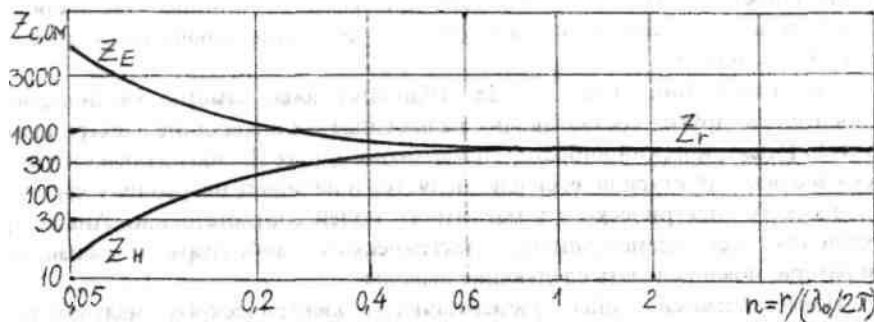


Рис. 3.1

При расчете электромагнитных экранов используется теория электромагнитного поля, основанная на решении уравнений Максвелла. Особенностью анализа экранов, предназначенных для ослабления в ближней зоне практически существующих отдельно электрических и магнитных полей, является возможность применения более простых методов теории цепей с использованием соответственно представлений о взаимных емкостях и индуктивностях между экранируемыми друг от друга элементами.

При конструировании РЭС в пределах одного устройства в большинстве случаев выполняется условие ближней зоны $r_0 < \lambda_0 / 2\pi$, что позволяет оценивать перенос помех между элементами аппаратуры, подверженными влиянию, и эффективность экранирования с помощью эквивалентных схем с сосредоточенными параметрами.

3.3. Экранирование электромагнитного поля

Квазистатические магнитные поля способны возбудить в металлическом экране большие токи, которые при толщине экрана меньше глубины проникновения поля в данный металл δ_c создают магнитные поля по обе стороны металлической поверхности экрана, что способствует передаче энергии этого поля через металлическую стенку экрана. Это требует специальных подходов при создании экранов для квазистатических полей

Экранирование квазистатических электрических полей обеспечивается металлическим экраном с $\mu = 1$ и толщиной $d \ll \delta_c$, что объясняется шунтирующим действием металлов, обладающих большой проводимостью σ , при которой согласно $J_{np} = \sigma E$ электрическое поле на $E = J_{np} / \sigma$ металлических стенках экрана практически отсутствует и энергия этого поля не передается через металлические стенки экранов. В этом случае любая конструкция замкнутого металлического экрана удовлетворяет основным требованиям и практически определяющими могут оказаться требования жесткости и

устойчивости к механическим воздействиям, стойкости против коррозии, технологичности конструкций и т. д.

Рассмотрим процесс эффективного экранирования электромагнитного поля дальней зоны (плоской волны) при нормальном (наиболее помехообразующем) ее падении на металлическую пластину толщиной d и бесконечно большой протяженности (рис. 3.2).

В курсе электродинамики отмечалось, что при падении

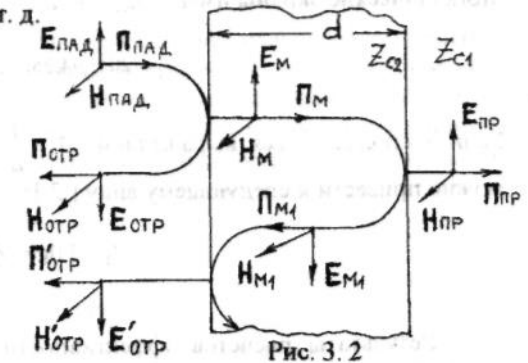


Рис. 3.2

плоской волны на поверхность металлической пластины основная энергия отразится от ее поверхности, и лишь очень небольшая часть пройдет внутрь металла, распространяясь в нем с большим коэффициентом затухания. Та часть энергии, которая достигает противоположной поверхности пластины, повторно отразится в противоположном направлении. Такие отражения (рис. 3.2) внутри пластины будут многократными. Общая эффективность экранирования металлической пластиной A_0 является суммой экранирования за счет поглощения энергии в толщине d материала экрана

$$A_1 = 8,69 \alpha d = 8,69 \frac{d}{\delta_c} = 8,69 \sqrt{\pi f \mu_0 \sigma},$$

двух первых отражений

$$A_2 = 10 \lg \left[\frac{P_{пад}}{P_{пад} - P_{отр}} \right] = 20 \lg \left[\frac{1}{1 - r^2} \right] = 20 \lg \frac{(Z_{c1} + Z_{c2})^2}{4Z_{c1}Z_{c2}},$$

а также многократных последующих отражений

$$A_3 = 20 \lg \left[1 + \left(\frac{Z_{c1} - Z_{c2}}{Z_{c1} + Z_{c2}} \right)^2 e^{-2\alpha d} \right]$$

где α , Z_{c1} , Z_{c2} , δ_c определяются

$$\alpha = \beta = \sqrt{\pi f \mu_0 \sigma} \text{ (металл)}; Z_c = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}; Z_{c1} = \sqrt{j\omega \mu_0 \sigma} = (1 + j)\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}; \delta_c = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}}.$$

Чаще всего внутри экрана и вне его находится воздушная среда с $Z_{c1} = 377$ Ом. Металлические экраны имеют $Z_{c2} \ll Z_{c1}$. В этом случае

$$A_2 = 20 \lg(94,25 / \sqrt{2\pi f \mu_s / \sigma})$$

Если воспользоваться выражением $\delta_s = \frac{1}{\alpha} = 1 / \sqrt{\pi f \mu_s \sigma}$, то последнюю формулу можно привести к следующему виду [2]:

$$A_2 = 20 \lg(67 \delta \sigma)$$

Результаты расчетов эффективности экранирования электромагнитных полей плоской металлической пластиной по приведенным выше формулам позволяют сформулировать следующие выводы

1. Металлические экраны при практически приемлемых толщинах обеспечивают хорошую эффективность экранирования на всех частотах радиодиапазона, в том числе и на нижних частотах радиовещания.
2. Эффективность экранирования растет с увеличением частоты, магнитной проницаемости μ , проводимости σ и толщины экрана d .
3. В диапазоне СВЧ толщина металлического экрана может иметь несколько микрон и выполняется в виде тонкой металлической пленки, нанесенной на экранируемое изделие.
4. При $d \ll \delta_s$ основная часть эффективности экранирования A_0 металлических экранов определяется первыми двумя отражениями от их поверхностей; при $d \gg \delta_s$, имеющем место в диапазоне СВЧ, A_s сильно возрастает из-за потерь в толщине экрана.
5. Повторные отражения в металлической толще экрана практически не увеличивают общую эффективность экранирования и A_3 можно не учитывать при проведении расчетов.
6. Большое значение общей эффективности экранирования $A_0 = A_1 + A_2$ допускает уменьшение толщины экрана для низких частот примерно на порядок по сравнению с глубиной проникновения. Это приводит к снижению затухания экрана A_1 и снижению Z_{c2} , а следовательно, к росту затухания за счет отражений A_2 . Однако последнее остается достаточно большим для того, чтобы обеспечить необходимую эффективность экранирования во многих практических применениях.
7. В рассматриваемых случаях было принято нормальное падение волны на поверхность экрана, но с изменением поляризации и угла падения будут меняться коэффициент отражения (увеличиваться) и коэффициент преломления (уменьшаться), а следовательно, изменится A_0 .

3.4. Экранирование магнитного поля

В радиоэлектронной аппаратуре функциональные узлы и элементы, в которых имеются большие токи и малые напряжения, создают в ближней зоне электромагнитные поля с преобладающей магнитной составляющей. При этом рассматриваемые помехи определяются в ближней зоне магнитной индукцией, как показано на рис. 3.3, где представлена эквивалентная схема индуктивной связи между электрическими цепями источника и рецептора помех.

Преимущественное влияние магнитных полей на аппаратуру имеется также в случае, если рассматриваемое устройство невосприимчиво к электрической составляющей или последняя много меньше за счет свойств излучателя или соответствующей поляризации электромагнитного поля помех.

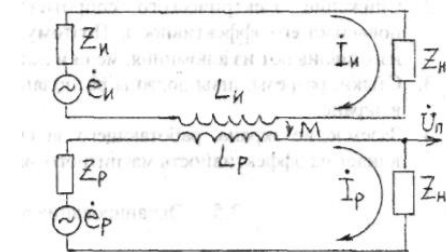


Рис. 3.3

Теоретические соображения и накопленная практика дают основание сформулировать основные требования, предъявляемые к магнитостатическим экранам [3].

1. Магнитная проницаемость материалов и экрана должна быть возможно более высокой. Наибольшая эффективность экранирования обеспечивается при использовании магнитомягких низкочастотных материалов с высокой магнитной проницаемостью (электротехнические стали и пермаллой).
2. Рост толщины стенок экрана приводит к увеличению эффективности экранирования, однако при этом следует принимать во внимание возможные конструктивные ограничения по массе и габаритам

При конструировании ВЧ функциональных узлов аппаратуры в качестве материала экранов чаще всего применяют немагнитные металлы, так как на высоких частотах они обеспечивают достаточную эффективность экранирования при рациональном выборе толщины материала и вносят в экранируемые узлы аппаратуры меньшие потери по сравнению с магнитными металлами.

Эквивалентная глубина проникновения для разных металлов в области высоких частот достаточно мала, следовательно, экран из любого металла сравнительно небольшой толщины действует вполне эффективно. Поэтому при выборе материала экрана и его толщины наряду с требованиями обеспечения заданной эффективности экранирования и допустимых электрических потерь определяющими могут оказаться требования устойчивости к механическим воздействиям, стойкости против коррозии и т. д.

Следовательно, основные требования, которые предъявляются к экранам, действующим по принципу вытеснения магнитного поля полем вихревых токов в экране, можно сформулировать следующим образом.

1. Толщина экрана должна выбираться много больше эквивалентной глубины проникновения. Этому условно могут удовлетворять как немагнитные, так и магнитные материалы, однако применение последних возможно в случае, если вносимыми ими потерями в экранируемые узлы аппаратуры можно пренебречь.
2. Снижение электрического сопротивления вихревым токам в экране повышает его эффективность. Поэтому чаще всего высокочастотные экраны изготавливают из алюминия, меди и латуни.
3. Стыки, разрезы, швы должны располагаться в направлении вихревых токов в экране.
4. Заземление экрана, работающего за счет образования вихревых токов не влияет на эффективность магнитного экранирования.

3.5. Экранирование электрического поля

В РЭС функциональные узлы и элементы, в которых имеются большие напряжения и малые токи, создают в ближней зоне электромагнитные поля с преобладанием электрической составляющей. При этом рассматриваемые помехи в ближней зоне определяются электрической индукцией. Перенос помех электрической индукцией (рис. 3. 4) наиболее распространен в аппаратуре.

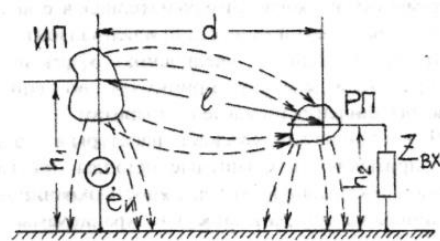


Рис. 3. 4

Преимущественное влияние электрических полей на аппаратуру имеется также в случае, если рассматриваемое устройство нечувствительно к магнитной составляющей или последняя значительно меньше за счет свойств излучателя или соответствующей поляризации электромагнитного поля помех.

Для экранирования

электрического поля все металлические элементы конструкции должны быть соединены с общим корпусом или землей РЭС. Основное внимание при этом должно быть обращено на конструктивное выполнение присоединения экрана к корпусу прибора, которое в значительной степени определяет экранирующее действие. Следует избегать применения длинных соединительных проводников для заземления экрана на корпус особенно в диапазоне высоких частот из-за индуктивного характера их сопротивления.

Таким образом, основные требования, которые предъявляются к электрическим экранам, можно сформулировать следующим образом.

1. Конструкция экрана должна выбираться такой, чтобы силовые линии электрического поля в основном замыкались на стенки экрана, не выходя за его пределы.
2. В области низких частот (при $t < \delta$, где t — толщина экрана) эффективность электростатического экранирования практически определяется качеством заземления экрана на корпусе прибора и мало зависит от материала и его толщины.
3. В области высоких частот (при $t > \delta$) эффективность экрана, работающего в электромагнитном режиме, наряду с качеством заземления определяется его толщиной, проводимостью и магнитной проницаемостью экрана. На основе расчетных данных исследуем зависимость эффективности экранирования плоского металлического экрана, изготовленного из магнитного и немагнитного металлов, для различного вида полей от частоты при $y = 1$ м (расстояние) и $t = 1$ мм. На рис. 3. 5 кривые 1 — для меди; кривые 2 — для стали, $\mu_r = 1000$; кривые 3 — для стали, $\mu_r = 100$; позиция а — для электрического поля, б — для электромагнитного поля и в — для магнитного поля. Анализируя полученные результаты, можно заключить, что

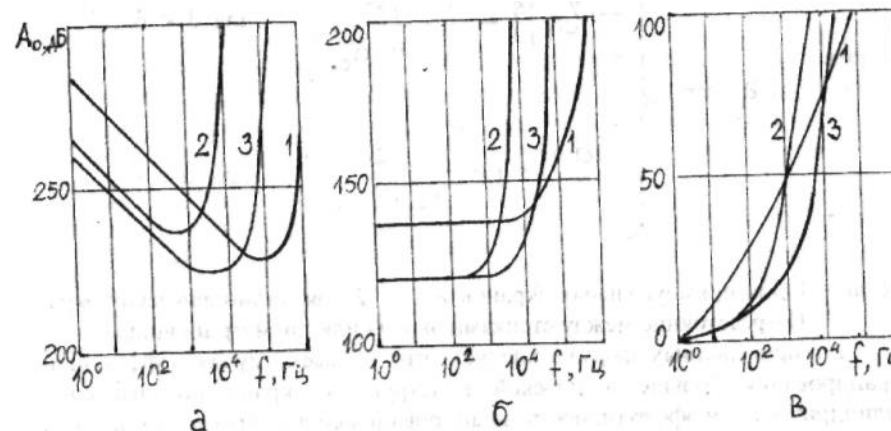


Рис. 3. 5

электрическое поле экранируется существенно лучше, чем магнитное, а поле плоской электромагнитной волны лучше, чем магнитное, но хуже, чем электрическое. Поэтому конструктивно сложнее обеспечить защиту от воздействия магнитных полей.

3.6. Однослойные экраны

Прямоугольные и цилиндрические экраны. Основные их конструкции приведены на рис. 3.6. Форма этих экранов влияет на коэффициент экранирования, поскольку от нее зависят коэффициенты преломления и отражения волн на границах раздела двух сред'

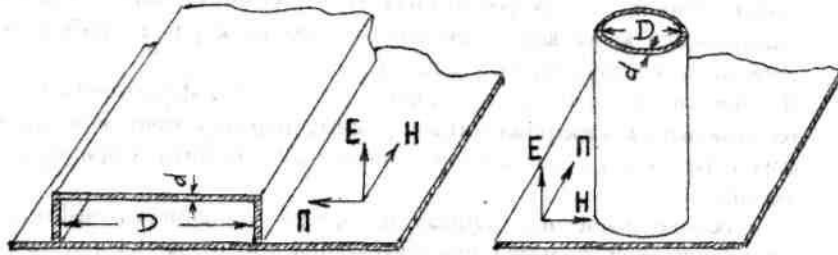


Рис. 3. 6

Эффективность экранирования экранов можно определить по формулам

$$A_0 = \begin{cases} \frac{1}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{Dd}{\mu m \delta_c^2} \right)^2 \right] & \text{для } d < \delta_c; \\ \frac{d}{\delta_c} + \ln \left[\frac{D}{\mu 2\sqrt{2} m \delta_c} \right] & \text{для } d > \delta_c, \end{cases}$$

где $m = 1$ для прямоугольных экранов и $m = 2$ для цилиндрических экранов,

D —расстояние между стенками экрана или диаметр цилиндра.

Из приведенных формул следует, что во всех случаях эффективность экранирования больше в плоской конструкции экрана по сравнению с цилиндрической и эффективность экранирования сильно возрастает в области $d > \delta_c$

В практических задачах часто требуется определить толщину экрана d так, чтобы экран при заданных частоте и размере обеспечивал необходимую эффективность экранирования. Согласно последним формулам для A_0 имеем

$$d = \begin{cases} \frac{m m \delta_c^2}{D} \sqrt{e^{2A_0} - 1} & \text{для } d < \delta_c; \\ \delta_c \left[A_0 - \ln \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{D}{\mu m \delta_c} \right] & \text{для } d > \delta_c. \end{cases}$$

При определении d расчет необходимо начать с выбора материала, затем определить δ_c , задаться величиной D и в зависимости от того, какой будет величина d , выбрать для расчета одну из формул. Заметим, что приведенные формулы справедливы при $d \ll D$, что на практике всегда имеет место.

При конструировании экранов следует учитывать возможность возникновения резонансных явлений в экране. Любой электромагнитный экран, как объемный резонатор, обладает рядом резонансных частот, которым соответствует $\lambda_p = \frac{l}{2} n$, где $n = 1, 2, 3, \dots$; l —размер внутренней области экрана

в одном из направлений. Кроме этого, значение резонансных частот зависит от компоновки, размеров и материала, размещаемых внутри экрана элементов и узлов аппаратуры. Если частота электромагнитного поля помехи совпадает с одной из резонансных частот экрана или близка к ней, то напряженность электромагнитного поля в экранируемой области возрастает пропорционально добротности экрана и, следовательно, эффективность экранирования резко снижается.

Прямоугольный экран (рис. 3.7) из ферромагнитного материала используется для экранирования квазистатических магнитных полей. При этом происходит шунтирование магнитного поля экраном вследствие его малого магнитного сопротивления. Величина магнитного сопротивления R_M

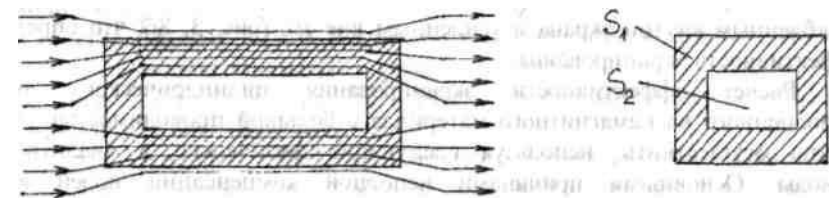


Рис. 3. 7

оказывается магнитопроводом с магнитной проницаемостью μ_a , длиной l вдоль линии магнитной индукции и поперечным сечением S , определяется соотношением

$$R_M = l / \mu_a S.$$

Эффективность экранирования определяется отношением магнитного потока в экранируемой области в отсутствие экрана Φ_1 к магнитному потоку в этой же области при наличии экрана Φ_2 . В рассматриваемом случае поперечное

сечение экранируемой области обозначено S_2 , а поперечное сечение магнитопровода — S_1 . Учитывая, что распределение магнитного потока обратно пропорционально магнитному сопротивлению, окончательно находим

$$A_2 = 20 \lg \frac{\Phi_2}{\Phi_{20}} = 20 \lg [(\mu S_1 + S_2) / S] \approx 20 \lg \left(1 + \frac{\mu S_1}{S_2} \right)$$

где $S = S_1 + S_2$.

Цилиндрический экран, применяемый при экранировании высокочастотных магнитных полей, помещают так, чтобы направление его оси совпадало с направлением линий магнитной индукции (рис. 3.8, а). В этом случае

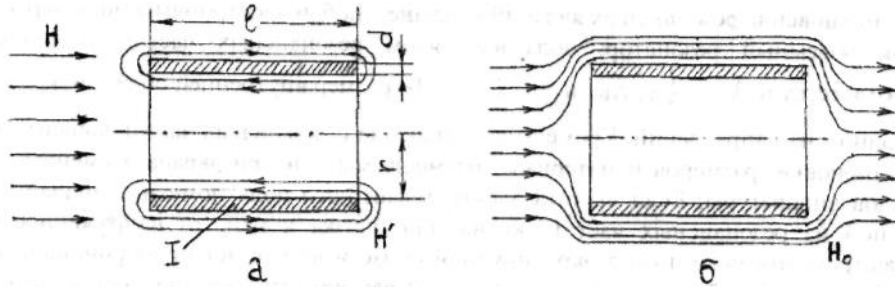


Рис. 3.8

в нем, как в короткозамкнутом витке, согласно закону электромагнитной индукции, наводится ЭДС, создающая ток, магнитное поле которого направлено внутри цилиндра встречно, а за его пределами — в ту же сторону, что и возбуждающее поле (рис. 3.8, а). Результирующее поле оказывается ослабленным внутри экрана и усиленным вне его (рис. 3.8, б) что определяет эффективность экранирования.

Расчет эффективности экранирования цилиндрического экрана, выполненного из немагнитного материала с большой проводимостью (меди), можно осуществить, используя следующие физические и аналитические выводы. Основными причинами неполной компенсации полей внутри экранируемой области является, во-первых, наличие активных потерь энергии в экране, что не позволяет наведенному в экране вихревому току I_0 полностью компенсировать помехообразующий поток своим противоположным потоком; и, во-вторых, наличие краевых эффектов, по-разному искажающих структуру компенсируемого и компенсирующего полей на краях экрана. Если длина экрана l выбрана достаточно большой, то краевыми эффектами можно пренебречь и предположить, что коэффициент экранирования определяется только активными потерями электромагнитной энергии в экране

$$A_2 = 20 \lg \frac{e_2}{U_1}$$

где $e_2 = -d\Phi/dt$ — наведенная в экране ЭДС; U_1 — падение напряжения на активной составляющей сопротивления экрана.

Окончательная расчетная формула имеет вид

$$A = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\omega \mu_0 \sigma r d}{2} \right)^2 \right]$$

Экранирующее действие за счет вытеснения магнитного поля полем вихревых токов в экране, изготовленном из любого металла, в значительной степени характеризуется произведением $\mu \delta$. В результате сталь дает больший экранирующий эффект, чем немагнитные металлы. Однако применение стального экрана возможно в тех редких случаях, когда вносимые потери не сказываются на работоспособности экранируемых узлов и элементов РЭА. Например, сталь не применяется для экранов высокочастотных контуров аппаратуры из-за больших вносимых потерь за счет малой электропроводности и потерь на гистерезис при перемагничивании. Стыки и швы должны располагаться в направлении вихревых токов в экране, протекающих в плоскости, перпендикулярной направлению помехонесущего магнитного поля. При этом обеспечивается меньшее сопротивление вихревым токам, определяющим эффект экранирования.

Основные рекомендации по конструированию однослойных экранов для высокочастотных магнитных полей можно сформулировать следующим образом:

1. Изготавливать их надо из алюминия, меди, латуни как имеющих большую проводимость.
2. Рост толщины стенок экрана улучшает эффективность экранирования, но способствует увеличению массы и габаритов экрана.
3. Стыки, швы, разрезы должны быть перпендикулярны линиям магнитной индукции помехонесущего поля.

Сетчатые экраны. Действие сетчатого однослойного экрана на помехонесущее магнитное поле, как и сплошного экрана, основано на возбуждении токов, наводимых магнитной составляющей поля в направлении, перпендикулярном линиям магнитной индукции. В результате проволоки, расположенные в направлении помехонесущего поля, практически не оказывают влияния на эффективность экранирования сетчатого экрана. Магнитное поле возбуждаемых токов вблизи перпендикулярно ориентированных проволок существенно отличается от однородного магнитного поля, создаваемого током, равномерно распределенным по сечению сплошного экрана. Однако на расстоянии, превышающем шаг сетки, это различие уменьшается и при дальнейшем его увеличении перестает

сказываться. Проведенные исследования эффективности экранирования сетчатых экранов позволили выявить следующие общие закономерности.

1. При шаге сетки $b = \text{Const}$ и одном и том же материале сетки из толстой проволоки радиусом r_0 эффективнее сетки из тонкой проволоки как в области низких ($\delta_c > 2r_0$), так и высоких ($\delta_c < 2r_0$) частот.
2. При $b / r_0 = \text{Const}$ редкие сетки из однородного металла на низких частотах более эффективны, а на высоких частотах менее эффективны, чем густые. Это объясняется тем, что на низких частотах основное влияние оказывает активное сопротивление проволоки, а на высоких частотах — индуктивность, которая мало зависит от r_0 .
3. При одинаковых b и r_0 в области низких частот медные сетки эффективнее стальных за счет более высокой удельной проводимости меди, однако с ростом частоты это различие уменьшается.
4. Для нормальной работы экрана следует обеспечивать надежный электрический контакт в местах соединений отдельных частей сетки.

3.7. Многослойные экраны

Многослойные комбинированные конструкции экранов, состоящие из последовательно чередующихся немагнитных (медь, алюминий, латунь) и магнитных (сталь, пермаллой) слоев, применяются для получения высокой эффективности экранирования в широком частотном диапазоне, включая область низких частот, и обеспечения малых вносимых потерь в экранирующие цепи РЭА. При рассмотрении принципа работы однородного электромагнитного экрана ранее показано, что экранирующий эффект определяется совместным ослаблением энергии за счет поглощения в толще металла и отражения, обусловленного различными значениями характеристических сопротивлений среды на границах внешняя среда — металл и металл — экранирующая область. С падением частоты коэффициент затухания в металле уменьшается и эффективность экранирования за счет поглощения также уменьшается. Поэтому экран, состоящий из нескольких тонких слоев различных металлов, в низкочастотной области за счет увеличения отражений обладает большим экранирующим действием по сравнению с однородным экраном той же толщины.

Эффективность экранирования многослойного экрана зависит от применяемых материалов, их расположения и соотношения толщин. Например, сочетание сталь — медь — алюминий обеспечивает меньшую эффективность экранирования, чем медь — сталь — алюминий. Кроме того, за счет внутреннего слоя экрана, выполненного из немагнитного металла, уменьшаются вносимые потери в экранируемые цепи аппаратуры по сравнению со сплошным магнитным экраном такой же толщины. Многослойная конструкция экрана оказывается особенно эффективной при экранировании квазистатических магнитных полей большой напряженности. В случае однослойного магнитного

экрана при большом значении напряженности магнитной составляющей поля материал экрана входит в насыщение и магнитная проницаемость сто резко снижается. Чтобы исключить насыщение, первый слой составного двухслойного экрана, обращенный к источнику магнитного поля, выполняется из магнитного материала с низкой магнитной проницаемостью, имеющего высокий уровень насыщения, или немагнитного металла, а второй слой — из материала с высокой магнитной проницаемостью и низким уровнем насыщения. При этом первый слой экрана уменьшает напряженность магнитного поля до величины, не вызывающей насыщение второго слоя, который обеспечивает в основном экранирование.

На основании экспериментов можно сформулировать основные рекомендации по проектированию многослойных комбинированных экранов.

1. Внутренние слои многослойного экрана для обеспечения большого экранирующего действия и достижения минимальных потерь, вносимых в экранируемые узлы РЭА, следует выполнять из немагнитных металлов. Наилучшие результаты дает экран с сочетанием слоев из немагнитных и магнитных материалов (например, медь-сталь, медь — сталь — медь и т. д.). Это связано с тем, что наибольшая эффективность экранирования обеспечивается за счет высокой отражательной способности меди и поглощательной — стали.
2. Применение диэлектрических прокладок (пластмассы, картона, бумаги) или воздушных зазоров между металлическими слоями комбинированного экрана может приводить к росту эффективности экранирования в случае, если их толщина значительно превышает толщину металлических слоев. Поэтому такие составные экраны могут использоваться, если по условиям проектирования допускается некоторое увеличение габаритов и массы.
3. При выборе оптимального соотношения толщин слоев в экране медь — сталь для наиболее сложно обеспечиваемого экранирования магнитных полей следует рассматривать следующие характерные частотные области:
 - 0—0,5 кГц, где наибольшая эффективность экранирования обеспечивается однородным стальным экраном;
 - 0,5 — 10 кГц, где наибольшая эффективность экранирования обеспечивается при равной толщине медного и стального слоев:
 - 10 — 50 кГц, где наибольшая эффективность экранирования достигается при уменьшающейся толщине медного слоя экрана и увеличивающейся толщине стального;
 - свыше 50 кГц, где применение составного экрана нецелесообразно, так как достаточно большая эффективность экранирования обеспечивается однородным металлическим экраном из меди, алюминия или латуни.

Необходимо отметить, что конструктивно составные комбинированные экраны сложны и громоздки. Поэтому при проектировании следует рассмотреть

возможные способы изменения компоновки РЭА для уменьшения влияния помехонесущего электромагнитного поля с целью обеспечения необходимой эффективности экранирования с помощью однослойного экрана.

3.8. Перфорированные экраны

Эффективность экранирования замкнутого металлического экрана может быть получена сколь угодно высокой. Однако практически полностью сплошными экраны не бывают из-за наличия крышек для доступа к узлам РЭА, жалюзи для отвода тепла, швов, отверстий для выводов и вводов сигналов, окон для размещения измеренных приборов, переключателей, вентиляции и др. Все это заметно снижает эффективность экранирования экранов.

Если обратиться к свойствам СВЧ направленного ответвителя [3], то известно, что в нем происходит возбуждение электромагнитного поля отверстием в волноводе. Очевидно, аналогичные результаты будут в случае отверстия в экране. Согласно зависимостям, которые описывают поле, возбуждаемое отверстием, то это поле пропорционально отношению r^3 / λ_0 , где r — радиус отверстия, λ_0 — длина волны возбуждающего поля. Из этих зависимостей можно сделать вывод, что при прочих равных условиях проникновение полей помех через отверстие пропорционально кубу его радиуса. Отверстие является электрическим и магнитным излучателем. Сильнее возбуждает та составляющая поля, которая в месте расположения отверстия имеет большую амплитуду. Для уменьшения излучения из отверстий их необходимо располагать в местах слабых электрических и магнитных составляющих электромагнитного поля.

Также известно [3], что щель является магнитным излучателем. Излучение щели пропорционально отношению l / λ_0 , где l — длина щели. Щель не излучает, если она располагается вдоль линий тока в экране, перпендикулярно тангенциальной составляющей магнитного поля H_t у поверхности экрана. Сказанное относится к узкой щели, ширина которой значительно меньше длины волны возбуждающих колебаний. С увеличением ширины щели она начинает реагировать и на электрическую составляющую поля и возбуждается электрической составляющей поля так же, как любое отверстие.

Излучение из отверстий растет примерно пропорционально их числу. Поскольку излучение одного отверстия пропорционально r^3 , то замена одного большого отверстия n малыми с той же общей площадью приводит к ослаблению поля, проникающего в экранируемую область, в \sqrt{n} раз. Заметим, что излучение отверстий и щелей размерами, близкими к $\lambda / 2$, сильно возрастает из-за резонансных явлений, поэтому большие отверстия в щели необходимо снабжать перемычками.

Эффективным средством ослабления электромагнитного СВЧ-поля, хорошо проникающего через отверстия в экране, является их конструктивное выполнение в виде запердевного волновода.

Рассмотренные способы повышения эффективности экранирования в зависимости от конкретных условий проектирования могут быть реализованы различно: углублением отверстий за счет вытяжки (рис. 3.9), применением патрубков, насаженных на отверстия, или перфорированных вставок, изготовленных из металла с большей толщиной чем экран. Для больших по размерам корпусов РЭА могут применяться сотовые металлические экраны.

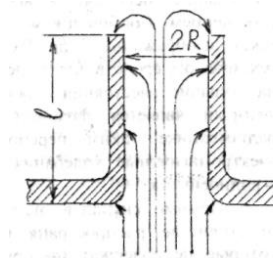


Рис. 3.9

Таким образом, для повышения эффективности экранов с отверстиями рекомендуется проведение следующего комплекса мероприятий:

- 1) располагать отверстия в зонах со слабыми электромагнитными полями;
- 2) при заданной площади перфорации, исходя из конструкции, уменьшать диаметр отверстий, увеличивая их количество;
- 3) щелевые отверстия располагать вдоль линий токов, наводимых в стенках экрана (перпендикулярно силовым линиям магнитного поля);
- 4) выполнять отверстия в виде запердевных волноводов.

4 СИГНАЛЫ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ

4.1. Оценка помеховой обстановки

В передаче информации участвуют отправитель (источник информации), получатель и технические средства связи, которые называют каналом связи (рис. 4.1) Отправителями и получателями информации могут быть как люди.

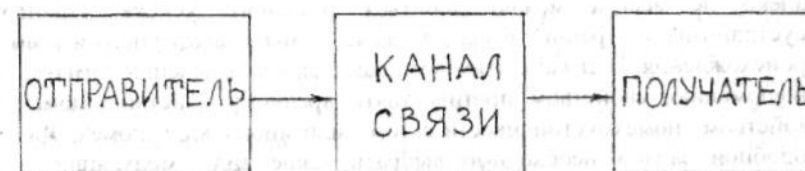


Рис. 4.1

так и технические устройства (приборы, индикаторы, машины). Информация, подлежащая передаче и выраженная в определенной форме, называется сообщением. Сообщения могут принимать самые различные формы: звук, текст, изображение и др. Различия в форме сообщений определяют выбор технических средств для их передачи. Для эффективной передачи информации на большие расстояния сообщение предварительно преобразуется в сигнал, который является физическим носителем, переносчиком сообщения. В радиотехнике таким переносчиком сообщений служат высокочастотные электромагнитные колебания — радиоволны. Отсюда происходит и название — радиосигнал.

Помимо сигналов, несущих нужную для получателя информацию, в пространстве распространяются посторонние электромагнитные процессы, которые не содержат информации (шумы) или содержат информацию, не интересующую получателя (сигналы других радиостанций), а иногда содержат дезинформацию. Эти посторонние электромагнитные процессы являются помехами. Происхождение помех может быть самым различным. Они могут появиться в результате естественных (природных) процессов как разряды атмосферного электричества радиоизлучение Солнца и звезд или могут быть созданы искусственно, например, в виде искрения в технических устройствах излучения других радиостанций и т. д. Помехи могут возникнуть как в среде, используемой для распространения сигнала — внешние помехи, так и в электрических цепях, выполняющих преобразования сигнала — внутренние помехи. Они могут иметь самые различные формы протекания во времени (гладкие, импульсные) и в том числе очень близкие к формам полезных сигналов. Таким образом, вместе с полезным сигналом в приемнике действуют помехи, интенсивность которых может оказаться соизмеримой с сигналом, в результате чего последний оказывается частично или полностью замаскированным. Это приводит к потерям информации, содержащейся в сигнале.

Предотвращение потерь информации, или, иными словами, борьба с помехами, является одной из главных проблем радиотехники. Для ослабления действия помехи увеличивают мощность сигнала, уменьшают мощность помехи, воздействуя на источники ее возникновения. Однако этим путем далеко не всегда можно добиться реального успеха. Принципиально неустраняемы внутренние шумы, а также шумы атмосферного и космического происхождения. В связи с этим возникает задача надления сигнала, несущего информацию, свойством противостоять вредному действию помех то есть свойством помехоустойчивости к тому или иному виду помех. Для решения подобной задачи необходимо выбрать такие виды модуляции и способы кодирования, которые в данных условиях и при заданных ограничениях имели бы необходимую помехоустойчивость. В общем случае получить такое решение нельзя.

4.2. Сигналы и помехи

4.2. 1. Общие сведения о сигналах

Сначала рассмотрим понятие сигнала связи. Укажем на его наиболее важные классификационные признаки:

1. Существуют случайные и детерминированные сигналы. Первые описываются случайными функциями, вторые — заданными функциями времени, значения и параметры которых предсказываются с большой определенностью. Среди детерминированных сигналов выделяются периодические и непериодические.
2. Все сигналы делятся на дискретные и непрерывные.
3. В зависимости от особенностей спектрального представления все сигналы делятся на узкополосные и широкополосные (по ширине спектра сигнала относительно средней частоты спектра), а также низкочастотные и высокочастотные (по величине частоты спектральных составляющих).
4. По принадлежности к тому или иному виду связи различают телеграфные, радиовещательные, телефонные, телевизионные, радиолокационные и др.

4. 2. 1. Спектральное представление сигнала

Детерминированный сигнал полностью определен, если задана функция $f(t)$, определяющая его мгновенные значения, или функция $S(j\omega)$ частоты ω определяющая все его спектральные составляющие. Эти функции связаны преобразованием Фурье

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt; f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega)e^{j\omega t} d\omega.$$

Функция частоты $S(j\omega)$ является комплексной величиной. Если описывает $f(t)$ сигнал, то $S(j\omega)$ принято называть комплексной спектральной плотностью или спектром сигнала.

По функциям $f(t)$ и $S(j\omega)$ можно определить длительность T и ширину F спектра сигнала. Иногда это не вызывает затруднений. Но многие функции, описывающие сигналы, не имеют четких временных и спектральных границ. В этих случаях ширину спектра (длительность) условно определяют как полосу частот (интервал времени), в которой сосредоточена заданная доля энергии сигнала. На практике считается допустимым отбрасывать высшие спектральные составляющие, энергия которых не превышает 5—10 % энергии сигнала.

Например, прямоугольный импульс во временной области имеет четкие границы

Эти границы указаны на рис. 4. 2. Из рисунка также видно, что спектральная

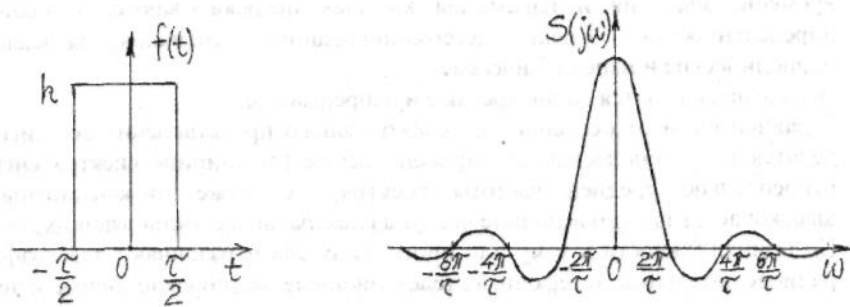


Рис. 4. 2

плотность данного импульса как преобразование Фурье от функции $f(t)$

$$S(j\omega) = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} h e^{-j\omega t} dt = h\tau \frac{\sin(\pi f \tau)}{\pi f \tau}$$

не имеет граничных частот. Поэтому за ширину спектра принимают полосу положительных частот, в которой сосредоточено 95% энергии: $F = 2 / \tau$

Иногда шириной спектра считают область положительных частот от максимума до первого нуля спектральной кривой. При этом $F = 1 / \tau$. Отрицательные частоты при построении спектральной кривой в расчет не принимаются, так как они не являются физической реальностью, а появились в результате применения интегральных преобразований Фурье в комплексной форме.

4. 2. 4. Ширина спектра реальных сигналов

Ширина спектра сигнала определяется требованиями получателя к скорости передачи информации и качеству воспроизведения сообщений. Например, при телеграфии сигнал представляет собой последовательность

посылок и пауз различной длительности. Спектр периодической последовательности прямоугольных (ППП) импульсов

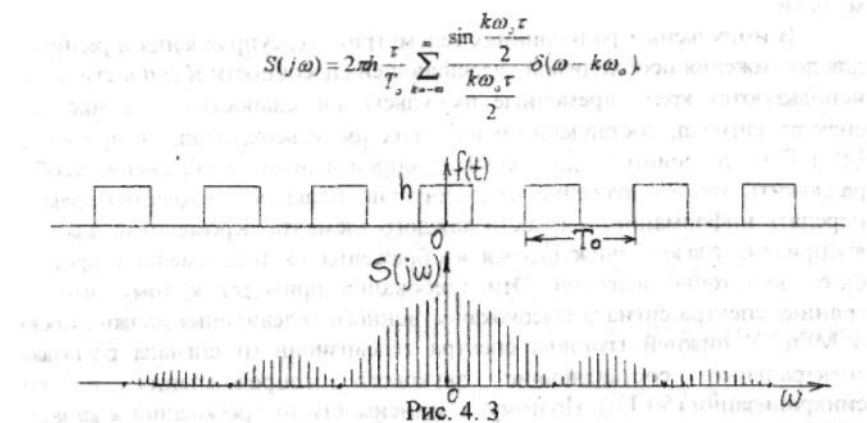


Рис. 4. 3

При графическом построении этого спектра (рис. 4. 3) видно, что огибающая спектра ППП импульсов совпадает со спектром одиночного прямоугольного импульса. Это оказывается справедливым для спектров периодических импульсных последовательностей с любой формой импульса. Сохранение прямоугольной формы импульса не всегда является обязательным. Для того чтобы получатель мог отличить посылку от паузы, достаточно сохранить в спектре сигнала лишь первые три гармоники, как это сделано на рис. 4. 4. то

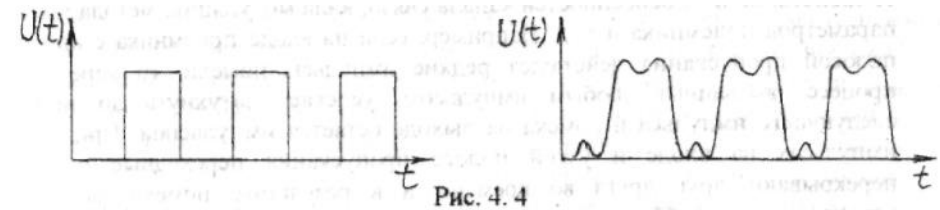


Рис. 4. 4

есть $F = 3 f_1$, где f_1 — частота следования коротких посылок, разделенных короткими паузами. Если, например, при передаче 100 слов в минуту среднее число букв в слове 6, а среднее число точек на букву 10, то есть скорость телеграфирования составляет 100 бод (1 бод — скорость телеграфирования, при которой в 1 с передается один элементарный импульс), то ширина спектра такого сигнала $F = 3f_1 = 150$ Гц. В радиовещании для высококачественной передачи музыки требуется полоса частот от 30 до 15000 Гц. Однако передача такого широкого спектра без взаимных помех большого числа радиостанций в диапазоне длинных, средних и коротких волн технически весьма затруднительна. Поэтому при радиовещании на этих волнах ограничиваются

передачей спектральных составляющих в полосе 50 — 4500 Гц. На УКВ и в частности, при звуковом сопровождении телевидения передают более широкие спектры (30— 10000 Гц), чем достигается более высокое качество передачи музыки.

В импульсных радиопередачах телеметрии, телеуправления и радиолокации для достижения необходимой разрешающей способности и точности измерений используются кратковременные импульсы длительностью ~ 1 мкс. Ширина спектра сигнала, составленного из таких импульсов, лежит в пределах 1 - 2 МГц. В телевидении для детального воспроизведения изображения необходимо разложить это изображение на достаточно большое количество элементов и передать информацию о яркости каждого элемента. Кроме того, для слитного восприятия глазом движущегося изображения частота смены кадров должна быть достаточно высокой. Эти требования приводят к тому, что верхняя граница спектра сигнала высококачественного телевидения должна превышать 6 МГц. У нижней границы спектра телевизионного сигнала располагаются спектральные составляющие звукового сопровождения и сигналы синхронизации (50 Гц). Поэтому, в зависимости от требований к каналу связи первичные сигналы могут иметь ширину спектра от сотен до миллионов герц.

4. 2. 4. Помехи

Помехи представляют собой посторонние электромагнитные возмущения, которые накладываются на сигналы и мешают их приему. По форме эти возмущения могут быть синусоидальными, импульсными или флуктуационными. Характер мешающего действия помехи зависит не только от ее свойств, но и от особенностей канала связи, вида модуляции, метода приема, параметров приемника и т. д. Например, если на входе приемника с широкой полосой пропускания действуют редкие импульсы помехи, то переходный процесс, вызванный любым импульсом, успевает затухнуть до прихода следующего импульса и помеха на выходе остается импульсной. При частых импульсах на входе и узкой полосе пропускания переходные процессы перекрывают друг друга во времени и в результате помеха на выходе становится "гладкой".

Помеху $n(t)$ называют аддитивной, если в канале связи она складывается с сигналом $X(t) = S(t) + n(t)$. Если же воздействие помехи на сигнал $S(t)$ сводится к умножению комплексной огибающей $M(t)$ сигнала на комплексную огибающую $E(t)$ некоторого случайного процесса

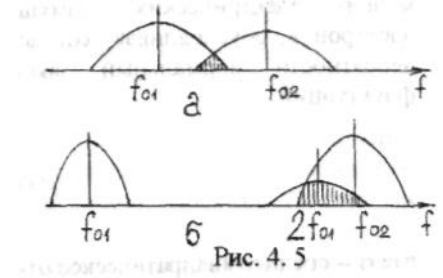
$$M(t) = E(t) \cdot M(t).$$

то такую помеху называют мультипликативной.

Аддитивные помехи. В радиоканалах чаще всего возникают следующие аддитивные помехи (о некоторых из них упоминалось выше).

Помехи соседних радиопомех

возникают в результате перекрытия спектров соседних по частоте радиоканалов или попадания в полосу частот одного канала гармоник несущей частоты другого канала (рис.4.5) где позиция а — взаимное перекрытие спектров, б — попадание гармоник.



Промышленные помехи

представляют собой электромагнитное излучение различных промышленных установок, линий передачи и транспорта.

Атмосферные помехи вызываются грозовыми разрядами и другими электромагнитными атмосферными явлениями.

Космические помехи являются электромагнитными излучениями Галактики, Солнца, Луны.

Внутренние флуктуационные шумы в отличие от всех предыдущих помех не вызываются внешними источниками, а возникают в радиоаппаратуре. Под этими шумами подразумеваются случайные колебания токов и напряжений в элементах радиоаппаратуры, обусловленные дискретной природой вещества и электричества. К ним относятся флуктуации постоянного тока электронных приборов из-за случайных колебаний числа электронов, приходящих к коллектору транзистора или аноду лампы в одинаковые промежутки времени (дробовой эффект), флуктуации напряжения на концах активных сопротивлений из-за случайных тепловых перемещений электронов в проводнике (тепловой шум) и др. Флуктуационные помехи представляют собой последовательность коротких импульсов со случайными моментами появления и случайной величиной. Столь короткие импульсы имеют широкий и практически равномерный спектр. Спектральную плотность мощности $S_{\text{ш.м.}}(f)$ этих помех считают постоянной во всем диапазоне радиоволн — белый шум. Таким образом мощность флуктуационных помех оказывается пропорциональной полосе пропускания приемника Δf . Кроме того, мощность тепловых флуктуаций тем больше, чем больше абсолютная температура T "шумящего" сопротивления. Средний квадрат ЭДС, обусловленной тепловыми флуктуациями в "шумящем" сопротивлении R , может быть вычислен по формуле Найквиста

$$\overline{e_{\text{ш.т.}}^2} = 4 k T \Delta f R.$$

Амплитуды импульсов тепловых флуктуаций неодинаковы. Наиболее вероятны мелкие выбросы. Чем больше значение флуктуации, тем меньше его вероятность появления. Случайный характер суммирования громадного числа

мелких электрических возмущений, вызванных тепловым движением электронов, обуславливает согласно центральной предельной теореме теории вероятности нормальный закон распределения вероятности тепловых флуктуаций

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}},$$

где σ – среднее квадратическое отклонение шумов, $\sigma = \sqrt{kT\Delta f}$.

Флуктуационные помехи считаются наиболее вредными и в то же время неизбежными. Поэтому при анализе помехоустойчивости радиосвязи чаще всего исходят из наличия именно этой помехи.

Замирания. Для некоторых каналов связи, например ионосферной КВ-радиосвязи, тропосферной УКВ-радиосвязи, модель с незамирающим сигналом и аддитивным стационарным гауссовым шумом является недостаточной. Изменения уровня сигнала, так называемые замирания, в подобных каналах вызываются многими причинами. *Медленные замирания* могут иметь место из-за изменений уровня поглощения радиоволн, коэффициента рефракции или из-за изменения солнечной или геомагнитной активности. Их средний период измеряется минутами или даже часами. *Быстрые замирания* происходят за секунды или доли секунды из-за явления многолучевости, то есть из-за распространения радиоволн от передатчика к приемнику по нескольким различным путям. Эти пути или радиолучи образуются в результате отражения радиоволн от многочисленных неоднородностей в ионосфере (КВ) или тропосфере (УКВ). Таким образом, сигнал, воздействующий на приемник, представляет собой сумму нескольких составляющих. Их амплитуды определяются коэффициентами отражения неоднородностей и меняются во времени сравнительно медленно. Фазы составляющих зависят от длины пути, проходимого радиоволной, то есть от местоположения неоднородностей. При изменении пути на одну длину волны фаза меняется на 2π радиан. Это может происходить при относительно небольших перемещениях неоднородностей и в реальных условиях происходит сравнительно быстро. Поэтому быстрые замирания обусловлены главным образом случайными изменениями времени запаздывания лучей или фаз слагаемых, воздействующих на приемник [12].

В результате быстрых замираний несущее колебание подвергается мультипликативной модуляции. Если в канале имеется значительное число неоднородностей сравнимых размеров, а фазы отраженных от них сигналов меняются случайно и независимо, то в этом случае амплитуда результирующего сигнала имеет релеевское распределение, а фаза — равномерное. Релеевские замирания огибающей радиосигнала постоянно имеют место при дальней КВ - радиосвязи. Они носят название *интерференционных замираний*. При этом часто один из лучей зеркально

отражается от устойчивого ионосферного слоя, а остальные — от флуктуирующих и перемещающихся неоднородностей. Результирующий сигнал в этом случае составлен из регулярной и релеевской составляющих, то есть он имеет обобщенное релеевское распределение [11].

При узкополосной модуляции можно допустить, что замирания одинаковым образом изменяют амплитуды спектральных составляющих на всех частотах. В этом случае замирания называют *гладкими* (в границах ширины спектра сигнала).

При широкополосной модуляции картина усложняется, поскольку степень изменения амплитуд спектральных составляющих сигнала на разных частотах оказывается различной, а зависимость фазы от частоты становится нелинейной. Такие замирания в отличие от гладких называют *селективными*. Они приводят к сильным случайным изменениям формы передаваемого сигнала.

Помехоустойчивость. Определяется как способность системы связи осуществлять прием полезных сигналов в условиях помех. Можно говорить не только о помехоустойчивости системы связи в целом, но и о помехоустойчивости ее отдельных звеньев, осуществляющих то или иное преобразование сигнала, например, помехоустойчивости приемника, кода, вида модуляции и т. д.

Количественная мера помехоустойчивости, единая для всех видов связи, отсутствует. Помехи искажают переданный сигнал, и поэтому помехоустойчивость связи тем выше, чем больше степень соответствия между принятым и переданным сигналом. Однако критерий этого соответствия не может быть единым. Выбор его зависит от требований получателя и особенностей восприятия им информации (слуховое, зрительное и г. п.), от класса используемых сигналов и от особенностей действующих в канале помех. В зависимости от условий связи и требований получателя информации в качестве критерия соответствия может быть использованы вероятность ошибочного приема, максимальное отклонение принятого сигнала от переданного, среднее квадратическое отклонение и многие другие критерии. Каждый из них определяет свою меру помехоустойчивости.

При передаче дискретной информации удобно считать, что сообщение передается тем точнее, чем меньше вероятность ошибочного приема или искажения элементарного символа. Поэтому количественная оценка помехоустойчивости в этом случае может быть дана с помощью величины, обратной вероятности искажения.

При передаче непрерывных сообщений для количественной оценки помехоустойчивости часто используется способ, основанный на сравнении отношений средних мощностей сигнала и помехи на выходе приемника ($P_c/P_{ш}$)вых при условии, что на входе сравниваемых приемников эти отношения ($P_c/P_{ш}$)вх одинаковы.

значение имеет создаваемое ими электрическое поле. Вклад магнитной составляющей поля в общее излучение мал и имеет место только на самых низких частотах. Напряженность электрического поля этих помех на объекте может достигать высоких значений. Так, на автомобиле без помехоподавления $E = 500 \text{ мкВ/м}$.

Для некоторых служб, в частности сухопутной подвижной связи, большое значение имеют помехи, создаваемые группой автомобилей, так как на расстоянии 60 — 80 м от шоссе с интенсивным автодвижением эти помехи практически преобладают над остальными. Данные помехи представляют собой поток групп импульсов, длительность каждой из которых колеблется от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд, длительность отдельных импульсов от 1 до 6 нс. Интенсивность этих помех подвержена значительным (до $\pm 16 \text{ дБ}$) изменениям в соответствии с изменением плотности движения. Влияние помех от систем зажигания обычно оценивают исходя из статистики. Так, интенсивность потока помех от систем зажигания описывается логарифмически нормальным распределением, а вероятность возникновения групп импульсов — распределением Пуассона.

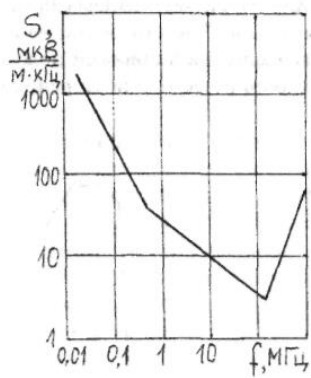


Рис. 4.7

Линии передачи электроэнергии. Высоковольтная аппаратура и линии передачи электроэнергии создают импульсные помехи максимальной интенсивности во время дождя, снега, тумана и высокой влажности, а в засушливых районах — при большой турбулентности воздуха и повышенной солнечной радиации. Непосредственной причиной возникновения данных помех являются дефекты изоляторов опорной мачты, а также переходные процессы, вызываемые электрическими разрядами, хаотически возникающими на поверхностях проводников и изоляторов линии.

Помехи от линий электропередач представляют собой случайный поток импульсов. По характеристикам этот вид помех аналогичен помехам, создаваемым системами зажигания, но отличается большей средней длительностью импульса и меньшей средней частотой следования. Спектр этих помех занимает полосу частот от примерно 14 кГц до 1 ГГц (рис. 4.7)

Помехи от линий электропередач излучаются в окружающее пространство, а также распространяются на значительные расстояния вдоль коаксиальной (подземный кабель), двухпроводной или многопроводной линии передачи (воздушная линия электропередачи).

Помехи от электродвигателей. Наибольшие помехи среди всех типов электродвигателей создают двигатели коллекторного типа, широко используемые как в бытовых приборах, так и в различных исполнительных механизмах. Причиной возникновения помех является прерывание контактов и, как следствие, возникновение импульсных токов в электрической цепи двигателя. Помехи имеют вид хаотического потока импульсов, их спектр занимает полосу частот 10 кГц — 1 ГГц. Помехи, создаваемые при работе электродвигателей, распространяются в сети электропитания, а также излучаются в окружающее пространство.

Дуговые сварочные аппараты. Помехи от них обусловлены излучением дугового разряда на частоте сети и ее гармониках вследствие переходных процессов и являются широкополосными импульсными помехами. Интенсивность их весьма велика и нередко превышает допустимые уровни на 40 дБ и более, что дает основание считать такой вид помех одним из наиболее опасных. Результаты измерений спектров этих помех указывают на наличие трех широких резонансных полос, центры которых соответствуют частотам, примерно равным 750 кГц, 3 и 20 МГц, хотя спектр излучения каждого отдельно взятого аппарата не обязательно включает в себя все эти резонансные полосы.

Газоразрядные источники света. Лампы дневного света и неоновые лампы создают непрерывные флуктуационные помехи, а ртутные дуговые и натриевые лампы — импульсные помехи. Непосредственной причиной возникновения помех является нерегулярный характер тока при газовом разряде. В цепях электропитания мощных ламп протекают интенсивные токи, создающие значительный уровень радиопомех в широкой полосе частот. Например, люминесцентные лампы могут создавать помехи в диапазоне частот 10 — 100 МГц и более.

Контактная сеть. Источником промышленных помех может быть любая электрическая цепь, в которой происходят частые и резкие изменения тока, обычно связанные с разрывом контактов, искрообразованием, появлением утечки тока через изоляцию, ионизацией газа. Мощным источником помех является электротранспорт, движение которого сопровождается частым прерыванием контакта между воздушным проводом и токосъемником. Эти и другие электрические устройства (релейные схемы, предохранительные выключатели и т. д.) создают помехи и виде одиночных импульсов, групп импульсов или непериодических импульсных последовательностей. Например, помехи при каждом прохождении электротранспорта представляют собой поток импульсов в течение 20—30 с длительностью импульса около 4,5 мс и средней частотой следования около 220 Гц. Спектр этих помех занимает широкую полосу, а уровень зависит от типа устройства. В качестве иллюстрации на рис. 4.8 представлена зависимость уровней помех, созданных размагничивающим (1), переключающим (2) и электромеханическим

переключающим (3) устройствами, от частоты, определенная на расстоянии 7, 5 м от источника помех.

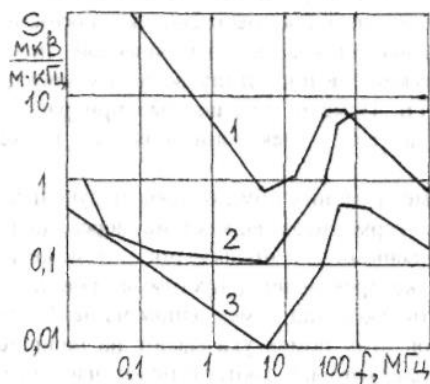


Рис. 4.8

Это изменение, а также сопровождающие его переходные процессы в виде скачков тока или колебательных процессов нередко имеют большую амплитуду и широкий спектр. Так, иногда в бортовой аппаратуре наблюдаются скачки напряжения с амплитудой до сотен вольт и длительностью около 10 мкс.

Значительные уровни помех могут создаваться самими источниками электропитания. Например, при работе мощных тиристорных выпрямителей нередко возникают периодические помехи на частоте второй гармоники переменного тока. Данные помехи занимают область частот, превышающую несколько десятков мегагерц. Другая причина возникновения помех от источников электропитания связана с тем, что при перегрузках трансформаторы входят в режим насыщения, протекающие в них токи имеют несинусоидальную форму, то есть содержат гармоники. В этом случае источник электропитания создает помехи на частотах гармоник сети переменного тока.

4. 3. 3. Дополнительные источники промышленных помех

Промышленные помехи могут вызываться электризацией движущихся объектов в результате трения их корпусов о воздух и взвешенные в нем частицы пыли, дыма, снежинки и т. д. Плотность индуцированных электрических зарядов максимальна в местах, где имеется малый радиус изгиба поверхности или острые кромки. Так, у концов крыльев самолета или лопастей винтов вертолета она в 5 — 8 раз выше, чем на поверхности средней части фюзеляжа. Уровень электризации корпуса самолета, вертолета или

Источники электропитания.

Первичные и вторичные цепи питания электро- и радиооборудования могут служить источником импульсных помех, обусловленных переходными процессами из-за резких изменений тока. Суть этого механизма заключается в том, что при изменении электропотребления одним из средств (например, при включении электродвигателей, исполнительных механизмов и др.) изменяется напряжение, действующее в цепи электропитания РП.

автомобиля бывает настолько высоким, что может произойти коронный разряд, создающий помехи с широким спектром. Степень электризации и, следовательно, интенсивность этого вида помех зависят от скорости движения и примерно пропорциональны кубу скорости (рис. 4. 9) На рисунке показан спектр помех за счет электризации самолета: 1)токами с непроводящих участков; 2)стеканием токов с проводящих участков; 3)электрическим пробоем.

К этой же группе следует отнести помехи, возникновение которых обусловлено процессами преобразования механической энергии в электрическую и не связано непосредственно с использованием какой-либо электромагнитной энергии источником помех.

Так, переменные механические нагрузки в элементах радиоустройства способны вызвать появление помех из-за пьезо-эффекта и других физических причин. К данной группе помех также можно отнести и наведенные переменные токи, образуемые вследствие перемещения проводников в магнитном поле. Помехи этого вида обычно воздействуют только на устройства, в которых они возникли, и малосущественны для других радиоэлектронных средств.

Контактными называют непреднамеренные помехи, возникающие в результате переизлучения электромагнитного поля элементами конструкции объекта, имеющими контакты, сопротивление которых в процессе движения объекта изменяются. Возникновение контактных помех объясняется следующим образом. Под действием электромагнитных полей, созданных передающими антеннами, на элементах конструкции объекта возникают значительные электрические токи. Другой причиной появления токов может быть электризация объекта. Если объект находится в покое, спектр вторичного излучения, обусловленного этими токами, совпадает со спектром первичного излучения. В процессе движения указанные токи, а следовательно, и поля этих токов оказываются промодулированными по амплитуде и фазе в соответствии с законом изменения контактных сопротивлений. Появляющиеся при этом дополнительные частотные составляющие и являются контактными помехами. Контактные помехи высокого уровня могут занимать широкие полосы частот, нередко превышающие несколько мегагерц. Структура их на большинстве объектов имеет квазиимпульсный характер. Мгновенное значение огибающей напряженности суммарного поля содержит флуктуационную и импульсную составляющие. Характерным для них является то, что они исчезают при прекращении движения объекта.

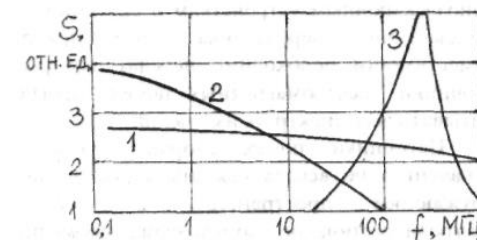


Рис. 4.9

5. СОВМЕСТИМОСТЬ В ПЕРЕДАЮЩИХ И ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ

5.1. Представление помех на уровне источников в задачах ЭМС

Источники непреднамеренных помех делят на две группы. К первой относят радиопередающие устройства. Являясь по своему назначению излучателями электромагнитных колебаний, они могут создавать помехи радиоэлектронным устройствам и системам, не предназначенным для приема сигнала данного передатчика. Поэтому при решении задач электромагнитной совместимости необходимо передатчики рассматривать как потенциальные источники электромагнитных помех, прогнозировать уровни мощности и учитывать весь спектр их излучений.

Источники помех второй группы по своему функциональному назначению не всегда связаны с излучением электромагнитной энергии в окружающее пространство. В эту группу входят, например, электроэнергетическое оборудование промышленных и подвижных объектов и многочисленные коммуникационные устройства. Резкие изменения тока в электрических цепях приводят к изменению электромагнитного поля в окружающем пространстве и возникновению токов и ЭДС в металлических конструкциях. Эти токи и ЭДС могут служить источником радиопомех. Причиной возникновения помех могут быть многочисленные механические контакты, характерные для подвижных объектов. Помехи второй группы относят к индустриальным помехам.

5.2. Классификация излучений передатчика

Основной функцией радиопередатчиков является генерирование высокочастотной энергии. Однако наряду с основным излучением работа радиопередатчиков сопровождается многочисленными нежелательными излучениями, которые лежат за пределами необходимой полосы радиочастот и не требуются для передачи полезной информации.

Радиопередающие устройства формируют радиочастотные сигналы, модулированные в соответствии с передаваемой информацией, в определенной полосе частот. Минимальная полоса B_n для данного класса сообщений, обеспечивающая передачу сигналов с требуемой скоростью и качеством, называется *необходимой полосой радиочастот*.

Излучения в пределах необходимой полосы частот называются *основными*, а вне необходимой полосы — *нежелательными*. Последние включают в себя *побочные* и *внеполосные* излучения.

Радиоизлучение на гармонике представляет собой побочное радиоизлучение на частотах в целое число раз больших частоты основного радиоизлучения:

как показано на рис. 5. 1. Излучения на гармониках присущи всем радиопередающим устройствам и обусловлены нелинейностью амплитудных и

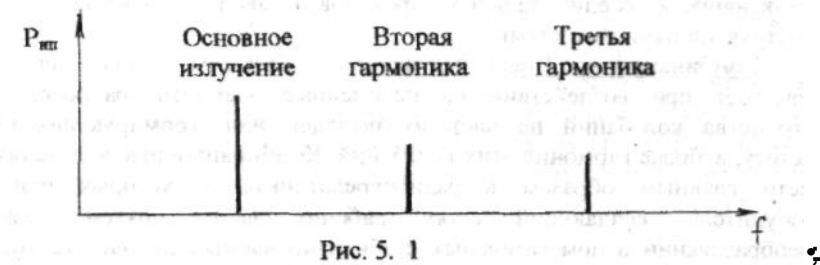


Рис. 5. 1

фазовых характеристик активных элементов. Конечным результатом этих нелинейных свойств является то, что выходное немодулированное колебание $U(t)$ имеет форму отличную от гармонической

$$U(t) = U_0 + U_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + \sum_{m=2}^{\infty} U_m \cos(m\omega_0 t + \varphi_m)$$

где U_m — коэффициенты разложения $U(t)$ в ряд Фурье; $m = 0, 1, 2, \dots$

Радиоизлучение на субгармониках. Это побочное радиоизлучение на частотах, в целое число раз меньших частоты основного радиоизлучения, то есть радиоизлучение, несущая частота которого $f_{\text{суб}} = f_0 / m$, где f_0 — несущая частота основного радиоизлучения, $m = 2, 3, \dots$. Радиоизлучения на субгармониках свойственны радиопередатчикам, использующим умножение частоты. Схема умножения применяется не только в относительно низкочастотном диапазоне, где используются стабилизированные генераторы опорных частот, но и в диапазоне СВЧ, поскольку мощность полупроводниковых или диодных генераторов, особенно в верхней части СВЧ-диапазона, недостаточно высока. Например, в излучающих модулях активных фазированных антенных решеток сантиметрового диапазона волн используются маломощные транзисторные генераторы и умножители частоты на варакторных диодах или диодах с накоплением заряда.

Паразитное радиоизлучение. Является побочным и возникает в результате самовозбуждения радиопередатчика из-за паразитных связей в его генераторных или усилительных каскадах. Для данного излучения характерно, что его частоты не кратны частоте основного радиоизлучения:

$$f_{\text{пар}} \neq m \cdot f_0, \quad m = 1, 2, 3, \dots, 1/2, 1/3, \dots$$

Паразитные излучения могут иметь место на частотах как ниже, так и выше основной частоты. В ламповых и транзисторных генераторах излучение на более низких частотах определяется самовозбуждением из-за паразитных резонансов в цепях питания. Частоты таких колебаний обычно на порядок

меньше основной частоты. Самовозбуждение на высоких частотах возникает, например, при параллельном соединении нескольких выходных генераторных приборов. В этом случае паразитные резонансы обусловлены наличием индуктивности соединительных проводов, выводов, межэлектродными и конструктивными емкостями.

Комбинационное радиоизлучение. Является также побочным и возникает при воздействии на нелинейные элементы радиопередающего устройства колебаний на частотах несущей или формирующих несущую частоту, а также гармоник этих колебаний. Комбинационные излучения имеют место главным образом в радиопередатчиках, в которых применяется возбудитель, создающий сетку рабочих частот путем нелинейных преобразований вспомогательных стабилизированных по частоте колебаний. Здесь на нелинейный элемент радиопередатчика поступают колебания с частотами (f_1, f_2, f_3, \dots), находящиеся обычно в декадном соотношении: $f_2 = 10f_1$; $f_3 = 10f_2 \dots$. В результате их смещения возникают различные комбинационные составляющие с частотами $f_{\text{комб}} = |\pm m_1 f_1 \pm m_2 f_2 + \dots|$. Выходной фильтр выделяет необходимую частоту, осуществляя возбуждение широкополосного оконечного каскада стабилизированным колебанием. Поскольку избирательные свойства любого фильтра конечны, он лишь частично подавляет остальные неиспользуемые колебания.

Интермодуляционное радиоизлучение. Относится к побочному типу и возникает в результате воздействия на нелинейные элементы высокочастотного тракта радиопередающего устройства генерируемых колебаний и внешнего электромагнитного поля (от другого передатчика). В определенном смысле они являются результатом нарушения работы радиопередатчика под влиянием радиопомех от других радиопередатчиков, имеющих с рассматриваемым сильную связь. Такая ситуация соответствует либо близкому расположению нескольких радиопередатчиков с отдельными антеннами на определенной территории, например, на корабле, самолете, узле связи, либо при работе нескольких радиопередатчиков на общую антенну.

Внеполосное радиоизлучение. Определяется как нежелательное в полосе частот, примыкающей к необходимой полосе радиочастот, и является результатом модуляции сигнала. Оно может быть вызвано рядом причин.

1. Применение для передачи сигналов с большей шириной спектра (например, для импульсных систем с чрезмерно крутыми фронтами и срезами импульсов), чем это требуется для нормальной работы. В этих случаях ширина полосы частот, в которой сосредоточена основная доля мощности, будет превышать необходимую полосу частот. Обычно сигналы прямоугольной формы по сравнению с другими при одинаковой длительности в зависимости от расстройки характеризуются более медленным убыванием спектральных составляющих, а значит, занимают более широкую полосу частот. Последнее обстоятельство иллюстрируется рис. 5. 2, где представлены огибающие спектров импульсов одинаковой длительности $\tau = 1 \text{ мкс}$, но различной формы.

2. Наличие нелинейности амплитудных характеристик передатчика (усилителя модулятора, элементов фидера). В результате в выходном спектре появляются дополнительные частотные составляющие, обусловленные биениями частот отдельных спектральных составляющих передаваемого сигнала, как в пределах необходимой полосы частот (нелинейные искажения сигнала), так и вне ее (внеполосные излучения). К аналогичным результатам приводит нелинейность фазовых характеристик. Например, в импульсных магнетронных автогенераторах наблюдается девиация фазы колебания во время нарастания и спада огибающей импульса, а во время формирования плоской части импульса нередко происходит паразитная амплитудная модуляция, также приводящие к появлению внеполосных радиоизлучений.

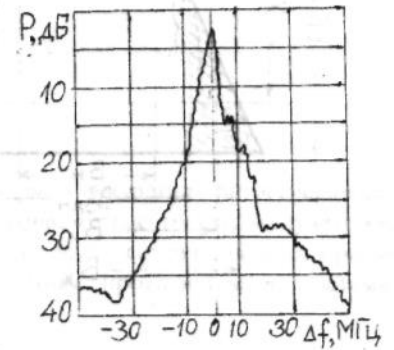
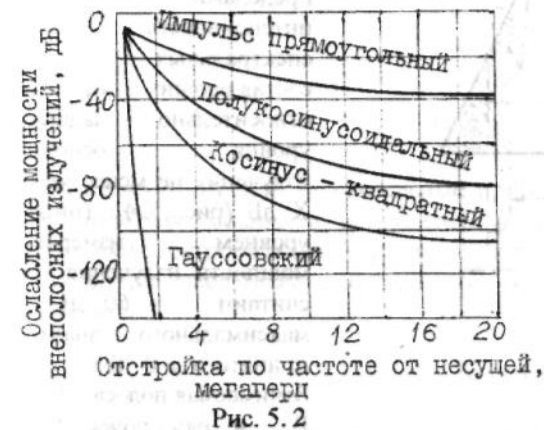


Рис. 5. 3

В этом случае спектр излучения радиопередатчика несимметричен и занимает полосу частот, значительно превосходящую необходимую (рис. 5.3)

3. Наличие нелинейности в тракте формирования модулирующих сигналов. Данное явление вызывает расширение полосы частот модулирующего сигнала вследствие образования дополнительных спектральных составляющих. Модулирующий сигнал в этом случае занимает более широкую полосу частот, что неизбежно приводит к расширению спектра радиоизлучения.

4. Использование квантования также вызывает расширение спектра по сравнению со случаем, когда квантование не используется.

Независимо от конкретного механизма возникновения внеполосные излучения характеризуются шириной занимаемой полосы частот и относительным уровнем. Последний представляет собой отношение спектральной плотности мощности внеполосного излучения к максимальному значению спектральной плотности мощности основного радиоизлучения, выраженное в децибелах. Ширина занимаемой полосы частот $B_{\text{н}}$

определяется как ширина полосы частот, за пределами которой излучается не более чем заданная (β) часть средней мощности излучения. При определении занимаемой ширины полосы $B_{зан}$, иногда отсчет производят при $\beta = 1\%$ от общей средней излучаемой мощности. На рис. 5.4 представлены характеристики внеполосного излучения передатчика.

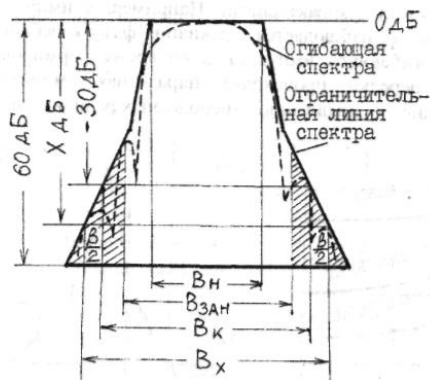


Рис. 5.4

мощности излучения часто считают - 60 дБ от максимального значения, принятого за 0 дБ). Занимаемая полоса частот $B_{зан}$ и ряд полос B_x на уровне X дБ служат для количественного описания внеполосных излучений при анализе ЭМС, а также для контроля и нормирования.

На практике используют также понятие контрольной полосы частот B_k , отсчитываемой на уровне - 30 дБ относительно исходного уровня 0 дБ; вне этих границ мощность внеполосных излучений ослаблена в 1000 раз относительно максимального значения мощности излучения. Значение ширины полосы излучения на уровне - 30 дБ, в частности, используется при распределении и присвоении номинальных частот передатчика и при расчетах частотного разнеса между соседними радиопередатчиками.

Шумовое излучение передающего устройства. Представляет собой нежелательное радиоизлучение, обусловленное собственными шумами и паразитной модуляцией генерируемого колебания шумовыми процессами передатчика. Для него характерны уровни на 60 — 80 дБ ниже уровня основного излучения и весьма широкая полоса частот, превышающая необходимую в десятки и сотни раз. Несмотря на относительно низкий уровень, шумовые излучения могут в ряде случаев нарушать работу близкорасположенных радиосредств, использующих соседние радиоканалы.

Для оценки убывания внеполосных составляющих вводится также понятие полосы частот на уровне X дБ (B_x), понимаемое как значение полосы, за пределами которой интенсивность любых спектральных составляющих ослаблена относительно заданного уровня основного излучения не менее чем на X дБ (рис. 5.4) (нижним уровнем измеряемой

Типичный спектр шумового излучения радиопередатчика показан на рис. 5.5. Источниками шумовых излучений являются различные элементы передатчика:



Рис. 5.5

электровакуумные или твердотельные приборы в выходных автогенераторах или усилителях мощности, возбудитель, низкочастотные тракты модуляторов, источники электропитания. Шумовые излучения часто создают помехи приему в соседних частотных каналах, что особенно проявляется в системах радиосвязи.

5. 3. Помехи в радиоприемниках

ЭМС излучателей и рецепторов (приемников) электромагнитного поля определяется не только электромагнитной обстановкой в точках размещения рецепторов, но и их восприимчивостью к полю. Восприимчивость радиоприемного устройства — это свойство устройства реагировать на радиопомехи, воздействующие через антенну и помимо нее (через экран, по цепям питания и коммутации). К параметрам, определяющим восприимчивость приемника, относятся чувствительность основного и побочных каналов приема, избирательность; нелинейные эффекты блокирования, перекрестных искажений и интермодуляции, а также коэффициенты сетевых радиопомех, электрической индукции и переноса радиопомех.

5. 3.1. Восприимчивость радиоприемного устройства по основному и побочным каналам приема

Упрощенная структурная схема главного тракта супергетеродинного радиоприемника, отражающая основные операции и преобразования: выделение полезного сигнала из помех в заданной полосе частот,

преобразование несущей частоты, усиление, выделение информационного сигнала (детектирование), его усиление и выдачу на выходное устройство, показана на рис. 5. 6. Способность приемника выделить полезный сигнал из

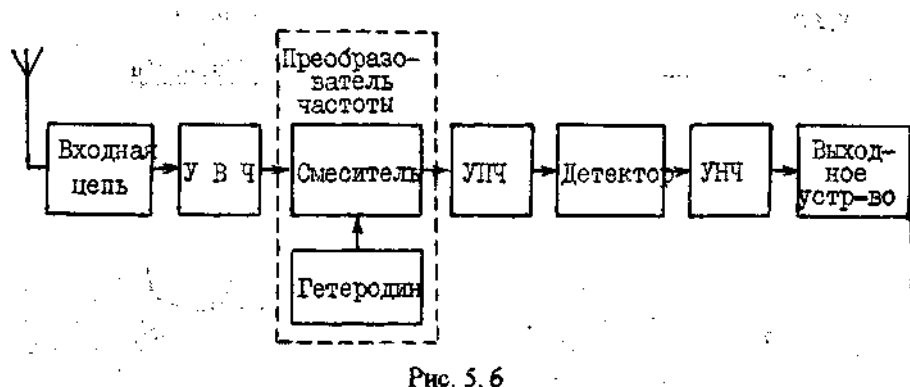


Рис. 5. 6

совокупности составляющих напряженности электромагнитных помех, в котором находится антенна, называют избирательностью. Различают несколько видов избирательности. Пространственную избирательность обычно выполняет антенна. Приемник может обладать временной, амплитудной, фазовой, частотной избирательностью. Последняя имеет особое значение. В отличие от ранее перечисленных видов избирательности она присуща каждому супергетеродинному приемнику. Характеристика частотной избирательности — это зависимость уровня сигнала на входе приемника от частоты при заданном отношении сигнал/шум или уровне сигнала на выходе. Измерение характеристики частотной избирательности производится одно- или многоканальными методами. На рис. 5.7 представлена типовая характеристика

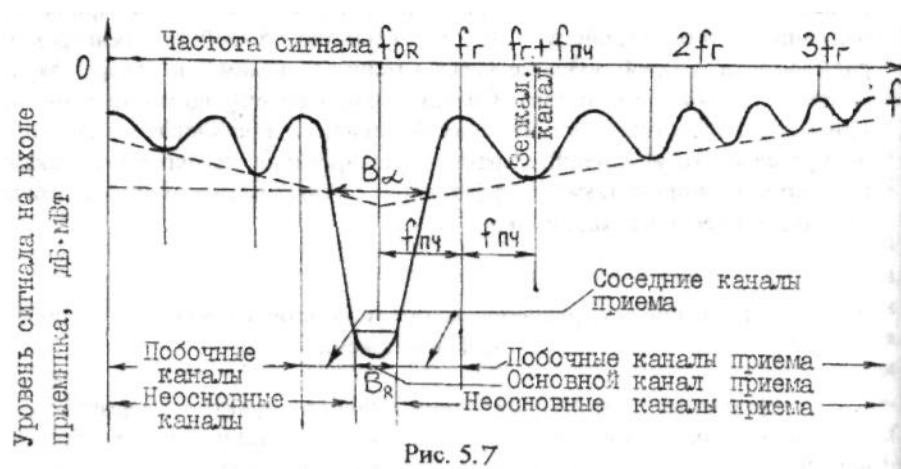


Рис. 5.7

частотной избирательности приемника, измеренная односигнальным методом. Она описывает избирательные свойства приемника в линейном или близком к линейному режимам работы. На ней можно выделить основной и неосновные каналы приема, которые делятся на соседние и побочные.

Основным каналом приема называют полосу частот, находящуюся в полосе пропускания приемника, предназначенную для приема сигнала. Полоса частот основного канала на рис. 5.7 обозначена B_R . Обычно ее определяют на уровне 3 дБ по отношению к значению частотной характеристики на частоте настройки приемника. Другой характеристикой основного канала является коэффициент прямоугольности частотной характеристики. Коэффициентом прямоугольности по уровню α , дБ называют отношение полосы частот на уровне α , дБ к полосе на уровне 3 дБ. Обычно $\alpha = 30$ или 60 дБ.

Побочные каналы приема составляют полосы частот, находящиеся за пределами основного канала приема, в которых сигнал проходит на выход радиоприемника. К побочным каналам относят зеркальный, каналы комбинационных частот и субгармоник частоты настройки приемника; канал приема, средняя частота которого равна промежуточной частоте приемника и т.п.

Нормы ослабления по зеркальному каналу в современных приемниках высокого класса лежат в пределах 70 — 80 дБ, нормы ослабления по промежуточной частоте составляют 80—100 дБ.

Побочные каналы приема образуются в смесителях. Они определяются недостаточной избирательностью предшествующих каскадов и характеристикой нелинейности смесителя. Предполагается, что при переносе спектра в смесителе искажения отсутствуют. В этом смысле операция преобразования частоты — линейная.

Избирательность побочных каналов приема, так же как и основного, определяется полосой пропускания и прямоугольностью частотной характеристики канала. В задачах ЭМС характеристика избирательности по побочным каналам обычно принимается такой же, как и по основному. Однако от основного побочные каналы существенно отличаются своей чувствительностью. Чувствительность по основному каналу называют чувствительностью радиоприемника. Количественно чувствительность определяют напряжением или мощностью сигнала на входе, при котором на выходе приемника обеспечивается заданное отношение $c / \text{ш}$ при номинальной мощности выходного сигнала.

Различают реальную чувствительность, предельную и чувствительность, ограниченную внутренними шумами или помехами.

Чувствительность измеряют или рассчитывают. Так чувствительность, соответствующая отношению $c / \text{ш} = 0$ дБ, вычисляют по формуле

$$P(f_{\text{ср}}) = F k T B_R,$$

где $P(f_{\text{ср}})$ — чувствительность приемника на рабочей частоте $f_{\text{ср}}$, Вт; F —

коэффициент шума приемника (в раз); $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/КГц — постоянная Больцмана; T — температура в Кельвинах; B_R — полоса приемника.

Коэффициент шума приемника определяется в основном коэффициентом шума усилителя высокой частоты или при его отсутствии — первым смесителем.

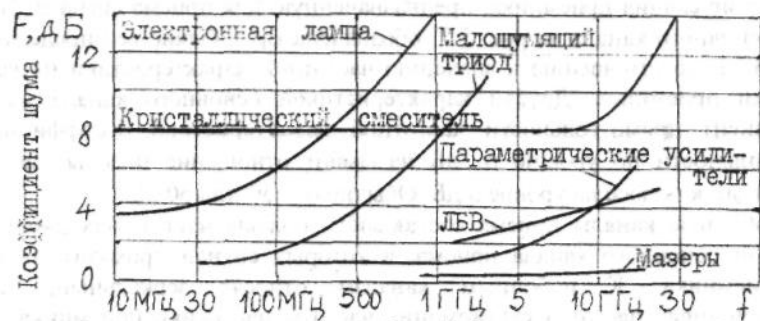


Рис. 5.8

Ориентировочные значения величины F можно получить из рис. 5.8. Поскольку побочные — это каналы, по которым на приемное устройство воздействуют внешние помехи, то для оценки воздействия помех по этим каналам используют термин восприимчивость вместо чувствительности, которая характеризует реакцию приемника на полезный сигнал в отсутствие помех. Восприимчивость побочных каналов приема измеряют в децибелах относительно чувствительности основного канала.

5.3.2. Блокирование, перекрестные искажения и интермодуляция

При достаточно большом уровне помеха, действующая по одному из соседних каналов приема и не проходящая на выход приемника, может вызвать эффект блокирования полезного сигнала. Блокирование в радиоприемном устройстве — это изменение уровня сигнала или отношения S/N на выходе при действии радиопомехи, частота которой не совпадает с частотами основного и побочных каналов приема. Полоса частот, в которой имеет место блокирование, называется полосой блокирования $B_{бл}$. При блокировании под воздействием радиопомехи, частота которой не совпадает с рабочей частотой, уменьшается усиление приемника. Уменьшение усиления обычно происходит в первых каскадах, которые из-за недостаточной избирательности преселектора находятся в наихудших условиях по помехозащищенности. Эффект блокирования проявляется тем сильнее, чем выше уровень помехи и чем ближе ее частота к основному каналу приемника. Блокирование сопровождается уменьшением уровня полезного сигнала на выходе и ухудшением отношения S/N . С другой стороны мощная помеха по соседнему каналу может вызывать

также и искажения структуры спектра сигнала на выходе радиоприемного устройства. Такого рода искажения называют *перекрестными*. Они вызывают изменение структуры спектра сигнала на выходе приемника при действии сигнала и модулированной радиопомехи, частота которой не совпадает с частотами основного и побочных каналов. Перекрестные искажения являются результатом взаимодействия на нелинейностях приемника спектральных составляющих полезного сигнала и модулированной помехи и проявляются в том, что модуляция мешающего сигнала, у которого все составляющие спектра находятся вне полосы пропускания приемника, переносится на полезный сигнал. Различимость полезного сигнала при этом ухудшается, а при значительных уровнях перекрестной модуляции нормальный прием полезного сигнала становится невозможным. Сам мешающий сигнал при этом на вход приемника не проникает.

Коэффициент перекрестных искажений $K_{пер}$ в радиоприемном устройстве определяется отношением уровня спектральных составляющих $U_{вых,пер}$, возникающих в результате перекрестных искажений, к уровню сигнала на выходе приемника $U_{вых,с}$ при заданных параметрах радиопомехи и сигнала:

$$K_{пер} = U_{вых,пер} / U_{вых,с}.$$

Еще одним видом нелинейного взаимодействия, который надо учитывать при анализе ЭМС, является *интермодуляция*. Это явление обусловлено возникновением помех на выходе приемника при действии на его входе двух или более сигналов радиопомех, частоты которых не совпадают с частотами основного и побочных каналов приема. Интермодуляция является результатом взаимодействия на нелинейностях приемника нескольких сигналов. При этом возникает новый сигнал с частотой $f_{инт} = \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \dots + \alpha_n f_n$, где f_1, f_2, \dots, f_n — частоты взаимодействующих сигналов, а $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ — целые положительные или отрицательные числа. Если частота интермодуляционного сигнала попадает в полосу пропускания приемника, то такой сигнал проходит на выход и создает помеху для принимаемого полезного сигнала. Число $N = |\alpha_1| + |\alpha_2| + \dots + |\alpha_n|$ называется порядком интермодуляционного сигнала.

Интермодуляционные помехи могут возникать в усилителях высокой частоты при больших уровнях помехи, когда входные каскады нельзя рассматривать как линейные, так и в смесителях приемника. Наиболее вероятно образование интермодуляционной помехи в первых каскадах приемника. Поэтому оценивая ЭМС, часто ограничиваются анализом интермодуляционной помехи только в этих каскадах.

Количественной мерой интермодуляции является коэффициент интермодуляции — отношение уровня радиопомехи, возникающей в результате интермодуляции в радиоприемном устройстве, к уровню сигнала, соответствующего чувствительности приемника, определенных на выходе его

$$K_{\text{инт}} = \frac{U_{\text{вых}}(U_c + \sum U_{nt}) - U_{\text{вых}}(U_c)}{U_{\text{вых}}(U_c)}, \quad U_c = U_{\text{пор}}$$

где $U_{\text{вых}}(U_c + \sum U_{nt})$ и $U_{\text{вых}}(U_c)$ - выходные напряжения при наличии и отсутствии помех; $U_{\text{пор}}$ - входное напряжение, соответствующее чувствительности приемника.

Перекрестные искажения, блокирование и интермодуляция присущи любым типам радиоприемных устройств: супергетеродинным, прямого усиления, с параметрическими усилителями и т. д. Они проявляются в тем меньшей степени, чем выше частотная избирательность входных цепей приемника и пассивных цепей его первых каскадов и чем ближе характеристики усилительных элементов к линейным, а смесительных - к квадратичным во всем диапазоне возможного изменения амплитуд сигналов и помех. Как показывают исследования, интенсивность помех, обусловленных интермодуляцией и блокированием или перекрестными искажениями, пропорциональна $U_{\text{п}}^3$ и $U_{\text{п}}^2$ соответственно, где $U_{\text{п}}$ - амплитуда помехи. Этим объясняется то, что приемник обычно более восприимчив к интермодуляционным помехам, чем к помехам, вызывающим перекрестные искажения и блокирование.

Библиографический список

1. Виноградов Е. М., Винокуров В. И., Харченко И. П. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: Учеб. пособие. Л.: Судостроение, 1986. 263 с.
2. Петровский В. И., Седельников Ю. Е. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: Учеб. пособие. М.: Радио и связь, 1986. 216 с.
3. Конструирование экранов и СВЧ-устройств: Учебник для вузов/Иод ред. Чернушенко А. М. М.: Радио и связь, 1990. 351 с.
4. Князев А. Д., Кечиев Л. Н., Петров Б. В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 1989. 223 с.
5. Ямольский В. Г., Фролов О. П. Антенны и электромагнитная совместимость. М.: Радио и связь, 1983. 271 с.
6. Кравченко В. И., Болотов Е. А., Летунова Н. И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. М.: Радио и связь, 1987. 306 с.
7. Бадалов А. Д., Михайлов А. С. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС: Справочник. М.: Радио и связь, 1990. 187 с.
8. Проблемы антенной техники / Под ред. Л. Д. Бахрах. М.: Радио и связь, 1989. 280 с.
9. Шевкопляс Б. В. Микропроцессорные структуры. Инженерные решения: Справочник. М.: Радио и связь, 1990. 367 с.
10. Благоевещенский Д. В. Распространение радиоволн: Учеб. пособие / СПбГААП. СПб., 1995. 127 с.
11. Благоевещенский Д. В. Распространение декаметровых радиоволн в высоких широтах. М.: Наука, 1981. 180 с.
12. Благоевещенский Д. В., Жеребцов Г. А. Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов. М.: Наука, 1987. 272 с.

Оглавление

1. ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ	3
1.1. Общие замечания	3
1.2. Электромагнитная обстановка	4
1.3. Главные определения	7
1.4. Источники и рецепторы электромагнитных помех	9
1.5. Воздействие помех на радиоэлектронные средства	17
1.6. Факторы воздействия на ЭМС радиоэлектронных средств	18
2. АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ЗАДАЧ ЭМС	20
2.1. Антенны и требования к ним	20
2.2. Параметры антенн как фактор ЭМС	21
2.2.1. Излучение антенн	21
2.2.2. Критерии помехозащищенности	23
2.2.3. Влияние помехозащищенности антенн на характеристики радиосистем	25
2.2.4. Антенны с высокой помехозащищенностью	26
2.3. Дальнее боковое излучение	28
2.4. Помехозащищенность антенн различного типа	29
2.4.1. Облучатели	29
2.4.2. Осесимметричные зеркальные антенны	30
2.4.3. Методы улучшения помехозащищенности антенн в заднем полупространстве	32
2.5. Вынесенные защитные экраны	33
3. ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ	36
3.1. Исходные соображения	36
3.2. Характер электромагнитных полей как источника помех	38
3.3. Экранирование электромагнитного поля	40
3.4. Экранирование магнитного поля	43
3.5. Экранирование электрического поля	44
3.6. Однослойные экраны	46
3.7. Многослойные экраны	50
3.8. Перфорированные экраны	52
4. СИГНАЛЫ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ	53
4.1. Оценка помеховой обстановки	53
4.2. Сигналы и помехи	55
4.2.1. Общие сведения о сигналах	55
4.2.2. Спектральное представление сигнала	55
4.2.3. Ширина спектра реальных сигналов	56
4.2.4. Помехи	58

4.2.4. Помехи	58
4.3. Индустриальные помехи	62
4.3.1. Источники непрерывных индустриальных помех	62
4.3.2. Источники импульсных помех	63
4.3.3. Дополнительные источники индустриальных помех	66
5. СОВМЕСТИМОСТЬ В ПЕРЕДАЮЩИХ И ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ	68
5.1. Представление помех на уровне источников в задачах ЭМС	68
5.2. Классификация излучений передатчика	68
5.3. Помехи в радиоприемниках	73
5.3.1. Восприимчивость радиоприемного устройства по основному и побочным каналам приема	73
5.3.2. Блокирование, перекрестные искажения и интермодуляция	76
Библиографический список	79