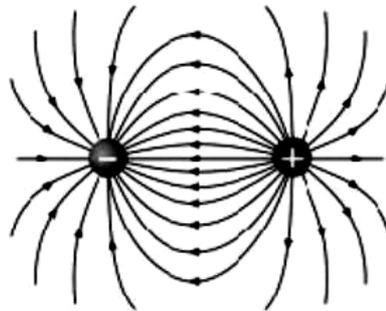


Н.А. МАЛКОВ, А.П. ПУДОВКИН

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ



◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

**Н.А. Малков, А.П. Пудовкин**

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Утверждено Ученым советом университета  
в качестве учебного пособия  
для студентов 4 и 5 курсов специальностей 210303 и 210201



---

Тамбов  
Издательство ТГТУ  
2007

УДК 621.396.6(075)  
ББК П844-017  
М194

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор  
*В.А. Федоров*

Кандидат технических наук, профессор  
*Ю.А. Брусенцов*

**Малков, Н.А.**

М194 Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств :  
учеб. пособие / Н.А. Малков, А.П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во Тамб.  
гос. техн. ун-та, 2007. – 88 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-0659-2.

Рассматриваются методы оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств, требования ЭМС и стойкости РЭС. Определяются паразитные электромагнитные связи источников. Материал представлен в виде инженерных методик с конкретными рекомендациями.

Предназначено для студентов 4 и 5 курсов специальностей 210303, 210201.

УДК 621.396.6(075)

ББК П844-017

ISBN 978-5-8265-0659-2

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный  
технический университет» (ТГТУ), 2007

Учебное издание

МАЛКОВ НИКОЛАЙ АРКАДЬЕВИЧ,  
ПУДОВКИН АНАТОЛИЙ ПЕТРОВИЧ

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Учебное пособие

Редактор З.Г. Чернова  
Инженер по компьютерному макетированию Т.Ю. Зотова

Подписано в печать 07.12.2007  
Формат 60 × 84 / 16. 5,11 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 792

Издательско-полиграфический центр ТГТУ  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## Введение

---

Международное сообщество пришло к пониманию необходимости ужесточить требования электромагнитной совместимости (ЭМС) и распространить регулирование в этой области на технические средства всех видов и назначений, подверженных воздействию электромагнитных помех и являющиеся их источниками.

Необходимость этих изменений была вызвана тем, что во все отрасли экономики и разные сферы жизни общества возрастающими темпами стали внедряться микроэлектроника, оборудование информационных технологий и средства радиосвязи, обладающие повышенной восприимчивостью к электромагнитным помехам. Этот процесс обусловлен развитием научно-технического прогресса, причем нет оснований полагать, что в обозримом будущем такое положение дел может измениться.

Обеспечение электромагнитной совместимости, т.е. достижение такого состояния, когда электротехнические, электронные и радиоэлектронные аппараты, системы и установки будут пригодны к выполнению функций по назначению при воздействии помех, создаваемых электротехническими изделиями и вызываемых природными явлениями, стало необходимым условием научно-технического прогресса, а следовательно, и устойчивого развития экономики, общества и государства.

Любые электрические и электронные изделия, включая аппараты, системы и стационарные и подвижные установки, способные создавать электромагнитные помехи и (или) восприимчивые к их воздействию, должны быть изготовлены таким образом, чтобы:

- создаваемые ими электромагнитные помехи не превышали уровня, обеспечивающего функционирование радио- и телекоммуникационного оборудования и других изделий в соответствии с их назначением;
- изделия имели достаточный уровень собственной устойчивости к электромагнитным помехам, обеспечивающий их функционирование в соответствии с назначением.

В качестве российских государственных стандартов были введены наиболее важные международные и европейские стандарты в области ЭМС, разработанные ТК 77 МЭК, СИСПР, другие ТК МЭК, СЕНЭЛЕК, ЕТСИ. В них были установлены требования устойчивости к электромагнитным помехам, требования по обеспечению качества электрической энергии в электрических сетях и новые методы испытаний, что дало возможность ориентировать отечественную промышленность на выполнение современных требований ЭМС, без чего невозможен выпуск продукции, конкурентоспособной на внутреннем и внешнем рынках. Все новые российские стандарты в области ЭМС были введены также в странах СНГ, т.е. приняты в качестве межгосударственных стандартов.

В результате усилий Госстандарта и Ростехрегулирования в России созданы условия для присоединения к принципам технического регулирования в области ЭМС, введенным в новой Директиве 2004/108/ЕС, принятой Европейским Парламентом и Европейским Советом (введена в действие с 20.07.2007). Действуют гармонизированные национальные стандарты ЭМС, функционирует испытательная инфраструктура, отечественная промышленность подготовлена к введению ЭМС на законодательном уровне. Сформировалось единодушное мнение отечественных ученых, производителей и испытателей о необходимости введения в стране европейской системы технического регулирования в области ЭМС.

# 1. ПРОБЛЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Понятие электромагнитной совместимости возникло еще в начале развития радиотехники и имело узкое смысловое значение – выбор частотного диапазона. В настоящее время МЭК определяет ЭМС, как способность оборудования или системы удовлетворительно работать в данной электромагнитной обстановке без внесения в нее какого-либо недопустимого электромагнитного возмущения. Электромагнитная совместимость нарушается, если уровень помех слишком высок, помехоустойчивость оборудования недостаточна.

Над проблемой ЭМС долгое время не задумывались, пока не были зарегистрированы сбои в банковских системах при воздействии помех. Сегодня человек настолько зависит от используемой электро- и радиотехники, что проблема обеспечения ЭМС стала для него жизненно важной.

Условно все помехи можно разделить на два класса: естественного и искусственного происхождения.

Помехи искусственного происхождения возникают в процессе человеческой деятельности. Помехи естественного происхождения не связаны с процессами жизнедеятельности человека и существуют, не зависимо от них.

Помехи искусственного происхождения, в свою очередь, делятся на непреднамеренные и организованные.

Непреднамеренные помехи возникают в процессе использования человеком различного рода устройств, генерация помех которыми является естественным следствием их функционирования.

Организованные помехи создаются искусственно с целью ухудшения функционирования или вывода из строя радиоэлектронных средств (РЭС). Организованные помехи в теории обеспечения требования ЭМС РЭС не рассматриваются. Тем не менее на практике они имеют место, и по характеру своего воздействия на элементы РЭС во многом идентичны мощным непреднамеренным электромагнитным помехам, особенно с точки зрения влияния на нормальное функционирование РЭС предполагаемой неблагоприятной ЭМС, в которой могут оказаться эти средства. Поэтому, чтобы выдержать основные, сложившиеся в практике обеспечения требований ЭМС РЭС аспекты, в классификации они объединены в единую группу с непреднамеренными помехами.

Основными источниками мощных электромагнитных помех являются: грозовые разряды, радиоэлектронные средства (мощные радиопередающие средства и радиолокационные станции), высоковольтные линии передачи, контактная сеть железных дорог, а также высоковольтные установки для научных исследований и технологических целей.

Практическое решение проблем ЭМС упрощенно сводится к двум моментам: знанию электромагнитной обстановки и помехоустойчивости оборудования и в приведении их в соответствие друг другу. Уже проведена огромная исследовательская и практическая работа, которая нашла отражение, прежде всего, в создании нормативной базы в области ЭМС в таких международных организациях, как МЭК, СИСПР и др. В настоящее время продолжается интенсивно вестись исследовательская работа. Расширяется методическая база, и создаются все более совершенные средства защиты от электромагнитных возмущений.

Большое значение имеют экранирующие свойства зданий и сооружений, длины и расположение кабелей, взаимное расположение оборудования и, в первую очередь, правильно выполненные системы заземления и выравнивания потенциалов. Во времени проведения проектных и монтажных работ, а также эксплуатации объекта при проведении мероприятий по защите от импульсных перенапряжений нельзя рассматривать различные типы оборудования, различные системы и коммуникации отдельно друг от друга.

Возникновение импульсных перенапряжений и помех, вызываемых электромагнитными воздействиями (грозовыми, коммутационными, радиочастотными и другими) на низковольтные сети, приводит не только к выходу из строя электроустановок, кабелей, распределительных щитов, но также и к повреждению оконечного оборудования и сбоям в его работе. Это связано, в первую очередь, с насыщенностью современных зданий и сооружений информационной, телекоммуникационной и другой цифровой техникой, имеющей очень низкий уровень защиты от импульсных перенапряжений и помех. Все это вызывает необходимость проведения соответствующих защитных мероприятий.

Опыт эксплуатации показывает, что без применения специальных защитных устройств (ограничителей импульсных перенапряжений) невозможна надежная эксплуатация устройств электропитания.

В России формально, согласно официальной статистике (например, той, которую ведет в энергетике фирма ОРГРЭС), практические проблемы ЭМС отсутствуют. В то же время проведенный анализ показал, что из-за несоблюдения требований ЭМС при проектировании, монтаже и эксплуатации объектов энергетике, связи и другого назначения имеют место случаи нарушения в работе этих объектов с серьезными экономическими последствиями.

Проведенное тестирование качества Московской городской телефонной связи показало, что около 30 % соединений признано неудовлетворительными по качеству из-за электромагнитных помех.

На объектах промышленности, в административных и жилых зданиях нередко имеет место неудовлетворительное качество электропитания, происходит повреждение электронной техники, а также наблюдается ускоренная электрохимическая коррозия трубопроводов из-за неправильного выполнения системы заземления – зануления.

Неудовлетворительное состояние дел в части выполнения требований ЭМС на объектах России обусловлено следующими факторами.

1. Большинство нормативных документов, регламентирующих проектирование, монтаж и эксплуатацию электроустановок, объектов связи и промышленности явно устарели и не соответствуют современным международным требованиям в области ЭМС. При практическом проектировании не используются современные методы численного анализа.

2. В настоящее время в России больше проводится реконструкция старых объектов, чем строится новых. В этих случаях чрезвычайно важно знать электромагнитную обстановку на объекте, подлежащем реконструкции. Методы и средства определения ЭМО на действующих объектах отсутствуют.

3. В процессе эксплуатации необходимо периодически проводить контроль ЭМО на объекте. Методики и нормы эксплуатационного контроля ЭМО в настоящее время не разработаны.

Применение в технологических процессах систем контроля, управления и сигнализации на базе современных электронных и микропроцессорных устройств обуславливает жесткие требования в обеспечении ЭМС на объектах. В связи с этим решаемые в данной работе задачи по разработке методов и средств диагностики ЭМО и практических мероприятий по обеспечению ЭМС в настоящее время, несомненно, актуальны.

### 1.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ЕГО ВИДЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ

На практике при характеристике электромагнитной обстановки используют термины «электрическое поле», «магнитное поле», «электромагнитное поле». Коротко поясним, что это означает и какая связь существует между ними. Электрическое поле создается зарядами. Например, во всех известных школьных опытах по электризации эбонита присутствует как раз электрическое поле. Магнитное поле создается при движении электрических зарядов по проводнику (рис. 1).



Рис. 1.1. Электромагнитное поле

Для характеристики величины электрического поля используется понятие напряженности электрического поля, обозначение  $E$ , единица измерения В/м (Вольт-на-метр). Величина магнитного поля характеризуется напряженностью магнитного поля  $H$ , единица А/м (Ампер-на-метр). При измерении сверхнизких и крайне низких частот часто также используется понятие магнитной индукции  $B$ , единица Тл (Тесла), одна миллионная часть Тл соответствует 1,25 А/м.

По определению, электромагнитное поле – это особая форма материи, посредством которой осуществляется воздействие между электрическими заряженными частицами. Физические причины существования электромагнитного поля связаны с тем, что изменяющееся во времени электрическое поле  $E$  порождает магнитное поле  $H$ , а изменяющееся  $H$  – вихревое электрическое поле: обе компоненты  $E$  и  $H$ , непрерывно изменяясь, возбуждают друг друга. Электромагнитное поле (ЭМП) неподвижных или равномерно движущихся заряженных частиц неразрывно связано с этими частицами. При ускоренном движении заряженных частиц ЭМП «отрывается» от них и существует независимо в форме электромагнитных волн, не исчезая с устранением источника (например, радиоволны не исчезают и при отсутствии тока в излучившей их антенне).

Электромагнитные волны характеризуются длиной волны, обозначение –  $\lambda$  (лямбда). Источник, генерирующий излучение, а по сути создающий электромагнитные колебания, характеризуется частотой –  $f$ .

Важная особенность ЭМП – это деление его на так называемую «ближнюю» и «дальнюю» зоны. В «ближней» зоне, или зоне индукции, на расстоянии от источника  $r < \lambda$  ЭМП можно считать квазистатическим. Здесь оно быстро убывает с расстоянием, обратно пропорционально квадрату  $r^2$  или кубу  $r^3$  расстояния. В «ближней» зоне излучения электромагнитная волна еще не сформирована. Для характеристики ЭМП измерения переменного электрического поля  $E$  и переменного магнитного поля  $H$  производятся раздельно. Поле в зоне индукции служит для формирования бегущей составляющей полей (электромагнитной волны), ответственных за излучение.

«Дальняя» зона – это зона сформировавшейся электромагнитной волны, начинается с расстояния  $r > 3\lambda$ . В «дальней» зоне интенсивность поля убывает обратно пропорционально расстоянию до источника  $r$ . В «дальней» зоне излучения есть связь между  $E$  и  $H$ :  $E = 377 H$ , где 377 – волновое сопротивление вакуума, Ом. Поэтому измеряется, как правило, только  $E$ . В России на частотах выше 300 МГц обычно измеряется плотность потока электромагнитной энергии (ППЭ), или вектор Пойтинга. Обозначается как  $S$ , единица измерения Вт/м<sup>2</sup>. ППЭ характеризует количество энергии, переносимой электромагнитной волной в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярной направлению распространения волны.

#### 1.1. Международная классификация электромагнитных волн по частотам

Наименование частотного диапазона	Границы диапазона	Наименование волнового диапазона	Границы диапазона
Крайние низкие, КНЧ, Гц	3...30	Декаметровые, Мм	100...10
Сверхнизкие, СНЧ, Гц	30...300	Метровые, Мм	10...1
Инфранизкие, ИНЧ, кГц	0,3...3	Гектокилометровые, км	1000...100
Очень низкие, ОНЧ, кГц	3...30	Мириаметровые, км	100...10

Низкие частоты, НЧ, кГц	30...300	Километровые, км	10...1
Средние, СЧ, МГц	0,3...3	Гектометровые, км	1...0,1
Высокие частоты, ВЧ, МГц	3...30	Декаметровые, м	100...10
Очень высокие, ОВЧ, МГц	30...300	Метровые, м	10...1
Ультравысокие, УВЧ, ГГц	0,3...3	Дециметровые, м	1...0,1
Сверхвысокие, СВЧ, ГГц	3...30	Сантиметровые, см	10...1
Крайне высокие, КВЧ, ГГц	30...300	Миллиметровые, мм	10...1
Гипервысокие, ГВЧ, ГГц	300...3000	Децимиллиметровые, мм	1...0,1

## 1.2. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Среди основных источников ЭМП можно перечислить:

- электротранспорт (трамваи, троллейбусы, поезда, ...);
- линии электропередач (городского освещения, высоковольтные, ...);
- электропроводка (внутри зданий, телекоммуникации, ...);
- бытовые электроприборы;
- теле- и радиостанции (транслирующие антенны);
- спутниковая и сотовая связь (транслирующие антенны);
- радары;
- персональные компьютеры.

*Электротранспорт.* Транспорт на электрической тяге – электропоезда (в том числе поезда метрополитена), троллейбусы, трамваи и т.п. – является относительно мощным источником магнитного поля в диапазоне частот 0...1000 Гц. Максимальные значения плотности потока магнитной индукции  $B$  в пригородных электричках достигают 75 мкТл при среднем значении 20 мкТл. Среднее значение  $B$  на транспорте с электроприводом постоянного тока зафиксировано на уровне 29 мкТл.

*Линии электропередач (ЛЭП).* Провода работающей ЛЭП создают в прилегающем пространстве электрическое и магнитное поля промышленной частоты. Расстояние, на которое распространяются эти поля от проводов линии, достигает десятков метров. Дальность распространения электрического поля зависит от класса напряжения ЛЭП (цифра, обозначающая класс напряжения стоит в названии ЛЭП – например ЛЭП 220 кВ), чем выше напряжение – тем больше зона повышенного уровня электрического поля, при этом размеры зоны не изменяются в течение времени работы ЛЭП. Дальность распространения магнитного поля зависит от величины протекающего тока или от нагрузки линии. Поскольку нагрузка ЛЭП может неоднократно изменяться как в течение суток, так и с изменением сезонов года, размеры зоны повышенного уровня магнитного поля также меняются.

*Биологическое действие.* Электрические и магнитные поля являются очень сильными факторами влияния на состояние всех биологических объектов, попадающих в зону их воздействия. Например, в районе действия электрического поля ЛЭП у насекомых проявляются изменения в поведении: так у пчел фиксируется повышенная агрессивность, беспокойство, снижение работоспособности и продуктивности, склонность к потере маток; у жуков, комаров, бабочек и других летающих насекомых наблюдается изменение поведенческих реакций, в том числе изменение направления движения в сторону с меньшим уровнем поля. У растений распространены аномалии развития – часто меняются формы и размеры цветков, листьев, стеблей, появляются лишние лепестки. Здоровый человек страдает от относительно длительного пребывания в поле ЛЭП. Кратковременное облучение (минуты) способно привести к негативной реакции только у гиперчувствительных людей или у больных некоторыми видами аллергии. В последние годы в числе отдаленных последствий часто называются онкологические заболевания.

Санитарные нормы, несмотря на то что магнитное поле во всем мире сейчас считается наиболее опасным для здоровья, предельно допустимая величина магнитного поля для населения в России не нормируется. Большая часть ЛЭП строилась без учета этой опасности. На основании массовых эпидемиологических обследований населения, проживающего в условиях облучения магнитными полями ЛЭП как безопасный или «нормальный» уровень для условий продолжительного облучения, не приводящий к онкологическим заболеваниям, независимо друг от друга шведскими и американскими специалистами рекомендована величина плотности потока магнитной индукции 0,2...0,3 мкТл. Основной принцип защиты здоровья населения от электромагнитного поля ЛЭП состоит в установлении санитарно-защитных зон для линий электропередачи и снижением напряженности электрического поля в жилых зданиях и в местах возможного продолжительного пребывания людей путем применения защитных экранов, границы санитарно-защитных зон для ЛЭП которых на действующих линиях определяются по критерию напряженности электрического поля – 1 кВ/м (см. табл. 1.2 – 1.4).

К размещению высоковольтных линий (ВЛ) ультравысоких напряжений (750 и 1150 кВ) предъявляются дополнительные требования по условиям воздействия электрического поля на население. Так, ближайшее расстояние от оси проектируемых ВЛ 750 и 1150 кВ до границ населенных пунктов должно быть, как правило, не менее 250 и 300 м, соответственно. Как определить класс напряжения ЛЭП? Лучше всего обратиться в местное энергетическое предприятие, но можно попробовать

визуально, хотя не специалисту это сложно: 330 кВ – два провода, 500 кВ – три провода, 750 кВ – четыре провода; ниже 330 кВ – по одному проводу на фазу, определить можно только приблизительно по числу изоляторов в гирлянде: 220 кВ – 10 ... 15 шт., 110 кВ – 6 ... 8 шт., 35 кВ – 3 ... 5 шт., 10 кВ и ниже – 1 шт.

### 1.2. Границы санитарно-защитных зон для ЛЭП согласно СН № 2971–84

Напряжение ЛЭП, кВ	330	500	750	1150
Размер санитарно-защитной (охранной) зоны, м	20	30	40	55

### 1.3. Границы санитарно-защитных зон для ЛЭП в Москве

Напряжение ЛЭП, кВ	<20	35	110	150...220	330...500	750	1150
Размер санитарно-защитной зоны, м	10	15	20	25	30	40	55

### 1.4. Предельно допустимые уровни воздействия электрического поля ЛЭП

ПДУ, кВ/м	Условия облучения
0,5	Внутри жилых зданий
1,0	На территории зоны жилой застройки
5,0	В населенной местности вне зоны жилой застройки (земли городов в пределах городской черты в границах их перспективного развития на 10 лет, пригородные и зеленые зоны, курорты, земли поселков городского типа в пределах поселковой черты и сельских населенных пунктов в пределах черты этих пунктов), а также на территории огородов и садов
10,0	На участках пересечения воздушных линий электропередачи с автомобильными дорогами I – IV категорий
15,0	В ненаселенной местности (незастроенные местности, хотя бы и часто посещаемые людьми, доступные для транспорта, и сельскохозяйственные угодья)
20,0	В труднодоступной местности (недоступной для транспорта и сельскохозяйственных машин) и на участках, специально выгороженных для исключения доступа населения

*Предельно допустимые уровни (ПДУ).* В пределах санитарно-защитной зоны ВЛ запрещается:

- размещать жилые и общественные здания и сооружения;
- устраивать площадки для стоянки и остановки всех видов транспорта;
- размещать предприятия по обслуживанию автомобилей и склады нефти и нефтепродуктов;
- производить операции с горючим, выполнять ремонт машин и механизмов.

Территории санитарно-защитных зон разрешается использовать как сельскохозяйственные угодья, однако рекомендуется выращивать на них культуры, не требующие ручного труда. В случае, если на каких-то участках напряженность электрического поля за пределами санитарно-защитной зоны окажется выше предельно допустимой 0,5 кВ/м внутри здания и выше 1 кВ/м на территории зоны жилой застройки (в местах возможного пребывания людей), должны быть приняты меры для снижения напряженности. Для этого на крыше здания с неметаллической кровлей размещается практически любая металлическая сетка, заземленная не менее чем в двух точках. В зданиях с металлической крышей достаточно заземлить кровлю не менее чем в двух точках. На приусадебных участках или других местах пребывания людей напряженность поля промышленной частоты может быть снижена путем установления защитных экранов, например это железобетонные, металлические заборы, тросовые экраны, деревья или кустарники высотой не менее двух метров.

*Электропроводка.* Наибольший вклад в электромагнитную обстановку жилых помещений в диапазоне промышленной частоты 50 Гц вносит электротехническое оборудование здания, а именно кабельные линии, подводящие электричество ко всем квартирам и другим потребителям системы жизнеобеспечения здания, а также распределительные щиты и трансформаторы. В помещениях, смежных с этими источниками, обычно повышен уровень магнитного поля промышленной частоты,

вызываемый протекающим электротоком. Уровень электрического поля промышленной частоты при этом обычно не высокий и не превышает ПДУ для населения 500 В/м.

В настоящее время многие специалисты считают предельно допустимой величину магнитной индукции равной 0,2...0,3 мкТл. При этом считается, что развитие заболеваний – прежде всего лейкемии – очень вероятно при продолжительном облучении человека полями более высоких уровней (несколько часов в день, особенно в ночные часы, в течение периода более года).

*Рекомендации по защите.*

Основная мера защиты – предупредительная:

- необходимо исключить продолжительное пребывание (регулярно по несколько часов в день) в местах повышенного уровня магнитного поля промышленной частоты;
- кровать для ночного отдыха максимально удалять от источников продолжительного облучения, расстояние до распределительных шкафов, силовых электрокабелей должно быть 2,5...3 метра;
- если в помещении или в смежном есть какие-то неизвестные кабели, распределительные шкафы, трансформаторные подстанции – удаление должно быть максимально возможным, оптимально – промерить уровень электромагнитных полей до того, как жить в таком помещении;
- при необходимости установить полы с электроподогревом выбирать системы с пониженным уровнем магнитного поля.

*Бытовая электротехника.* Все бытовые приборы, работающие с использованием электрического тока, являются источниками электромагнитных полей. Наиболее мощными следует признать СВЧ-печи, аэрогрили, холодильники с системой «без инея», кухонные вытяжки, электроплиты, телевизоры. Реально создаваемое ЭМП в зависимости от конкретной модели и режима работы может сильно различаться среди оборудования одного типа. Значения магнитного поля тесно связаны с мощностью прибора – чем она выше, тем выше магнитное поле при его работе. Значения электрического поля промышленной частоты практически всех электробытовых приборов не превышают нескольких десятков В/м на расстоянии 0,5 м, что значительно меньше ПДУ 500 В/м. (см. табл. 1.5 – 1.6).

По этому при размещении в квартире бытовой техники руковод-ствуйтесь следующими принципами: размещайте бытовые электроприборы по возможности дальше от мест отдыха, не располагайте бытовые электроприборы по-близости и не ставьте их друг на друга.

Микроволновая печь (или СВЧ-печь) в своей работе использует для разогрева пищи электромагнитное поле, называемое также микроволновым излучением или СВЧ-излучением. Рабочая частота СВЧ-излучения микроволновых печей составляет 2,45 ГГц. Именно этого излучения и боятся многие люди. Однако, современные микроволновые печи оборудованы достаточно совершенной защитой, которая не дает электромагнитному полю вырываться за пределы рабочего объема. Вместе с тем, нельзя говорить, что поле совершенно не проникает вне микроволновой печи.

### 1.5. Уровни магнитного поля промышленной частоты бытовых электроприборов на расстоянии 0,3 м

Бытовой электроприбор	От, мкТл	До, мкТл
Пылесос	0,2	2,2
Дрель	2,2	5,4
Утюг	0,0	0,4
Миксер	0,5	2,2
Телевизор	0,0	2,0
Люминесцентная лампа	0,5	2,5
Кофеварка	0,0	0,2
Стиральная машина	0,0	0,3
Микроволновая печь	4,0	12
Электрическая плита	0,4	4,5

По разным причинам часть электромагнитного поля, предназначенного для приготовления продукта, проникает наружу, особенно интенсивно, как правило, в районе правого нижнего угла дверцы. Для обеспечения безопасности при использовании печей в быту в России действуют санитарные нормы, ограничивающие предельную величину утечки СВЧ-излучения микроволновой печи. Называются они «Предельно допустимые уровни плотности потока энергии, создаваемой микроволновыми печами» и имеют обозначение СН № 2666–83. Согласно этим санитарным нормам, величина плотности потока энергии электромагнитного поля не должна превышать 10 мкВт/см<sup>2</sup> на расстоянии 50 см от любой точки корпуса печи при нагреве одного литра воды. На практике практически все новые современные микроволновые печи выдерживают это требование с большим запасом. Тем не менее, при покупке новой печи надо убедиться, что в сертификате соответствия зафиксировано соответствие вашей печи требованиям этих санитарных норм. Надо помнить, что со временем степень защиты может снижаться, в основном из-за появления микрощелей в уплотнении дверцы. Это может происходить как из-за попадания грязи, так и из-

за механических повреждений. Поэтому дверца и ее уплотнение требует аккуратности в обращении и тщательного ухода. Срок гарантированной стойкости защиты от утечек электромагнитного поля при нормальной эксплуатации – несколько лет. Через пять – шесть лет эксплуатации целесообразно проверить качество защиты, для чего пригласить специалиста из специально аккредитованной лаборатории по контролю электромагнитного поля. Кроме СВЧ-излучения работу микроволновой печи сопровождает интенсивное магнитное поле, создаваемое током промышленной частоты 50 Гц, протекающим в системе электропитания печи. При этом микроволновая печь является одним из наиболее мощных источников магнитного поля в квартире.

### 1.6. Предельно допустимые уровни электромагнитного поля для потребительской продукции, являющейся источником ЭМП

Источник	Диапазон	Значение ПДУ	Условия измерения
Индукционные печи	20...22 кГц	500 В/м 4 А/м	Расстояние 0,3 м от корпуса
СВЧ печи	2,45 ГГц	10 мкВт/см <sup>2</sup>	Расстояние 0,50 ± 0,05 м от любой точки, при нагрузке 1 л воды
Видеодисплейный терминал ПЭВМ	5 Гц...2 кГц	$E_{ПДУ} = 25 \text{ В/м}$ $B_{ПДУ} = 250 \text{ нТл}$	Расстояние 0,5 м вокруг монитора ПЭВМ
	2...400 кГц	$E_{ПДУ} = 2,5 \text{ В/мВ}$ ПДУ = 25 нТл	
	поверхностный электростатический потенциал	$V = 500 \text{ В}$	Расстояние 0,1 м от экрана монитора ПЭВМ
Прочая продукция	50 Гц	$E = 500 \text{ В/м}$	Расстояние 0,5 м от корпуса изделия
	0,3...300 кГц	$E = 25 \text{ В/м}$	
	0,3...3 МГц	$E = 15 \text{ В/м}$	
	3...30 МГц	$E = 10 \text{ В/м}$	
	30...300 МГц	$E = 3 \text{ В/м}$	
	0,3...30 ГГц	ППЭ = 10 мкВт/см <sup>2</sup>	

*Теле- и радиостанции.* Передающие радиостанции (ПРЦ) размещаются в специально отведенных для них зонах и могут занимать довольно большие территории (до 1000 га). По своей структуре они включают в себя одно или несколько технических зданий, где находятся радиопередатчики и антенные поля, на которых располагаются до нескольких десятков антенно-фидерных систем (АФС). АФС включает в себя антенну, служащую для измерения радиоволн, и фидерную линию, подводящую к ней высокочастотную энергию, генерируемую передатчиком. Зону возможного неблагоприятного действия ЭМП, создаваемых ПРЦ, можно условно разделить на две части. Первая часть зоны – это собственно территория ПРЦ, где размещены все службы, обеспечивающие работу радиопередатчиков и АФС. Это территория охраняется и на нее допускаются только лица, профессионально связанные с обслуживанием передатчиков, коммутаторов и АФС. Вторая часть зоны – это прилегающие к ПРЦ территории, доступ на которые не ограничен и где могут размещаться различные жилые постройки, в этом случае возникает угроза облучения населения, находящегося в этой части зоны. Расположение РНЦ может быть различным, например, в Москве и московском регионе характерно размещение в непосредственной близости или среди жилой застройки. Высокие уровни ЭМП наблюдаются на территориях, а нередко и за пределами размещения передающих радиостанций низкой, средней и высокой частоты (ПРЦ НЧ, СЧ и ВЧ). Детальный анализ электромагнитной обстановки на территориях ПРЦ свидетельствует о ее крайней сложности, связанной с индивидуальным характером интенсивности и распределения ЭМП для каждого радиостанции. В связи с этим специальные исследования такого рода проводятся для каждого отдельного ПРЦ. Широко распространенными источниками ЭМП в населенных местах в настоящее время являются радиотехнические передающие центры (РТПЦ), излучающие в окружающую среду ультракороткие волны ОВЧ и УВЧ-диапазонов. Сравнительный анализ санитарно-защитных зон (СЗЗ) и зон ограничения застройки в зоне действия таких объектов показал, что наибольшие уровни облучения людей и окружающей среды наблюдаются в районе размещения РТПЦ «старой постройки» с высотой антенной опоры не более 180 м. Наибольший вклад в суммарную интенсивность воздействия вносят «угловатые» трех- и шестиэтажные антенны ОВЧ ЧМ-вещания.

*Радиостанции ДВ* (частоты 30...300 кГц). В этом диапазоне длина волн относительно большая (например, 2000 м для частоты 150 кГц). На расстоянии одной длины волны или меньше от антенны поле может быть достаточно большим, напри-

мер, на расстоянии 30 м от антенны передатчика мощностью 500 кВт, работающего на частоте 145 кГц, электрическое поле может быть выше 630 В/м, а магнитное – выше 1,2 А/м.

*Радиостанции СВ* (частоты 300 кГц...3 МГц). Данные для радиостанций этого типа говорят, что напряженность электрического поля на расстоянии 200 м может достигать 10 В/м, на расстоянии 100 м...25 В/м, на расстоянии 30 м...275 В/м (приведены данные для передатчика мощностью 50 кВт).

*Радиостанции КВ* (частоты 3...30 МГц). Передатчики радиостанций КВ имеют обычно меньшую мощность. Однако они чаще размещаются в городах, могут быть размещены даже на крышах жилых зданий на высоте 10...100 м. Передатчик мощностью 100 кВт на расстоянии 100 м может создавать напряженность электрического поля 44 В/м и магнитного поля 0,12 Ф/м.

*Телевизионные передатчики* располагаются, как правило, в городах. Передающие антенны размещаются обычно на высоте выше 110 м. С точки зрения оценки влияния на здоровье интерес представляют уровни поля на расстоянии от нескольких десятков метров до нескольких километров. Типичные значения напряженности электрического поля могут достигать 15 В/м на расстоянии 1 км от передатчика мощностью 1 МВт. В России в настоящее время проблема оценки уровня ЭМП телевизионных передатчиков особенно актуальна в связи с резким ростом числа телевизионных каналов и передающих станций. Основной принцип обеспечения безопасности – соблюдение установленных Санитарными нормами и правилами предельно допустимых уровней электромагнитного поля. Каждый радиопередающий объект имеет Санитарный паспорт, в котором определены границы санитарно-защитной зоны. Только при наличии этого документа территориальные органы Госсанэпиднадзора разрешают эксплуатировать радиопередающие объекты. Периодически они производят контроль электромагнитной обстановки на предмет ее соответствия установленным ПДУ.

*Спутниковая связь.* Системы спутниковой связи состоят из приемопередающей станции на Земле и спутника, находящегося на орбите. Диаграмма направленности антенны станций спутниковой связи имеет ярко выраженный узконаправленный основной луч – главный лепесток. Плотность потока энергии (ППЭ) в главном лепестке диаграммы направленности может достигать нескольких сотен Вт/м<sup>2</sup> вблизи антенны, создавая также значительные уровни поля на большом удалении. Например, станция мощностью 225 кВт, работающая на частоте 2,38 ГГц, создает на расстоянии 100 км ППЭ равное 2,8 Вт/м<sup>2</sup>. Однако рассеяние энергии от основного луча очень небольшое и происходит больше всего в районе размещения антенны.

*Сотовая связь.* Сотовая радиотелефония является сегодня одной из наиболее интенсивно развивающихся телекоммуникационных систем. Основными элементами системы сотовой связи являются базовые станции (БС) и мобильные радиотелефоны (МРТ). Базовые станции поддерживают радиосвязь с мобильными радиотелефонами, вследствие чего БС и МРТ являются источниками электромагнитного излучения в УВЧ диапазоне. Важной особенностью системы сотовой радиосвязи является весьма эффективное использование выделяемого для работы системы радиочастотного спектра (многократное использование одних и тех же частот, применение различных методов доступа), что делает возможным обеспечение телефонной связью значительного числа абонентов. В работе системы применяется принцип деления некоторой территории на зоны, или «соты», радиусом обычно 0,5...10 километров. Базовые станции (БС) поддерживают связь с находящимися в их зоне действия мобильными радиотелефонами и работают в режиме приема и передачи сигнала. В зависимости от стандарта (табл. 17) БС излучают электромагнитную энергию в диапазоне частот 463...1880 МГц. Антенны БС устанавливаются на высоте 15...100 метров от поверхности земли на уже существующих постройках (общественных, служебных, производственных и жилых зданиях, дымовых трубах промышленных предприятий и т.д.) или на специально сооруженных мачтах. Среди установленных в одном месте антенн БС имеются как передающие (или приемопередающие), так и приемные антенны, которые не являются источниками ЭМП. Исходя из технологических требований построения системы сотовой связи, диаграмма направленности антенн в вертикальной плоскости рассчитана таким образом, что основная энергия излучения (более 90 %) сосредоточена в довольно узком «луче». Он всегда направлен в сторону от сооружений, на которых находятся антенны БС, и выше прилегающих построек, что является необходимым условием для нормального функционирования системы.

БС являются видом передающих радиотехнических объектов, мощность излучения которых (загрузка) не является постоянной 24 часа в сут-ки. Загрузка определяется наличием владельцев сотовых телефонов в зоне обслуживания конкретной базовой станции и их желанием воспользоваться телефоном для разговора, что, в свою очередь, коренным образом зависит от времени суток, места расположения БС, дня недели и др. В ночные часы загрузка БС практически равна нулю, т.е. станции в основном «молчат».

### 1.7. Краткие технические характеристики стандартов системы сотовой радиосвязи, действующих в России

Наименование стандарта	Диапазон рабочих частот БС, МГц	Диапазон рабочих частот МРТ, МГц	Максимальная излучаемая мощность БС, Вт	Максимальная излучаемая мощность
МРТ Радиус «соты» NMT-450 Аналоговый	463...467,5	453...457,5	100	1 Вт; 1...40 м

AMPS Аналоговый	869...894	824...849	100	0,6 Вт; 2...20 км
D-AMPS (IS-136) Цифровой	869...894	824...849	50	0,2 Вт; 0,5...20 км
CDMA Цифровой	869...894	824...849	100	0,6 Вт; 2...40 км
GSM-900 Цифровой	925...965	890...915	40	0,25 Вт; 0,5...35 км
GSM-1800 (DCS) Цифровой	1805...1880	1710...1785	20	0,125 Вт; 0,5...35 км

*Мобильный радиотелефон* (МРТ) представляет собой малогабаритный приемопередатчик. В зависимости от стандарта телефона, передача ведется в диапазоне частот 453...1785 МГц. Мощность излучения МРТ является величиной переменной, в значительной степени зависящей от состояния канала связи «мобильный радиотелефон – базовая станция», т.е. чем выше уровень сигнала БС в месте приема, тем меньше мощность излучения МРТ. Максимальная мощность находится в границах 0,125...1 Вт, однако в реальной обстановке она обычно не превышает 0,05...0,2 Вт. Вопрос о воздействии излучения МРТ на организм пользователя до сих пор остается открытым. Многочисленные исследования, проведенные учеными разных стран, включая Россию, на биологических объектах (в том числе, на добровольцах), привели к неоднозначным, иногда противоречащим друг другу, результатам. Неоспоримым остается лишь тот факт, что организм человека «откликается» на наличие излучения сотового телефона.

При работе мобильного телефона электромагнитное излучение воспринимается не только приемником базовой станции, но и телом пользователя, и, в первую очередь, его головой. Что при этом происходит в организме человека, насколько это воздействие опасно для здоровья? Однозначного ответа на этот вопрос до сих пор не существует. Однако эксперимент российских ученых показал, что мозг человека не только ощущает излучение сотового телефона, но и различает стандарты сотовой связи.

*Радиолокационные станции* оснащены, как правило, антеннами зеркального типа и имеют узконаправленную диаграмму излучения в виде луча, направленного вдоль оптической оси. Радиолокационные системы работают на частотах от 500 МГц до 15 ГГц, однако отдельные системы могут работать на частотах до 100 ГГц. Создаваемый ими ЭМ-сигнал принципиально отличается от излучения иных источников. Связано это с тем, что периодическое перемещение антенны в пространстве приводит к пространственной прерывистости облучения. Временная прерывистость облучения обусловлена цикличностью работы радиолокатора на излучение. Время наработки в различных режимах работы радиотехнических средств может исчисляться от нескольких часов до суток. Так у метеорологических радиолокаторов с временной прерывистостью 30 мин – излучение, 30 мин – пауза суммарная наработка не превышает 12 ч, в то время как радиолокационные станции аэропортов в большинстве случаев работают круглосуточно. Ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости обычно составляет несколько градусов, а длительность облучения за период обзора составляет десятки миллисекунд. Радары метеорологические могут создавать на удалении 1 км ППЭ ~ 100 Вт/м<sup>2</sup> за каждый цикл облучения. Радиолокационные станции аэропортов создают ППЭ ~ 0,5 Вт/м<sup>2</sup> на расстоянии 60 м. Морское радиолокационное оборудование устанавливается на всех кораблях, обычно оно имеет мощность передатчика на порядок меньшую, чем у аэродромных радаров, поэтому в обычном режиме сканирование ППЭ, создаваемое на расстоянии нескольких метров, не превышает 10 Вт/м<sup>2</sup>. Возрастание мощности радиолокаторов различного назначения и использование остронаправленных антенн кругового обзора приводит к значительному увеличению интенсивности ЭМИ СВЧ-диапазона и создает на местности зоны большой протяженности с высокой плотностью потока энергии. Наиболее неблагоприятные условия отмечаются в жилых районах городов, в черте которых размещаются аэропорты.

*Персональные компьютеры.* Основным источником неблагоприятного воздействия на здоровье пользователя компьютера является средство визуального отображения информации на электронно-лучевой трубке. Ниже перечислены основные факторы его неблагоприятного воздействия.

Эргономические параметры экрана монитора:

- снижение контраста изображения в условиях интенсивной внешней засветки;
- зеркальные блики от передней поверхности экранов мониторов;
- наличие мерцания изображения на экране монитора.

Излучательные характеристики монитора:

- электромагнитное поле монитора в диапазоне частот 20 Гц...1000 МГц;
- статический электрический заряд на экране монитора;
- ультрафиолетовое излучение в диапазоне 200...400 нм;
- инфракрасное излучение в диапазоне 1050 нм...1 мм;
- рентгеновское излучение > 1,2 кэВ.

*Компьютер как источник переменного электромагнитного поля.* Основными составляющими частями персонального компьютера (ПК) являются: системный блок (процессор) и разнообразные устройства ввода/вывода информации: клавиатура, дисковые накопители, принтер, сканер и т.п. Каждый персональный компьютер включает средство визуального отображения информации, называемое по-разному – монитор, дисплей. Как правило, в его основе – устройство на основе электронно-лучевой трубки. ПК часто оснащают сетевыми фильтрами (например, типа «Pilot»), источниками бесперебойного питания и другим вспомогательным электрооборудованием. Все эти элементы при работе ПК формируют сложную электромагнитную обстановку на рабочем месте пользователя.

Источник; диапазон частот (первая гармоника); монитор, сетевой трансформатор блока питания 50 Гц, статический преобразователь напряжения в импульсном блоке питания 20...100 кГц; блок кадровой развертки и синхронизации 48...160 Гц; блок строчной развертки и синхронизации 15 110 кГц; ускоряющее анодное напряжение монитора (только для мониторов с ЭЛТ) 0 Гц (электростатика); системный блок (процессор) 50 Гц...1000 МГц; устройства ввода/вывода информации 0...50 Гц; источники бесперебойного питания 50 Гц, 20...100 кГц. Электромагнитное поле, создаваемое персональным компьютером, имеет сложный спектральный состав в диапазоне частот 0...1000 МГц (табл. 1.8). Электромагнитное поле имеет электрическую ( $E$ ) и магнитную ( $H$ ) составляющие, причем взаимосвязь их достаточно сложна, поэтому оценка  $E$  и  $H$  производится раздельно.

### 1.8. Максимальные зафиксированные на рабочем месте значения ЭМП

Вид поля	Диапазон частот	Единица измерения напряженности поля	Значение напряженности поля по оси экрана вокруг монитора
Электрическое поле	100 кГц ... 300 МГц	В/м	17,0 24,0
	0,02...2 кГц	В/м	150,0 155,0
	2...400 кГц	В/м	14,0 16,0
Магнитное поле	100 кГц ... 300 МГц	мА/м	
	0,02...2 кГц	мА/м	550,0 600,0
	2...400 кГц	мА/м	35,0 35,0
Электростатическое поле		кВ/м	22,0

В части электромагнитных полей стандарту MPR II соответствуют российские санитарные нормы СанПиН 2.2.2.542–96 «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ».

*Средства защиты пользователей от ЭМП.* В основном из средств защиты предлагаются защитные фильтры для экранов мониторов. Они используются для ограничения действия на пользователя вредных факторов со стороны экрана монитора.

## 2. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ

### 2.1. ВЛИЯНИЕ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ НА РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА

Грозовые разряды (молнии) – это наиболее распространенный источник мощных электромагнитных помех естественного происхождения [1, 5]. По приближенным подсчетам в земную поверхность каждую секунду ударяют около ста молний. На окружающие предметы, электротехнические сооружения, средства связи, РЭС, живую природу молнии оказывают неблагоприятные воздействия:

- электростатическое;
- электромагнитное;
- динамическое;
- термическое;
- биологическое.

Удары молнии нередко приводят к гибели людей и наносят большой материальный ущерб.

*Молния* представляет собой разновидность газового разряда при очень большой длине искры. Общая длина канала молнии достигает нескольких километров. Источником молнии является грозовое облако, несущее в себе скопление объемных положительных и отрицательных зарядов. Образование таких объемных зарядов различной полярности в облаке (поляризация облака) связано с конденсацией вследствие охлаждения водяных паров восходящих потоков теплого воздуха на положительных и отрицательных капелек влаги в облаке под действием интенсивных восходящих воздушных потоков.

В природе различают три основных типа грозовых разрядов:

1. Линейная молния – имеет вид узкой полосы между облаком и землей, между облаками или между отдельными скоплениями объемных зарядов внутри облака.
2. Шаровая молния – ярко светящийся, подвижный, выпуклый, относительно устойчивый сгусток плазмы, возникающий и исчезающий по мало изученным в настоящее время причинам.
3. Тихие разряды – корона, возникающая в местах резкой неоднородности напряженности электрического поля на выступающих заземленных предметах в предгрозовой период и во время грозы.

Линейная молния (в дальнейшем молния) встречается в природе наиболее часто и является, по сравнению с другими видами грозовых разрядов, самым распространенным источником мощных электромагнитных помех.

Грозовой разряд развивается по различным путям. Внутриоблачные разряды чаще всего бывают во время гроз, возникающих высоко над землей. В таких условиях молнии легче развиваться от нижней части заряженного облака к верхней или наоборот, чем пройти долгий путь от основания облака, т.е. ближайшей к земле кромке, до земли. Внутриоблачные разряды нередко наблюдаются в засушливых районах, где облака выше над поверхностью земли, чем в районах с влажным климатом. Для средних широт РФ, где облака располагаются на высоте около 1...3 км, число внутриоблачных разрядов и разрядов между облаками и землей почти одинаково.

Поляризация облака в процессе разделения зарядов происходит не одинаково. В 75...85 % всех случаев основание облака несет отрицательный заряд, и в процессе разряда именно заряд этой полярности передается земле. При этом амплитудное значение тока молнии при отрицательной ее полярности в среднем в 1,5...2 раза ниже, чем при положительной.

Механизм образования линейной молнии связан с постепенным накоплением разнополярных электрических зарядов на верхней и нижней частях облака и образованием вокруг него электрического поля возрастающей напряженности. Когда градиент потенциала в какой-либо точке облака достигает критического для воздуха значения (при нормальном атмосферном давлении около  $3 \cdot 10^6$  В/м), в этом месте возникает молния, которая начинается лидерной стадией и завершается обратным (главным) разрядом. Главная стадия грозового разряда и является источником МЭМП. Ввиду того, что в облаке образуется несколько изолированных друг от друга скоплений зарядов, молния обычно бывает многократной, т.е. состоит из нескольких единичных разрядов, развивающихся по одному и тому же пути. Средняя продолжительность главного разряда 20...50 мкс; число повторных разрядов может колебаться от 2 до 10 и более; интервал времени между повторными разрядами 0,001...0,5 с. Как показывают измерения, разрядный ток молнии представляет собой импульс с быстрым нарастанием тока от нуля до максимума (фронт волны) и сравнительно медленным спадом (хвост волны).

При осуществлении мер защиты и определения электромагнитной обстановки (ЭМО) в той или иной области в качестве расчетных могут быть приняты следующие значения основных величин характеристики молнии:

амплитуда тока молнии, А (Ам) .....	30 000
высота облака над землей, м .....	2000
длина канала молнии, м ( <i>h</i> ) .....	4500
число повторных разрядов в течение одного видимого удара молнии .....	3
длительность фронта импульса, мкс ( $\lambda\phi$ ) .....	3
длительность разряда молний, мкс .....	50
общая продолжительность молнии, с .....	0,5
число разрядов на 1 км <sup>2</sup> в год .....	0,1

Наибольшие значения амплитуд в спектре излучения молнии соответствуют частотам 300...20 000 Гц.

## 2.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА

В конечном итоге для обеспечения требований ЭМС и стойкости РЭС к воздействию МЭМП источники помех в основном интересуют разработчиков с точки зрения создания областей с неблагоприятными условиями для функционирования РЭС. Для грозовых разрядов можно выделить две такие области.

С одной стороны, это область близких грозовых разрядов, для которой характерно либо прямое воздействие токов молнии на РЭС, либо электромагнитное влияние излучения грозового разряда в ближней, соизмеримой с длиной его канала, зоне. Как правило, граница этой области определяется расстоянием до 3...5 км от канала молнии. С другой стороны, молния является источником электромагнитных полей, распространяющихся на большое расстояние от места разряда, которые также оказывают неблагоприятное влияние на РЭС в своей дальней (волновой) зоне на излучения. Эта зона – вторая область электромагнитного воздействия МЭМП грозовых разрядов на РЭС. В дальнейшем для удобства изложения первую область будем условно определять как область индукционного влияния, а вторую – как область электромагнитного влияния грозовых разрядов.

Так грозовой разряд в процессе своего формирования проходит три стадии – лидерную, обратного разряда и стадию после свечения, то и электромагнитные поля в окружающем пространстве будут соответствовать этим трем стадиям, поочередно сменяя друг друга. Наибольшее электромагнитное влияние молния оказывает во время обратного разряда. При этом выделяют две области формирования ЭМО: над поверхностью земли и ниже ее уровня.

*Область близких грозовых разрядов.* Большой вклад в исследование полей излучения молний внес Д.В. Разевиг. Им на основе вычисления скалярного и векторного электродинамических потенциалов излучения молнии были получены значения напряженностей электрических полей в окружающем канал разряда пространстве в виде суммы собственно электрической составляющей поля  $E_э$  и напряженности электрического поля, созданного изменением во времени магнитного поля канала молнии,  $E_м$ :

$$E = - \left( \text{grad}\varphi + \frac{\partial A}{\partial t} \right) = E_э + E_м,$$

где для точек, лежащих на расстоянии  $l \geq \tau_ф$  от канала молнии, параметры  $E_э$  и  $E_м$  принимают значения:

$$E_э = \frac{60 I_м}{\beta l} \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{(h/l)^2 + 1 - \beta^2}} \right], \quad (2.1)$$

$$E_м = \frac{60 I_м \beta}{l} \cdot \frac{1}{\sqrt{(h/l)^2 + 1 - \beta^2}}, \quad (2.2)$$

В (2.1) и (2.2) использованы следующие обозначения:  $h$  – длина канала молнии, м;  $l$  – расстояние от канала молнии до точки наблюдения, м; численный коэффициент 60 имеет размерность сопротивления Ом;  $I_м$  – амплитуда тока молнии, А;  $\beta$  – коэффициент, связывающий амплитуду тока и скорость его разряда  $v$ , численные значения которого приведены в табл. 2.1.

### 2.1. Связь между амплитудой тока молнии и скоростью обратного разряда

Амплитуда тока молнии $I_м$ , кА	2	5	10	20	50	100	200
Коэффициент $\beta = I_м/c$	0,047	0,074	0,105	0,147	0,228	0,316	0,427

Примечание:  $c$  – скорость света.

Для расстояний  $l/h \leq 1$ , где происходит формирование ЭМО, соответствующей первой области МЭМП, электрическая составляющая напряженности поля значительно превышает его магнитную составляющую. Тогда после введения замены  $r' = l/h$ .

Для значений  $\beta = 0,1...0,3$ , которые практически охватывают весь диапазон изменения скоростей обратного разряда, встречающихся на практике, нетрудно получить выражение для напряженности электрического поля и интересующей области

$$E = - \frac{60 I_м}{\beta h} \left[ \frac{1}{l^2} - \frac{1}{\sqrt{l^2 + 1}} \right]. \quad (2.3)$$

Аналогично напряженность магнитного поля в окружающем канал молнии пространстве

$$H = - \frac{I_м}{2\pi h} \left\{ \frac{1}{l} - \frac{l}{\left[ \sqrt{l^2 + 1} + 1 \right] \sqrt{l^2 + 1}} \right\}. \quad (2.4)$$

В (2.3) и (2.4) приняты обозначения, соответствующие формулам (2.1) и (2.2).

Выражения (2.3) и (2.4) описывают ЭМО, созданную каналом молнии в области существования МЭМП над поверхностью земли.

Воздействию грозовых разрядов или созданных ими МЭМП подвержены не только объекты РЭС, находящиеся над землей или на ее поверхности, но и расположенные непосредственно в грунте. При этом земля, обладающая полупроводящими свойствами, оказывает существенное влияние на формирование характеристик электромагнитных полей в ее толще. Как и для РЭС, находящихся над землей или на ее поверхности, заглубленные средства могут быть подвержены как непосредственному воздействию токов молнии, так и их электромагнитному влиянию.

При ударе молнии в землю ее ток растекается от места удара во все стороны. При наличии участков с повышенной по отношению к земле проводимостью (например, подземных грунтовых вод, кабелей связи в металлической оболочке) поблизости от места удара молнии большая часть или весь ток молнии может попасть в эту область, стремясь распространиться далее по пути с наименьшим электрическим сопротивлением (например по оболочке кабеля). В этом случае имеет место непосредственное воздействие тока молнии на заглубленные РЭС.

Если расстояние от места удара молнии в землю до объекта с повышенной электрической проводимостью таково, что не возникает дуга и не происходит непосредственное стекание тока молнии, то эти области находятся в зоне действия повышенного потенциала, значение которого может быть приближенно определено по формуле точечного заземлителя

$$U = I_m / 2\pi r \sigma_z, \quad (2.5)$$

где  $I_m$  – амплитуда тока молнии, А;  $r$  – расстояние от места удара молнии до рассматриваемой точки, м;  $\sigma_z$  – удельная проводимость земли, см/м.

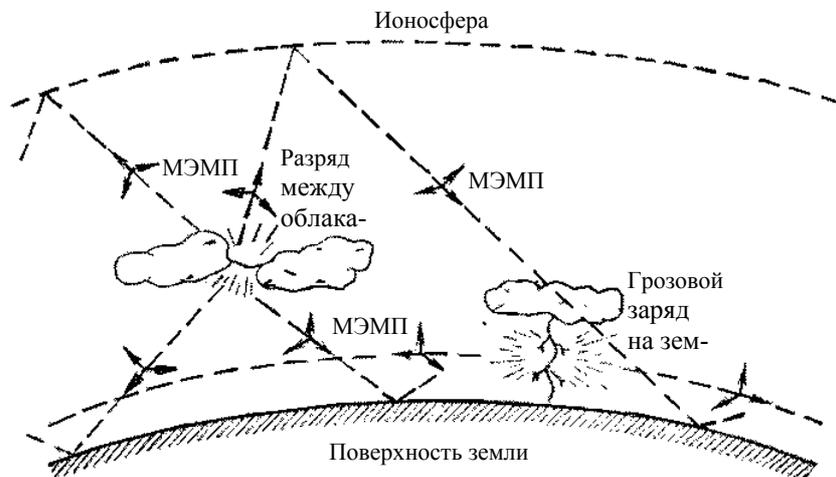
Воздействие токов молнии или повышенных потенциалов на заглубленные РЭС наблюдаются в непосредственной близости от места удара молнии или стекания в землю ее токов с пораженных объектов.

*Область волновой зоны излучения грозовых разрядов.* По мере удаления от места грозового разряда электромагнитные поля его излучения затухают по амплитуде со скоростью, обратно пропорциональной расстоянию, изменяясь по своей качественной структуре, и для расстояний  $l/h \gg 1$  существенно отличаются от ранее описанных.

В дальнем поле излучения грозового разряда, его электрическая и магнитная составляющие начинают взаимодействовать друг с другом, образуя плоскую электромагнитную волну с соотношением электрической и магнитной компонент поля

$$E/H = 120 \pi = \zeta_0. \quad (2.6)$$

Геометрия формирования плоской электромагнитной волны излучения при грозовых разрядах между облаками и на землю показана на рис. 2.1. При этом возникающие поля излучения молний могут охватывать значительные районы. Разряды в облаке и в воздухе порождают довольно сложные излучения, отличающиеся по своей структуре от излучений при грозовых разрядах на землю. Они не дают типичных импульсов, так как не имеют обратного разряда и в основном проявляются на частотах 100 кГц ... 10 МГц.



**Рис. 2.1. Геометрия формирования МЭМП грозы**

На практике при определении создаваемой молнией ЭМО и ее характеристик выделяют две основные зоны – над землей и ниже ее поверхности. Отражение от земли существенно влияет на характеристики полей излучения молнии. Над землей, в результате отражения от ее поверхности, существует прямая и отраженная волны, суперпозиция которых друг с другом будет производить или к усилению, или к подавлению части спектра МЭМП и, естественно, к изменению их амплитудно-временных характеристик.

Большая часть энергии поля отражается реальными почвами практически при всех углах падения. Для описания отраженной от поверхности земли волны можно воспользоваться известными из теории распространения радиоволн выражениями для коэффициентов отражения для вертикальной и горизонтальной поляризации волн:

$$R_v = \frac{\epsilon'_k \sin \gamma - \sqrt{\epsilon'_k - \cos^2 \gamma}}{\epsilon'_k \sin \gamma + \sqrt{\epsilon'_k - \cos^2 \gamma}}; \quad (2.7)$$

$$R_r = \frac{\sin \gamma - \sqrt{\varepsilon'_k - \cos^2 \gamma}}{\sin \gamma + \sqrt{\varepsilon'_k - \cos^2 \gamma}},$$

где  $\varepsilon'_k = \varepsilon' + \sigma_3 / (j \omega \varepsilon_0)$ ;  $\gamma$  – угол скольжения падающей волны, рад.

Процессы отражения электромагнитных волн от поверхности земли интересны рядом особенностей. Так, для вертикально-поляризованной волны существенным является случай ее падения под углом скольжения, близким к углу Брюстера. Для тангенциального же (горизонтального) электрического поля (особенно для высокопроводящих грунтов) характерно обращение фазы отраженной волны, что приводит к существенному ослаблению суммарного поля над землей и у ее поверхности. Формирование ЭМО на поверхности земли и в ее толще связано с двумя процессами: отражением и преломлением электромагнитных волн на поверхности земли и потерями в проводящем грунте.

Для характеристики полей ниже поверхности земли наиболее характерными являются два случая. Во-первых, когда волна падает нормально или почти нормально к поверхности земли (электрическое и магнитное поля поляризованы горизонтально).

Для отдельных гармоник нормально падающей, горизонтально-поляризованной волны

$$E_3(d) = E_1 [2Z_2 / (\zeta_0 + Z_2)] \exp(-\gamma d); \quad (2.8)$$

$$H_3(d) = H_1 [2\zeta_0 / (\zeta_0 + Z_2)] \exp(-\gamma d). \quad (2.9)$$

где  $Z_2 = [\mu / \varepsilon (1 + \delta_3 / (j \omega \varepsilon))]^{1/2}$ ;  $\gamma = j \omega \{ \mu \varepsilon [ (1 + (\sigma_3 / j \omega \varepsilon)) ] \}^{1/2}$ ;  $\mu$  – магнитная проницаемость земли, Гн / м;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость земли, Ф/м;  $d$  – глубина грунта, м.

Для типичных почв  $\zeta_0 \gg Z_2$ , поэтому напряженность магнитного поля удваивается на поверхности земли, в то время как значение напряженности электрического поля составляет 0,01...0,1 значения напряженности электрического поля в свободном пространстве.

В случае вертикально-поляризованного электрического поля по мере роста угла  $\gamma$  амплитудное значение преломленной волны увеличивается и при угле  $\gamma_0$  известном как угол Брюстера, достигает максимума. При этом происходит максимальная передача электромагнитной энергии в землю и минимальное отражение ее от поверхности. Это надо учитывать при определении характеристик ЭМО в земле и на ее поверхности.

Значение угла Брюстера может быть определено из соотношения

$$\sin \gamma_0 = 1 / \sqrt{1 + \varepsilon'}. \quad (2.10)$$

Напряженность вертикально-поляризованного электрического поля в земле и у ее поверхности для отдельных гармоник определяется через характеристики грунта и угол скольжения:

$$E_3 = E_1 \left| \frac{2\sqrt{\varepsilon'_k - \cos^2 \gamma}}{\varepsilon'_k \sin \gamma + \sqrt{\varepsilon'_k - \cos^2 \gamma}} \right|. \quad (2.11)$$

При этом необходимо отметить одно важное обстоятельство: плотность одинаковых амплитуд у преломленной в землю волны будет всегда параллельна плоскости раздела сред, что свидетельствует об убывании по мере углубления в почву напряженности электрического поля преломленной волны с увеличением глубины проникновения независимо от горизонтальной координаты.

В типичных условиях высокочастотные компоненты ослабляются почвой в два раза или более на глубине 10 м по сравнению со значением на поверхности.

### 3. ГРОЗОЗАЩИТА

Грозовой разряд (молния) представляет собой разновидность искрового разряда в электрическом поле атмосферы при длине искры в несколько километров. Причиной возникновения молний является образование большого объемного электрического заряда. Обычным источником молний являются грозовые тучи, несущие в себе скопление положительных и отрицательных электрических зарядов в верхней и нижней частях облака и образующие вокруг этого облака большие электрические поля. Хотя и возможны другие причины.

Образование объемных зарядов различной полярности в облаке связано с конденсацией вследствие охлаждения и возникновении при этом положительных и отрицательных ионов и последующее разделение заряженных капелек под воздействием тепловых воздушных потоков.

Когда градиент потенциала в какой-либо точке облака достигает критического для изоляционных свойств воздуха значения, в этом месте начинает зарождаться молния. Так как в облаке, как правило, образуется несколько изолированных друг от друга скоплений одноименных зарядов, то большинство грозových разрядов представляет собой серию отдельных импульсов.

Очень упрощенно грозовое электрическое поле можно представить в виде статического поля и поля излучения (в свою очередь, состоящую из индукционной и радиационной составляющих).

При изменении расстояния статическая составляющая изменяется обратно пропорционально кубу расстояния, а составляющие поля излучения – обратно квадрату расстояния (индукционная) и линейно – обратно расстоянию (радиационная). Поэтому при расстоянии до молнии ближе 20...30 км преобладает статическая составляющая, а при больших расстояниях (100 км и более) – в основном поле излучения.

Мерой защиты служит исключение влияния статического заряда. Это достаточно просто сделать, учитывая достаточно медленный характер нарастания уровня напряженности электрического поля (50...300 м · с). Для этого достаточно поставить резистор для стекания токов параллельно входу приемника или еще лучше дроссель. Причем величину индуктивности дросселя необходимо выбирать минимально возможной (для обеспечения стекания статистически наведенных токов, имеющих максимальную скорость нарастания), но достаточную для прохождения контролируемых сигналов.

Поле излучения в наиболее простом случае можно представить в виде короткого импульса тока, в общем случае имеющего колебательный характер, то есть короткого радиоимпульса. За счет малой длительности такого импульса (30...150 м · с), спектр такого излучения очень широк, а в пределе, если рассматривать его как дельта-функцию, имеет вообще бесконечно широкий равномерный энергетический спектр.

Помимо грозových импульсов в реальных условиях эксплуатации электронного оборудования в его цепях могут возникнуть различные виды электрических перегрузок, создаваемые электромагнитными импульсами искусственного происхождения (за счет излучения радиопередающих устройств, высоковольтных линий передачи, сетей электрифицированных железных дорог и тому подобное), а также за счет внутренних переходных процессов в оборудовании при ее функционировании (например, при переключениях индуктивных нагрузок) и электростатических разрядов ЭСР.

#### 3.1. ЗАЩИТА ОБОРУДОВАНИЯ ОТ ГРОЗЫ

Рассмотрим основные причины выхода оборудования из строя во время грозы.

1. Образование статического электричества на кабелях и аппаратуре в результате влияния неподвижных зарядов, накопленных в грозовом облаке.

Наиболее подвержены влиянию статических зарядов воздушные линии. Причем значительный заряд может также накапливаться в сухую погоду зимой и летом во время так называемых «песчаных метелей».

Основной метод защиты – обеспечение отвода статического электричества с помощью заземления экрана и (или) проводящей траверсы и установки на обоих концах кабеля разрядников. Здесь на первое место выходит правильность выполнения заземления и надежность разрядников, к которым предъявляются высокие требования по отводу значительного тока.

2. Наведение в кабельной системе импульсов высокого напряжения, которые возникают в результате воздействия мощного электрического поля, порожденного грозowymi разрядами.

Если применяемая линия высокого напряжения (ЛВН) не экранирована, в результате воздействия мощной электромагнитной волны на каждом шаге скрутки наводится небольшое напряжение, в пределах нескольких милливольт. Если ЛВН изготовлена идеально и площадь контуров одинакова, суммарная наведенная ЭДС близка к нулю. Реально же шаг скрутки далеко не одинаков, поэтому полной взаимной компенсации элементарных ЭДС не происходит, и чем длиннее кабель, тем выше может быть напряжение между проводниками одной пары в результате электромагнитного импульса, создаваемого молнией. Это напряжение может до-стигать нескольких сотен вольт.

Основной метод защиты – экранирование, установка на концах кабеля устройств защиты выравнивающих потенциалы, при которых максимальное напряжение между любыми двумя проводами в кабеле не превышает 7...10 В. Потенциал, превышающий сотни вольт относительно земли, снижает разрядник.

3. Броски напряжения питающей сети. Это довольно часто встречающаяся причина выхода из строя оборудования «целиком». В сети 220 В нередко происходят броски напряжения до нескольких тысяч вольт. Причины тому – срабатывание предохранителей на подстанции, разряд молнии, помеха от других мощных потребителей энергии.

Традиционные методы защиты – повышение надежности штатных источников питания, применение источников бесперебойного питания и устройств защиты от повышения напряжения в сети.

4. Изменение потенциала заземляющих устройств. Оно возникает при близком разряде молнии в поверхность земли. Основная причина выхода из строя аппаратуры – большая разность потенциалов на заземляющих шинах оборудования, установленного на значительном расстоянии друг от друга. В этом случае по кабельным линиям в целях входов/выходов протекает очень большой уравнивающий ток, который разрушает электронное или электрическое оборудование. Минимизировать потери в этом случае можно, строго соблюдая правило монтажа заземляющих устройств.

Для защиты цепей оборудования от воздействия электрических перегрузок могут использоваться разнообразные методы, основными из которых являются: конструкционные, структурно-функциональные, схемотехнические.

Конструкционные способы защиты включают в себя: рациональное расположение и монтаж компонентов, экранирование, заземление и др.

Группа структурно-функциональных методов включает в себя: рациональный выбор принципа действия оборудования и выбор используемых стандартов передачи сигналов и др.

Схемотехнические методы включают в себя пассивную и активную защиту. Наиболее эффективным средством защиты оборудования от воздействия ЭМИ является активная защита.

Основным элементом схем активной защиты являются разрядники, металлоокисные варисторы, TVS (transient voltage suppressor) – тиристоры и TVS – диоды, называемые в отечественной литературе «супрессорами», «полупроводниковыми ограничителями напряжения» (ПОН) или «диодами для подавления переходных процессов» (ППН) (табл. 3.1).

### 3.1. Сравнение элементов активной защиты от перенапряжений

Элемент защиты	Преимущество	Недостатки	Примеры использования
Разрядник	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокое значение допустимого тока;</li> <li>– низкая емкость;</li> <li>– высокое сопротивление изоляции;</li> <li>– высокое напряжение возникновения разряда</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– низкая долговечность и надежность;</li> <li>– значительное время срабатывания;</li> <li>– защищаемая цепь шунтируется, после прохождения импульса</li> </ul>	Первичная защита телекоммуникационных силовых цепей. Первая ступень комбинированной защиты
Варистор	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокое значение допустимого тока;</li> <li>– низкая цена;</li> <li>– широкий диапазон рабочих токов и напряжений</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ограниченный срок службы;</li> <li>– высокое напряжение ограничения;</li> <li>– высокая собственная емкость;</li> <li>– затруднительность поверхностного крепления</li> </ul>	Вторичная защита. Защита силовых цепей и автомобильной электроники. Защита электронных компонентов непосредственно на ПП. Первая и вторая ступень комбинированной защиты

TVS-диод	<ul style="list-style-type: none"> <li>– низкие уровни напряжения ограничения;</li> <li>– высокая долговечность и надежность;</li> <li>– широкий диапазон рабочих напряжений;</li> <li>– высокое быстродействие;</li> <li>– низкая собственная емкость;</li> </ul> <p style="text-align: center;">— ИДЕАЛЬНО ПОДХОДИТ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– низкое значение номинального импульсного тока;</li> <li>– относительно высокая стоимость</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– идеален для защиты полупроводниковых компонентов на ПП;</li> <li>– вторичная защита;</li> <li>– защита от электрических переходных процессов</li> </ul>	Оконечная ступень в комбинированных защитных устройствах
TVS-тиристор	<ul style="list-style-type: none"> <li>– не подвержен деградации;</li> <li>– высокое быстродействие;</li> <li>– высокий управляющий ток</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ограничительный диапазон рабочих напряжений;</li> <li>– защищаемая цепь шунтируется после прохождения импульсов</li> </ul>	Первичная и вторичная защита в телекоммуникационных цепях

Для защиты оборудования используют модуль грозозащиты (ГЗ), который ограничивает амплитуду воздействующего импульса и тем самым предотвращает в большинстве случаев выход из строя сетевого оборудования.

Многие производители устройств грозозащиты для подавления импульса синфазной помехи используют только искровые разрядники, снижая тем самым себестоимость продукции. Однако при этом снижается надежность работы оборудования.

Причины следующие:

- напряжение срабатывания разрядника зависит от длительности приложенного к нему напряжения. Чем короче импульс, тем выше пробивное напряжение разрядника, на постоянном и импульсном токе может превышать 300 %;
- время срабатывания сравнимо с фронтом грозового импульса, следовательно, при срабатывании разрядника на оборудование проходит короткий импульс, длительностью порядка одной микросекунды;
- наблюдается временная нестабильность разрядных характеристик в ходе эксплуатации разрядников вследствие эрозии электродов, частичной потери вакуума;
- при срабатывании разрядников возникают значительные перенапряжения в расположенных поблизости индуктивных элементах (согласующих трансформаторах, дросселях и прочее).

### 3.2. ГРОЗОЗАЩИТА ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Одна из проблем, с которой приходится сталкиваться разработчикам локальных компьютерных сетей, – обеспечение стойкости сетевого оборудования к различным внешним воздействиям.

В период грозовой активности на электрические локальные сети (ЭЛС) оказывают свое влияние электрические поля, поля незавершенных облачных разрядов, электромагнитные наводки, связанные с током канала молнии и ее ответвлений, токи, растекающиеся в земле через систему заземлений и попадающие в цепи локальных сетей.

Грозовой разряд действует как мощный радиопередатчик, порождающий сильное электромагнитное излучение. Спектральный состав этого излучения лежит в диапазоне от нескольких герц до десятков килогерц, наибольшая плотность которого находится в районе 5 ... 8 кГц. По этой причине трансформаторная развязка устройств от информационных линий, выполненных витой парой, нередко оказывается бессильной. Помеха огромной мощности проходит через развязывающий трансформатор, не разрушая его, но повреждая электронику.

Длительность таких импульсов может составлять 1...500 мкс и более, а напряжение – от сотен до десятков киловольт. В результате длительных исследований различными лабораториями мира были получены усредненные параметры импульсов грозовых разрядов. На линиях электропередачи и телефонии длиной измеряемой километрами возможны импульсы напряжения до 20...25 кВ и тока до 10 кА. В более коротких линиях, длиной в сотни метров, наводятся импульсы напряжения до 6 кВ и тока до 5 кА, а в линиях, проходящих внутри зданий, – до 6 кВ и до 500 А.

Основными видами воздействий грозовых импульсов на сетевое оборудование локальных сетей являются:

- электростатическое – связано с влиянием электростатических полей предгрозового периода и незавершенного облачного грозового разряда;
- электромагнитное – связано с индукционным влиянием канала молнии на сетевые кабели при расстояниях, соизмеримых с длиной канала;
- гальваническое – связано с растеканием в земле токов молнии и частичным их ответвлением в цепи локальных сетей через систему заземления;
- ток молнии – связано с прямым попаданием молнии в кабель.

По статистике, процент «выживания» оборудования, которое подключено к воздушным линиям, выполненным неэкранированной витой парой, составляет всего 59 %.

Выход из строя аппаратуры, подключенной к линиям из коаксиального кабеля, не редкость даже внутри кирпичных зданий. На подобных воздушных линиях оборудование без специальных мер защиты практически «не живет».

Стопроцентной защиты от подобного рода воздействий не существует, но минимизировать потери, исходя из разумного компромисса между стоимостью, сложностью и эффективностью устройств защиты, несомненно, можно. Конечно, неплохо использовать «классические» методы: переход на оптоволоконные кабели, отказ от открытых линий, экранирование кабельной системы, но порой все это сказывается недоступно для мелких и средних сетей вследствие высокой стоимости и сложности монтажа.

Помехоустойчивость существующих электрических сетей недостаточная, а переход к оптическим сетям сдерживается экономическими причинами. Поэтому требуются дополнительные устройства защиты электрических сетей.

### 3.3. ЗАЩИТА КОАКСИАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

Если закоротить центральную жилу и экран коаксиального кабеля и подать на них импульс аналогичный возникающему при грозовом разряде, то на другом конце за счет меньшей индуктивности сначала образуется импульс такой же амплитуды, но меньшей длительности на экранирующем проводнике, а затем импульс приблизительно половинной амплитуды, но большей длительности на центральной жиле. При этом энергия каждого импульса приблизительно равна половине энергии входного импульса, а дифференциальное напряжение между центральной жилой и экраном в начальный момент может даже превысить амплитуду входного импульса.

Аналогичные процессы происходят при грозовых разрядах в кабеле снижения от антенны к приемопередающей аппаратуре. При большой длине кабеля напряжения между центральной жилой и экраном могут до-стигать величин достаточных для вывода из строя любой аппаратуры, этим и продиктована необходимость применения специальных защитных устройств. Из описания процесса следует также, что антенны, замкнутые по постоянному току при подключении коротким кабелем, не требуют грозозащиты.

Для защиты антенных кабелей снижения от грозовых разрядов и электромагнитных импульсов ядерного взрыва применяют так называемые устройства грозозащиты (УГЗ).

Основным требованием к УГЗ является волновое сопротивление, его стандартные значения 50 или 75 Ом. Другое производится и поставляется только на заказ.

У большинства серийных УГЗ быстродействие достаточное, но для некоторых специальных применений требуется повышенное быстродействие.

В частотном диапазоне существуют два больших класса УГЗ:

- широкодиапазонные;
- настроенные на определенный диапазон фильтры.

Большая часть энергии грозового разряда лежит в диапазоне низких частот 0...1 МГц. С повышением частоты энергия разряда резко убывает.

Если в аппаратуре скомпенсированы несколько передатчиков, необходимо это обязательно учитывать. Газоразрядные устройства имеют определенное напряжение срабатывания, а несколько передатчиков, работающих на один кабель, могут значительно увеличить проходящее через УГЗ напряжение, вплоть до напряжения разряда газоразрядной колбы. Два передаваемых 100 Вт сигнала дают суммарную мощность 200 Вт, но суммарное напряжение будет иметь пики эквивалентные 400 Вт сигналу. Поэтому многоканальные передающие системы с комбайнерами или дуплексерами должны рассчитываться на большее напряжение срабатывания и пиковые значения ВЧ токов. Такие расчеты не требуются при использовании УГЗ на основе фильтров (не газоразрядных).

По окончании грозового разряда или ЭМИ УГЗ должно выключиться, а не оставаться в режиме разряда под действием рабочей ВЧ энергии. Для этого напряжение срабатывания УГЗ не должно быть очень низким, однако при выборе УГЗ со слишком высоким напряжением срабатывания (например при комбайнировании передатчиков), придется пренебречь частью защитных свойств. Это не актуально для негазоразрядных фильтрующих УГЗ.

В приемной аппаратуре передача постоянного или переменного напряжения вместе с ВЧ сигналом актуальна для высоко расположенных предусилителей и конверторов, а также для мощных передающих усилителей, расположенных возле антенных систем. Эти возможности УГЗ, если они предусмотрены, обычно указываются в технических параметрах.

Пиковый ток УГЗ варьируется у различных производителей. Но не стоит стремиться к применению устройств с максимальными значениями пикового тока, это не всегда означает лучшую защиту.

Стандартным является разъем *N*-типа, но на заказ выпускаются и другие.

Система заземления комплекса аппаратуры должна быть интегрирована с аппаратурой грозозащиты.

*Типы УГЗ.* Газоразрядные УГЗ используются при достижении напряжения в линии порогового значения. В газоразрядной трубке возникает разряд и в центральный проводник оказывается короткозамкнутым на землю. Так как эти УГЗ имеют проводимость по постоянному току центральных контактов разъемов, то до достижения дифференциальным напряжением уровня срабатывания газоразрядной трубки часть энергии пройдет на аппаратуру. Считается, что до срабатывания газоразрядного УГЗ оборудование должно выдерживать импульс тока до 10 000 А. Поскольку газоразрядные УГЗ имеют свойство перегорать при пиковых значениях напряжения, производители комплектуют их сменными капсулами. Большинство производителей ограничивают сверху их рабочий диапазон частот.

*Четвертьволновые режекторные УГЗ* относятся к устройствам со связью по постоянному току. Однако в отличие от всдиапазонных настроенных на определенное напряжение срабатывания газоразрядных УГЗ, это фильтры, настроенные на определенный диапазон частот. Заземленная согласованная четвертьволновая секция этих устройств имеет низкое проходное сопротивление центрального проводника для рабочего диапазона частот и низкое сопротивление на землю для всех остальных частот. А поскольку большая часть энергии грозового разряда приходится на диапазон 0...1 МГц, то УГЗ этого типа представляются идеальными.

Кроме того, эти УГЗ фильтруют широкополосные искровые помехи промышленного и другого происхождения.

*Антенны* являются устройствами, настроенными на свою рабочую частоту, и при ударе импульсом напряжения с крутыми фронтами вся ВЧ и НЧ энергия спускается по коаксиальному кабелю. Четвертьволновый фильтр НЧ энергию разряда направляет на землю, а весь полезный сигнал и очень малая часть энергии разряда идут на вход аппаратуры. При этом максимальный ток у них в 5 – 10 раз больше, чем у газоразрядных УГЗ.

Для специальных применений выпускаются УГЗ других типов, в частности на лавинопролетных диодах. Применяются также комплексные системы грозозащиты с использованием УГЗ разных типов.

Некоторые фирмы выпускают так называемые микроволновые фильтры работающие в широких диапазонах частот (начиная с 800 МГц) с низким КСВН и низкими потерями. Обладая способностью коммутировать до 750 Вт мощности, они используются в мощной аппаратуре специального назначения. Поскольку они не обладают проводимостью по постоянному току, то практически не пропускают энергию грозового разряда на вход аппаратуры.

### 3.4. ПРИМЕР УСТРОЙСТВА ГРОЗОЗАЩИТЫ

Рассмотрим УГЗ для бытового применения. На металлооксидных варисторах, хотя они и обладают высоким быстродействием и очень низкой ценой, не способны надежно защитить оборудование на неэкранированных воздушных линиях. Остаточное напряжение на них может в несколько раз превышать предельно допустимое для защищаемой аппаратуры. Это объясняется неидеальной вольт-амперной характеристикой варисторов и зависимостью напряжения от амплитуды импульса тока, протекающего через них. Необходимо также учитывать, что защитные элементы постепенно изменяют свои параметры, деградируют если через них протекает ток, близкий к предельному. В этом случае у варисторов уменьшается внутреннее сопротивление и они, в конце концов, замыкают защищаемую линию. Практически через пару лет эксплуатации на воздушных линиях защитные свойства приборов теряются и увеличиваются потери, поэтому становится невозможным их применение в высокоскоростных сетях на значительных расстояниях.

Во многих УГЗ отечественного производства в качестве разрядников используют либо неоновые лампы, либо «неонки» от стартеров ламп дневного света. Это обусловлено в основном низкой стоимостью подобных защитных элементов. Но такие решения не очень удачны, поскольку неоновые лампы обладают большим сопротивлением при пробое и невысоким быстродействием.

Продолжительные испытания неэкранированной ЛВВП 100-мегабитной сети длиной сто метров, протянутой между зданиями, показали, что неплохо справляется со своими обязанностями устройство, схема которого показана на рис. 3.1.

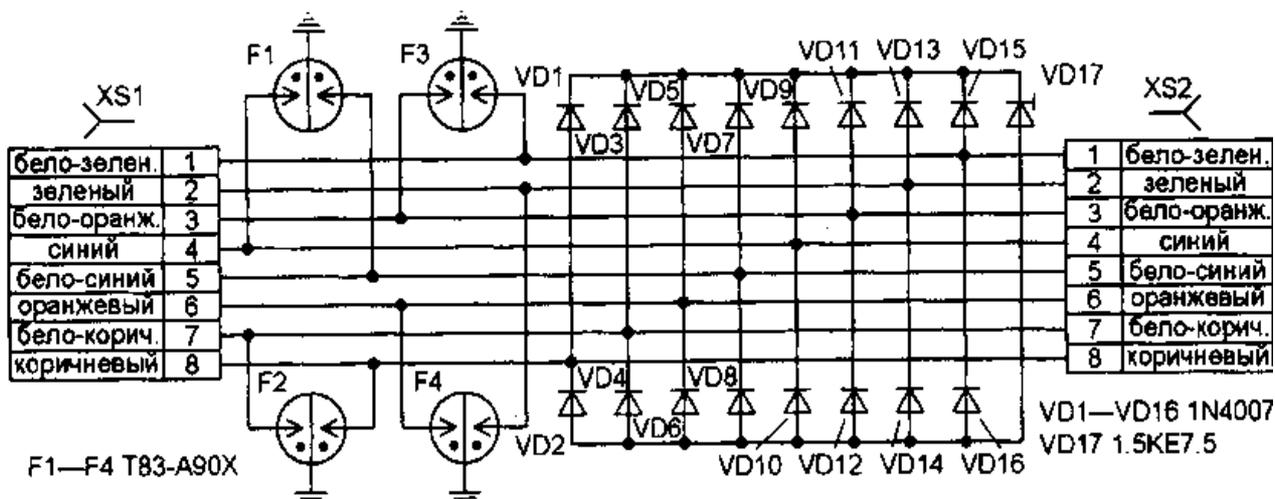


Рис. 3.1. Схема устройства грозозащиты

Оно представляет собой многофазный диодный мост на диодах VD1 – VD16, в диагональ включен защитный диод VD17, ограничивающий напряжение между любыми двумя проводниками линии на уровне около 8 В. Применение ограничительных диодов фирмы Transil обусловлено существенными отличиями параметров таких приборов от стабилитронов. Например, время срабатывания ограничительного диода не превышает нескольких пикосекунд, а пиковая рассеиваемая мощность (в течение 1 мс) составляет 1500 Вт.

К разъему XS1 подключают линию, а к разъему XS2 – сетевое оборудование. Кабель, соединяющий УГЗ с сетевым оборудованием, должен быть минимальной длины. Каждый проводник информационного кабеля соединен с землей через газонаполненные разрядники F1 – F4, которые обеспечивают отвод потенциала статического электричества, превышающего 90 В. Специализированные разрядники Epcos T83-A90X допускают прохождение импульсного тока 10 кА длительностью 8/20 мкс, характерного для грозового разряда. Сдвоенные разрядники применены, исходя только из экономических соображений, вместо них можно использовать любые, удовлетворяющие выше требованиям. Вместо диодов 1N4007 (VD1 – VD16) можно использовать любые аналоговые выпрямительные диоды импортного или отечественного производства с допустимым обратным напряжением не менее 1000 В, способные работать на частотах выше 10 кГц.

УГЗ собрано на печатной плате из двухсторонне фольгированного стеклотекстолита толщиной 1,5 мм. Чертеж печатной платы устройства показан на рис. 3.2. Фольга на плате со стороны выполняет функцию экрана, ее удаляют только около выводов деталей, зенкуя отверстия. Средний вывод разрядников припаивают непосредственно к фольге со стороны деталей.

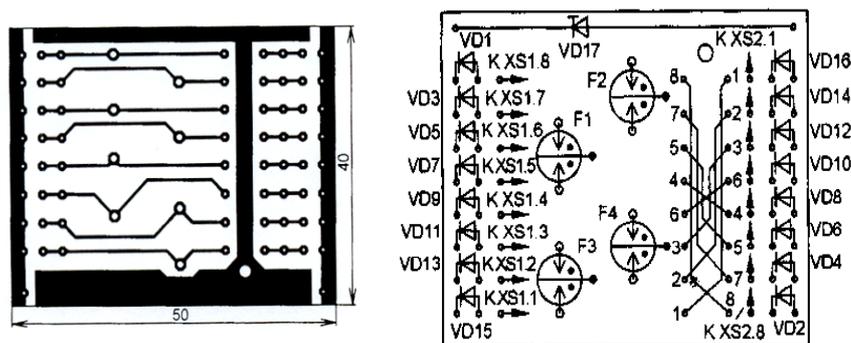


Рис. 3.2. Печатная плата устройства грозозащиты

Заземляющий проводник вставляют в отверстие диаметром 2 мм и припаивают к обеим сторонам платы. Для уменьшения перекрестных наводок перемычки 1 и 2, 3 и 6, 4 и 5, 7 и 8 можно попарно свить двумя-тремя витками. Устройство смонтировано в корпусе стандартной двойной розетки RG45B. Поскольку в этой розетке нумерация выводов разъемов XS1 и XS2 перевернута относительно друг друга, пришлось на печатной плате использовать перемычки. В случае другого варианта монтажа УГЗ перемычки можно исключить. Штатные ножевые разъемы с платы розетки удаляют, а вместо них запаивают изогнутые штыри, на которые монтируют плату УГЗ.

Если нет необходимости в защите всех восьми проводников кабеля, УГЗ можно собрать по упрощенной схеме, показанной на рис. 3.3. Неиспользуемые проводники соединяют вместе и через разрядник F2 (Epcos N81-A90X) подключают к заземлению.

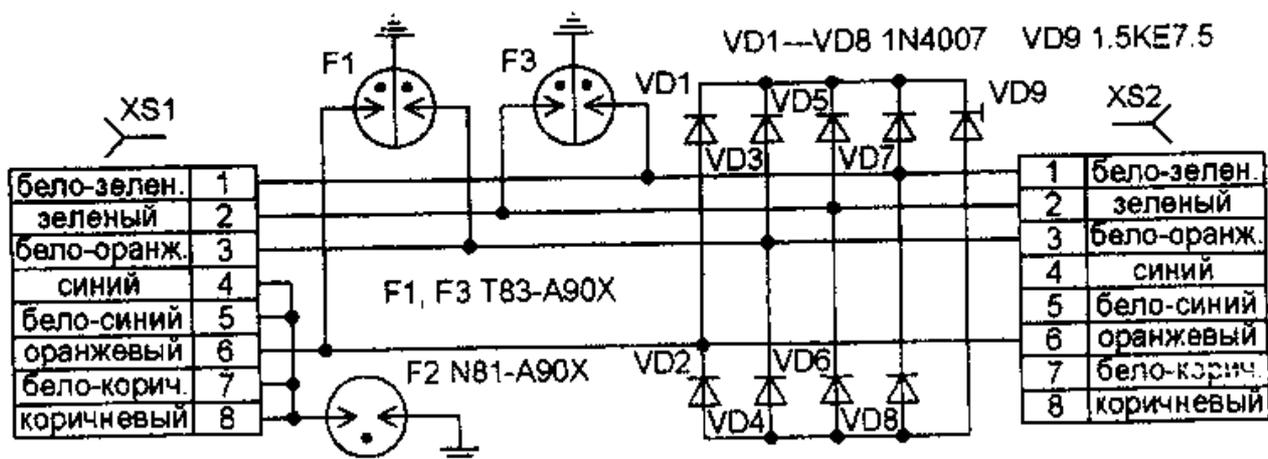


Рис. 3.3. Схема устройства грозозащиты

Для защиты источников питания от коротких всплесков напряжения в сети 220 В применяют устройство, схема которого показана на рис. 3.4. Его включают в разрыв сетевого провода возможно ближе к блоку питания, например, встраивают в сетевую розетку.

Если длина низковольтной (9...12 В) цепи питания аппаратуры составляет несколько метров и более, например, питание подводят по свободным парам или неэкранированным проводам, то необходимо установить УГЗ, которые собирают по схеме рис. 3.1, отличающийся тем, что вместо двух используют только один ограничительный диод 1,5KE18, включенный катодом к плюсу питания. Устройство подключают возможно ближе к активному оборудованию в разрыв низковольтной цепи питания постоянного тока. Все виды УГЗ требуют обязательного подключения к заземлению, будем считать, что это, в нашем случае, одно и то же. При его отсутствии все мероприятия по грозозащите практически сводятся к нулю.

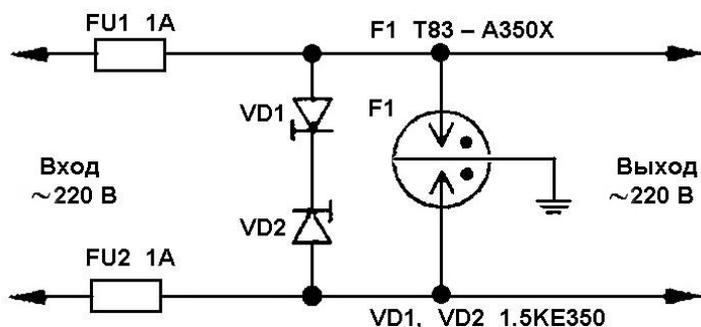


Рис. 3.4. Схема защиты источников питания

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ), электрическая сеть в жилых домах состоит из фазы  $L$  рабочего нуля  $N$  и защитного нуля ( $PE$ ), подключаемого к корпусу распределительного щита на лестничной площадке к среднему контакту розетки в квартире. Проверить его наличие можно, подключив лампу накаливания на напряжение 220 В относительно фазы сначала к нулевому проводу, затем к среднему контакту розетки. В обоих случаях лампа должна гореть ярко и ровно, если при подключении лампы к среднему контакту произойдет срабатывание устройства защитного отключения (УЗО) в щите, это лишь подтвердит наличие защитного нуля.

Если же в помещение защитный нуль не подведен, его придется провести самому. Для этого потребуется провод сечением не менее  $1,5 \text{ мм}^2$ , чем больше, тем лучше. Один конец провода закрепляют под любой свободный болт шины, соединенной с корпусом соединительного щита, второй соединяют с заземляющим контактом розетки или УГЗ. Использовать в качестве защитного заземления батарею отопления или водопроводные трубы не допустимо. Одна из причин – высокое сопротивление подобного «заземления». Кроме того, в некоторых случаях потенциал на батарее может быть отличен от нуля, например, если сосед использует трубы в качестве рабочего нуля из-за разрыва нулевого проводника в проводке, что категорически запрещено. И хотя в подвале здания теоретически должна существовать система выравнивания потенциалов, на практике встречается всякое.

В сельские дома напряжением 220 В подводят воздушными линиями электропередачи, и использовать в качестве защитного рабочий нуль опасно. При возникновении аварийной ситуации (обрыв нулевого провода на линии электропередачи, падение дерева на линию электропередачи и т.д.) на нулевом проводе возможно появление потенциала, отличного от нуля, вплоть до фазного напряжения.

В этом случае в качестве устройства защитного зануления можно использовать естественные заземлители. Пункт 1.7.70 ПУЭ по этому поводу гласит: «В качестве естественных заземлений рекомендуется использовать: проложенные в земле водопроводные и другие металлические трубопроводы, за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих и взрывчатых газов и смесей, канализации и центрального отопления; обсадные трубы скважин: металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, находящиеся в соприкосновении с землей; металлические шунты гидротехнических сооружений, водоводы, затворы и т.п.; свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле. Алюминиевые оболочки кабелей не допускается использовать в качестве естественных заземлителей. Если оболочки кабелей служат единственными заземлителями, то в расчете заземляющих земель они должны учитываться при количестве кабелей не менее двух; заземлители опор высоковольтных линий (ВЛ), соединенные с заземляющим устройством электроустановки с помощью грозозащитного троса ВЛ, если трос не изолирован от опор ВЛ; нулевые провода ВЛ до 1 кВ с повторными заземлителями при количестве ВЛ не менее двух; рельсовые пути магистральных неэлектрофицированных железных дорог и подъездные пути при наличии преднамеренного устройства перемычек между рельсами».

Также согласно ПУЭ «не допускается объединение нулевых рабочих и нулевых защитных проводников различных групповых линий...», т.е. заземлять (занулять) проводящие траверсы, подвеса кабелей и неиспользуемые проводники в кабеле необходимо только с одного конца. Дело в том, что при близком грозовом разряде в землю значительно изменяется потенциал заземляющих устройств, о чем было сказано выше. Кроме того, разность потенциалов между удаленными точками заземления может быть очень большой и при «жестком» заземлении с обоих концов, через кабели и аппаратуру возможно протекание значительного уравнивающего тока.

УГЗ питающих и информационных линий, аналогичные описанным, можно использовать для защиты ЛВВП, но и телефонных линий противопожарной и охранной сигнализации, систем видеонаблюдения и прочих, удаленных на расстояние более нескольких десятков метров информационных и питающих линий активного оборудования, особенно эксплуатируемого на открытом воздухе (табл. 3.2).

### 3.2. Сравнение параметров различных типов защит

<i>Достоинства</i>	<i>Недостатки</i>
<i>Аналог APC</i>	
Дешевизна Обкатанность Работает на 100 мегабит Практически не влияет на дальность	Не обеспечивает 100 % надежности Не масштабируется
<i>Защита на трансформаторах</i>	
Незначительно дороже копии APC Гальваническая развязка Промежуточный заземленный контур Работает на 100 мегабит Масштабируется, есть общие детали	Возможно снижение дальности Не прошла полностью испытаний
<i>Защита на оптронах</i>	
Оптронная развязка 100 % защита Масштабируется, есть общие детали	Возможно снижение дальности Не прошла полностью испытаний Не работает на 100 мегабит Высокая стоимость

#### 4. МОЩНЫЕ РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ СРЕДСТВА

Радиоэлектронные средства могут быть не только объектами неблагоприятного воздействия МЭМП, но и их источниками (например, радиопередающие средства). При этом независимо от того, используются ли они в качестве системы радиоподавления, т.е. создания организованных помех, либо эти помехи создаются непосредственно в результате функционирования РЭС, их основные свойства как источников электромагнитных помех остаются идентичными.

Мощные радиопомехи охватывают достаточно широкий спектр, от десятков герц до десятков гигагерц, частотный диапазон и являются гармоническими сигналами, модулированными по амплитуде и частоте [3, 4].

Как правило, основными источниками мощного электромагнитного излучения любых РЭС является антенна, направленно или ненаправленно излучающая поток электромагнитной энергии в окружающее пространство. Антенны радиолокационных станций (РЛС) в этом отношении наиболее опасные источники мощного излучения, так как обладают свойствами концентрировать электромагнитную энергию в определенном направлении (имеют высокий коэффициент направленного действия, который может достигать значений порядка десятков тысяч).

##### 4.1. Электромагнитное излучение антенн

Основные характеристики электромагнитного поля определяются его источником, окружающей средой и расстоянием от источника до точки наблюдения. В соответствии с этим окружающее антенну пространство, где существует электромагнитное поле, делится на ближнюю, промежуточную и дальнюю зоны излучения. Вблизи направленной антенны, когда  $r < \lambda/2\pi$ , свойства поля определяются характеристиками источника и расстоянием от него до рассматриваемой области. Если в антенне генерируется большой ток и низкое напряжение, что свойственно рамочным антеннам, ближнее поле будет в основном магнитным. Для этого случая характерно соотношение

$$E/H = 120\pi (2\pi r/\lambda),$$

где  $E$  и  $H$  – напряженности электрического и магнитного полей в окружающем антенну пространстве;  $r$  – расстояние от антенны до точки наблюдения;  $\lambda$  – длина волны поля излучения.

Для антенны в виде штыря или натянутого над землей провода характерным является малый ток и большое напряжение. В этом случае электрическая составляющая поля вблизи антенны намного превышает магнитную:

$$E/H = 120\pi (\lambda/2\pi r).$$

Так, поля  $E$  и  $H$  для излучения провода в ближней зоне

$$E = Il / 2\pi\epsilon_0 r^3; \quad H = Il / 4\pi r^2, \quad (4.1)$$

где  $I$  – ток в проводе (антенне);  $l$  – его длина.

В отличие от всенаправленных антенн, для которых ближняя зона распространяется на расстояние  $r < \lambda/2\pi$ , для широко распространенных зеркальных антенн с диаметром зеркала  $D$  граница ближней зоны в главном максимуме излучения определяется расстоянием

$$r = D^2/4\lambda. \quad (4.2)$$

В этой зоне (рис. 4.1) излучение концентрируется в луче почти такого же сочетания, как и сечение антенны в ее разрыве. Интенсивность излучения в центре сечения луча почти в девять раз больше, чем на его краях.

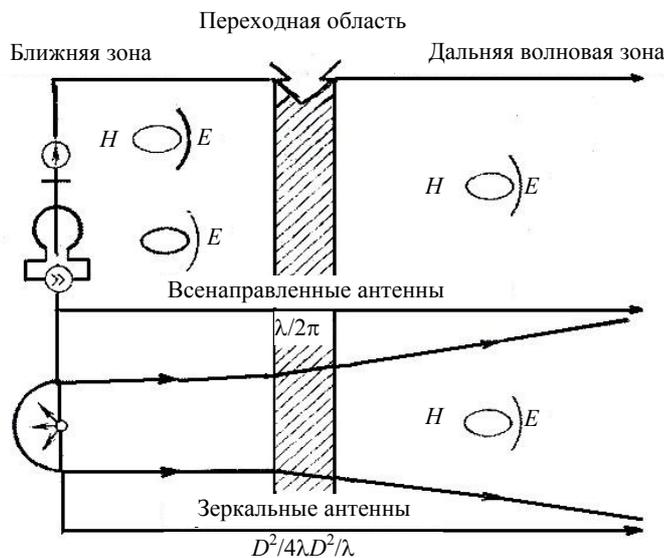


Рис. 4.1. Зоны электромагнитного поля излучения антенн

По мере удаления от антенны картина меняется. В случае штыревой антенны интенсивность электрического поля падает пропорционально  $(l/r)^3$ , на создание магнитной составляющей поля, которая с увеличением расстояния затухает пропорционально  $(l/r)^2$ . Для рамочной антенны, наоборот, магнитная составляющая затухает пропорционально  $(l/r)^3$ , а электрическая –  $(l/r)^2$ .

$r)^2$ . Такая картина будет наблюдаться до тех пор, пока расстояние не достигнет значения  $r \sim \lambda/2\pi$ , что соответствует промежуточной зоне формирования полей излучения, которые распространяются и существуют в следующей дальней зоне.

В общем случае при изотропном излучении граница между промежуточной и дальней зонами определяется расстоянием  $r \gg \lambda/2\pi$ .

Для дальней зоны излучения характерно соотношение

$$E/H = 120\pi = \zeta_0.$$

В дальнейшем как электрическая, так и магнитная составляющие поля затухают пропорционально  $1/r$ .

В дальней зоне излучения РЭС

$$E = \sqrt{30 \cdot PG} / r, \quad H = \sqrt{(PG/30)} / 4\pi r, \quad (4.3)$$

где  $P$  – средняя по времени мощность излучения.

Для направленных зеркальных антенн область дальней зоны излучения определяется расстоянием  $r = D^2/\lambda$ ,  $G$  – коэффициент направленного действия антенны.

Так как РЭС работает в основном в СВЧ диапазоне, то пространство вблизи станций, их антенн или мест утечек является дальней зоной.

Радиолокационное оборудование и связанная радиоаппаратура, работающие в диапазоне от низких до высоких частот, могут создавать и внутренние МЭМП через отверстия, неоднородности в экранах линий передачи энергии на антенну или в экранах катодных выводов магнетронов и т.п. По данным, приведенным в, напряженности полей утечек могут достигать значений от тысяч до десятков вольт на метр, что говорит о необходимости учета не только внешней, но и внутренней электромагнитной обстановки (ЭМО).

#### 4.2. ФОРМИРОВАНИЕ ЭМО И ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Как и во всех предыдущих случаях, на формирование ЭМО излучающими элементами РЭС проводящие свойства земли будут оказывать самое существенное влияние. При этом характеристики ЭМО над поверхностью земли и в ее толще существенно отличаются друг от друга.

*Поля излучения РЭС над поверхностью земли.* Можно выделить три возможных варианта формирования ЭМО над поверхностью земли: в ближней от антенны области без учета поглощающих и отражающих свойств земли (т.е. в зоне «прямой видимости»); с учетом отражения от поверхности земли; при распространении радиоволн над поверхностью земли. Первый из возможных вариантов формирования ЭМО тесно связан с узконаправленным действием зеркальных антенн РЭС, имеющих ярко выраженную узкую диаграмму направленности, например игольчатого типа.

Для направленных антенн существенным оказывается учет распределения интенсивности излучения по сечению луча, которое изменяется от максимального значения на его оси почти до нуля на периферии луча.

Для наиболее распространенного типа антенн РЭС с параболическими отражателями распределение интенсивности излучения характеризуется формулой

$$Q(\nu) = 4 \left[ \frac{J_1(kR \sin \nu)}{kR \sin \nu} \right]^2, \quad (4.5)$$

где  $Q$  – отношение интенсивности излучения в точке приема, расположенной под углом  $\nu$  к оси главного луча, к интенсивности на его оси;  $J_1(kR \sin \nu)$  – функция Бесселя первого порядка;  $R$  – половина размера раскрытия антенны, м;  $k$  – коэффициент распространения радиоволн,  $m^{-1}$ .

Как видно из рис. 4.2, первый максимум приходится на ось излучения  $\nu = 0$ . Первый минимум наступает при  $kR \sin \nu = 3,8$ .

На последующие максимумы приходится обычно несколько процентов мощности излучения.

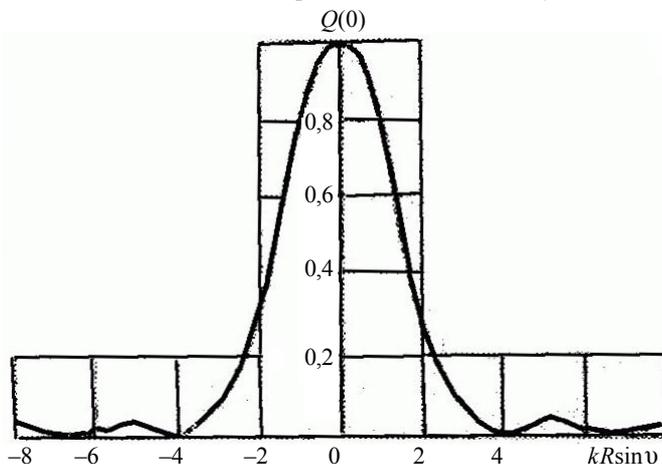


Рис. 4.2. Диаграмма направленности зеркальной антенны

При  $k R \sin \nu \leq 1,62$  значение  $Q - (\nu) = 0,5Q(0)$  соответствует так называемой ширине диаграммы направленности на половинной мощности, которая считается техническим параметром РЛС и указывается в паспорте. При этом ширина диаграммы направленности по нулям примерно в два раза больше ее ширины половинной мощности.

Таким образом, чтобы рассчитать напряженность поля в любой из точек, по сечению луча при излучении направленными антеннами необходимо в формулу (4.3) внести коэффициент (4.5). Если для описания ЭМО применить не энергетический, а электродинамический подход, то в выражение для напряженности поля следует коэффициент (4.5) подставлять в степени  $1/2$ .

Угол  $\nu$ , определяющий отклонение точки наблюдения от оси луча, может быть выражен через линейные параметры:  $r$  – расстояние от антенны до точки наблюдения от оси луча (рис. 4.3). В том случае, когда  $r > a$ ,

$$\nu = a/0,0175 r, \quad (4.6)$$

где  $a$  определяется через линейные параметры (рис. 4.3) в виде алгебраической суммы

$$a = (h_a - h_b + \Delta H) + l.$$

Возвышение антенны над точкой приема  $\Delta h = h_a - h_b + \Delta H$  принимает отрицательные или положительные значения в зависимости от того, будут ли они откладываться вверх или вниз от оси луча антенны. Величина приближения или удаления оси луча от линии горизонта также будет иметь разные знаки в соответствии со знаками угла  $a$  и определяется зависимостью  $l = 0,0175 r a$ .

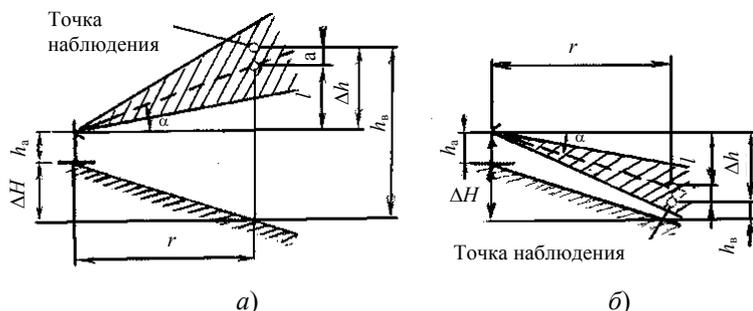


Рис. 4.3. Общие случаи взаимного расположения антенны РЛС и точки приема в зоне ее излучения:  
 $a - \alpha > 0$ ;  $b - \alpha < 0$

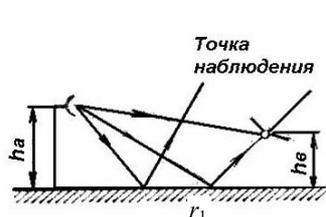


Рис. 4.4. Сложение прямой и отраженной волны

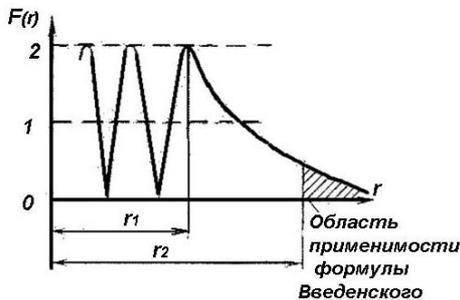


Рис. 4.5. Зависимость коэффициента ослабления волн излучения в точке приема ослабления радиоволн от расстояния при их отражении от поверхности земли

Преимущество выражения (4.6) очевидно, так как на практике всегда легче определить линейные координаты расположения точки приема по отношению к горизонту или оси антенны по сравнению с ее угловыми координатами.

В том случае, когда диаграмма направленности антенны такова, что на некотором расстоянии от антенны часть ее излучения падает на землю, как показано на рис. 4.4, в точке наблюдения будет не только прямой, но и отраженный луч. Чтобы учесть влияние земли на распространение радиоволн над ее поверхностью, в теории распространения радиоволн вводится коэффициент ослабления

$$F(r) = \sqrt{1 + 2 R_3 \cos\left(\theta + \frac{4\pi h_a h_b}{\lambda r}\right) + R_3^2}, \quad (4.7)$$

где  $R_3$  – коэффициент отражения радиоволн от земли;  $\theta$  – угол изменения фазы (потери фазы) прямого луча.

Приведенная формула справедлива для случаев, когда  $h_a$  и  $h_b \gg \lambda$ , что соответствует КВ и УКВ диапазону.

Для большинства встречающихся на практике видов поверхностей земли коэффициент отражения радиоволн  $R_3$  близок к единице, а угол потери фазы  $\theta$  стремится к  $180^\circ$ . Тогда

$$F(r) = 2 |\sin(2\pi h_a h_b / \lambda r)|.$$

Как показано на рис. 4.5, функция  $F(r)$  – периодическая и ее  $n$ -й максимум наступает при  $r_1 = 4\pi h_a h_b / \lambda$ .

При  $r > r_1$  функция  $F(r)$  начинает монотонно убывать и при  $r \geq 18 h_a h_b / \lambda$  переходит в зависимость, определяемую формулой Введенского:

$$F(r) = 4\pi h_a h_b / r \lambda,$$

Функция ослабления  $F(r)$  зависит от состояния поверхности земли. Для диффузного отражения от негладкой поверхности земли (травяной покров, неровности, шероховатости и т.п.)  $F(r) = 1$ .

При отражении от гладкой поверхности для больших углов скольжения и расстояний  $r \leq 4h_a h_b / \lambda$  в точках максимумов  $F(r) = 1 + R_3$ , при малых же (до  $3^\circ$ ) углах скольжения и тех же расстояниях  $F(r) = 2$ . При увеличении расстояния, когда угол скольжения остается мал, коэффициент ослабления стремится к  $F(r) = 4\pi h_a h_b / r \lambda$ .

Таким образом, при определении характеристик ЭМО в интересующей точке пространства влияние отражения радиоволн от поверхности земли учитывают введением коэффициента ослабления  $F(r)$ .

При дальнейшем увеличении расстояния от источника излучения до рассматриваемой точки земля начинает оказывать более существенное влияние на процесс распространения радиоволн, что в конечном итоге приводит к ослаблению и трансформации составляющих напряженности электрических и магнитных полей. Напряженность электрического поля излучения РЭС на расстоянии  $r$  от антенны определяется известным из теории распространения радиоволн соотношением Шулейкина-Ван-дер-Поля:

$$E(r) = \frac{245 \sqrt{PG}}{r} \exp(-jkr) F(\xi), \quad (4.8)$$

где  $k$  – фазовый коэффициент распространения радиоволн,  $\text{м}^{-1}$ ;  $F(\xi)$  – коэффициент ослабления электромагнитной энергии радиопередачи.

Коэффициент  $F(\xi)$  определяет потери электромагнитной энергии в земле при проникновении в ее толщу электромагнитных волн и является функцией параметра  $\xi$ , называемого «численным расстоянием». В свою очередь, величина  $\xi$  зависит от комплексной диэлектрической проницаемости земли по трассе распространения радиоволн и расстояния от радиостанции до рассматриваемой точки.

Для реальных почв, токи проводимости которых значительно превосходят токи смещения, в результате чего можно считать, что  $60\lambda\sigma_3 \ll \epsilon$  и для диапазона средних и длинных волн численное расстояние

$$\xi = \pi r / 60\lambda^2 \sigma_3.$$

Обычно определение коэффициента ослабления  $F(\xi)$  по вычисленному значению  $\xi$  производится по графикам. При отсутствии графиков коэффициент ослабления приближенно можно определить по формуле

$$F(\xi) = (2 + 0,3\xi) / (2 + \xi + 0,6\xi^2).$$

Таким образом, выражение (4.8) позволяет оценить напряженность электрического поля излучения РЭС для любых условий распространения радиоволн.

В процессе распространения электромагнитных волн над поверхностью земли не только происходит их ослабление вследствие конечной проводимости земли, но и возникают дополнительные составляющие поля, отсутствующие при их генерации.

Так, при вертикальной поляризации электромагнитной волны излучения, вследствие взаимодействия тангенциального магнитного поля с землей как проводящим полупространством, возникает горизонтальная составляющая напряженности электрического поля  $E_\tau$ , в результате чего происходит так называемый эффект наклона вектора напряженности электрического поля излучения в направлении распространения (рис. 4.6).

Соотношение между вертикальной составляющей напряженности электрического поля и появляющейся вследствие потерь в грунте горизонтальной ее составляющей можно установить на основе приближенных граничных условий Леонтовича, т.е.

$$E_\tau = E_v / \sqrt{E'k},$$

где  $E_v$  – вертикальная составляющая электрического вектора напряженности поля в воздухе, В/м;  $E_\tau$  – горизонтальная составляющая электрического вектора напряженности поля у поверхности земли (в земле и в воздухе), В/м.

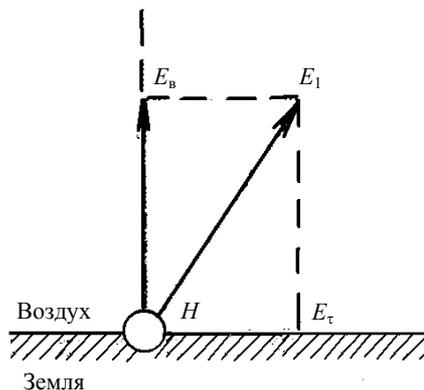


Рис. 4.6. К определению горизонтальной составляющей напряженности электрического поля у поверхности земли

Для реальных почв в диапазонах длинных и средних волн

$$E_{\tau} = E_B \sqrt{60\lambda\sigma_3} . \quad (4.9)$$

При этом ввиду малости (несколько градусов) угла наклона вектора напряженности электрического поля (4.9) может быть записана вместо ее вертикальной составляющей  $E_B$  полная напряженность  $E_1$ .

При излучении антенной РЛС электромагнитных волн горизонтальной поляризации на основе теории взаимности можно утверждать, что формула (4.9) будет выражать и вертикальную составляющую электрического поля.

*Подземный район излучения РЭС.* Формирование ЭМО в области над поверхностью земли тесно связано с проникновением электромагнитных полей в грунт. При этом существенна границе воздух-земля; проникновение электромагнитных волн в землю при распространении радиоволн над ее поверхностью.

Как и в случае с подземными полями, созданными грозowymi разрядами на процесс формирования ЭМО от излучения РЭС при преломлении радиоволн на границе воздух – земля будет сказываться их поляризация и угол скольжения (рис. 4.7).

Напряженность электрического поля в земле при вертикальной поляризации излучения

$$E_3 = E_1(1 - R_B),$$

где  $E_1$  – напряженность поля падающей волны, В/м;  $R_B$  – коэффициент отражения на границе воздух-земля при вертикальной поляризации.

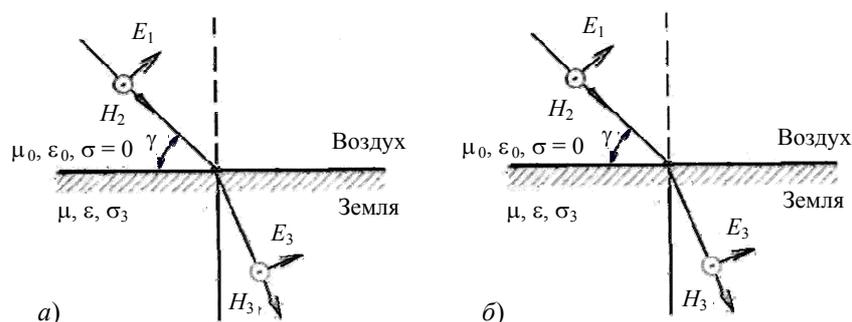


Рис. 4.7. Преломление вертикально-поляризованной (а) и горизонтально-поляризованной (б) электромагнитных волн на границе воздух-земля

При вертикальной поляризации электрического вектора и угле скольжения, близким к брюстеровскому, в грунт передается максимальная энергия. Аналогична в случае горизонтальной поляризации напряженность электрического поля в земле:

$$E_3 = E_1(1 + R_r),$$

где  $R_r$  – коэффициент отражения на границе воздух-земля при горизонтальной поляризации падающей волны.

Следует отметить, что для горизонтально поляризованной волны эффекта полной передачи энергии в землю ни при каких углах скольжения не наблюдаются. При малых углах скольжения происходит практически полное отражение как вертикально, так и горизонтально поляризованных волн от поверхности земли, и в ее толщу они практически не проникают.

На процесс формирования ЭМО в земле при распространении радиоволн над ее поверхностью оказывают существенное влияние многие факторы: неоднородность проводимости земли по трассе распространения радиоволн и в глубь земли; различные препятствия (горы, леса и т.п), обладающие способностью поглощать электромагнитную энергию радиоволн; уклоны и подъемы земной поверхности, ее кривизна. Влияние указанных факторов на распространение радиоволн подробно рассмотрено в [8].

Защита радиооборудования подразумевает целый комплекс мероприятий, согласно стандартам ИЕС (МЭК), стандартам ETSI (Европейского Телекоммуникационного Стандарта) и рекомендациям ITU (Международного Союза Электросвязи). Для уменьшения вероятности выхода из строя радиооборудования при прямых или близких попаданиях молнии рекомендуется:

- тщательно отнестись к вопросу проектирования и монтажа на объекте молниезащитного заземляющего устройства антенно-мачтового сооружения;
- предусматривать способ его соединения для выравнивания потенциалов с защитным заземляющим устройством электропитающей установки объекта;
- осуществлять заземление экранных оболочек коаксиальных высокочастотных кабелей на тело мачты (токоотвод системы молниезащитного заземления) как минимум в следующих основных точках:
  - возле антенного устройства;
  - при изгибах кабеля на угол 90° и более;
  - при вводе в техническое здание (контейнер).

### 4.3. Расчеты стойкости РЭС к воздействию МЭМП

Решение многих актуальных задач, относящихся к самым различным областям науки и техники, было бы чрезвычайно трудно осуществить без применения ЭВМ.

Реализация расчетно-экспериментальной оценки стойкости РЭС к воздействию МЭМП на ЭВМ предполагает выполнение следующих операций:

- постановку задачи и выбор общего алгоритма ее решения;
- математическое описание задачи (набор математических выражений – модель явления);
- составление блок-схемы программы и написание программы на одном из языков программирования.

#### 4.3.1. Формирование модели взаимодействия МЭМП с РЭС

*Постановка задачи.* Провести анализ работоспособности радиоответчика в условиях воздействия МЭМП.

*Начальные сведения о воздействующей МЭМП.* Предположим, что МЭМП представляет собой экспоненциальный импульс вида

$$E(t) = E_{\max} [\exp(-a_1 t) - \exp(-a_2 t)], \quad H(t) = E(t) / \xi_0.$$

*Начальные сведения о РЭС.* В качестве объекта исследования рассмотрим типовую структурную схему радиоответчика (рис. 4.8), приведенную в [5]. Для проведения анализа работы данной схемы в условиях воздействия МЭМП необходимо знать: несущую частоту принимаемого (полезного) сигнала; полосу пропускания ВЧ тракта приемника; полосу пропускания приемника в целом; чувствительность приемника; эффективную площадь антенны для возможного направления прихода помехи; характеристики экрана (экранов); характеристики кабелей и проводов (линий связи).

*Идеализация процесса работы радиоответчика в условиях воздействия МЭМП.* Обобщенная схема взаимодействия МЭМП с рассматриваемым радиоответчиком приведена на рис. 4.9.

*Алгоритм (описание вычислительного процесса).* Оценка работоспособности радиоответчика в условиях воздействия МЭМП должна содержать следующие операции (рис. 4.8 и 4.9):

- подготовку начальных данных о воздействующей МЭМП, полезном сигнале и основных характеристиках радиоответчика;

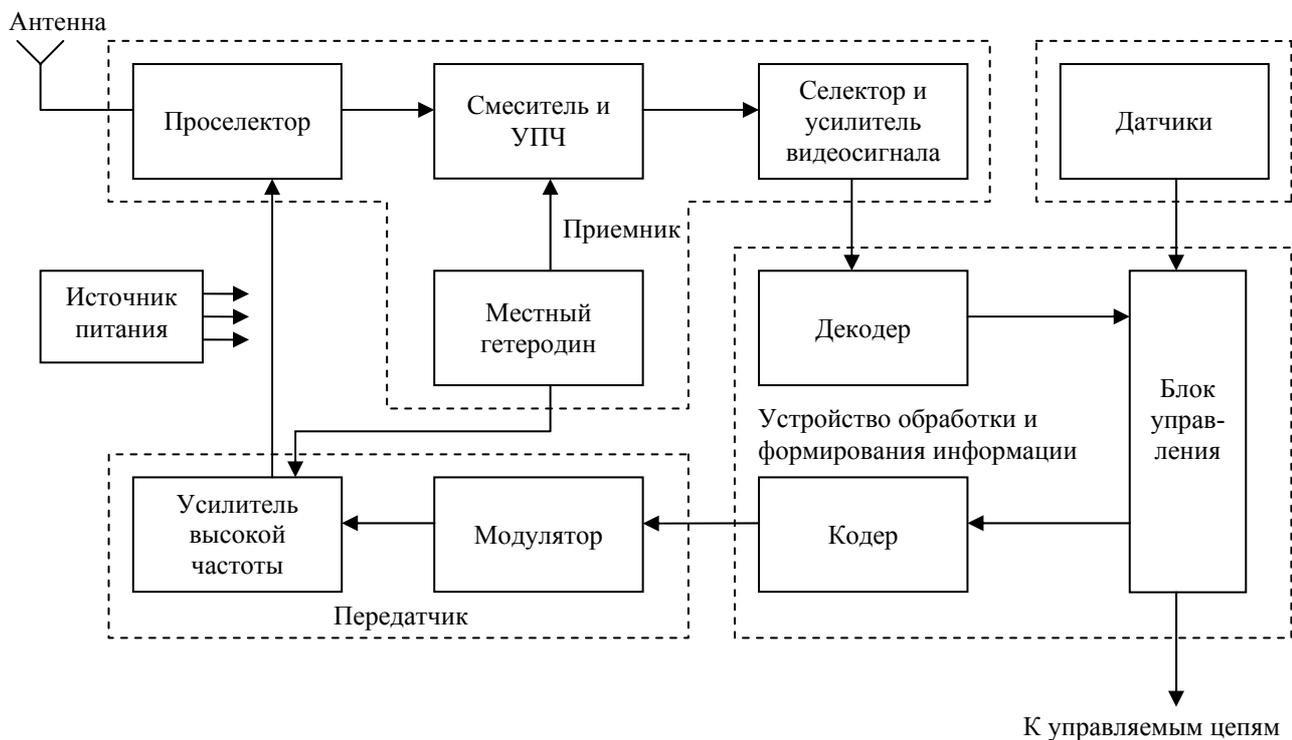
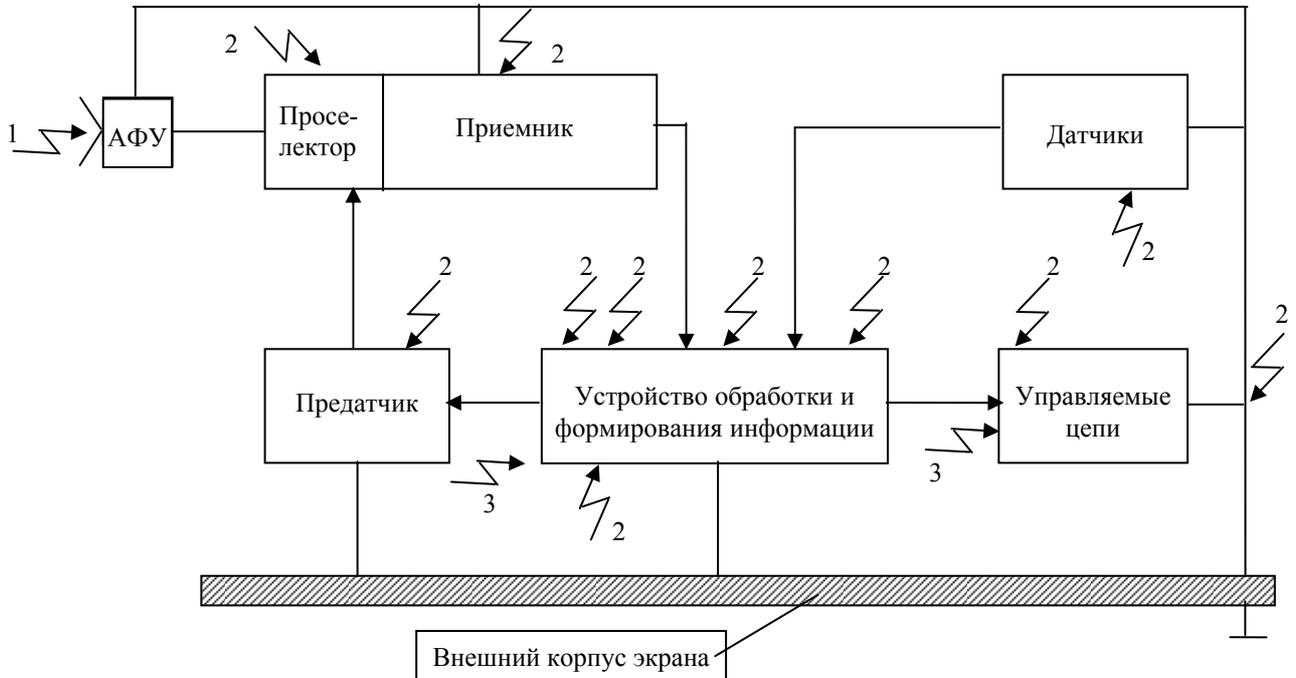
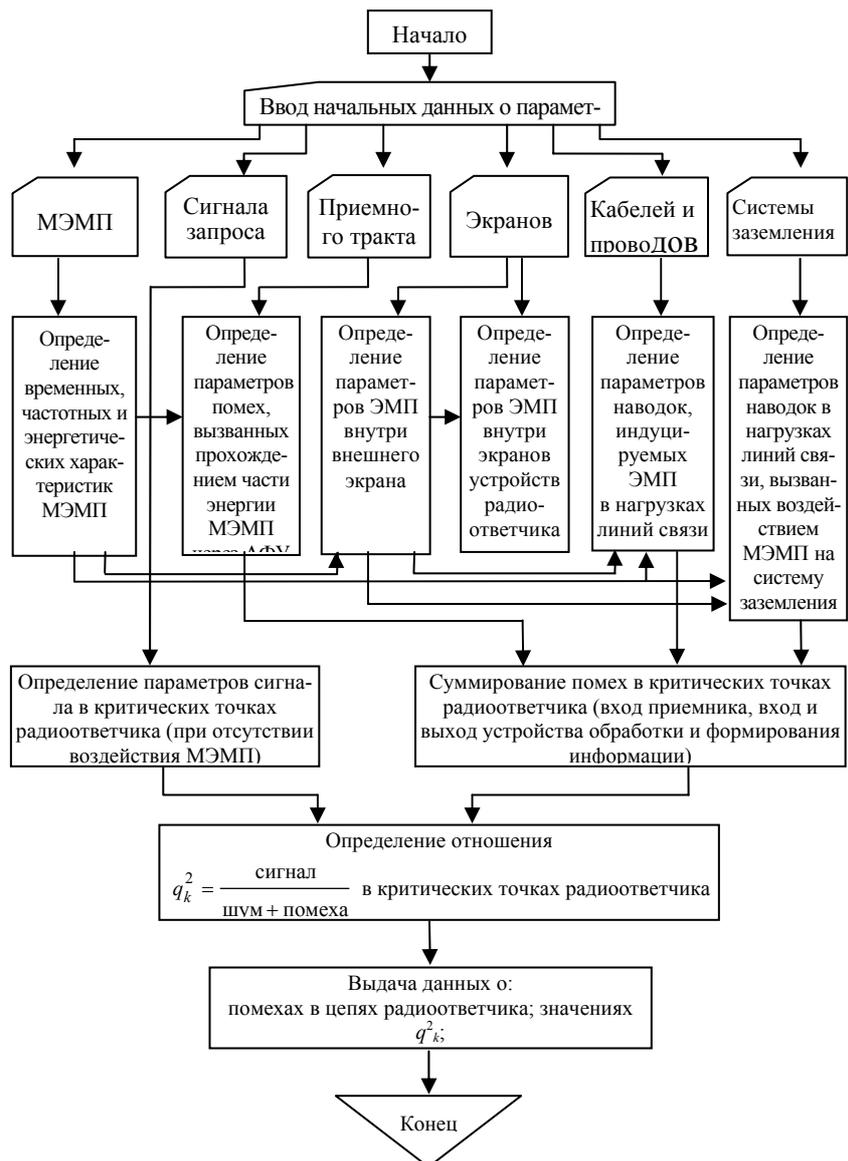


Рис. 4.8. Структурная схема радиоответчика



**Рис. 4.9. Возможные пути проникновения МЭМП в цепи радиоответчика:**  
 1 – через АФУ; 2 – через защитные экраны воздействие на ЭРЭ, схемы и линии связи; 3 – через систему заземления



**Рис. 4.10. Алгоритм оценки стойкости радиоответчика к воздействию МЭМП**

– расчет параметров помех, вызванных воздействием МЭМП по каждому из путей ее проникновения, их суммирование и приведение к критическим точкам радиоприемника (вход приемника, вход и выход устройства обработки и формирования информации);

– определение отношения  $q^2k = \text{сигнал} / (\text{шум} + \text{помеха})$  в критических точках радиоприемника;

– изменение начальных данных и проведение повторных вычислений в случае, если значение  $q^2k$  оказывается меньше заданного.

Анализ оценки стойкости радиоприемника к воздействию МЭМП приведен на рис. 4.10

### 4.3.2. Формирование программы

*Постановка задачи.* Оценка параметров помех в приемном тракте (рис. 4.8), вызванных прохождением части МЭМП через АФУ.

*Начальные сведения о РЭС и воздействующей МЭМП* те же, что и в предыдущей задаче.

Используемые математические выражения:

$$E_{п. \max} \ll \sqrt{\frac{\xi_0 k T N \Delta f}{\eta \lambda^2}}, \quad (4.10)$$

$$E_{п} = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} S_n(\omega) \cos[\omega t - \varphi_n(\omega)] d\omega, \quad (4.11)$$

$$W_{\Delta t} = \frac{1}{\pi \xi_0} \int_{\omega_1}^{\omega_2} [S_n(\omega)]^2 d\omega, \quad (4.12)$$

$$u_a(t) = E_{п}(t) h_a / 2, \quad (4.13)$$

$$W_a = W_{\Delta t} S_{эф.а} / 2. \quad (4.14)$$

Для импульсных МЭМП, имеющих сравнительно низкочастотный спектр, источниками которых являются молнии, ЛЭП в режиме КЗ, и рабочего диапазона частот радиоприемника выше 100 МГц справедливы следующие выражения:

$$E_{п. \max} = \frac{2(\tau_1 - \tau_2) \Delta f E_{\max}}{\pi^2 \tau_1 \tau_2 (4f_{\text{нес}}^2 - \Delta f^2)}, \quad (4.15)$$

$$E_{п}(t) = \frac{(\tau_1 - \tau_2) E_{\max} [\sin(\omega_2 t) - \sin(\omega_1 t)]}{\pi \tau_1 \tau_2 \omega_{\text{нес}}^2 t}, \quad (4.16)$$

$$E_{оп}(t) = \frac{2(\tau_1 - \tau_2) E_{\max} \sin(\Delta \omega t / 2)}{\pi \tau_1 \omega_{\text{нес}}^2 t}, \quad (4.17)$$

$$E_{ом}(t) = \frac{2(\tau_1 - \tau_2) E_{\max}}{\pi \tau_1 \tau_2 \omega_{\text{нес}}^2 t}, \quad (4.18)$$

$$W_{\Delta f} = \frac{(\tau_1 - \tau_2)^2 E_{\max}^2 \Delta f (12f_{\text{нес}}^2 + \Delta f^2)}{12\pi^2 \xi_0 \tau_1^2 \tau_2^2 (2f_{\text{нес}}^2 - \Delta f^2)^3}, \quad (4.19)$$

$$t_{\text{зап}} = \frac{2(\tau_1 - \tau_2) E_{\max}}{\pi \tau_1 \omega_{\text{нес}}^2 E_{п. \text{доп}}}. \quad (4.20)$$

В выражениях (4.10) – (4.20), кроме общепринятых в книге использованы следующие обозначения:  $E_{п}(t)$ ,  $E_{п. \max}$  – напряженность электрической составляющей поля МЭМП, приведенная к полосе пропускания приемного тракта  $\Delta \omega = 2\pi \Delta f$ , и ее максимальное значение [при выполнении условия (4.10) влиянием МЭМП на работу радиоприемника можно пренебречь], В/м;  $E_{оп}(t)$  – соответственно огибающие  $E_{п}(t)$  и  $E_{ом}(t)$ , В/м;  $W_{\Delta t}$  – плотность потока энергии помехи, приведенная к полосе его пропускания приемного тракта, Дж/м<sup>2</sup>;  $W_a$  – энергия помехи на входе приемника, приведенная к полосе его пропускания, Дж;  $u_a(t)$  – напряжение помехи на входе приемника, приведенное к полосе его пропускания.

### 4.3.3. Обсуждение результатов расчета

Положим для определенности, что:

$t = 1,2 \cdot 10^{-5}$ с	– область возможного нахождения задержанного сигнала;
$\tau = 4 \cdot 10^{-7}$ с	– ожидаемая минимальная задержка между фронтом сигнала на входе и выходе исследуемой цепи;
$E_0 = 5 \cdot 10^{-7}$ с, $t_d = 3 \cdot 10^{-7}$ с	– длительности задержанного сигнала на уровне $0,1U_m$ и $0,9U_m$ ;
$U_m = 1$ В	– максимальное значение амплитуды задержанного сигнала.

Основные результаты расчета, сведенные в табл. 4.1 – 4.4, показывают, что исследование модели измерителя  $\tau_3$  на ЭВМ позволяет:

- определить требуемый для реализации заданной точности измерения  $\tau_3$  период повторения стробирующих импульсов  $T_c$ ;
- оценить влияние различных дестабилизирующих факторов и погрешностей измерения  $t_k$ ,  $U_{\text{вых}}$  на точность измерения  $\tau_3$ ;
- сформулировать рекомендации, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации измерителя времени задержки.

#### 4.1. Зависимость точности измерения $\tau_3$ от периода повторения стробирующих импульсов

Количество стробов $K$ на интервале $t_1 - t_2$	6	10	14	18	22	26
Значение $\tau_3$ , не	680,2	700,1	694,2	691,4	693,1	693,9
Абсолютная ошибка измерения $t_{ц.т.}$ , не	13,23	6,643	1,283	1,710	0,394	0,523
Относительная ошибка измерения $\tau_3$ , %	1,945	0,948	0,184	0,247	0,057	0,075

#### 4.2. Зависимость точности измерения $\tau_3$ от точности измерения амплитуды $U_{\text{вых}}$ в момент $t_k$ при $K = 26$

Погрешность измерения $U_{\text{вых}}$ , %	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Значение $\tau_3$ , не	679,9	685,4	696,0	706,1	715,4	723,9
Абсолютная ошибка измерения $t_{ц.т.}$ , не	4,980	10,42	21,03	31,08	40,39	48,93
Относительная ошибка измерения $\tau_3$ , %	0,732	1,520	3,022	4,401	5,646	6,758

#### 4.3. Зависимость точности измерения $\tau_3$ от нестабильности временного положения стробирующих импульсов (в числителе при $K = 6$ , в знаменателе при $K = 26$ )

Относительная нестабильность $t_1$	0	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$
Значение $\tau_3$ , не	800,0	800,21	803,05	809,77	821,20	833,95
	800,0	800,06	803,71	811,30	823,45	836,54
Абсолютная	0	0,2142	0,9438	2,2253	2,7949	2,0447

ошибка измерения $t_{ц.т}, \text{не}$	0	0,0641	0,2849	0,6918	0,5457	0,5429
Относительная ошибка измерения $\tau_3, \%$	0	0,0267	0,1175	0,2748	0,3403	0,2452
	0	0,0080	0,0354	0,0852	0,0662	

**4.4. Зависимость точности измерения  $\tau_3$  от погрешности измерения  
временного изложения стробирующих импульсов  
(в числителе при  $K = 6$ , в знаменателе при  $K = 26$ )**

Погрешность измерения $t_{к}, \%$	1	4	8	12	16	20
Значение $\tau_3, \text{не}$	802,08	808,34	816,69	825,04	833,38	841,73
	802,14	808,59	817,17	825,76	834,35	842,94
Абсолютная ошибка измерения $t_{ц.т}, \text{не}$	2,0863	8,3453	16,691	25,036	33,381	41,727
	2,1469	8,5878	17,176	25,763	34,351	42,939
Относительная ошибка измерения $\tau_3, \%$	0,2601	1,0324	2,0437	3,0345	4,0055	4,9578
	0,2676	1,0620	2,1018	3,1199	4,1171	5,0939

## 5. УСТОЙЧИВОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

### 5.1. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭМИ

Исследуя устойчивость работы электромагнитной системы в условиях действия импульсных электромагнитных полей, целесообразно предварительно оценить энергию поля, поглощенную системой. Это особенно важно в случае принципиальной возможности ложных срабатываний устройств при воздействии помехонесущего поля.

Сущность оценки устойчивости систем к воздействию электромагнитного импульса (ЭМИ) сводится прежде всего к определению механизмов и уровней повреждения элементов, из которых состоит система. Вывод о потенциальной опасности воздействия ЭМИ на систему может быть сделан из сопоставления количества поглощенной энергии ЭМИ с минимальным ее количеством, достаточным для сбоя в работе или необратимых повреждений различных элементов системы [3].

Проведенный таким образом анализ устойчивости системы к воздействию ЭМИ позволит выявить наиболее слабые элементы системы, которые и будут, по сути дела, определять устойчивость всей системы в целом. Повышая устойчивость наиболее слабых элементов системы к воздействию ЭМИ, можно значительно повысить устойчивость системы в целом.

Наиболее эффективными приемниками энергии ЭМИ являются провода, выполняющие роль соединительных линий. Линейные проводники по отношению к помехонесущему полю играют роль электрических антенн и являются приемниками электрического поля; проводники образуют замкнутые контуры, играют роль магнитных антенн и являются приемниками магнитного поля. Оба этих типа приемников являются генераторами ЭДС, которые поглощают часть энергии помехонесущего поля и передают ее соединенным с ними функциональным элементам схем. В табл. 5.1 – табл. 5.5 приведены ориентировочные значения параметров соединительных проводов.

Исходя из вышесказанного, можно рекомендовать следующий порядок оценки устойчивости электронных систем к воздействию ЭМИ.

1. Провести анализ элементов электронной системы, выделить основные приемники энергии ЭМИ, контуры, линии проводников.
2. Найти ЭДС, которые наводятся в каждом из этих приемников.
3. Составить эквивалентные схемы, включающие цепи приема энергии и сопротивления, составляющие цепи элементов.
4. Найти токи, напряжения, выделяющуюся в элементах энергию ЭМИ.
5. Сравнить энергию, выделяющуюся в каждом элементе системы, с критическими ее значениями, при достижении которых происходит нарушение функционирования (данные о минимальной энергии, вызывающей сбой в работе или функциональные повреждения элементов электронной аппаратуры, приведены в табл. 5.6 и табл. 5.2).

Если энергия срабатывания оказывается больше поглощенной энергии поля, то система потенциально устойчива. В противном случае, система потенциально неустойчива и необходимо принятие меры по увеличению ее устойчивости.

Оценка энергии электромагнитного поля, поглощенной в системе, является сложной задачей. Приближенно она может быть решена для случаев взаимодействия поля с проводящими оболочками простых геометрических форм, внутри которых может располагаться аппаратура. Рассмотрим энергию электрического и магнитного поля, поглощенную системой, конструктивно выполненной в проводящем корпусе цилиндрической формы. Изложенный подход может быть распространен и на другие геометрические формы.

Сначала найдем энергию электрического поля, поглощенную системой. В случае, когда длина волны воздействующего электромагнитного поля гораздо больше размеров корпуса системы (а в случае ЭМИ – это безусловно так), последний можно рассматривать как длинноволновую антенну, электрическую – для электрического поля и магнитную – для магнитного поля.

#### 5.1. Сопротивление и индуктивность медного прямого провода

Диаметр провода, мм	Сопротивление при длине 100 мм, Ом	Индуктивность, мкГн, при длине провода, мм		
		50	100	200
0,1	0,22	0,07	0,15	0,33
0,5	0,0089	0,05	0,12	0,26
1,0	0,0023	0,04	0,10	0,23
2,0	0,00056	0,035	0,08	0,20

**5.2. Индуктивность, мкГн, на 100 мм медного прямого провода  
параллельного корпуса прибора**

Диаметр провода, мм	Расстояние между проводом и корпусом, мм		
	1	10	100
0,1	0,074	0,116	0,142
0,5	0,041	0,084	0,110
1,0	0,028	0,028	0,096
2,0	0,014	0,014	0,080

**5.3. Емкость провода, пФ, параллельного корпуса прибора,  
на 100 мм длины**

Диаметр провода, мм	Расстояние между проводом и корпусом, мм		
	1	10	100
0,1	1,5	0,9	0,7
0,5	2,7	1,4	0,8
1,0	4,0	1,6	0,9
2,0	8,0	1,8	1,0

**5.4. Емкость между двумя параллельными проводами  
на 100 мм длины, пФ**

Диаметр провода, мм	Расстояние между проводами, мм		
	1	10	50
0,1	0,75	0,5	0,04
0,5	1,4	0,75	0,05
1,0	2,0	0,9	0,06
2,0	5,0	1,3	0,07

**5.5. Взаиминдуктивность между двумя параллельными проводами  
одной длины, мкГн**

Длина провода, мм	Расстояние между проводами, мм		
	2	10	30
50	0,03	0,015	0,008
100	0,07	0,04	0,024
200	0,17	0,11	0,07

**5.6. Минимальная энергия, вызывающая функциональные  
повреждения элементов электронной аппаратуры и воспламенение  
пиротехнических устройств**

Наименование элемента	Минимальная энергия, Дж
1. Низкочастотный транзистор (германиевый)	$4 \cdot 10^{-2}$
2. Переключающие транзисторы <i>n-p-n</i>	$6 \cdot 10^{-5}$
3. Переключающие транзисторы <i>p-n-p</i>	$8 \cdot 10^{-4}$
4. Интегральная схема (кремневая)	$8 \cdot 10^{-5}$
5. Туннельный диод	$5 \cdot 10^{-4}$

6.	Высокочастотный диод (кремневый)	$1 \cdot 10^{-7}$
7.	Управляемый выпрямитель (кремневый)	$3 \cdot 10^{-3}$
8.	Вариатор (германиевый)	$1 \cdot 10^{-4}$
9.	Электронная лампа СВЧ	$1 \cdot 10^0$
10.	Реле слабого тока	$2 \cdot 10^{-3}$
11.	Реле (на 1 А)	$1 \cdot 10^{-1}$
12.	Микроамперметр	$3 \cdot 10^{-3}$
13.	Разрывной болт	$6 \cdot 10^{-4}$
14.	Запал	$2 \cdot 10^{-5}$
15.	Пары топлива	$3 \cdot 10^{-3}$

### 5.7. Минимальная энергия, Дж, вызывающая сбой в работе электронных систем

Вид устройства	Минимальная энергия	Характер сбоя	Дополнительные данные
Плата с логическими элементами	$3 \cdot 10^{-9}$	Сбой работы схемы	Типичный резисторно-транзисторный логический ключ
Плата с логическими элементами	$1 \cdot 10^{-9}$	Сбой работы схемы	Типичная триггерная схема на транзисторах
Интегральная схема	$4 \cdot 10^{-10}$	Сбой работы схемы	Монолитная триггерно-интегрирующая схема
Устройство оперативной памяти	$2 \cdot 10^{-9}$	Стирание записи	Запоминающее устройство на магнитных сердечниках
Оперативная память	$3 - 5 \cdot 10^{-9}$	Стирание записи	Запоминающее устройство на магнитных сердечниках
Усилитель	$4 \cdot 10^{-21}$	Помехи	Типичный усилитель с большим коэффициентом усиления

Угольные резисторы способны выдерживать импульсные мощности, более чем в 10 000 раз превышающие их собственную номинальную мощность. Конденсаторы также относятся к числу довольно стойких к импульсному воздействию элементов.

Минимальная энергия, необходимая для того, чтобы произошел сбой в работе электронной или электрической системы, примерно на 1–2 порядка меньше энергии, вызывающей необратимые изменения.

При рассмотрении сечения герметичной проводящей цилиндрической оболочки радиуса  $r_0$  и длиной  $l$ , находящейся в продольном электрическом поле  $E_0$ .

Под действием электрического поля цилиндр поляризуется и на каждом из его оснований индуцируется заряд

$$|q| = \pi \varepsilon_0 r_0 E_0(t), \quad (5.1)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость.

При изменении во времени электрического поля заряды также изменяются во времени и на боковой поверхности оболочки протекает ток. Этот ток связан с разделением электрических зарядов и замыкается вне цилиндра токами смещения. Следовательно, по отношению к воздействию полю проводящий корпус системы с точки зрения введенного в нем тока ведет себя как емкость, включенная последовательно с омическим сопротивлением проводника, т.е. проводящий корпус системы в электрическом поле можно рассматривать как короткую электрическую антенну.

Эквивалентная схема для расчета тока в оболочке системы совпадает с эквивалентной схемой цепи короткой электрической антенны. Омическое сопротивление оболочки цилиндрической формы, имеющей стенки толщиной  $d$  с проводимостью,  $\sigma$  равно

$$R_{об} = \frac{l}{2\pi r_0 \sigma d}. \quad (5.2)$$

Емкость оболочки находится из соотношения (5.1), если учесть, что  $q = C_0 v$ , где  $v = E_0 l$  – разность потенциалов оснований цилиндра. Отсюда

$$C_{об} = \frac{2\pi \varepsilon_0 r_0^2}{l}.$$

Энергия электрического поля, поглощенного системой, равна

$$W = \int_0^{\infty} R_{об} |i_{об}(t)|^2 dt. \quad (5.3)$$

Ток оболочки  $i_{об}(t)$  может быть найден из выражения

$$i_{об}(t) = \frac{l}{R_{об} \theta_{об}} \int_0^t E_0(t-\tau) e^{-\frac{\tau}{\theta_{об}}} d\tau, \quad (5.4)$$

где  $\theta_{об} = R_{об} C_{об} = \frac{\varepsilon_0 r_0}{\sigma d}$  – постоянная времени оболочки.

Подставляя (5.4) в (5.3), найдем энергию электрического поля, поглощенную системой:

$$W_a = \frac{l^2}{R_{об} \theta_{об}^2} \int_0^{\infty} \left[ \int_0^t E_0(t-\tau) e^{-\frac{\tau}{\theta_{об}}} d\tau \right]^2 dt. \quad (5.5)$$

В случае действия магнитного поля, индуцированные токи протекают по периметру сечения, перпендикулярного направлению вектора магнитного поля.

Меняющееся во времени магнитное поле индуцирует в таком короткозамкнутом витке ЭДС, которая пропорциональна скорости изменения магнитного поля. При очень низких частотах ток в витке пропорционален приложенной ЭДС, деленной на омическое сопротивление витка. Этот ток сдвинут на  $\frac{\pi}{2}$  относительно приложенного помехонесущего поля.

Когда скорость изменения приложенного поля увеличивается, индуктивное сопротивление проводника растет и становится гораздо больше его омического сопротивления. Таким образом, по отношению к магнитному полю проводящий корпус системы с точки зрения наведенного в нем тока ведет себя как индуктивность, включенная последовательно с омическим сопротивлением, определяемым собственным омическим сопротивлением оболочки, т.е. проводящий корпус системы в магнитном поле можно рассматривать как короткозамкнутый виток, или магнитную антенну.

Эквивалентная схема для расчета тока в оболочке системы, возникающего под действием магнитного поля, совпадает с эквивалентной схемой цепи рамочной антенны.

Определим индуктивность оболочки  $L_{об}$  для протекающего по ее периметру поперечного кругового тока. Если этот ток обозначить  $i_{об}$ , а ЭДС, самоиндукции в оболочке  $\varepsilon_{об}$ , то

$$\varepsilon_{об} = -L_{об} \frac{di_{об}}{dt}. \quad (5.6)$$

Ток в оболочке создает магнитное поле  $H$ , которое может быть найдено по закону полного тока

$$\oint \vec{H} dl = \iint \vec{j} n dS, \quad (5.7)$$

где  $dl$  – дифференциал длины кривой, ограничивающей сечение  $S$ , через которое протекает ток оболочки;  $\vec{n}$  – единичный вектор (орт) нормали к поверхности  $S$ .

Если рассмотреть продольное сечение цилиндрической оболочки, направления линий тока и контур интегрирования  $ABCD$ , охватывающий ток  $i_{об}$ , закон полного тока в этом случае дает

$$i_{об} = 2lH. \quad (5.8)$$

ЭДС самоиндукции определяется из второго закона Максвелла:

$$\varepsilon = - \iint_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \vec{n} dS = - \int_0^{\pi} \int_0^{r_0} \mu(r) \frac{\partial H}{\partial t} r dr d\theta,$$

где  $B$  – магнитная индукция;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды.

Будем считать, что напряженность магнитного поля постоянна по сечению оболочки. Учитывая, что  $d \ll r$ , после интегрирования получим

$$\varepsilon = -\pi r_0 (\mu_0 r_0 + 2\mu_{об} d) \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (5.9)$$

Здесь через  $\mu_0$  обозначена магнитная проницаемость среды, заполняющей полость оболочки (для воздуха  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м). Из (5.6), (5.8) и (5.9) найдем индуктивность оболочки для поперечного кругового тока:

$$L_{об} = \frac{\pi r_0}{2} (\mu_0 r_0 + 2\mu_{об} d). \quad (5.10)$$

Энергия магнитного поля поглощенная системой

$$W_a = R_{об} \int_0^{\infty} |i_{об}(t)|^2 dt. \quad (5.11)$$

Если действует импульс магнитного поля прямоугольной формы длительностью  $t_n$  и амплитудой  $H_m$ , то индуцируемая в оболочке ЭДС в соответствии с (5.9) будет:

$$\varepsilon = -\pi r_0 (\mu_0 r_0 + 2\mu_{об} d) H_{m0} [\delta(0) - \delta(t_n)] = A [\delta(0) - \delta(t_n)],$$

где  $\delta(t)$  – дельта-функция (единичная импульсная функция).

Соответственно ток оболочки равен:

$$i_{об} = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0; \\ \frac{A}{L_{об}} e^{-\frac{t}{\theta_{об}}}, & \text{при } 0 < t < t_n; \\ -\frac{A}{L_{об}} \left(1 - e^{-\frac{t_n}{\theta_{об}}}\right) e^{-\frac{t-t_n}{\theta_{об}}}, & \text{при } t > t_n, \end{cases}$$

$$\text{где } \theta_{об} = \frac{L_{об}}{R_{об}}; R_{об} = \frac{2\pi r_0}{\sigma l d}.$$

Подставляя найденный ток в выражение для поглощенной энергии (5.11), получим

$$W = 2\pi r_0 l (\mu_0 r_0 + 2\mu_{об} d) H_{m0}^2 \left(1 - e^{-t_n/\theta_{об}}\right).$$

Сравнивая поглощенную энергию ЭМИ элементами и схемами электронной системы с минимальным уровнем энергии, достаточной для сбоя в работе или необратимых повреждений, можно сделать вывод об устойчивости отдельных элементов и системы в целом к воздействию ЭМИ.

Приведенная методика оценки устойчивости электронных систем к воздействию ЭМИ ядерного взрыва может быть выполнена при условии знания величин напряженностей электрического, магнитного полей ЭМИ в области пространства, где размещены исследуемые системы. В условиях мирного времени можно лишь предположительно судить об этих величинах. Поэтому для оценки устойчивости различной электронной аппаратуры к воздействию ЭМИ можно использовать более упрощенную схему оценки.

Порядок проведения оценки в этом случае может быть следующим.

1. Составить перечень основных комплектующих элементов анализируемой аппаратуры.
2. Приблизительно определить степень защищенности  $K$  от ЭМИ для каждого элемента схемы (наличие приемников ЭМИ, проводников, связанных с данным элементом, экранов, фильтров, заземлений и т.д.). Величина  $K$  может быть как больше единицы, так и меньше единицы.
3. Используя табл. 5.6 и табл. 5.7, а также литературные данные по минимальной энергии ЭМИ, вызывающей повреждения или сбоя в работе рассматриваемых элементов, и выявленную степень их защищенности в конструктивной схеме и конструкции, определить наименее стойкие к воздействию ЭМИ элементы.
4. Выработать предложения по повышению устойчивости наименее устойчивых элементов с целью повысить устойчивость всей аппаратуры (системы) в целом, используя один из методов, описанных ниже.
5. После повышения устойчивости системы обратным расчетом, рекомендуемым в данном параграфе, определить значения напряженностей электромагнитного поля, создаваемого ЭМИ, которые не вызовут нарушения функционирования оцениваемой системы.

## 5.2. Методы повышения устойчивости электронных систем к воздействию ЭМИ

Основными методами повышения устойчивости электронных схем к воздействию ЭМИ являются:

- выбор наиболее стойких к воздействию ЭМИ комплектующих элементов системы;
- рациональное пространственное размещение узлов и схем системы;

- создание стойких к воздействию ЭМИ электронных схем (схемные решения);
- предложения по порядку функционирования системы с подачей сигнала «ВТ»;
- принятие мер специальной защиты.

Не обязательно и экономически не оправдано увеличивать устойчивость системы за счет доведения параметров, определяющих устойчивость ее элементов, до их максимальных значений.

Наиболее рациональным методом повышения устойчивости электронной системы к воздействию ЭМИ является повышение устойчивости к ЭМИ наиболее слабых элементов системы.

В тех случаях, когда выбором наиболее устойчивые к воздействию ЭМИ элементов или схемным решением не удастся повысить устойчивость системы до желаемого уровня, следует прибегнуть к специальным средствам защиты от воздействия ЭМИ.

К таким средствам следует отнести применение в схемах:

- фильтров, трансформаторов, дросселей;
- разрядников, ограничителей, разъединителей;
- заземлений и экранов.

Фильтры широко использовали для защиты от радиопомех, созданных сторонним электромагнитным излучением передатчиков. Трудность при использовании фильтров в системах защиты от ЭМИ – очень широкая полоса частот, соответствующих сигналам различной формы, наведенных ЭМИ. Необходимо учитывать, что при применении фильтра энергия снижается незначительно и только на порядок уменьшается амплитуда пика, поэтому их следует применять в сочетании с другими защитными приборами, например, диодными ограничителями или разрядниками. Другая трудность заключается в том, что большинство готовых фильтров имеют типичные рабочие напряжения 400...600 В. Напряжения же наводки, созданные ЭМИ, значительно превышают указанные значения.

Бифилярные дроссели и изолирующие трансформаторы могут быть использованы для подавления наводки ЭМИ от изменения индукции магнитного поля во времени. В этом случае включенная последовательно индуктивность в цепи наводки подавляет ее сигнал, но в то же время пропускает постоянные и высокочастотные сигналы. Как бифилярный дроссель, так и изолирующий трансформатор могут быть подвергнуты действию очень высоких импульсных напряжений наводки. Пороги их повреждений для переходных процессов, обусловленных ЭМИ, сравнимы со значениями переходных воздействий при испытаниях, проведенных с целью защиты от грозových разрядов.

Искровые разрядники (или как их называют «жесткие ограничители») могут быть использованы для защиты электронных схем при перегрузке по напряжению и току. Однако ни искровые разрядники, ни электромагнитные приборы (реле) не пригодны для защиты чувствительных полупроводниковых приборов, поскольку для них недопустимы начальные выбросы, пропускаемые этими защитными приборами. Это объясняется тем, что напряжение перегрузки, возникающее от действия поля ЭМИ, может повредить систему в течение нескольких наносекунд, что меньше времени срабатывания большинства защитных приборов.

Другой класс защитных приборов – варисторы, сопротивление которых зависит от напряжения. Иначе их называют «мягкими» ограничителями. Они имеют меньшее время срабатывания, однако менее устойчивы к амплитуде наводки. С целью использования достоинств фильтров и различных типов разрядников и в то же время для избежания недостатков часто создают гибридные схемы защиты, т.е. комбинацию из тех и других.

Разъединители – плавкие предохранители, реле, прерыватели или схемы скоростной защиты относятся к стойким устройствам защиты. Они предназначены для отключения менее стойких схем от источников мощности в начале переходного процесса, до того как произойдут катастрофические повреждения.

### 5.3. Электромагнитное экранирование

Наиболее существенное ослабление воздействиям ЭМИ на электронные системы и их элементы можно получить, применяя электромагнитные экраны [1, 3, 5].

Электромагнитными экранами называются конструкции, предназначенные для ослабления электромагнитных полей, создаваемых какими-либо источниками в некоторой области пространства, не содержащей этих источников, и широко используемые в современной электротехнике.

В подавляющем большинстве случаев электромагнитные экраны делаются из металла: меди, алюминия, стали.

Принцип действия электромагнитного экрана заключается в следующем. Под действием первичного поля на поверхности экрана индуцируются заряды, а в его толще – токи и магнитная поляризация. Эти заряды, токи и поляризация создают вторичное поле. От сложения вторичного поля с первичным образуется результирующее поле, которое оказывается слабее первичного в защищаемой области пространства.

Таким образом, можно считать, что электромагнитный экран отражает и направляет поток электромагнитной энергии и отводит его от защищаемой области.

Электромагнитный экран – система линейная; отсюда следует, что для него справедлив принцип взаимности перемещений. Сказанное, в частности, означает, что эффективность экрана-коробки сохраняется одной и той же независимо от того расположен ли внутри него источник поля или защищенная область пространства. Это положение имеет большое практическое значение, так как при излучении эффективности экранирования позволяет ограничиться случаем расположения источника поля внутри экрана.

Количественную оценку эффективности электромагнитного экрана (эффективность экранирования) можно характеризовать отношением напряженности поля в защищенной области пространства при отсутствии экрана  $E_0, H_0$  и при наличии его ( $E, H$ ):

$$\mathfrak{E}_E = \frac{E_0}{E}; \quad \mathfrak{E}_H = \frac{H_0}{H}.$$

Величина  $\mathfrak{E}_{E,H}$  может быть выражена в простых отношениях или в децибелах (дБ).

Эффективность экрана существенно зависит от характера источника поля. Разнообразие возможных источников бесконечно: однако любой реальный источник может быть с необходимой точностью представлен в виде более или менее сложной совокупности электрических диполей и витков (рамок) с током (магнитных диполей).

В основе различия поведения экрана по отношению к разным реальным источникам лежит различие в его поведении по отношению к электрическому и магнитному диполям. Последнее различие является следствием разной структуры полей этих двух источников. В свободном пространстве при

$$r \gg \frac{\lambda}{2\pi},$$

где  $r$  – расстояние от источника, а  $\lambda$  – длина волны, различие в структурах полей обоих источников стирается: в любой точке пространства  $E$  и  $H$  практически синфазны, а их отношение оказывается почти такими же, как и в плоской волне, т.е.  $\frac{E}{H} = 120\pi$ , Ом.

При  $r \ll \frac{\lambda}{2\pi}$  отношение  $E/H$  зависит от положения точки наблюдения. В экваториальной плоскости (плоскости, проходящей через диполя перпендикулярно к его оси) оно приближенно и определяется следующими формулами:

$$\text{– для электрического диполя} \quad \frac{E}{H} = 120\pi \frac{\lambda}{2\pi r};$$

$$\text{– для магнитного диполя} \quad \frac{E}{H} = 120\pi \frac{2\pi r}{\lambda}.$$

Таким образом, с уменьшением  $r$  или увеличением  $\lambda$  (с уменьшением частоты  $f$ ) отношение  $E$  к  $H$  в случае электротехнического поля растет, роль магнитной составляющей убывает, и оказывается возможным рассматривать поле как квазиэлектростатическое.

В общем случае экран не только ослабляет, но и искажает поле источника в защитной области пространства. Поэтому его эффективность различна для электрической и магнитной составляющих поля. Это обстоятельство существенно затрудняет ее количественную оценку.

Только в простейших случаях эффективность экрана определяется однозначно (например, экранирование полупространства от плоской электромагнитной волны бесконечным однородным экраном).

Для последнего случая можно получить формулу, удобную для практических расчетов:

$$\mathfrak{E}_{пл} = 60\pi\sigma dx \begin{cases} 1 & \text{при } d/\delta < 0,1; \\ \frac{\delta}{2\sqrt{2}d} e^{d/\delta} & \text{при } d/\delta > 1, \end{cases} \quad (5.12)$$

где  $\sigma$  – удельная проводимость материала экрана, см/м;  $d$  – толщина экрана, м;  $\delta$  – эквивалентная глубина проникновения, т.е. расстояние, на котором электромагнитная волна ослабевает в  $e$  раз и отстает на  $\pi/2$ .

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_a \sigma}} = \frac{A}{\sqrt{f}},$$

где  $A$  – коэффициент материала;  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость;  $f$  – частота электромагнитного излучения, Гц.

Электрофизические параметры, а также данные об эквивалентной глубине проникновения для материалов экранов, представляющих наибольший интерес, приведены в табл. 5.8 и табл. 5.9.

### 5.8. Электрические параметры некоторых металлов

Показатель	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь	Пермаллой
Удельное сопротивление $\rho$ , Ом · мм <sup>2</sup> /м	0,0175	0,06	0,03	0,1	0,65

Удельная проводимость $\sigma$ , См/м	$5,7 \cdot 10^7$	$16,6 \cdot 10^7$	$33 \cdot 10^7$	$10 \cdot 10^7$		$1,54 \cdot 10^7$
Относительная магнитная проницаемость $\mu_r$	1	1	12	50	100	12 000
Коэффициент материала экрана $A$ , м · Гц <sup>1/2</sup>	$6,7 \cdot 10^{-2}$	$12,4 \cdot 10^{-2}$	$8,8 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$1,54 \cdot 10^{-2}$	$0,36 \cdot 10^{-2}$

### 5.9. Эквивалентная глубина проникновения $\delta$ для различных экранирующих материалов, мм

Частота $f$ , Гц	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь		Пермаллой $\mu_r = 12\ 000$
				$\mu_r = 50$	$\mu_r = 100$	
$10^2$	6,700	12,400	8,800	2,300	1,540	0,380
$10^3$	2,100	3,900	2,750	0,700	0,490	0,120
$10^4$	0,670	1,240	0,880	0,230	0,154	0,038
$10^5$	0,210	0,390	0,275	0,070	0,049	0,012

На высоких частотах при относительно большой толщине материала  $d > \delta$  эффективность экрана можно определить по приближенному уравнению

$$\mathcal{E} \approx e^{d/\delta} \left( \frac{1}{2} + \frac{D}{2,8m\mu_r\delta} \right), \quad (5.13)$$

где  $d$  – толщина стенок экрана;  $\delta$  – эквивалентная глубина проникновения;  $D$  – ширина прямоугольного экрана или диаметр цилиндрического или сферического;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость;  $m$  – коэффициент формы экрана, для прямоугольного  $m = 1$ , для цилиндрического  $m = 2$  и для сферического  $m = 3$ .

Величину  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  можно рассматривать как произведение двух сомножителей:

$$\mathcal{E}_{\text{пл}} = \mathcal{E}_{\text{пл.отр}} \mathcal{E}_{\text{пл.осл}}. \quad (5.14)$$

Первый из сомножителей характеризует эффективность отражения первичной падающей волны электрического поля от поверхности экрана.

Можно получить следующие приближенные зависимости для оценки величины первого сомножителя зависимости (5.14):

$$\mathcal{E}_{\text{пл.отр}} \approx 60\pi \cdot \begin{cases} d & \text{при } d/\delta < 0,1; \\ \delta & \text{при } d/\delta > 1. \end{cases} \quad (5.15)$$

Из формулы (5.15) видно, что с увеличением толщины экрана  $\mathcal{E}_{\text{пл.отр}}$  сначала растет, а потом почти не меняется. Это и понятно, так как при  $d > \delta$  явления на поверхности практически перестают зависеть от  $d$ .

С повышением частоты эффективность отражения сначала сохраняется неизменной, а потом начинает уменьшаться и при  $d > \delta$  оказывается практически обратно пропорциональной  $\sqrt{f}$ . Причина в том, что из-за поверхностного эффекта возрастает поверхностное сопротивление экрана.

Второй сомножитель формулы (5.14) характеризует степень ослабления электрической составляющей при проникновении поля сквозь толщу стенки экрана. Приближенно его можно оценить по зависимости

$$\mathcal{E}_{\text{пл.осл}} \approx \begin{cases} 1 & \text{при } d/\delta < 0,1; \\ \frac{1}{2} e^{d/\delta} & \text{при } d/\delta > 1. \end{cases} \quad (5.16)$$

Формулы (5.12) позволяют сравнивать между собой различные металлы как материалы для экрана. Действительно, при  $d/\delta < 0,1$  эффективность экрана пропорциональна удельной проводимости  $\delta$  и не зависит от магнитной проницаемости материала. Следовательно, при равных толщинах медный экран лучше алюминиевого и намного лучше стального.

Однако с ростом толщины  $d$  или частоты  $f$  картина изменяется, так как существенную роль при определении  $\mathcal{E}$  начинает играть член  $e^{d/\delta}$ . А так как у стали толщина поверхностного слоя много меньше, чем у меди и алюминия, то стальной экран оказывается более эффективным. Граничная частота  $f_{\text{гр}}$ , при которой эффективность стального и медного экранов одна, зависит от  $d$  и определяется формулой

$$f_{гр} = \frac{0,48}{\mu d^2},$$

где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость стали.

При произвольной форме экрана и конечных размерах диполя (источника поля) количественная оценка эффективности экранирования сильно затруднена. Поэтому для получения количественной оценки обратимся к простейшему случаю – шаровому экрану.

Эффективность шарового экрана с внутренним радиусом  $R$  и толщиной стенок  $d$  по отношению к элементарному диполю, расположенному в его центре, при  $d \ll R \ll \lambda/2\pi$  определяется формулой

$$\Theta = 4,2 \frac{R}{\lambda} \Theta_{пл}, \quad (5.17)$$

где  $\Theta_{пл}$  находится из (5.12).

Электромагнитная волна элементарного диполя не плоская, а сферическая; однако  $d \ll R$  можно считать поле в толще стенок экрана плоским и воспользоваться для оценки ослабления его формулой (5.17), а для оценки ослабления поля от экрана следующей приближенной зависимостью:

$$\Theta_{отр} = 4,2 \frac{R}{\lambda} \pi \sigma \begin{cases} d & \text{при } \frac{d}{\delta} < 0,1; \\ \delta & \text{при } \frac{d}{\delta} > 1. \end{cases} \quad (5.18)$$

Нетрудно видеть, что с повышением частоты эффективность ослабления уменьшается.

Расчеты и испытания показывают, что на частотах ниже 100 кГц плоский стальной экран менее эффективен, чем медный и даже алюминиевый, но на частотах выше 1 МГц его эффективность уже на пять порядков выше эффективности плоского медного экрана. Эти соотношения сохраняются и для шаровых экранов при экранировании диполей обоих типов. Напоминаем, что большая часть энергии ЭМИ излучается в диапазоне частот 15...30 кГц.

Эффективность экранирования замкнутыми экранами источников типа электрического диполя очень велика. Даже при толщине стенок 0,1 мм она на всех частотах при всех практически возможных размерах и для всех трех рассмотренных материалов превышает  $10^6$  (120 дБ).

При экранировании источников типа магнитный диполь на частотах порядка 10 кГц и ниже для получения большой эффективности экран должен быть толстостенным. Так на частоте 10 кГц при  $R = 100$  мм эффективность экранов различной толщины принимает значения, приведенные в табл. 5.10.

**5.10. Эффективность экранов различной толщины**

$d$ , мм	$\Theta$		
	медь	алюминий	сталь ( $\mu = 100$ )
0,1	15	9	–
1,0	160	87	940
2,0	730	290	$5,1 \cdot 10^5$
4,0	$1,5 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^{11}$

В случае замкнутого экрана поле может проникнуть в экран только через толщину стенок.

Из сказанного ранее следует, что соответствующим выбором материала экрана и толщины стенок принципиально можно получить сколь угодно большую эффективность экранирования. В реальных же экранах неизбежны более или менее значительные отверстия и щели, которые образуют дополнительный канал для проникновения поля. Вследствие этого эффективность экрана уменьшается.

Если стенки очень тонкие, а отверстия и щели незначительны, то поле внутри экрана создается в основном за счет проникновения через стенки. Смена материала и утолщение стенок могут в этом случае повысить эффективность экранирования. Напротив, если стенки относительно толстые, а отверстия и щели значительны, то поле внутри экрана создается в основном за счет проникновения через эти отверстия и щели, так что утолщение стенок малоэффективно.

В большинстве реальных ситуаций свойства экрана часто определяются не толщиной и типом материала, а дефектами – отклонениями от идеальной конструкции. Этими дефектами являются в основном различные отверстия и щели (нарушения однородности экрана).

Анализ проникновения электромагнитного поля через малое отверстие в бесконечно тонком идеально проводящем экране позволяет сделать следующие выводы. Круглое и квадратное отверстие одной и той же площади пропускают электромагнитное поле практически одинаково. Через узкую щель поле проникает слабее, чем через квадратное отверстие той же площади. Особый интерес представляет то обстоятельство, что при данной форме отверстия момент эквивалентности диполя пропорционален площади этого отверстия в степени три вторых. Из этого следует, что замена одного большого отверстия несколькими малыми, общая площадь которых равна площади этого большого отверстия, будет способствовать улучшению эффективности экрана. Расчеты показывают, что замена одного большого отверстия  $N$  малыми с той же общей площадью, ведет к ослаблению поля, проникающего в защищаемую область пространства в  $\sqrt{N}$  раз.

Ориентировочно ослабление поля, проникающего через отверстие, вследствие конечности толщины стенок  $d$  можно учесть, рассматривая отверстие как запердельный волновод – волноводный фильтр. Обозначив коэффициент ослабления такого поля через  $\mathcal{E}_\alpha$ , можно соответственно принять

$$\mathcal{E}_\alpha = e^{\alpha d}, \quad (5.20)$$

где  $\alpha$  зависит от характера поля, формы и величины отверстия. Значение  $\alpha$  для круглого и прямоугольного отверстия приведены в табл. 5.11.

Проникновение поля через отверстие может быть существенно ослаблено путем насадки на это отверстие патрубка. При этом величина  $\mathcal{E}_\alpha$  может быть найдена по формуле (5.20) с заменой в ней  $d$  на длину патрубка  $l$ .

### 5.11. Зависимость коэффициента $\alpha$ от формы и величины отверстия в экране

Форма отверстия	$\alpha$	
	квазиэлектростатическое поле	квазимагнитостатическое поле
Круглое с радиусом $R$	$\frac{2,4}{R}$	$\frac{1,84}{R}$
Прямоугольное с шириной $b$ и длиной $a$	$\pi\sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}$	$\frac{\pi}{b}$

Значительное ослабление проникновения поля через отверстие можно получить, применяя разделение одного большого отверстия на несколько малых с одновременным применением патрубков [8, 9].

## Заключение

---

В учебном пособии рассматриваются основные проблемы электромагнитной совместимости различных радиоэлектронных средств.

В первой главе проведен анализ основных источников ЭВМ и рассмотрены предельно доступные уровни электромагнитного поля для потребительской продукции, на рабочих местах и населения.

Во второй главе рассмотрены естественные источники, подробно описывается электромагнитная обстановка, дана теория области близких и волновых зон грозových разрядов. Проведены основные методы грозозащиты оборудования, локальных сетей, линий передач (коаксиальных).

Подробно рассмотрен пример устройства грозозащиты для бытового применения.

Мощные радиопередающие средства создают МЭМП в первую очередь излучением антенн как над поверхностью земли, так и в подземный район и излучения РЭС.

Приведена инженерная методика расчета стоимости РЭС к воздействию МЭМП.

В пятой главе рассмотрена методика оценки устойчивости РЭС к воздействию электромагнитного импульса ядерного взрыва и рассмотрены практические задачи электромагнитного экранирования, решаемые в курсовом и дипломном проектировании.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. Иванов, В.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / В.А. Иванов, Л.Я. Ильинский, М.И. Фузик. – К. : Техника, 1983. – 120 с.
2. Князев, А.Д. Элементы теории и практики электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. – М. : Радио и связь, 1984. – 336 с.
3. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / под ред. В.И. Кравченко. – М. : Радио и связь, 1984. – 256 с.
4. Крылов, В.А. Защита от электромагнитных излучений / В.А. Крылов, Т.В. Югенков. – М. : Советское радио, 1972. – 216 с.
5. Уайт, Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи / Д. Уайт; пер. с англ. – М. : Советское радио, 1977. – Вып. 1. – 348 с.
6. ГОСТ 11001–80 Измерители радиопомех. Общие требования.
7. Михайлов, А.С. Измерение параметров ЭМС РЭС / А.С. Михайлов. – М. : Связь, 1980. – 244 с.
8. Михайлов, А.С. Справочник по расчету электромагнитных экранов / А.С. Михайлов. – М. : Энергоатом изд-во, 1988. – 244 с.
9. ГОСТ Р 51724–2001 Экранированные объекты, помещения, технические средства. Поле гипогеомагнитное.
10. САНПИН 2.2.4.1191–03 Электромагнитные поля в производственных условиях. Постановление о введении в действие санитарных правил и нормативов.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>1. ПРОБЛЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ</b> ....	5
1.1. Электромагнитное поле, его виды и классификация .....	7
1.2. Основные источники электромагнитного поля .....	10
<b>2. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ</b> .....	24
2.1. Влияние грозových разрядов на радиоэлектронные средства ...	24
2.2. Электромагнитная обстановка .....	26
<b>3. ГРОЗОЗАЩИТА</b> .....	32
3.1. Защита оборудования от грозы .....	33
3.2. Грозозащита локальных сетей .....	37
3.3. Защита коаксиальных кабелей .....	39
3.4. Пример устройства грозозащиты .....	41
<b>4. МОЩНЫЕ РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ СРЕДСТВА</b> .....	49
4.1. Электромагнитное излучение антенн .....	49
4.2. Формирование ЭМО и ее характеристики .....	51
4.3. Расчеты стойкости РЭС к воздействию МЭМП .....	59
4.3.1. Формирование модели взаимодействия МЭМП с РЭС ...	59
4.3.2. Формирование программы .....	62
4.3.3. Обсуждение результатов расчета .....	64
<b>5. УСТОЙЧИВОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРО-МАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА</b> .....	67
5.1. Оценка устойчивости электромагнитных систем к воздействию ЭМИ .....	67
5.2. Методы повышения устойчивости электронных систем к воздействию ЭМИ .....	76
5.3. Электромагнитное экранирование .....	77
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	85
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	86