


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)


Факультет инженерно-физический
Кафедра физики
Направление подготовки 03.03.02 – Физика

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Зав. кафедрой
 Е.В.Стукова
«16» 06 2019 г.


БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Экранирование измерительной аппаратуры центрального узла связи космодрома «Восточный» от воздействия посторонних электромагнитных излучений

Исполнитель
студент группы 511-об

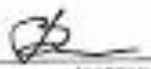
 14.06.2019 О.Н. Задорожная
(подпись, дата)

Руководитель
профессор, д-р. физ.-мат. наук

 12.06.2019 Е.В. Стукова
(подпись, дата)

Нормоконтроль

доцент, канд. физ.-мат. наук

 20.06.2019 О.В.Зотова
(подпись, дата)

Благовещенск 2019

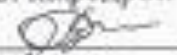
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВПО «АмГУ»)

Факультет инженерно-физический

Кафедра физики

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

 Е.В. Стукова

« 21 » 01 2019 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Задорожной Олеси Николаевны

1. Тема выпускной квалификационной работы: Экранирование измерительной аппаратуры центрального узла связи космодрома «Восточный» от воздействия посторонних электромагнитных излучений (утверждена приказом от 12.04.2019 № 847-0/9)

2. Срок сдачи студентом законченной работы 14.06.2019

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: методы электромагнитной совместимости и борьбы с помехами; центральный узел связи; электромагнитные экраны; формулы расчета эффективности экранирования

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): анализ методов реализации электромагнитной совместимости и борьбы с организованными помехами; определение функций центрального узла связи; расчет эффективности экранирования оборудования для различных электромагнитных экранов

5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.): нет

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе: нет

7. Дата выдачи задания 21.01.2019

Руководитель выпускной квалификационной работы:

Стукова Елена Владимировна; профессор, доктор физ.-мат. наук, доцент

(фамилия, имя, отчество, должность, ученым званием, учасное звание)

Задание принял к исполнению (дата): 21.01.2019 

(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 55 с., 10 рисунков, 1 таблицу, 18 источников.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ, РАДИОЭЛЕКТРОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА, ЭКРАНИРОВАНИЕ, ЦЕНТРАЛЬНЫЙ УЗЕЛ СВЯЗИ

Цель работы – определение эффективности использования различных электромагнитных экранов для экранирования оборудования центрального узла связи на КЦ «Восточный».

В ходе выполнения работы были проанализированы методы реализации электромагнитной совместимости и борьбы с организованными помехами. Рассмотрены функции центрального узла связи и рассчитана эффективность экранирования оборудования для различных электромагнитных экранов.

По результатам проделанной работы показано, что для экранирования оборудования центрального узла связи могут быть использованы различные варианты электромагнитных экранов и при нарушении электрической герметичности существенную роль играет толщина материала, с увеличением которой можно частично компенсировать уменьшение эффективности экранирования.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Электромагнитная совместимость и методы ее реализации	8
1.1 Систематизация электромагнитных помех	8
1.1.1 Индуктивные (излучаемые) ЭМП	11
1.1.2 Кондуктивные ЭМП	12
1.2 Методы обеспечения электромагнитной совместимости	13
1.2.1 Организационные методы обеспечения ЭМС РЭС	13
1.2.2 Конструкторско-технологические меры обеспечения ЭМС	19
2 Методы борьбы с организованными помехами	24
2.1 Общая характеристика методов борьбы с организованными помехами	24
2.1.1 Организационные методы борьбы с помехами	24
2.1.2 Технические способы и средства защиты от помех	24
2.2 Методы обеспечения необходимого соотношения мощностей сигнала и помехи	26
2.2.1 Защита приемных устройств от перегрузок	26
2.2.2 Повышение помехоустойчивости РЭС методами селекции	31
3 Экранирование оборудования центрального узла связи	34
3.1 Центральный узел связи	34
3.1.1 Основные принципы построения центрального узла связи	34
3.1.2 Комплекс мер по достижению электромагнитной совместимости узлов связи	37
3.2 Анализ загруженности радиоэлектронной обстановки с помощью аппаратно-программного комплекса системы контроля электромагнитной совместимости радиоэлектронной обстановки	38
3.3 Принципы экранирования	40

3.4 Расчет эффективности электромагнитного экранирования	44
Заключение	51
Библиографический список	52

ВВЕДЕНИЕ

Всенаправленная экспансия радиоэлектронных средств (РЭС) жизненного пространства человека приводит к росту числа электромагнитных излучений в окружающий эфир, что ведет за собой сложную электромагнитную обстановку.

Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств – это способность РЭС нормально функционировать в реальной электромагнитной обстановке, не создавая при этом недопустимых радиопомех, опасных для других технических устройств и человека [1].

Техническое средство (ТС) – это техника или ее составные части, содержащие электронные компоненты и (или) схемы, которые выполняют одну или несколько следующих функций: усиление, генерирование, преобразование, переключение и запоминание [2].

На данный момент существует огромное количество технических средств, отличающихся друг от друга принципами своей работы и рабочими характеристиками, т.е. оценка влияния внешних электромагнитных помех может выполняться по-разному для каждого вида ТС.

Электромагнитная обстановка (ЭМО) – это совокупность электромагнитных излучений, процессов в точке или районе, где размещается (или предполагается разместить) РЭС, частотном и временном диапазонах. Для телекоммуникационных систем ЭМО определяется как пространственная типизация электромагнитных полей в точках, где размещаются антенны этих систем. ЭМО характеризуется напряженностью электромагнитного поля и плотностью потока мощности [3].

Однако качество работы РЭС также зависит от помехоустойчивости и помехозащищенности РЭС, а не только от электромагнитной обстановки. Часто данные понятия трактуют как синонимы, хотя это не так.

Помехоустойчивость РЭС – способность РЭС сохранять определенное качество действия при влиянии на него внешних ЭМП с прописанными значе-

ниями параметров в отсутствие дополнительных средств защиты от помех, не относящихся к принципу действия или построения РЭС [1].

Помехозащищенность РЭС – способность уменьшать влияние электромагнитной помехи за счет внешних средств защиты от помех, которые не относятся к принципу действия или построения РЭС [4].

Высокая степень помехоустойчивости РЭС облегчает возможность организации совместной работы с другими средствами. Однако со средствами помехозащищенности следует быть внимательнее, ведь аппаратура ориентирована на подавление помех определенного вида, т.е. в сложной ЭМО, где присутствуют мешающие сигналы, применение данного средства может привести к росту помех, что является нежелательным результатом. Например, для подавления импульсных помех при приеме узкополосных сигналов во входных цепях приемников прибегают к нелинейным устройствам с последующей узкополосной фильтрацией. Если на входе приемника присутствуют непрерывные мешающие сигналы, то наличие нелинейных элементов может привести к образованию новых мешающих частот, попадающих в полосу пропускания приемника и снижающих качество приема полезного сигнала. В таком случае средства подавления помех такого типа можно включать по мере необходимости.

Цель работы – определение эффективности использования различных электромагнитных экранов для экранирования оборудования центрального узла связи на КЦ «Восточный».

Задачи:

1. Анализ методов реализации электромагнитной совместимости и борьбы с организованными помехами.
2. Анализ загруженности радиоэлектронной обстановки на КЦ «Восточный».
3. Расчет эффективности экранирования оборудования для различных электромагнитных экранов.

1 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И МЕТОД ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ

1.1 Систематизация электромагнитных помех

В качестве электромагнитной помехи, отражавшейся в уменьшении рабочих показателей ТС, вызванной электромагнитным возмущением, может выступать практически любой электромагнитный импульс в широком частотном диапазоне.

В общем случае техническое средство предназначено для того, чтобы при поставленных условиях работы в течение времени его использования реализовывать данную функцию. При этом эти устройства постоянно находятся с помощью электрических и неэлектрических воздействий в обратной связи с окружающей средой.

Отрицательное выражение помехи наблюдается только при взаимодействии с рецептором помех. Источники и приемники помех характеризуются различными физическими основами передачи энергии электромагнитных процессов от источника к приемнику помех. Общее представление о принципиально возможных проявлениях единства источников и приемников помех приведено на рисунке 1. Гальваническая, емкостная и магнитная связи реализуются посредством электрического и магнитного полей в «ближней зоне», а также через ток или напряжение.

Электромагнитные помехи могут взаимодействовать с окружающей средой различными путями:

- при помощи гальванической связи (кондуктивные помехи), характеризующиеся силой тока и напряженностью электромагнитного поля;
- при помощи емкостной (электрической), индуктивной (магнитной) связей через соответствующие поля в эфире (индуктивные помехи) [5].

ЭМП делятся на естественные и искусственные в зависимости от источника. К естественным можно отнести электромагнитные импульсы при ударе

молнии. Искусственные же помехи создаются функциональными и нефункциональными источниками. Функциональный источник помех – это источник, для которого создаваемая электромагнитная помеха является полезным сигналом. Например, передающие устройства радиосвязи и аппаратура, которая использует цепи питания для передачи информации. Нефункциональные источники помех – это источники, создающие ЭМП в качестве побочного эффекта в процессе действия. К ним относят линию передач, устройство связи, блок питания аппаратуры и т.д. Между функциональными и нефункциональными источниками существует принципиальное различие. Для функциональных электромагнитных помех исключается возможность снижения уровня помех путем пересмотра конструкции источника, тогда как для нефункциональных данный способ является лучшим.



Рисунок 1 – Механизмы единства источников и приемников помех [3]

Условность деления помех на индуктивные и кондуктивные наглядно выражается, например, в ходе изучения хода проникновения высокочастотных помех внутрь электронной аппаратуры. Обычно оказывается, что действитель-

ный путь возникновения помехи представляет собой сплетение металлических проводников и «дорожек» на платах устройства («кондуктивные» участки) и паразитных емкостных и индуктивных связей («индуктивные» участки). После чего помеха достигает высокочувствительные цифровые контуры аппаратуры, минуя защитные элементы.

Подобное деление помех можно считать относительно строгим лишь в низком диапазоне частот, когда емкостные и индуктивные связи обычно малы. Помехи можно разделить по степени влияния на ТС на следующие виды:

1. Допустимые помехи – наблюдаемые или прогнозируемые помехи, удовлетворяющие критериям совместного использования частот.

2. Опасные (вредные) помехи – помехи, которые мешают действию радионавигационной службы или других служб безопасности или существенно ухудшают качество, затрудняют или неоднократно прерывают работу службы радиосвязи.

3. Приемлемые помехи – помехи с более высоким уровнем, чем те, которые определяются как допустимые, и которые согласованы между двумя или несколькими администрациями без ущерба для других администраций [3].

Далее помехи классифицируются по их спектральным характеристикам. Электромагнитные поля делят на периодические, непериодические и шумы, каждые из которых в свою очередь делят на узкополосные и широкополосные, однако при этом шумы характеризуются лишь широкополосными помехами. Отличительной чертой узкополосных помех является их синусоидальный характер изменения во времени. Широкополосные помехи проявляются в виде дискретных импульсов.

Другой спектральной характеристикой является область частот, в которой лежит основная часть спектра помехи. Условно положено делить все помехи на низкочастотные (0-9 кГц) и высокочастотные (с частотой выше 9 кГц). Часто различают радиочастотные помехи (диапазон – от 150 кГц до 1-2 ГГц) и СВЧ-помехи (порядка нескольких ГГц).

Определяя ЭМО, удобно разделить электромагнитные помехи на категории:

1. Низкочастотные и высокочастотные помехи (кондуктивные и излучаемые), которые вызываются всеми источниками, не считая электростатических разрядов.

2. Помехи, вызываемые электростатическими разрядами.

К кондуктивным низкочастотным электромагнитным помехам относят гармоники и интергармоники напряжения электропитания, напряжения сигналов, колебания напряжения электропитания, провалы и кратковременные прерывания напряжения электропитания, изменения частоты питающего напряжения, наведенные низкочастотные напряжения, постоянные составляющие в сетях электропитания переменного тока. К индуктивным низкочастотным помехам относят магнитные и электрические поля.

К кондуктивным же высокочастотным помехам относят наведенные напряжения или токи непрерывных колебаний, апериодические переходные процессы и колебательные переходные процессы, а к индуктивным высокочастотным помехам – магнитные поля, электрические поля, электромагнитные поля, в том числе вызываемые непрерывными колебаниями и переходными процессами, электростатические разряды [1].

1.1.1 Индуктивные (излучаемые) ЭМП

Индуктивные помехи – помехи, которые распространяются в непроводящей среде в виде электромагнитного поля. Их делят на низкочастотные и высокочастотные излучаемые ЭМП.

Действие любого электрического оборудования вызывает образование электрических и магнитных полей с частотой 50 Гц. На этих частотах длина волны велика, т.е. оборудование всегда оказывается в ближней зоне, где электрическое и магнитное поля прямо не связаны друг с другом. Однако непосредственное воздействие данных полей на аппаратуру редко приводит к ее отказу или сбою из-за малости коэффициентов индуктивной связи и, следовательно, малости величин ЭДС, наводимых во внутренних цепях оборудования. Исклю-

чением являются только средства на основе электронно-лучевой трубки, в первую очередь – мониторы компьютеров. Воздействие значительных магнитных полей часто полностью искажает изображение на мониторе в течение некоторого времени от исчезновения породившей их помехи.

Уровни электрических и магнитных полей находятся в сильной зависимости от режима работы электрической аппаратуры. Особенно высокий уровень магнитных полей можно замечать при коротких замыканиях по схеме «фаза – земля», что объясняется большой величиной протекающих токов и значительной степенью не симметрии схемы. Действительно, при протекании даже сравнительно больших токов по симметричной схеме (по схемам «фаза - фаза» или «фаза - ноль») векторная сумма полей, создаваемых токами в соседних проводах, оказывается соответственно мала. При этом она будет прямо пропорционально зависеть от расстояния между проводами [6].

1.1.2 Кондуктивные ЭМП

Кондуктивные ЭМП распространяются совместно с протеканием тока. Причинами их появления в системе являются: импульсы в линиях передачи данных, высокочастотные и низкочастотные тактовые импульсы, коммутационные процессы в индуктивностях, искровые разряды при замыкании и размыкании цепей.

В цепях с двумя и более проводниками разделяют синфазные (по схеме «провод – земля») и противофазные (по схеме «провод – провод») помехи.

Синфазные помехи определяются напряжением в цепях заземления оборудования и могут быть вызваны токами в земле или магнитными полями. Синфазные ЭМП влияют на изоляцию проводов относительно земли и могут вызвать пробой изоляции.

Противофазные помехи возникают посредством передачи электромагнитным полем через гальванические связи или вследствие преобразования синфазной помехи в противную. Данные ЭМП могут вызывать ошибочную работу систем, а также воздействовать на линейную изоляцию между проводами.

Реальные помехи обычно представляют собой комбинацию синфазных и противофазных помех [6].

1.2 Методы обеспечения электромагнитной совместимости

Универсальных мер для обеспечения ЭМС РЭС не существует, поэтому их условно делят на две группы – организационные и технические. Первые включают в себя разделение полос частот между различными видами радиослужб, выбор пространственного расположения РЭС, ограничение мощностей передатчиков, т.е. применяется ряд приемов, направленных на ограничение и упорядочение работы разнообразных РЭС. Вторые же представляют собой ряд конструкторских и технологических приемов, которые направлены на снижение уровней создаваемых помех, их ослабление на пути распространения, а также ослабления восприимчивости рецепторов к непреднамеренным помехам. Для лучшего обеспечения ЭМС на объекте следует комплексно применять выше обозначенные меры.

1.2.1 Организационные методы обеспечения ЭМС РЭС

Организационные меры по обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств представляют собой:

1. Рациональное распределение частот. Практически полностью исключает взаимные помехи между РЭС разнос рабочих частот на десятки – сотни килогерц в метровом и сотни килогерц в более коротком диапазоне частот. В настоящее время нормирование радиоизлучений введено в государственные стандарты.

2. Пространственный разнос радиоэлектронного оборудования. Устанавливают нормы частотно – территориального разнеса, которые диктуют требуемые расстояния между РЭС при заданных частотных настройках.

3. Введение ограничений на режимы работы и наложение запретов на действие отдельных средств в определенные интервалы времени.

4. Выбор и оборудование позиций, включающих в себя применение как экранирующих свойств местности, так и искусственных экранов.

5. Организация выявления источников помех и устранение их мешающего воздействия.

Электромагнитное поле заданной интенсивности требуется локализовать в некоторой области пространства с дополнительными характеристиками, кроме пространственных – мощность P , частота f , время t . На рисунке 2 показаны области, условно занимаемые двумя передающими и одним принимающим РЭС. Они зависят от восприимчивости рецептора, частоты электромагнитного излучения и от энергетических параметров источника излучения, но, кроме того, определяются диаграммами направленности и коэффициентом усиления их антенн, а также характеристиками среды на трассе распространения электромагнитного излучения и зависит от частоты электромагнитного излучения.

Рецепторы способны реагировать на электромагнитные поля друг друга только в случае пересечения областей передачи. Радиочастотный ресурс РЭС – комплекс возможностей использования диапазона частот с учётом различных времени работы и пространственного расположения. Радиочастотный ресурс ограничивается временем функционирования РЭС, его расположением в пространстве, полосой частот, а также мощностями РЭС. Ограниченность радиочастотного ресурса, как природного, связана с тем, что любое РЭС использует больший радиочастотный ресурс, чем это требуется для его функционирования.

Так, на рисунке 2 необходимый объем радиочастотного ресурса, при котором обеспечивается требуемое качество работы РЭС, обозначен пунктиром. Отсюда вытекает еще одна проблема ЭМС – наличие непреднамеренного «загрязнения» радиочастотного ресурса по причине его недостаточно эффективно использования из-за превышения занимаемыми объемами необходимых значений. Для решения данной проблемы изменяют схемные решения, вводят дополнительные элементы, усложняют конструкцию, используют более совершенные конструкции и т.д. Таким образом, требования использования радиочастотного ресурса с каждым годом все больше возрастает, а возможности их удовлетворения остаются ограниченными [1].

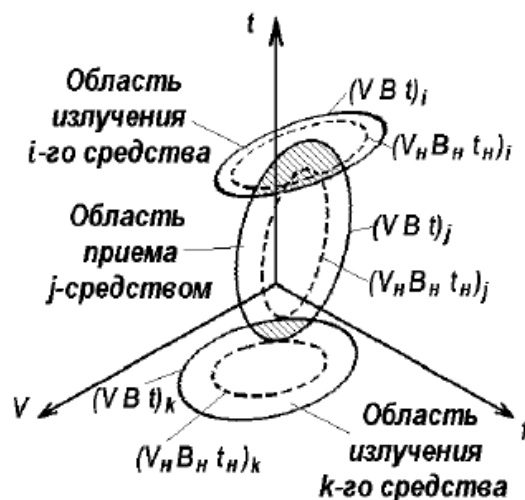


Рисунок 2 – Области приема и передачи РЭС в пространстве [1]

Излучения передающих устройств подразделяются на основные и неосновные. Основное радиоизлучение занимает полосу частот, которая предназначена для передачи сигнала, и определяется функциональным назначением данного средства. Нежелательное же излучение занимает полосу частот вне необходимой. На рисунке 3 представлена классификация излучений передающего устройства.

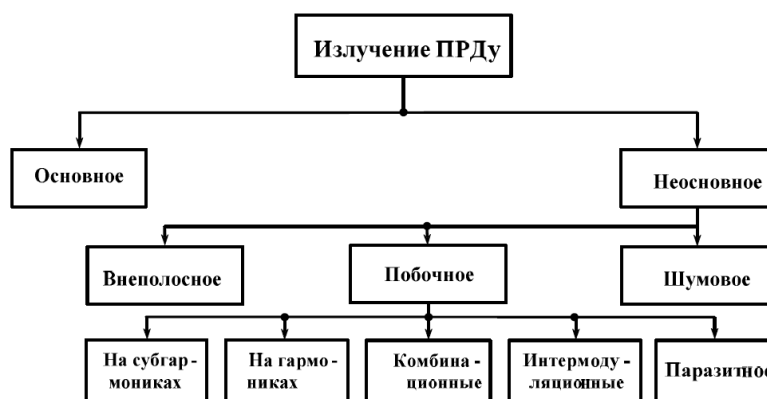


Рисунок 3 – Классификация излучений передающего устройства [4]

- внеполосное излучение является результатом модуляции сигнала и занимает полосу частот, примыкающую к необходимой полосе радиочастот;
- шумовое радиоизлучение появляется вследствие собственных шумов и паразитной модуляции основного колебания шумовым напряжением;

– побочное радиоизлучение обусловлено разными нелинейными процессами в передатчике, кроме модуляции сигнала.

В свою очередь, побочное излучение включает излучение на гармониках, на субгармониках, комбинационное, интермодуляционное и паразитное.

– излучение на гармониках – это излучение на частотах, в целое число раз больше несущей частоты основного излучения [1]. Вследствие этого выходное немодулированное колебание представляет собой сумму колебаний основной частоты и ее гармоник. Для уменьшения числа гармоник применяют различные фильтры в выходных передающих устройствах;

– излучение на субгармониках – это излучение на частотах, в целое число раз меньше, чем основное излучение [2]. Оно возникает в передающих устройствах, использующих умножители частоты для получения основной частоты;

– комбинационное излучение возникает на нелинейных элементах устройств в процессе формирования несущей;

– интермодуляционное излучение (или взаимномодуляционное) возникает при воздействии на передатчик других радиоизлучений. Проявляется при существовании между передатчиками функциональной или конструктивной связи;

– паразитное излучение возникает с выполнением условия самовозбуждения на неосновных частотах.

Существуют основные каналы приема, которые предназначены для приема основного сигнала, и неосновные, возникновение которых связано с самим принципом построения на основе преобразования частоты. На рисунке 4 представлена классификация каналов приема сигналов.

Соседние каналы возникают по причине недостаточной частотной избирательности приемника и примыкают к основному каналу. Прием по данному каналу называют прямым прохождением радиопомех.

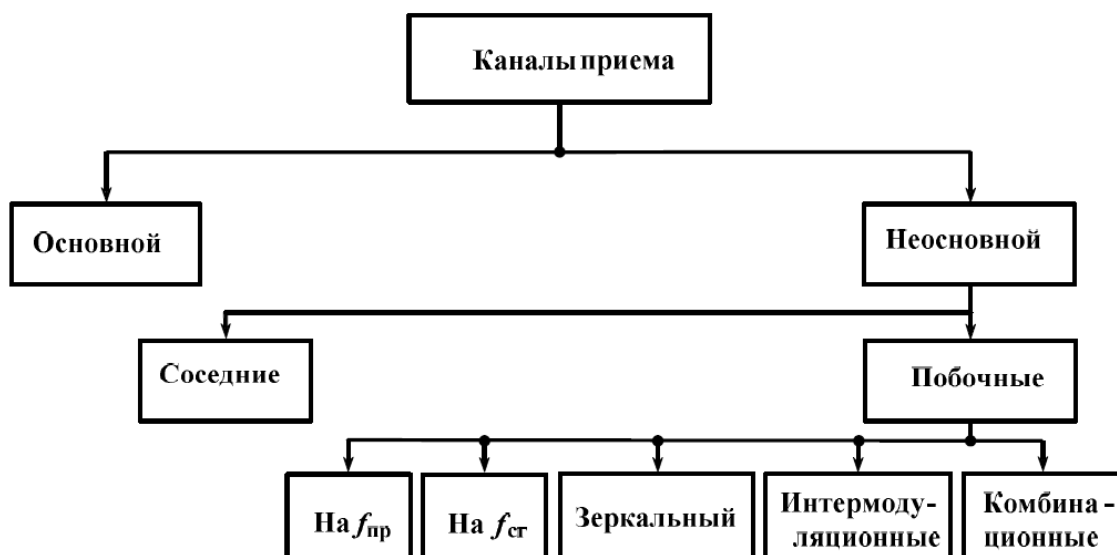


Рисунок 4 – Классификация каналов приема радиосигналов [4]

Образование побочных каналов приемника связано с процессом преобразования частоты. Частота гетеродина выбирается такой, чтобы колебания разностной промежуточной частоты попали в полосу пропускания $\Delta f_{упч}$ и выполнялось условие $|f_r - f_c = f_{пр}|$. За счет взаимодействия помехи с частотой, не равной частоте основного сигнала, и сигнала гетеродина со своей частотой образуются комбинационные каналы. На выход смесителя приходят колебания с комбинационными частотами

$$f_k = |mf_r \pm nf_{п}|, \quad (1)$$

где m и $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Комбинационные частоты могут оказываться при определенных значениях констант в пределах полосы пропускания. Таким образом, частотное условие возникновения побочных каналов

$$|mf_r \pm nf_{п}| \approx f_{пр}. \quad (2)$$

Из данного условия следуют частные случаи:

1. При равенстве частот пропускания и помехи возможен прием сигнала помехи, несущая частота которого равна частоте пропускания. Для решения этой проблемы повышают селективные входные цепи.

2. Образуется зеркальный канал с частотой $f_3 = f_c + 2f_{пр} = f_{п}$, который располагается на частотной оси симметрично с полезным сигналом относительно частоты гетеродина.

3. В случае нижней настройки гетеродина зеркальный канал связи образуется при $f_{п} = f_{г} \pm \Delta f_{пр}$. Для решения данной проблемы используют специальные схемы преобразователей частоты с компенсацией помех по зеркальному каналу и выбирают более высокую промежуточную частоту.

4. Канал на субгармониках образуется при $f_{п} = \frac{f_c}{n} = f_{сг}$.

5. При остальных сочетаниях m и n образуются комбинационные каналы.

6. В случае воздействия на приемное устройство более двух помеховых импульсов возникают интермодуляционные каналы приема. Для уменьшения влияния данного канала повышают частотную избирательность преселектора.

Таким образом, организационные меры по достижению ЭМС РЭС выглядят следующим образом:

1. Применение специализированных антенн для направленного воздействия.

2. Уменьшение уровней боковых лепестков диаграммы направленности антенн.

3. Синхронизированный запуск взаимодействующих радиоэлектронных средств.

4. Подавление мешающих и стробирование полученных сигналов.

5. Компенсация помеховых сигналов с помощью применения схем, основанных на приеме сигналов на две разнесенные антенны.

1.2.2 Конструкторско-технологические меры обеспечения ЭМС

Конструкторские методы, применяемые в РЭС для подавления помех, подразделяются на решения по фильтрации, экранировкам и заземлению (металлизации).

Фильтры для обеспечения ЭМС разделяются на межсистемные (для подавления межсистемных помех) и внутрисистемные (для подавления помех в цепях коммутации, питания и управления). Первая группа фильтров также делится на высокочастотные фильтры, которые обеспечивают подавление в выходных цепях РЭС помех, которые могут излучаться антенной, и на фильтры, обеспечивающие подавление нежелательных колебаний, поступающих во входные цепи устройств по побочным каналам. А вторая группа фильтров применяется для подавления кондуктивных помех, устранения связей по высокой частоте между различными устройствами, имеющими общее сопротивление, и для подавления индустриальных помех. Входное и выходное значение у внутрисистемных фильтров зависит от частоты [4].

Заземление применяют для защиты от перенапряжений, защиты человека от поражения электрическим током и для уменьшения ЭМП.

К системе заземления выставляются два требования:

1. Чтобы исключить появления напряжения помех, выходящего за пределы допустимого уровня за счет протекания токов отдельных функциональных узлов, необходимо минимизировать общий импеданс «земли».

2. Замкнутые контуры заземления, чувствительные к воздействию электромагнитных полей, необходимо исключить.

В целом в цепь следует включить как минимум три цепи заземления – для сигнальных и командных цепей со сравнительно низкими значениями тока и напряжения, для силовых цепей с большими значениями тока и для корпусных цепей. Активная и индуктивная составляющая сопротивления заземления должны быть минимизированы. Для этого должно выполняться неравенство $l_3 \leq 0,02\lambda_{п}$, где l_3 – минимально возможная длина заземляющего проводника, а

$\lambda_{\text{п}}$ – длина волны помехи. Поперечное сечение выбирают так, чтобы обеспечились малые активное и реактивное сопротивления на частоте помехи [4].

Экранирование используется для снижения уровня помех, поступающих в окружающее пространство, или для повышения помехоустойчивости к помехам излучения рецепторов электромагнитных колебаний.

Электродинамический экран создаёт скачок волнового сопротивления на пути распространения электромагнитной волны, нарушая однородность пространства, что влечет за собой отражение и/или поглощение энергии волны.

Различают «ближнюю» и «дальнюю» зоны электромагнитного поля. В первой преобладает либо электрическая, либо магнитная составляющая поля в зависимости от соотношений токов к напряжениям, а в «дальней» зоне главенство какой-либо составляющей отсутствует. Также ближней зоне волновое сопротивление воздуха электрическому полю обратно пропорционально расстоянию от источника поля и частоте, а характеристическое сопротивление воздуха магнитному полю прямо пропорционально расстоянию от источника и частоте. Электромагнитная волна характеризуется векторами электрического поля E и магнитного поля H , сдвинутых относительно друг друга по фазе во времени и в пространстве на 90 градусов. В дальней зоне волновое сопротивление воздуха постоянно, и напряженности электрического и магнитного полей синфазны.

Металлические экраны обладают высокой проводимостью и имеют низкое волновое сопротивление. В момент падения электромагнитной волны на экран одна ее часть отражается от границы воздух/металл, где имеет место скачок волнового сопротивления, но другая ее часть проникает в материал экрана и распространяется до следующей границы металл/воздух где также имеет место скачок волнового сопротивления. С этой частью электромагнитной волны процесс отражения - поглощения повторяется. Процесс прохождения электромагнитной волной металлического экрана изображен на рисунке 5.

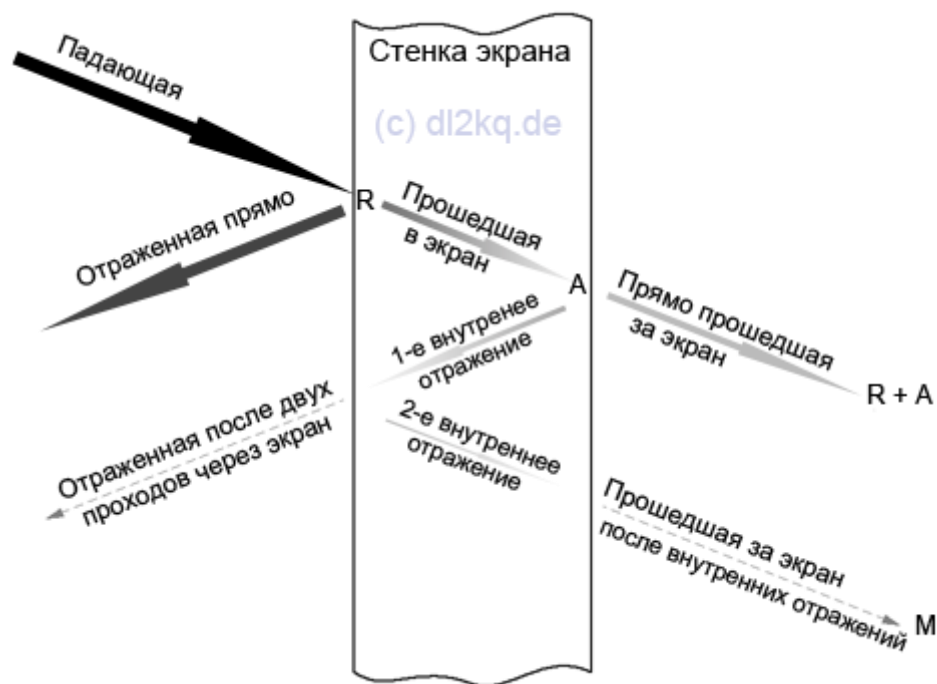


Рисунок 5 – Ослабление электромагнитной волны экраном [1]

При взаимодействии электромагнитной волны с поверхностью экрана на ней возникают поверхностные токи и вихревые токи. Экран имеет ненулевое активное сопротивление, вследствие чего образующиеся токи теряют энергию, которая выделяется в форме тепла. Это явление получило название скин-эффекта, для характеристики которого используют толщину скин-слоя, при прохождении которого поле убывает в e раз. Толщина скин-слоя зависит от электромагнитных характеристик металла и частоты поля.

Для электрического и магнитного поля в «ближней» и «дальней» зоне, как было сказано выше, отношение волнового сопротивления в воздухе и в материале имеет существенные различия. Таким образом, в ближней зоне электрическое поле легко отражается очень тонкими металлическими экранами на самых высоких частотах, которые требуется экранировать, а магнитное поле не испытывает большого отражения, т.е. его экранирование больше зависит от поглощения волны в экране. Чтобы у экрана была хорошая эффективность, нужна соответствующая толщина металла.

В дальней же зоне эффективность экранирования зависит и от проводимости экрана, и от его толщины.

Математически эффективность экранирования определяется как отношение напряжённостей соответствующих полей или плотностей потока мощности в какой-либо точке пространства при отсутствии и при наличии экрана [1], т.е.

$$K_E = 20 \log E/E_0, K_H = 20 \log H/H_0, \quad (3)$$

$$K_{\Pi} = 10 \log EH/E_0H_0 = (K_E + K_H)/2, \quad (4)$$

где K_E , K_H , K_{Π} – коэффициенты экранирования по электрическому полю, магнитному полю и потоку мощности соответственно;

E , H – напряжённости электрического и магнитного полей в отсутствие экрана;

E_0 , H_0 – напряжённости электрического и магнитного полей в той же точке пространства при наличии экрана.

Главными характеристиками материала экрана являются его проводимость, магнитная проницаемость и толщина. Медь и алюминий имеют высокую проводимость, но при этом их относительная магнитная проницаемость равна 1, т.е. для создания экрана из данных материалов потребуется большая толщина экрана. В пределах данных ограничений подходящим материалом будет мягкая сталь, которая на низких частотах имеет относительную магнитную проницаемость около 300, убывающую до 1, когда частота становится больше 100 кГц. На низких частотах возможно сконструировать экран разумной толщины, так как высокая магнитная проницаемость мягкой стали снижает глубину скин-слоя [1].

Для широкого диапазона частот используют многослойные экраны.

Эффективность экранирования также зависит от апертур в швах, соединениях, дверях экранированных помещений, крышках и т.п., а также в местах проводки кабелей в экран. На частотах выше 100 кГц контролирование различных апертур даже важнее, чем тип или толщина материала, из которого сделан экран. Для повышения эффективности экранирования реальных экранов неизбежные апертуры делают как можно меньших размеров, а длинные апертуры снабжают проводящими прокладками.

Существуют три уровня экранирования: уровень компоненты, подсистемы и уровень системы в целом.

При экранировании подсистем и системы в целом используют различные решения, которые включают: различные материалы; использование экранированного окна, выполненного в виде двух полосок из стекла или пластика, между которыми находится тонкая металлическая сетка; экрана непосредственно внутри листа из стеклопластика или использование стеклопластика с прозрачным проводящим покрытием и т.п.

Большое значение имеет прокладка проводов и кабелей. Для улучшения электромагнитной совместимости технических средств, рекомендуется:

1. Использовать провода с экранированием комбинированным экраном.
2. Соединять кабель, входящий в корпус блока снаружи, а выходящий – изнутри.
3. Использовать пары проводов, скрученные между собой. Данный метод уменьшает площадь контура и приводит к гашению магнитных полей, создаваемых токами, текущими по паре проводов, так как они текут в противоположные стороны. Вследствие этого снижается уровень помех, наведённый от этой пары в другие провода.

Правильное использование экранирования на этапах конструирования и размещения оборудования на объектах помогает улучшить показатели электромагнитной совместимости РЭС и возможности общей работы в условиях непреднамеренных помех [3].

2 МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ОРГАНИЗОВАННЫМИ ПОМЕХАМИ

2.1 Общая характеристика методов борьбы с организованными помехами

2.1.1 Организационные методы борьбы с помехами

Помехозащищенность РЭС зависит от скрытности работы радиоэлектронных средств и их помехоустойчивости. Ее качественным показателем является вероятность успешного выполнения РЭС поставленных задач в условиях ведения противников РЭП

$$P_{\text{зад}}^{\text{РЭП}} = P_{\text{д.п}} P_{\text{зад}}^{\text{п}} + (1 - P_{\text{д.п}}) P_{\text{зад}}^0, \quad (5)$$

где $P_{\text{зад}}^{\text{РЭП}}$ – вероятность успешного выполнения РЭС поставленных задач в условиях ведения противников РЭП;

$P_{\text{д.п}}$ – вероятность действия преднамеренных помех;

$P_{\text{зад}}^{\text{п}}$ – вероятность успешной работы РЭС при условии воздействия на него ЭМП;

$P_{\text{зад}}^0$ – вероятность успешной работы РЭС в нормальных условиях.

При помощи следующих технических мер обеспечивается защита от ЭМП:

- увеличение отношения сигнал – шум;
- предотвращение перегрузки приемных устройств;
- помехоустойчивое кодирование;
- селекция (выделение) сигналов и их оптимальная обработка.

2.1.2 Технические способы и средства защиты от помех

На вход приемного устройства поступает сигнал $y(t)$

$$y(t) = u_c(t) + n(t), \quad (6)$$

где $u_c(t)$ – полезный сигнал;

$n(t)$ – белый шум.

$$u_c(t) = \text{Re}\{S(t)\exp(jw_0 t)\}, \quad (7)$$

где $S(t)$ – комплексный сигнал, состоящий из произведения двух комплексных огибающих: зондирующего сигнала и мультипликативной помехи, которая вызвана доплеровскими флуктуациями отраженного сигнала.

Энергия для импульсного радиосигнала прямоугольной формы определяется выражением

$$E_{cl} = P_n \tau_n = \frac{U_m^2}{2} \tau_n, \quad (8)$$

где τ_n – длительность импульса.

Тогда полная энергия пачки из n импульсов

$$E = E_{cl} n. \quad (9)$$

Таким образом можно определить отношение сигнал – шум по мощности (10) и по напряжению (11) на выходе приемника

$$q = \frac{2E}{N_0} = \frac{2nE_{cl}}{N_0}, \quad (10)$$

$$q = \sqrt{\frac{2E}{N_0}} = \sqrt{\frac{2nE_{cl}}{N_0}}. \quad (11)$$

Возможность обнаружения детерминированного сигнала и ложной тревоги не зависит от формы сигнала, а определяется лишь пиковым отношением сигнал – шум на выходе корреляционного приемника или согласованного фильтра (11). Существует два способа увеличения отношения сигнал – шум:

повышение энергетического потенциала РЛС и количества накапливаемых сигналов n , а также применение сжатия импульса.

2.2 Методы обеспечения необходимого соотношения мощностей сигнала и помехи

2.2.1 Защита приемных устройств от перегрузок

Перегрузка радиоприемников влечет за собой невозможность воспроизводить передаваемое сообщение. Режим работы приборов становится резко нелинейным, что приводит к падению коэффициента передачи, из – за чего и наступает перегрузка.

Каждый приемник импульсных и амплитудно-модулированных сигналов рассчитывается так, чтобы в ожидаемом диапазоне интенсивности входных импульсов перегрузка не наступала. Для этого используют логарифмические усилители и системы автоматической регулировки усиления.

Выходное напряжение логарифмического усилителя (ЛУ) записывается в виде:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \begin{cases} K_0 U_{\text{ВХ}}, & U_{\text{ВХ}} \leq U_{\text{ВХ0}}; \\ A \log_a \left[\frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ0}}} \right] + B, & U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ВХ0}}, \end{cases} \quad (12)$$

где $U_{\text{ВХ0}}$ – напряжение, которое соответствует переходу от линейного участка к логарифмическому;

A, B – некоторые константы.

Основание логарифма a подбирается исходя из характеристик усилителя. Коэффициенты A и B выбирают из условия отсутствия скачка производной при переходе от линейного участка к логарифмическому, т.е.

$$A = \frac{U_{\text{ВХ0}} K_0}{\log_a e}, B = U_{\text{ВЫХ0}} = U_{\text{ВХ0}} K_0. \quad (13)$$

Коэффициент передачи ЛУ уменьшается обратно пропорционально амплитуде входного сигнала и выражается формулой

$$K_{\text{лу}} = \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dU_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХО}}}{U_{\text{ВХ}}}. \quad (14)$$

Динамический диапазон по выходу и по входу соответственно

$$D_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ max}}}{U_{\text{ВХО}}}, D_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ max}}}{U_{\text{ВХО}}}. \quad (15)$$

Отношение сигнал – помеха на выходе

$$\frac{U_{\text{П ВЫХ}}}{U_{\text{С ВЫХ}}} = \frac{U_{\text{П ВХ}}}{U_{\text{м с}}} b \log_a e \frac{U_{\text{П ВХ}}}{U_{\text{ВХ 0}}}, \quad (16)$$

где $U_{\text{П ВЫХ}}$ – напряжение помехи на выходе ЛУ;

$U_{\text{С ВЫХ}}$ – амплитуда сигнала.

Поскольку коэффициент передачи по сигналу определяется помехой на входе и уменьшается с ростом уровня помехи, данное отношение увеличивается с ростом помехи.

Амплитудная характеристика усилителя представлена на рисунке 6.

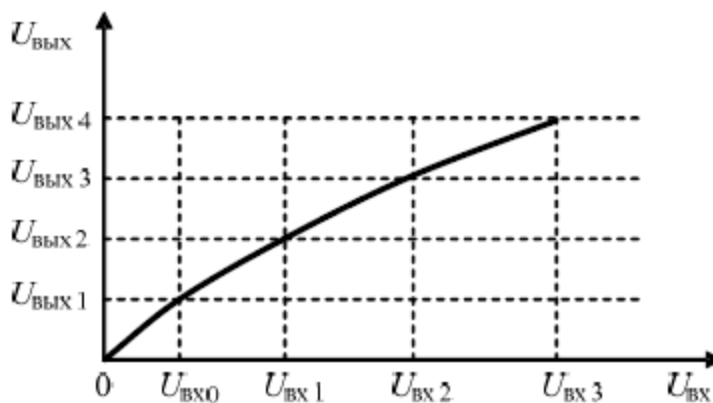


Рисунок 6 – Амплитудная характеристика ЛУ

Как видно, зависимость, представленная на рисунке 6, имеет вид ломаной, которая состоит из отдельных участков, каждый из которых соответствует числу ячеек, где достигнут уровень ограничения.

Автоматическое выполнение функции поддержания уровня выходного сигнала приемника или усилителя вблизи некоторого номинального значения при изменении уровня входного сигнала необходимо потому, что изменения уровня входного сигнала могут происходить хаотически и достаточно быстро, из-за воздействия шумов и помех, изменения расстояния между источником и приемником.

Систему автоматической регулировки усиления (АРУ) могут быть с обратной и прямой связью. В обратных системах точка съема напряжения для формирования регулирующего воздействия находится дальше точки приложения данного воздействия от входа приемника, а в прямых системах АРУ наоборот – ближе. Большее распространение получили обратные системы, функциональная схема которых изображена на рисунке 7.

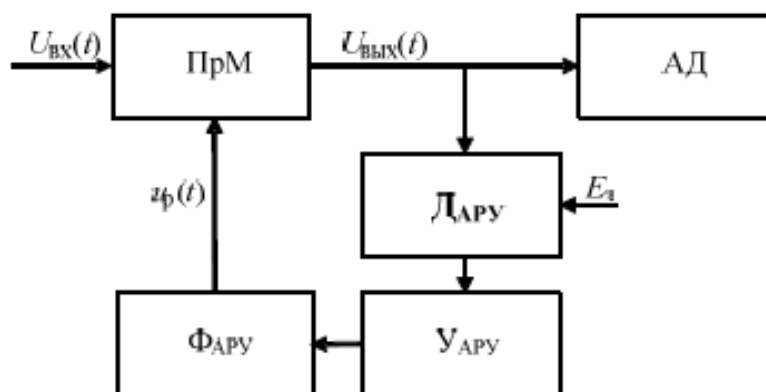


Рисунок 7 – Функциональная схема системы с обратной связью АРУ

Цепь АРУ будет обладать АХ u_p , если на вход системы подается с выхода УПЧ приемника выходное напряжение. Вид такой амплитудной характеристики представлен на рисунке 8. Загиб характеристики свидетельствует о очень большом значении $U_{\text{вых}}$, при котором цепь перегружается.

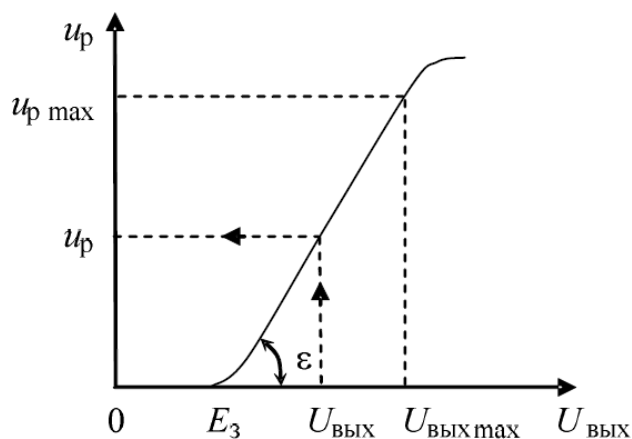


Рисунок 8 – АХ системы АРУ

Коэффициент $K_{ару}$ усиления цепи определяет тангенс угла наклона амплитудной характеристики.

$$K_{ару} = tg \varepsilon = \frac{u_p \max}{U_{ВЫХ \max} - U_{ВЫХ \min}} = \frac{u_p \max}{U_{ВЫХ \min} \beta - 1}. \quad (17)$$

Если систему включать после того, как $U_{ВЫХ}$ достигнет номинального значения, тогда напряжение задержки с учетом его равенства с минимальным значением выходного напряжения будет выглядеть:

$$E_3 = \frac{u_p \max}{K_{ару}(\beta - 1)}. \quad (18)$$

Для упрощения анализа переходных процессов в приемнике предполагают, что тракт прохождения сигнала управляется напряжением АРУ и является безынерционным. Тогда амплитуда выходного напряжения, описывающая тракт прохождения сигнала, определяется соотношением

$$U_{ВЫХ}(t) = U_{ВХ}(t) K_{0 \text{ нр}} (K_{0 \max} - K_0(u_p)), \quad (19)$$

где $K_0(u_p)$ – коэффициент усиления приемника, который зависит от напряжения регулировки u_p , которое находится из соотношения

$$u_p = (U_{\text{вых}} - E_3)K_{\text{ару}}F(p), \quad (20)$$

где $F(p)$ – передаточная функция фильтра системы.

В виду нелинейности уравнений (19) и (20), систему, состоящую из данных соотношений, решают лишь для некоторых частных случаев. Например, часто коэффициент усиления приемника аппроксимируют линейной зависимостью.

На рисунке 9 изображены амплитудные характеристики различных систем АРУ, с помощью которых рассмотрены особенности регулируемого усилителя при действии АРУ.

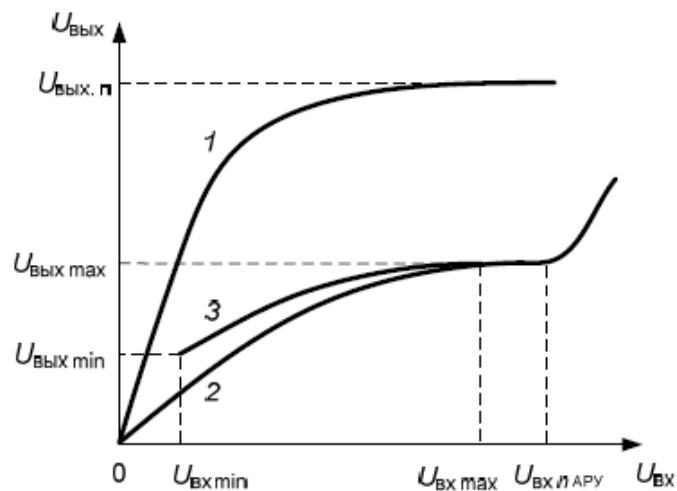


Рисунок 9 – Амплитудные характеристики систем АРУ

Кривая 1 характеризует ситуацию, возникающую при отсутствии системы автоматической регулировки усиления. Появляется перегрузка усилителя и его способность передавать приращения $U_{\text{вх}}$ теряется. Вследствие этого искажается амплитудная модуляция, или устраняется совсем.

Кривая под номером 2 описывает уменьшение коэффициента усиления при наличии незадержанной системы АРУ. Искривление характеристики является показателем инерционности системы в данном случае.

Кривая 3 характеризует ситуацию, возникающую при наличии задержанной системы АРУ. При условии $U_{вх} < U_{вх min}$ АХ совпадают без АРУ и с АРУ. Коэффициент сигналов не снижается. Цепь автоматической регулировки усиления начинает перегружаться со значения входного напряжения, а ее стабилизирующее действие ослабляется.

2.2.2 Повышение помехоустойчивости РЭС методами селекции

Пространственная селекция позволяет вести борьбу с помехами, которые создаются несколькими разнесенными в пространстве источниками, т.е. с многолучевыми помехами. Она обеспечивается антенной. Пространственная селекция тем выше, чем уже диаграмма направленности антенны (ДНА) и меньше уровень боковых лепестков, что обеспечивается с помощью выбора распределения амплитуды и фазы ЭМП в раскрыве антенны и с помощью применения антенн с нелинейной обработкой сигналов.

Также существует несколько методов компенсации радиопомех (МКР).

1. Амплитудный МКР, действующий по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны. В данном случае компенсация достигается при условии, что помехи начинают действовать в одно и то же время и имеют одинаковые длительности и огибающие. Для выполнения перечисленных условий антенны должны иметь диаграммы направленности, удовлетворяющие равенствам:

$$\begin{cases} F_k(\theta) = 0 & \text{при } -0,5\theta_0 < \theta < 0,5\theta_0 \\ F_k(\theta) = F_0(\theta) & \text{при } \theta > 0,5\theta_0 \text{ или } \theta < -0,5\theta_0 \end{cases} \quad (21)$$

где θ – угол, отсчитываемый от направления максимума ДНА;

θ_0 - ширина главного лепестка ДНА.

2. Когерентный МКП состоит в получении одинаковых по интенсивности и противоположных по фазе помеховых сигналов и последующим их сложении. Он обеспечивает полную компенсацию помех без ослабления сигнала.

3. Метод компенсации помех с системами АРУ и фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) состоит в неизменности уровня напряжения на выходе основного канала и синфазности (или противофазности) помеховых сигналов.

Когда амплитуда полезного сигнала выше амплитуды помехи, применяется селекция сигналов при ограничении их снизу. В данном случае напряжение на выходе появляется только в том случае, когда входное напряжение превышает уровень ограничения.

В тех случаях, когда амплитуда полезного сигнала меньше амплитуды помехи целесообразно применять селекцию импульсов по уровню. Таким образом, на выход селектора приходят лишь сигналы, для которых амплитуда входящего сигнала меньше заданного порогового уровня.

Метод временной селекции основан на отличие селективируемых сигналов от импульсных помех по фазе, частоте повторения и длительности. На рисунке 10 представлена система автоматической временной селекции системы автосо-
провождения дальности (АСД).

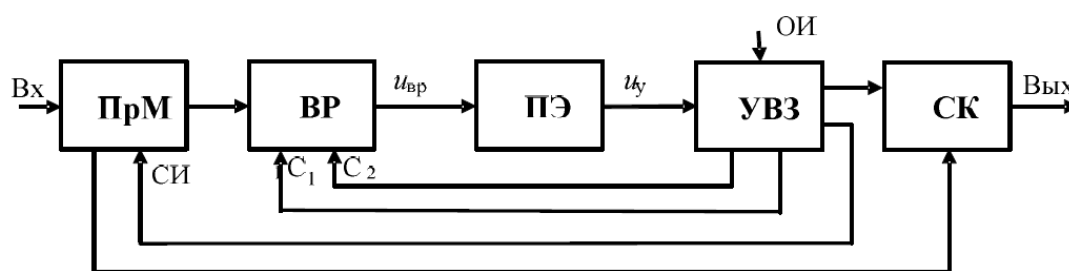


Рисунок 10 – Функциональная схема системы АСД

Во временном различителе, обозначенном как ВР, вырабатывается напряжение $u_{вр}$, которое зависит от временного рассогласования ξ между осью селективируемых и следящих импульсов.

$$t_{и} = t_{и0} + K_{у}u_{у}, \quad (22)$$

где $t_{и}$ – время, на которое задерживаются следящие импульсы относительно опорных;

$t_{и0}$ – начальная задержка, соответствующая $u_{у}=0$;

$u_{у}$ – управляющее напряжение.

Таким образом, устройство временной задержки (УВЗ) возможно рассматривать как преобразователь управляющего напряжения во время $t_{и}$ с коэффициентом $K_{у}$.

Преобразование временного рассогласования осуществляет временной различитель ВР, который действует в течении короткого времени по сравнению со временем следования опорных сигналов.

Временная селекция действует с подачей в приемник (ПрМ) специального селекторного импульса, который вырабатывается в УВЗ.

Селекция импульсов по частоте повторения основывается на совпадении двух потоков импульсов. На выход приходят линии импульса, которые совпадают по времени с образованными в селекторном устройстве опорными импульсами.

Селекция импульсов по длительности заключается в селектировании импульсов, длительность которых меньше заданной величины, больше ее или равна ей.

3 ЭКРАНИРОВАНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО УЗЛА СВЯЗИ

3.1 Центральный узел связи

3.1.1 Основные принципы построения центрального узла связи

Узел связи – составная часть сетей связи, предназначенная для объединения и распределения потоков сообщений (телеграфных, телефонных, почтовых). В нем сосредоточено большое количество каналообразующих, коммутационных, специальных и оконечных элементов узла связи. Под центральным узлом связи принято понимать часть сил и средств узла связи, выполняющая функционально однородную задачу. Они также могут именоваться центрами, боевыми постами, станциями, пунктами в зависимости от характера выполняемых задач. Разнотипные средства связи объединяют в соответствии с их оперативно-тактическим назначением, а однотипные – с их функциональным назначением. На этом базируются принципы построения узлов связи. Еще одним важным правилом является модульный принцип построения.

Рассмотрим данные принципы подробнее.

Первый принцип – объединение однотипных средств связи в элементы по родам и видам связи. К таким элементам, не считая станцию электропитания, следует определить:

- по видам связи – телефонная станция, телеграфная станция;
- по родам связи – радицентр, обеспечивающий узел связи радиосвязью, и центр каналообразования, обеспечивающий узел связи проводной, радиорелейной, тропосферной и спутниковой связью.

Данная система имеет как свои достоинства, например, благоприятные условия для применения многоканальных средств на линиях привязки и упрощение решения задач организации электропитания, обеспечению безопасности засекреченной связи и подготовки специалистов, так и недостатки, к которым можно отнести сравнительно высокое время обработки большого числа каналов на общеузловых кроссах при централизованном распределении каналов, низкую живучесть и надёжность работы из-за наличия общеузловых элементов и

отсутствие ответственного лица за состояние связи на конкретном направлении связи, так как она обеспечивается несколькими элементами узла связи.

Второй принцип – закрепление разнотипных средств за управлениями или отделами пункта управления (должностными лицами) или конкретными информационными направлениями. К достоинствам относится повышение живучести и надежности работы элементов, сокращение времени обработки каналов связи и упрощение рассредоточения элементов на местности, а к недостаткам – затруднение общеузлового маневра комплектами аппаратуры и отсутствие полнодоступного обслуживания связью должностных лиц различных отделов и управлений по всем информационным направлениям. Кроме того, осуществление второго принципа требует увеличения числа центров на узле связи.

Модульный принцип построения организационно-технических структур объединяет в себе достоинства двух уже рассмотренных принципов. Таким образом, в соответствии с первым принципом построения элементов узла формируются технологические модули, а со вторым – информационные (абонентские) модули.

Функции оборудования, входящего в состав узла связи с территориально распределенной архитектурой:

- MSC – сервер или сервер центра коммутации подвижной связи;
- медиашлюз;
- визитный регистр местонахождения;
- опорный регистр местонахождения и центра аутентификации;
- регистр идентификации оборудования;
- шлюз сигнализации;
- центр управления и технического обслуживания.

Узлы связи по условиям функционирования, оборудования и размещения делятся на стационарные и подвижные.

Подвижные узлы связи могут обеспечивать связь как в движении, так и на месте. Они должны иметь возможность быстро перемещаться, разворачивать-

ся (или свёртываться) в короткие сроки, устанавливать связь и обеспечивать её бесперебойное ведение.

Они могут размещаться на летно-подъемных и железнодорожных средствах, на автотракторной и бронетанковой технике, а также на плавсредствах.

Также узлы связи классифицируются на автоматизированные, частично автоматизированные и неавтоматизированные по степени автоматизации.

Основные задачи УС ПУ заключаются в обмене всеми видами документальных сообщений с заданной достоверностью в установленные нормативами сроки и ведении переговоров должностными лицами с требуемым качеством.

Требования, предъявляемые к узлам связи:

- высокая живучесть и защищенность;
- максимальное удобство пользования средствами связи;
- безопасность и достоверность связи;
- ЭМС всех РЭС, разворачиваемых в районе узла связи.

Живучесть характеризует возможность узлов связи не реагировать на воздействия различных поражающих факторов, при повреждениях восстанавливать частично или полностью свои функции и успешно выполнять поставленные перед ними задачи.

Живучесть узлов связи оценивается по объектовому, структурному и функциональному уровням. Первый уровень характеризует вероятность сохранения его автономных элементов в условиях преднамеренного воздействия. Второй уровень узла связи есть вероятность сохранения минимально необходимой непрерывной связи его элементов, при которой еще сохраняются орган управления, объект управления, прямые и обратные связи. А вероятность того, что количество оставшихся путей прохождения сообщений после внешнего воздействия будет не ниже минимально необходимого числа связей, есть функциональный уровень узлов связи.

Повышение функциональной живучести достигается повышением защиты фортификационных сооружений объектов управления и связи, использованием защитных свойств местности путем выноса излучающих средств, раскре-

доточением элементов узла связи на местности, исключающим одновременное поражение двух и более элементов одним расчетным боеприпасом, очаговым размещением аппаратных полевых узлов связи, дублированием, резервированием и восстановлением элементов узла связи, а также совершенствованием организационно-технической структуры узла связи и автономностью работы его элементов.

Удобство использования средств связи достигается:

- установкой оборудования для обратной связи на рабочих местах высших должностных лиц на КЦ «Восточный»;
- устройством пунктов общего пользования вблизи основных управлений и отделов;
- строгим соблюдением поочередности обслуживания абонентов соответствии с серийностью;
- внесением на узлах связи автоматической коммутации каналов, сообщений;
- обеспечением на неавтоматизированных рабочих местах должностных лиц телевизионных экранов и электронных табло, а также телеграфных и факсимильных аппаратов.

3.1.2 Комплекс мер по достижению электромагнитной совместимости узлов связи

ЭМС РЭС на узлах связи достигается проведением комплекса организационно-технических мероприятий, основными из которых являются:

- анализ и прогнозирование ЭМО в районе размещения узла связи и его элементов;
- учет рельефа местности во время размещения РЭС, а также соблюдение требований по территориальному, частотно-территориальному и временному разнесу;
- введение ограничений на использование радиоэлектронных средств;
- сокращение до минимально возможной продолжительности работы РЭС;

- установка антенн с узкой диаграммой направленности;
- своевременное обнаружение источников НЭМП и принятие мер по их устранению;
- своевременное обслуживание РЭС и постоянный контроль за соответствием технических характеристик оборудования установленным нормам;
- концентрированное распределение, назначение и использование частот.

Во время работы усилителей мощности на центральном узле связи в зоне диаграммы направленности подсоединенных антенн может присутствовать высокочастотное электромагнитное излучение. Излучаемая мощность может превышать пределы облучения для человека. Излучающие элементы (антенны) следует применять только в экранированных комнатах с уровнем экранирования не менее 40 дБ при 40 ГГц.

3.2 Анализ загруженности радиоэлектронной обстановки с помощью аппаратно-программного комплекса системы контроля электромагнитной совместимости радиоэлектронной обстановки

Площадка Генеральный план – 3 (ГП–3) оборудована следующими излучающими элементами: антенны HL033, ADD197, ADD075, HL050S7, HE314A1 и AOR DA 3200.

Логопериодическая антенна HL033 при подключении к мониторинговому приемнику служит для измерения напряженности поля, определения поляризации сигнала, а также направления на источник излучения в диапазоне частот от 80 МГц до 2 ГГц.

Пеленгаторная антенна ADD197 предназначена для использования на стационарных и мобильных постах. Позволяет оценить пеленг источника радиоизлучения при использовании ее в составе пеленгатора, а так же осуществлять радиопеленгование сигналов, как с вертикальной, так и горизонтальной поляризацией в диапазоне частот от 20 до 1300 МГц.

Пеленгаторная антенна ADD075 позволяет оценить пеленг источника радиоизлучения при использовании ее в составе пеленгатора, а так же осу-

ществлять радиопеленгование сигналов, как с вертикальной, так и горизонтальной поляризацией в диапазоне частот от 1,3 до 6 ГГц.

Направленная *логопериодическая антенна HL050S7* с широкополосным усилителем для приема сигналов с линейной поляризацией в диапазоне частот от 85 МГц до 26,5 ГГц.

Всенаправленная антенна HE314A1 применяется для измерения направленности электромагнитного поля, параметров электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в диапазоне частот от 20 до 500 МГц.

Широкополостная антенна AOR DA 3200 предназначена сугубо для радиомониторинга в диапазоне от 100 МГц до 3 ГГц.

Для решения поставленных задач был проведен анализ частотного спектра от 247 МГц до 18 ГГц при помощи антенн HE314, HL033 и AOR DA 3200 на площадке ГП-3 для оценки загруженности ЭМО на КЦ «Восточный». В таблицах 1 – 3 представлены зафиксированные показания в рабочем диапазоне частот центрального узла связи.

Таблица 1 – Частотная картина с антенны HL033.

Частота, МГц	Напряженность, дБмкВ/м	Название канала
574,50 – 581,50	46,2 – 45,8	Мультиплекс 1
590,35 – 597,70	45,0 – 43,7	Мультиплекс 2
938,40	62,2	ПАО МТС
942,60	61,1	ПАО Мегафон
949,70	67,8	ПАО Вымпелком

Таблица 2 – Частотная картина с антенны AOR DA 3200.

Частота, МГц	Напряженность, дБмкВ/м	Название канала
422,35	48,2	БС ТЕТРА
574,50 – 581,50	46,2 – 45,8	Мультиплекс 1
590,35 – 597,70	45,0 – 43,7	Мультиплекс 2
938,40	62,2	ПАО МТС
942,60	61,1	ПАО Мегафон

949,70	67,8	ПАО Вымпелком
951,40	71,3	ПАО МТС
954,50	63,2	ПАО Мегафон

Таблица 3 – Частотная картина с антенны HL050S7.

Частота, МГц	Напряженность, дБмкВ/м	Название канала
574,50 – 581,50	46,2 – 45,8	Мультиплекс 1
590,35 – 597,70	45,0 – 43,7	Мультиплекс 2
938,40	62,2	ПАО МТС
942,60	61,1	ПАО Мегафон
949,70	67,8	ПАО Вымпелком
951,40	71,3	ПАО МТС
954,50	63,2	ПАО Мегафон
958,20	59,2	ПАО МТС
959,75	41,6	ПАО Мегафон

Проанализировав полученные данные, можно прийти к выводу, что радиочастотный спектр на КЦ «Восточный» мало загружен. Данный факт упрощает поставленную задачу по расчету экранирования измерительной аппаратуры на центральном узле связи.

3.3 Принципы экранирования

Электростатические экраны используются для экранирования электрического поля. Принцип их действия состоит в замыкании электрического поля на корпус («землю») радиоэлектронного средства. Если, между А, который создает электрическое поле, и Б, для которого влияние этого поля оказывается негативным (рисунок 10, а), поместить заземленный лист В из металла, то он будет ловить электрические силовые линии, что является защитой элемента Б от негативного влияния элемента А (рисунок 10, б).

Если лист В не соединен с «землей» (рисунок 10, в), то все силовые линии электрического поля, созданные элементом А и заканчивающиеся на левой стороне листа В, будут индуцировать на этой стороне листа отрицательные заряды, на другой стороне листа будут индуцироваться положительные заряды, которые в свою очередь создадут силовые линии, оканчивающиеся на поверхности элемента Б, индуцируя на нем отрицательные заряды.

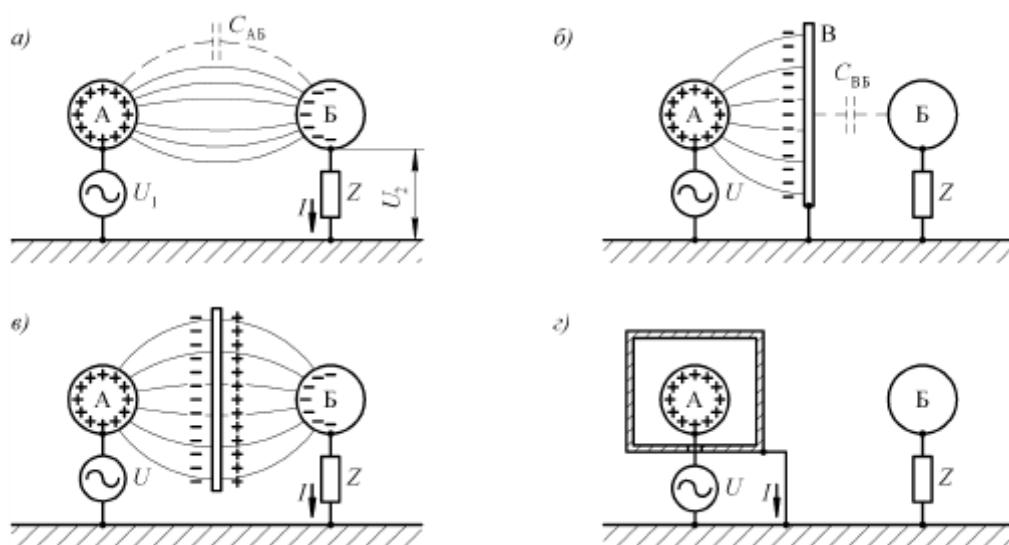


Рисунок 10 – Электростатическое экранирование [18]

При этом связь между элементами А и Б может оказаться еще более сильной, чем это было без экрана. Для максимального устранения паразитной связи необходимо выполнение следующих условий: экран должен полностью охватывать экранируемый элемент схемы А; необходимые отверстия в экране должны быть минимально возможного размера (рисунок 10, г); материал экрана должен обладать по возможности большой электрической проводимостью, а его соединение с землей должно представлять минимальное сопротивление току с частотой помехи.

Принцип действия магнитостатического экрана показан на рисунке 11, а. Магнитные силовые линии внешнего поля будут проходить в основном по толще стенок экрана, выполненного из ферромагнитного материала и

обладающего малым магнитным сопротивлением по сравнению с сопротивлением пространства внутри экрана, где находится катушка индуктивности. В результате внешнее магнитное поле помех не будет влиять на режим работы электрической цепи, в которую включена катушка индуктивности.

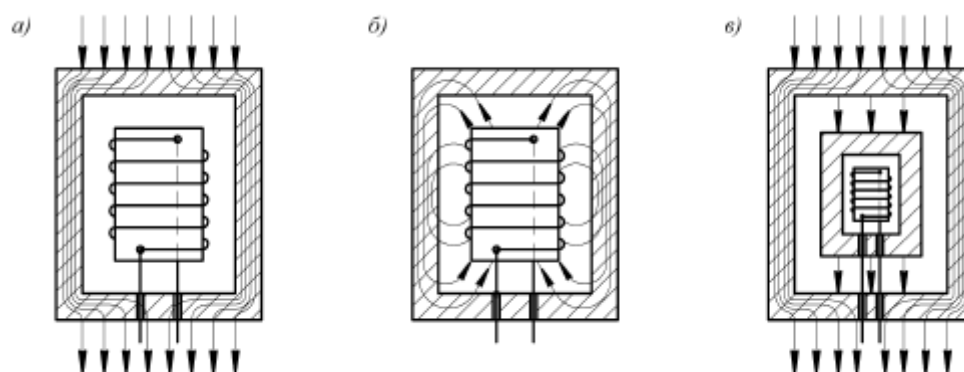


Рисунок 11 – Магнитоэкранирование [17]

Для повышения эффективности экранирования в ряде случаев используют многослойные магнитоэкранные экраны, которые составлены из нескольких слоев, но более тонкого материала. Требуемая эффективность экранирования может быть получена уже у двух- или трехслойного экрана. Двухслойный экран конструируется так, чтобы обеспечивалось замыкание в наружной оболочке тех силовых линий поля, которые выйдут за толщину стенок первого внутреннего слоя.

Принцип действия электромагнитного экранирования иллюстрируется на рисунке 12. Если на пути равномерного переменного магнитного поля (рисунок 12, а) поместить экран из меди, то в нем возбуждятся переменные ЭДС, которые, в свою очередь, создадут переменные индукционные вихревые токи. Магнитное поле этих токов будет замкнутым (рисунок 12, б); внутри цилиндра оно будет направлено навстречу возбуждающему полю, а за его пределами – в ту же сторону, что и возбуждающее поле. Результирующее поле оказывается ослабленным у цилиндра и усиленным вне его, т.е. происходит вытеснение поля из

пространства, занимаемого цилиндром, в чем и заключается его экранирующее действие.

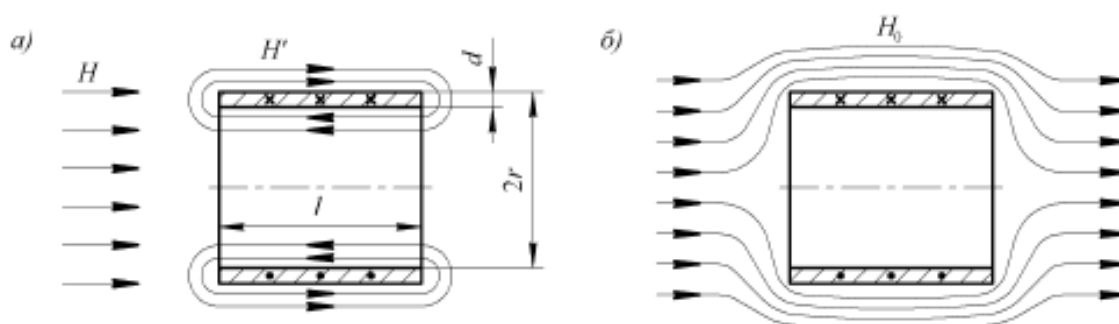


Рисунок 13 – Электромагнитное экранирование [17]

Из описанного принципа действия электромагнитного экранирования видно, что его эффективность увеличивается с увеличением обратного поля, которое будет тем больше, чем больше протекающие по цилиндру токи.

Поскольку вихревые токи распределяются неравномерно по толщине стенок экрана, глубина проникновения тока в стенку экрана уменьшается с увеличением частоты. При этом увеличивается ток в поверхностных слоях, что увеличивает создаваемое им магнитное поле, вытесняющее из пространства, занимаемого экраном, внешнее (мешающее) поле. При магнитоэлектронном и электромагнитном экранировании часть энергии теряется в экране. Поэтому при разработке подобных экранов его материал и размеры выбирают исходя из допустимых потерь, которые он вносит в экранируемую цепь.

Электростатическое экранирование не вызывает появления в экране токов сколько-нибудь значительной величины. Поэтому для такого экрана параметры материала не имеют существенного значения. Его эффективность определяется почти полностью наличием короткого замыкания между экраном и корпусом устройства.

Поэтому надежно заземленные магнитоэлектронные или электромагнитные экраны будут хорошо выполнять и функции электростатических экранов.

Эффект электромагнитного экранирования для заданной частоты прямо пропорционален магнитной проницаемости материала экрана и обратно пропорционален его удельному сопротивлению. Многообразие и случайный характер факторов, определяющих эффективность электромагнитного экранирования, существенно затрудняет расчеты экранов. Опыт проектирования, изготовления, испытаний и эксплуатации устройств и систем экранирования показывает, что в среднем эффективность экранирования аппаратуры и объектов может быть достигнута на уровне данных приведенных в таблице 1 [18]. Общая эффективность экранирования определяется самым низким значением эффективности экранирования одного из узлов экрана. Для высоких частот используется электромагнитное экранирование.

3.4 Расчет эффективности электромагнитного экранирования

Существует огромное количество факторов, которые влияют на эффективность экранирования и затрудняют инженерные расчеты. Однако данные расчеты являются необходимыми при проектировании радиоэлектронных средств. Было рассмотрено две методики расчета эффективности экранирования.

В первом методе приведены следующие данные для расчета:

- конструктивные параметры частоты изделия или его узлов;
- спектр частот помехи и соответствующие им напряженности электрического или магнитного поля;
- допустимые напряженности электромагнитного поля или его составляющих [18].

Сначала определяют тип поля помехи. Электростатическое поле в случае представления излучателя в виде диполя, а магнитостатическое – рамкой с током. После выбирают конструктивную форму экрана в зависимости от экранируемого изделия в виде параллелепипеда, цилиндра или сферы. Она влияет на сопротивление среды вблизи него, эффективность экранирования и на значение резонансной частоты.

Низшая резонансная частота определяется

$$f_{\text{рез}} \cong \frac{138}{R_3} 10^6, \quad (23)$$

где R_3 – эквивалентный радиус экрана, вводимый для сравнения экранов разных форм. Для экрана прямоугольной формы с размерами $l_1 l_2 l_3$:

$$R_3 = \sqrt[3]{3/4\pi l_1 l_2 l_3}. \quad (24)$$

Для цилиндрического экрана диаметром D

$$R_3 = \sqrt[3]{3/16D^2 h}. \quad (25)$$

Для сферического экрана $R_3 = r_3$.

Следующим шагом выбираем материал и конструкцию стенок экрана. Эквивалентная глубина проникновения характеризует экранирующее действие материала экрана и определяется [18]

$$\delta = 0.03 \sqrt{\frac{\lambda \rho}{\mu_r}} = 0.52 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}. \quad (26)$$

Эффективность магнитных материалов значительно выше немагнитных в том случае, если экран работает в поле ближней зоны, однако при работе в поле дальней зоны более высокую эффективность обеспечивают немагнитные материалы. В таблице 1 представлены электрические параметры материалов, применяемых для экранирования.

$$\mathcal{E}_{0E(H)} = 0,024 \sqrt{\frac{\delta}{\rho} Z_{E(H)}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_3}} \exp\left[\frac{2\pi d}{m}\right] \times ((a - m)/m)^2 \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6, \quad (27)$$

где a – расстояние между центрами апертур в экране;

m – наибольший размер щели в экране.

Таблица 4 - Электрические параметры материалов, применяемых для экранирования [18]

Материал	Удельная проводимость, См/м·10 ⁻⁷	Относительная магнитная проницаемость μ
Алюминий	3,56	1
Латунь	1,25	1
Медь	5,80	1
Серебро	6,20	1
Железо	1,00	1100...22000
Никель	1,38	12...80
Сталь	0,66	150
Пермаллой	0,42	80...8000

Для обычного процесса и высокого качества монтажа можно записать наиболее общую и полностью характеризующую процесс электромагнитного экранирования реальных экранов формулу [18]

$$E_{0E(H)} = \sqrt{\frac{\delta}{\rho} Z_{E(H)}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_3}} \exp\left[\frac{2\pi d}{m}\right] \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6. \quad (28)$$

В множителе $\exp\left[\frac{2\pi d}{m}\right]$ роль толщины материала и размера щелей однозначно выражена, поэтому эффективность экранирования выражается им. Множитель $1 - \frac{\pi m}{\lambda}$ определяет эффективность экрана, обусловленную его герметичностью.

Для перфорированных материалов (28) записывается следующим образом

$$E_{0E(H)} = \sqrt{\frac{\delta}{\rho} Z_{E(H)}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_3}} \left(1 - \frac{\pi D}{\lambda}\right)^6 \left(\frac{a-D}{a}\right)^2 \exp\left[\frac{2\pi d}{m}\right]. \quad (29)$$

Множитель $(\frac{a-D}{a})^2$ описывает параметры перфорации и меняется от 1 до 0 в зависимости от соотношения между a и D .

Для экранов из сетчатых материалов за толщину берут эквивалентную толщину сетки $d_s = \pi r^2 / S$. Тогда

$$\mathcal{E}_{0c} = \sqrt{\frac{d_s}{\rho}} Z_{E(H)}^3 \sqrt{\frac{\lambda}{R_3}} \exp\left[\frac{\pi d_s}{S-d_s}\right] \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6, \quad (30)$$

где d_s – диаметр провода сетки;

S – шаг сетки.

Эффективность экранов из электрически тонких материалов определяется выражением

$$\mathcal{E}_0 = 1,25\pi \sqrt{\frac{d}{\rho}} Z_E^3 \sqrt{\frac{\lambda}{R_3}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6. \quad (31)$$

Эффективность экранирования токопроводящей краской определяется

$$\mathcal{E}_0 = 1,25\pi \sqrt{\frac{Z_E}{R_{KB}}}^3 \sqrt{\frac{\lambda}{R_3}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6, \quad (32)$$

где R_{KB} – сопротивление на квадрат площади поверхности экрана.

Рассчитаем несколько экранов одинакового размера, изготовленных из различных материалов в диапазоне длин волн $3 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^{-1}$ м.

Экран 1 – листовая сталь толщиной 1,5 мм. Листы прикреплены к металлическому каркасу болтами с шагом крепления 100 мм. При таком креплении обшивки могут быть щели размером не более 10 мм [18].

Определим эквивалентный радиус экрана

$$R_3 = 0,62\sqrt{b\bar{l}h} = 0,62\sqrt{2 \cdot 1,5 \cdot 1} = 0,894 \text{ м.}$$

Волновое сопротивление электрического поля при $\frac{2\pi R_3}{\lambda} = 2\pi \cdot \frac{0,894}{3 \cdot 10^3} \ll 1$

$$Z_E \approx \frac{Z_0 \lambda}{2\pi R_3} = \frac{377 \cdot 3 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 0,894} \approx 2 \cdot 10^5 \text{ Ом.}$$

А магнитного поля

$$Z_H \approx \frac{Z_0 \lambda}{2\pi R_3} = \frac{377 \cdot 2\pi \cdot 0,894}{3 \cdot 10^3} \approx 0,7 \text{ Ом.}$$

Глубина проникновения

$$\delta = 0,03 \sqrt{\frac{\lambda \rho}{\mu_r}} = 0,03 \sqrt{\frac{3 \cdot 10^3 \cdot 10^{-7}}{180}} = 3,87 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Находим значения множителей выражения (6):

$$\sqrt{\frac{\delta}{\rho} Z_{E(H)}} = \sqrt{\frac{3,87 \cdot 10^{-5}}{10^{-7}} 2 \cdot 10^5} = 0,88 \cdot 10^4;$$

$$\sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_3}} = 14,97; \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6 \approx 1;$$

$$\exp\left[\frac{2\pi d}{m}\right] = \exp\left[6,28 \cdot \frac{1,5}{10}\right] = 2,5; \quad \sqrt{\frac{\delta}{\rho} Z_H} = \sqrt{\frac{3,87 \cdot 10^{-5}}{10^{-7}} 0,7} = 16,46.$$

Тогда эффективность экранирования электрического поля

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{0E(H)} &= \sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_{E(H)} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_3}} \exp\left[\frac{2\pi d}{m}\right] \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6 = 0,88 \cdot 10^4 \cdot 14,97 \cdot 2,57 = \\ &= 3,39 \cdot 10^5 \text{ или } 110,6 \cong 111 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Соответственно для магнитного поля $\mathcal{E}_H = 633,3$ или $56,03 \cong 56$ дБ.

Аналогично вычисляется эффективность экранирования для других точек рабочего диапазона длин волн.

Экран 2 – алюминиевые листы толщиной 1,5 мм. Конструкция такая же, как и у экрана 1.

$$Z_E \approx \frac{Z_0 \lambda}{2\pi R_3} = \frac{377 \cdot 3 \cdot 10^2}{2\pi \cdot 0,894} \approx 2 \cdot 10^4 \text{ Ом}, \quad Z_H \approx 7 \text{ Ом.}$$

$$\delta = 0,03 \sqrt{\rho \lambda} = 8,7 \cdot 10^{-5} \text{ м;}$$

$$\sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_E = 0,79 \cdot 10^4; \quad \sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_H = 1,47 \cdot 10^2; \quad \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_3}} = 6,94; \quad \exp\left[\frac{2\pi d}{m}\right] \approx 2,6.$$

Тогда $\mathcal{E}_{0E} = 1,43 \cdot 10^5$ или 103 дБ и $\mathcal{E}_{0H} = 2,6 \cdot 10^3$ или 68 дБ.

Результаты вычислений и измерений практически совпадают, что видно из рисунка 11. С уменьшением длины волны эффективности экранирования составляющих поля становятся равными, что указывает на установление при этих условиях электромагнитного процесса в экране. Сравнительно быстрое падение эффективности по мере уменьшения длины волны объясняется более интенсивным влиянием апертур.

Экран 3 изготовлен из латунной сетки с шагом в 0,25 мм, натянутой на деревянный каркас. Полотна сетки пропаяны по всей длине. Определим эффективность при $\lambda=30$ м [18].

Эквивалентная толщина

$$d_3 = \frac{\pi(0,045 \cdot 10^{-3})^2}{0,25 \cdot 10^{-3}} \approx 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

$$Z_E = 377 \cdot 5 = 1885 \text{ Ом}; \quad \sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_E = 0,79 \cdot 10^2; \quad \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_3}} = 3,2; \quad \exp\left[\frac{\pi d_s}{s-d_s}\right] \cong 5,8.$$

Тогда $\mathcal{E}_{0E} = 1,5 \cdot 10^4$ или 84 дБ.

Экран 4 выполнен из листового алюминия толщиной 1,5 мм. Задняя верхняя и нижняя стенки перфорированы, $a=15$ мм, $D=10$ мм. Определим эффективность экранирования на волне 3 м. волновые сопротивления электрической и магнитной составляющей соответственно равны 300 и 350 Ом [18].

Значения множителей

$$\sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_E = 3 \cdot 10^2; \quad \sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_H = 3,3 \cdot 10^2; \quad \exp\left[\frac{2\pi d}{D}\right] = 2,6; \quad \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_3}} = 1,5;$$

$$\left(1 - \frac{\pi D}{\lambda}\right)^6 = \frac{1}{9}; \quad \left(\frac{a-D}{a}\right)^2 = 0,86.$$

Тогда $\mathcal{E}_{0E} = 1,1 \cdot 10^2$ или 41 дБ и $\mathcal{E}_{0H} = 1,2 \cdot 10^2$ или 41 дБ.

Таким образом, можно сделать вывод о том, все рассмотренные экраны имеют достаточную эффективность для экранирования оборудования центрального узла связи. При этом необходимо учитывать, что невозможность обеспечения высокой электрической герметичности экранов приводит к тому, эффективность их остается сравнительно низкой на высоких частотах. В связи с этим нецелесообразно использовать в экранах дорогостоящие высокоэффективные материалы, так как их экранирующие свойства используются лишь частично. При нарушении электрической герметичности существенную роль играет толщина материала, с увеличением которой можно частично компенсировать уменьшение эффективности экранирования [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были проанализированы методы реализации электромагнитной совместимости и борьбы с организованными помехами. Рассмотрены функции центрального узла связи и рассчитана эффективность экранирования оборудования для различных электромагнитных экранов.

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что для экранирования оборудования центрального узла связи могут быть использованы рассчитанные в рамках представленной работы экраны, так как их эффективность принимает значения больше 40 дБ.

2. Установлено, что выше 10 ГГц герметичность экранов будет нарушаться вне зависимости от качества и цены используемого материала, а также от конструкции экрана. При таких частотах существенную роль играет толщина материала, с увеличением которой можно частично компенсировать уменьшение эффективности экранирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Ефанов, В.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем / В.И. Ефанов, А.А. Тихомиров. – М.: МГУ, 1998. – 295 с.
- 2 Виноградов, Е.М. Анализ электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / Е.М. Виноградов. – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. – 197 с.
- 3 Задоя, Н.И. Электромагнитная безопасность / Н.И. Задоя. – Рубцовск: РИИ, 2014. – 108 с.
- 4 Бородич, С.В. ЭМС наземных и космических радиослужб. Критерии условия и расчет. / С.В. Бородич. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.
- 5 Банкет, В.Л. Цифровые методы в спутниковой связи. / В.Л. Банкет, В.М. Дорофеев. – М.: Радио и связь, 1988 г. – 240 с.
- 6 Акбашев, Б.Б. Защита объектов телекоммуникаций от электромагнитных воздействий. / Б.Б. Акбашев, Н.В. Балюк, Л.Н. Кечиев. – М.: Грифон, 2014 г. – 472 с.
- 7 Пудовкин, А.П. Электромагнитная совместимость и помехозащищенность РЭС. / А.П. Пудовкин, Ю.Н. Панасюк, Т.И. Чернышова. – Тамбов: ТГТУ, 2013. – 92 с.
- 8 Соловьев, В.В. Методы оптимального присвоения частот. / В.В. Соловьев. – М. Гейзер, 2000. – 74 с.
- 9 Андреев, В.А. Временные характеристики кабельных линий связи. / В.А. Андреев. – М.: Радио и связь, 1986. – 104 с.
- 10 Уайт, Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи / Д. Уайт. // Советское радио, 1977. – Вып.1. – С.348.
- 11 Уайт, Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи / Д. Уайт. // Советское радио, 1978. – Вып.2. – С.272.

12 Картавец, Д.В. анализ эффективности использования подвижного узла связи / Д.В. Картавец, С.Н. Волкова, А.В. Черемисин.// Пожарная безопасность: проблемы и перспективы, 2016. – Т.1. – Вып. 12. – С.35 – 37.

13 Евсеев, В.В. Модернизация радиооборудования подвижных узлов связи / В.В. Евсеев, И.В. Бессонов.// Вестник ТГУ, 2009. – Т.14. – Вып. 3. – С.569-571.

14 Акулиничев, А.Б. Проблемы цифровизации военных сетей связи и пути их решения / А.Б. Акулиничев // Военная мысль, 2006. – Вып. 9. – С.76–80.

15 Куц, Л.В. Применение современных телекоммуникационных решений при организации связи в мобильных узлах / Л.В.Куц, Т.А.Говор, С.В.Качалин. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион, 2018. – Вып. 48. – С.118 – 122.

16 Сериков, И.В. Аппаратные управления и телекоммуникации, полевые подвижные инфокоммуникационные комплексы, мобильные пункты доступа разработки / И.В. Сериков, В.Е.Кузнецов, Ю.И. Серикова. // Вопросы радиоэлектроники, 2015. – Вып. 2. – С. 142 – 158.

17 Рогинский, В.Ю. Экранирование в радиоустройствах / В.Ю. Рогинский. – Л. Энергия, 1969. – 112 с.

18 Винников, В.В. Основы проектирования РЭС. Электромагнитная совместимость и конструирование экранов / В.В. Винников. – СПб. СЗТУ, 2006. – 164 с.