

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Майкопский государственный технологический университет»**

Электромагнитная совместимость в электроэнергетике

учебно-методическое пособие для студентов очной и заочной форм
обучения по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и
электротехника

Майкоп – 2019

УДК 621.3(07)

ББК 31.2

Э 45

**СОСТАВИТЕЛЬ: Старков Н.Н., кандидат технических наук,
доцент**

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Содержание

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	5
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ.....	11
1.1. Электромагнитная совместимость. Электромагнитные влияния..	11
1.2. Уровень помех. Помехоподавление.	14
1.2.1. Логарифмические относительные характеристики. Уровни помех.	15
1.2.2. Степень передачи. Помехоподавление.....	16
1.3. Основные типы и возможные диапазоны значений электромагнитных помех.....	16
1.3.1. Узкополосные и широкополосные процессы	16
1.3.2. Противофазные и синфазные помехи.....	17
1.4. Земля и масса	18
1.5. Способы описания и основные параметры помех	21
1.5.1. Описание электромагнитных влияний в частотной и временной областях.....	22
1.5.2. Представление периодических функций времени в частотной области. Ряд Фурье.	22
1.5.3. Представление непериодических функций времени в частотной области. Интеграл Фурье.	26
1.5.4. Возможные диапазоны значений электромагнитных помех..	28
1.5.5. Спектры некоторых периодических и импульсных процессов	29
1.5.6. Учет путей передачи и приемников электромагнитных помех	31
2. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ	34
2.1. Классификация источников помех	35
2.2. Источники узкополосных помех	37
2.2.1. Передатчики связи	37
2.2.2. Генераторы высокой частоты	39
2.2.3. Радиоприемники. Приборы с кинескопами. Вычислительные системы. Коммутационные устройства.....	40
2.2.4. Влияние на сеть.....	41
2.2.5. Влияние линий электроснабжения.....	41
2.3. Источники широкополосных импульсных помех	42
2.3.1. Исходный уровень помех в городах	42
2.3.2. Автомобильные устройства зажигания	43
2.3.3. Газоразрядные лампы.....	44
2.3.4. Коллекторные двигатели.....	45

2.3.5. Воздушные линии высокого напряжения	46
2.4. Источники широкополосных переходных помех	47
2.4.1. Разряды статического электричества.....	47
2.4.2. Коммутация тока в индуктивных цепях	50
2.4.3. Переходные процессы в сетях низкого напряжения	52
2.4.4. Переходные процессы в сетях высокого напряжения	53
2.4.5. Переходные процессы в испытательных устройствах высокого напряжения и электрофизической аппаратуре	54
2.4.6. Электромагнитный импульс молнии	55
2.4.7. Электромагнитный импульс ядерного взрыва.....	56
2.5. Классы окружающей среды.....	57
2.5.1. Классификация окружающей среды по помехам, связанным с проводами	57
2.5.2. Классификация окружающей среды по помехам, вызванным электромагнитным излучением.....	59
3. МЕХАНИЗМЫ ПОЯВЛЕНИЯ ПОМЕХ И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ИХ СНИЖЕНИЮ	61
3.1. Обзор.....	61
3.2. Гальваническое влияние	62
3.2.1. Гальваническое влияние через цепи питания и сигнальные контуры	63
3.2.2. Гальваническое влияние по контурам заземления.....	68
3.3. Емкостное влияние	70
3.3.1. Гальванически разделенные контуры.....	70
3.3.2. Контуры с общим проводом системы опорного потенциала..	71
3.3.3. Токовые контуры с большой емкостью относительно земли .	75
3.3.4. Емкостное влияние молнии	76
3.4. Индуктивное влияние	77
3.5. Воздействие электромагнитного излучения.....	81
4. ПАССИВНЫЕ ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ И ЗАЩИТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ	83
4.1. Обзор.....	83
4.2. Фильтры.....	83
4.2.1. Принцип действия.....	83
4.2.2. Фильтровые элементы	88
4.2.3. Сетевые фильтры	94
Библиографический список источников информации	Ошибка!
Закладка не определена.	

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Ниже приводятся основные термины и определения, относящиеся к области электромагнитной совместимости технических средств и установленные межгосударственным стандартом ГОСТ 30372-95 «СОВМЕСТИМОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ. Термины и определения»

1. Общие понятия

- 1.1 **Электромагнитная совместимость технических средств; ЭМС** технических средств: способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средством.
- 1.2 **Электромагнитная обстановка; ЭМО** (*поле помех*): совокупность электромагнитных явлений, процессов в заданной области пространства, частотном и временном диапазонах.
- 1.3 **Электромагнитная помеха; помеха**: электромагнитное явление, процесс, которые снижают или могут снизить качество функционирования технического средства.
- 1.4 **Влияние помехи**: снижение показателей качества функционирования технического средства, вызванного электромагнитной помехой.
- 1.5 **Допустимая помеха**: электромагнитная помеха, при которой качество функционирования технического средства, подверженного ее воздействию, сохраняется на заданном уровне.
- 1.6 **Недопустимая помеха**: электромагнитная помеха, воздействие которой снижает качество функционирования технического средства до недопустимого уровня.
- 1.7 **Приемлемая помеха**: электромагнитная помеха, превышающая допустимую и устанавливаемая путем соглашения.
- 1.8 **Уровень помехи**: значение величины электромагнитной помехи, измеренное в регламентированных условиях.
- 1.9 **Норма на помеху**: регламентированный максимальный уровень помехи.
- 1.10 **Источник помехи**: источник искусственного или естественного происхождения, которые создают или могут создать электромагнитную помеху.
- 1.11 **Рецептор**: техническое средство, реагирующее на электромагнитный сигнал и (или) электромагнитную помеху.
- 1.12 **Электромагнитная эмиссия от источника помехи; помехоэмис-**

сия: генерирование источником помехи электромагнитной энергии.
Примечание. Генерируемая источником энергия может излучаться в пространство или распространяться кондуктивным путем.

- 1.13 **Уровень эмиссии:** значение величины электромагнитной помехи, эмитируемой от источника, измеренный в регламентированных условиях.
- 1.14 **Норма на эмиссию:** регламентированный максимальный уровень эмиссии.
- 1.15 **Электромагнитное излучение;** излучение: явление, процесс, при котором энергия излучается источником в пространство в виде электромагнитных волн.
- 1.16 **Уровень излучения:** уровень электрического и (или) магнитного поля и (или) плотности потока мощности, излучаемые техническим средством, измеренные в регламентированных условиях.
- 1.17 **Норма на уровень излучения:** регламентированный максимальный уровень излучения.
- 1.18 **Электромагнитная кондукция (от источника помехи);** кондукция: явление, процесс, при котором помеха распространяется от источника кондуктивным путем в проводящей среде.
Примечание. Проводящей средой могут быть сигнальные цепи ввода-вывода, цепи электропитания, экраны, заземлители.
- 1.19 **Уровень кондукции:** уровень электрического тока и (или) напряжения, и (или) мощности, кондуктируемые техническим средством, измеренный в регламентированных условиях.
- 1.20 **Норма на уровень кондукции:** регламентированный максимальный уровень кондукции.

2. Обеспечение электромагнитной совместимости

- 2.1 **Организационное обеспечение ЭМС:** организационные решения, постановления, нормативно-технические документы, направленные на исключение или снижение до приемлемого уровня электромагнитных помех между техническими средствами.
- 2.2 **Техническое обеспечение ЭМС:** технические решения, направленные на улучшение характеристик их ЭМС.
- 2.3 **Зона влияния (радиус влияния):** область пространства, в пределах которой уровень электромагнитной помехи превышает допустимый.
- 2.4 **Сертификация ТС на соответствие требованиям ЭМС:** мероприятия, в результате которых удостоверяется соответствие определенного типа технического средства требованиям государственных, международных или иных нормативно-технических документов, ре-

- гламентирующих характеристики ЭМС, посредством выдачи предприятию—изготовителю сертификата.
- 2.5 **Экспертиза ЭМС:** экспериментальное и (или) теоретическое исследование состояния обеспечения ЭМС технического средства в заданной электромагнитной обстановке.
 - 2.6 **Подавление помех:** мероприятия, имеющие целью ослабление или устранение влияния помех.
 - 2.7 **Помехоподавляющее оборудование:** устройство или комплект устройств, предназначенных для подавления помех.
 - 2.8 **Помехоподавляющий элемент:** часть помехоподавляющего устройства, непосредственно осуществляющая подавление помех.
 - 2.9 **Экран (электромагнитный):** устройство или элемент конструкции устройства, обеспечивающий поглощение, преобразование или отражение электрических и (или) магнитных полей и электромагнитных волн.
 - 2.10 **Экранирование (электромагнитное):** способ ослабления электромагнитной помехи с помощью экрана с высокой электрической и (или) магнитной проводимостями.
 - 2.11 **Биологическая защита (от электромагнитного излучения):** обеспечение регламентированных уровней электромагнитных излучений, соответствующих установленным санитарными нормами.

3. Характеристики и параметры технических средств, влияющих на ЭМС

- 3.1 **Характеристика ЭМС:** характеристика технического средства, отражающая возможность его функционирования в заданной ЭМО и (или) степень его воздействия на другие технические средства.
Примечание. Характеристика ЭМС может отражать свойства технического средства как источника помех, как рецептора и (или) свойства окружающей среды, влияющие на ЭМС технического средства.
- 3.2 **Параметр ЭМС:** величина, количественно характеризующая какое-либо свойство ЭМС, отражающая одно из значений характеристики ЭМС.
- 3.3 **Восприимчивость (электромагнитная):** способность рецептора реагировать на электромагнитную помеху.
- 3.4 **Порог восприимчивости:** минимальная величина электромагнитной помехи, при которой рецептор на нее реагирует.
- 3.5 **Невосприимчивость (электромагнитная):** способность технического средства противостоять воздействию электромагнитной по-

мехи.

- 3.6 **Устойчивость к электромагнитной помехе;** помехоустойчивость: способность технического средства сохранять заданное качество функционирования при воздействии на него внешних помех с регламентируемыми значениями параметров в отсутствие дополнительных средств защиты от помех, не относящихся к принципу действия или построения технического средства.
- 3.7 **Помехозащищенность:** способность ослаблять действие электромагнитной помехи за счет дополнительных средств защиты от помех, не относящихся к принципу действия или построения технического средства.

4. Электромагнитные помехи

- 4.1 **Естественная помеха:** электромагнитная помеха, источником которой являются природные физические явления.
- 4.2 **Искусственная помеха:** электромагнитная помеха, источником которой является устройство, созданное человеком.
- 4.3 **Атмосферная помеха:** естественная помеха, источником которой являются электрические разряды в атмосфере.
- 4.4 **Космическая помеха:** естественная помеха, источником которой является излучение Солнца, звезд и галактики.
- 4.5 **Электростатический разряд:** импульсный перенос электрического заряда между телами с разными электростатическими потенциалами.
- 4.6 **Электростатическая помеха:** естественная помеха, обусловленная электризацией и проявляющаяся вследствие импульсных токов стекания накопленных электрических зарядов и (или) электростатических разрядов.
- 4.7 **Излучаемая помеха:** электромагнитная помеха, распространяющаяся в пространстве.
- 4.8 **Кондуктивная помеха:** электромагнитная помеха, распространяющаяся по проводникам.
- 4.9 **Индустриальная помеха:** электромагнитная помеха, создаваемая техническими средствами.
Примечание. К индустриальным помехам не относятся помехи, создаваемые излучениями выходных трактов радиопередатчиков.
- 4.10 **Коммутационная помеха:** индустриальная помеха, возникающая при процессах коммутации тока и напряжения.
- 4.11 **Контактная помеха:** электромагнитная помеха, обусловленная излучением токопроводящих контактов и (или) среды с нелинейной проводимостью при воздействии на них электромагнитного поля.

- 4.12 **Электромагнитный импульс; ЭМИ:** изменение уровня электромагнитной помехи в течение времени, соизмеримого со временем установления переходного процесса в техническом средстве, на которое это изменение воздействует.
- 4.13 **Импульсная помеха:** электромагнитная помеха в виде одиночного импульса, последовательности или пачки импульсов.
- 4.14 **Шумовая помеха:** электромагнитная помеха, источником которой является электромагнитный шум.
- 4.15 **Импульсно-шумовая помеха:** электромагнитная помеха, энергетический спектр которой имеет импульсные и шумовые составляющие.
- 4.16 **Непрерывная помеха:** электромагнитная помеха, уровень которой не уменьшается ниже определенного значения в регламентированном интервале времени.
- 4.17 **Кратковременная помеха:** электромагнитная помеха, длительность которой, измеренная в регламентированных условиях, меньше некоторой величины, регламентированной для данного технического средства.
- 4.18 **Непродолжительная помеха:** электромагнитная помеха, длительность которой, измеренная в регламентированных условиях, сравнительно невелика, но больше некоторой величины, регламентированной для данного технического средства.
- 4.19 **Регулярная помеха:** электромагнитная помеха, возникающая и исчезающая через определенные промежутки времени.
- 4.20 **Нерегулярная помеха:** электромагнитная помеха, возникающая и исчезающая через различные случайные промежутки времени.
- 4.21 **Узкополосная помеха:** электромагнитная помеха, ширина спектра которой меньше или равна ширине полосы пропускания рецептора.
- 4.22 **Широкополосная помеха:** электромагнитная помеха, ширина спектра которой больше полосы пропускания рецептора.
- 4.23 **Межсистемная помеха:** электромагнитная помеха, источник которой находится в системе, не относящейся к рассматриваемой.
- 4.24 **Внутрисистемная помеха:** электромагнитная помеха, источник которой находится внутри рассматриваемой системы.
- 4.25 **Мешающий сигнал:** электромагнитный сигнал, который ухудшает качество функционирования технического средства.

5. Измерительное оборудование и аппаратура

- 5.1 **Экранированная камера:** помещение, обладающее свойствами экранирования для разделения внутренней электромагнитной обстановки от внешней.

- 5.2 **Безэховая камера:** экранированная камера с поглощающим электромагнитные волны покрытием внутренних поверхностей.
- 5.3 **Г-камера:** экранированная камера, представляющая собой отрезок волновода, в которой может быть возбуждена поперечная электромагнитная волна.
- 5.4 **Измерительная площадка:** площадка, пригодная для измерения помех, излучаемых испытуемым устройством, параметров и характеристик ЭМС технического средства и отвечающая регламентированным требованиям.
- 5.5 **Измеритель помех:** селективный микровольтметр, для которого регламентирована величина отношения синусоидального напряжения к спектральной плотности напряжения импульсов на входе, вызывающих одинаковое показание измерительного прибора, содержащий инерционные детекторы.
- 5.6 **Анализатор помех:** измеритель помех, оборудованный устройством временной селекции.
- 5.7 **Имитируемая помеха:** электромагнитная помеха с заданными значениями параметров, создаваемая с целью измерения или оценки помехоустойчивости.
- 5.8 **Имитатор помех:** устройство, предназначенное для генерации и передачи в проводящую среду и (или) окружающее пространство имитируемых помех.

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

1.1. Электромагнитная совместимость. Электромагнитные влияния

Электромагнитная совместимость (ЭМС) является современным понятием, объединяющим такие известные электромагнитные явления, как радиопомехи, влияние на сеть, перенапряжения, колебания напряжения сети, электромагнитные влияния, паразитные связи, фон промышленной частоты 50 Гц, воздействия заземления и т.д. Существует несколько определений понятия «Электромагнитная совместимость». Так стандарт VDE 0870 (Общество немецких электротехников) определяет ЭМС как **«способность электрического устройства удовлетворительно функционировать в его электромагнитном окружении, не влияя на это окружение, к которому принадлежат также и другие устройства, недопустимым образом»**. ГОСТ Р 50397-92 определяет электромагнитную совместимость как **«способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам»**

Основными понятиями в теории электромагнитной совместимости являются понятия передатчиков и приемников электромагнитной энергии (электромагнитных помех) в их расширенном понимании. Так к передатчикам электромагнитной энергии относятся телевизионные и радиовещательные устройства, электрические цепи и системы, непреднамеренно излучающие в окружающую среду электромагнитную энергию, электроприемники, являющиеся источниками электромагнитных помех, распространяющихся по цепям питания.

На объектах электроэнергетики передатчиками электромагнитных воздействий, которые могут оказывать влияние на автоматические и автоматизированные системы технологического управления электротехническими объектами являются:

- Переходные процессы в цепях высокого напряжения при коммутациях силовыми выключателями и разъединителями;

- Переходные процессы в цепях высокого напряжения при коротких замыканиях, срабатывании разрядников или ограничителей перенапряжений;
- Электрические и магнитные поля промышленной частоты, создаваемые силовым оборудованием станций и подстанций;
- Переходные процессы в заземляющих устройствах подстанций, обусловленные токами КЗ промышленной частоты и токами молний;
- Быстрые переходные процессы при коммутациях в индуктивных цепях низкого напряжения;
- Переходные процессы в цепях различных классов напряжения при ударах молнии непосредственно в объект или вблизи него;
- Разряды статического электричества;
- Электромагнитные возмущения в цепях оперативного тока.

В качестве примеров передатчиков электромагнитных воздействий можно также перечислить: автомобильные устройства зажигания, люминесцентные лампы, коллекторные электродвигатели, силовая электроника, сварочные аппараты, электроинструмент и т. д..

- В особых ситуациях рассматриваются такие виды электромагнитных воздействий, как: Электромагнитные импульсы ядерных взрывов;
- Магнитное поле Земли при аномальных явлениях на поверхности Солнца.

Источники электромагнитных помех на электрических станциях и подстанциях изображены на рис. 1.1.

К приемникам электромагнитных воздействий относятся теле и радиоприемники, силовые электроприемники, системы автоматизации, автомобильная микроэлектроника, управляющие приборы и регуляторы, средства релейной защиты и автоматики, устройства обработки информации и т. д.. Многие электрические устройства могут одновременно действовать как приемники так и как передатчики.

С учетом изложенного электрическое устройство считается совместимым, если оно в качестве передатчика является источником электромагнитных помех не выше допустимых, а в качестве приемника обладает допустимой чувствительностью к посторонним влияниям, т.е. достаточной помехоустойчивостью и иммунитетом.

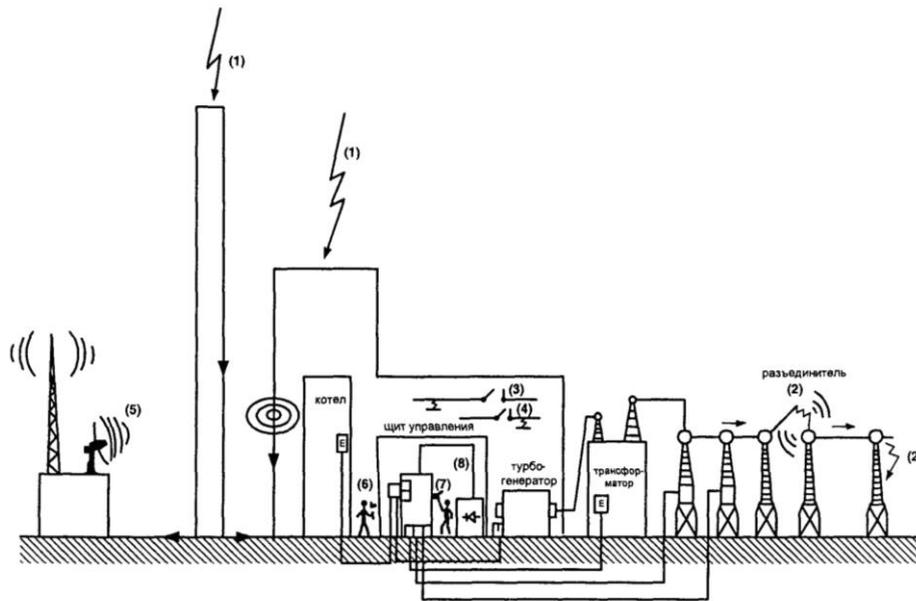


Рис. 1.1. Источники электромагнитных воздействий на электрических станциях и подстанциях:

1 – удар молнии; 2 – переключения и короткие замыкания (КЗ) в сети высокого напряжения; 3 – переключения и КЗ в сети среднего напряжения (СН); 4 - переключения и КЗ в сети низкого напряжения (НН); 5 – внешние источники радиочастотных излучений; 6 – внутренние источники радиочастотных излучений; 7 – разряды статического электричества; 8 – источники кондуктивных помех по цепям питания

Электромагнитные влияния могут проявляться в виде обратимых и необратимых нарушений. Так, в качестве обратимого нарушения можно назвать шум при телефонном разговоре. К необратимому нарушению относится сбой в работе системы релейной защиты, приведший к отключению нагрузки. В табл. 1.1. приведены примеры повреждений и неправильной работы устройств РЗА вызванных воздействиями электромагнитных помех.

Таблица 1.1.

Примеры повреждений и неправильной работы устройств РЗА из-за воздействия электромагнитных помех

№ п.п.	Событие	Последствия	Причины
<i>Коммутации в первичных цепях</i>			
1.	Коммутация выключателем на ПС с элегазовым РУ	Ложная работа РЗА. Отключилась линия 110 кВ	Неисправно ЗУ. Высокий уровень импульсных помех
2.	Коммутация выключателем 10 кВ на ПС с закрытым РУ	Ложная работа РЗА. Отключилась линия 110 кВ	Импульсные помехи в сети постоянного тока более 2 кВ

Таблица 1.1. (продолжение)

№ п.п.	Событие	Последствия	Причины
3.	Коммутация выключателем на ПС с элегазовым РУ	Повреждение электронного реле	Высокий уровень импульсных помех. Низкая помехоустойчивость реле
4.	Коммутация выключателем на ПС с элегазовым РУ	Сбой в работе автоматики контроля плотности элегаза. Заблокировано управление выключателями 110 кВ	Низкая помехоустойчивость аппаратуры
5.	Коммутация выключателем 110 кВ на ПС с открытым РУ	Ложное отключение выключателя 220 кВ	Импульсные помехи в цепях оперативного тока
<i>Короткие замыкания на землю в цепях высокого напряжения</i>			
6а	КЗ на землю на шинах 110 кВ ПС с открытым РУ	Повреждение аппаратуры РЗА, коммутационных аппаратов в сети постоянного тока. Отключились 6 линий 110 кВ	Неисправно ЗУ.
6б	Ближнее КЗ на землю ПС с открытым РУ	Возгорание кабелей в кабельном канале	Перекрытие с ЗУ на цепи постоянного тока
7.	КЗ на шинах 110 кВ ПС с открытым РУ	Ложная работа Отключилась линия 500кВ	Неисправно ЗУ.
8.	КЗ на шинах ПС с закрытым РУ	Ложная работа РЗА. Отключилась линия 110 кВ	Неисправно ЗУ.
9.	КЗ на шинах ОРУ-110кВ открытой ПС с открытым РУ	Ложно отключается блок генераторов на ТЭЦ	Неисправно ЗУ.
<i>Удары молнии в территорию подстанции</i>			
10.	Удар молнии в молниеприемник на ОРУ ПС	Повреждение устройств системы автоматического управления. Загорелось реле на распределительном щите	Неправильно выполнена молниезащита
11.	Удар молнии в молниеприемник ОРУ ПС	Отключение 8 выключателей на РУ 110 кВ, 2 на РУ 220 кВ	Неправильно выполнена молниезащита
<i>Стационарные режимы</i>			
12.	Нормальный режим на ТЭЦ	Ложно работает микропроцессорная защита генератора. Отключился блок генератора	Помехи в цепях дискретных сигналов. Неэкранированный кабель

1.2. Уровень помех. Помехоподавление.

Для количественной оценки электромагнитной совместимости широкое применение нашли т.н. логарифмические масштабы, позволяющие наглядно представлять соотношения величин, отличающихся на несколько порядков. Существует два вида логарифмических отношений – уровень и степень передачи.

Уровни определяют отношение величины к базовому значению. Степень передачи определяется отношением входных и выходных величин системы и служит характеристикой ее трансляционных (передаточных) свойств.

1.2.1. Логарифмические относительные характеристики.

Уровни помех.

С применением десятичного логарифма определяются следующие уровни помех, измеряемые в децибелах:

Напряжение: $u_{\text{дБ}} = 20\lg(u_x/u_0)$, где $u_0 = 1\text{ мкВ}$;

Ток: $i_{\text{дБ}} = 20\lg(i_x/i_0)$, где $i_0 = 1\text{ мкА}$;

Напряженность электрического поля: $E_{\text{дБ}} = 20\lg(E_x/E_0)$, где $E_0 = 1\text{ мкВ/м}$;

Напряженность магнитного поля: $H_{\text{дБ}} = 20\lg(H_x/H_0)$, где $H_0 = 1\text{ мкА/м}$;

Мощность: $P_{\text{дБ}} = 10\lg(P_x/P_0)$, где $P_0 = 1\text{ пВт}$.

В данных соотношениях введен множитель 20, обеспечивающий простое выражение мощности в относительных логарифмических единицах:

Найдем выражение $P_{\text{дБ}}$ через $u_{\text{дБ}}$ и $i_{\text{дБ}}$: $u_{\text{дБ}} = 20\lg(u_x/u_0)$, откуда $u_x = u_0 \times 10^{\frac{u_{\text{дБ}}}{20}}$.

Аналогично $i_x = i_0 \times 10^{\frac{i_{\text{дБ}}}{20}}$.

Следовательно $P_x = u_x \times i_x = u_0 i_0 \times 10^{\frac{u_{\text{дБ}}+i_{\text{дБ}}}{20}} = P_0 \times 10^{\frac{u_{\text{дБ}}+i_{\text{дБ}}}{20}}$, откуда $P_x/P_0 = 10^{\frac{u_{\text{дБ}}+i_{\text{дБ}}}{20}}$.

Но по определению $E_{\text{дБ}} = 10\lg(E_x/E_0) = 10\lg(10^{\frac{u_{\text{дБ}}+i_{\text{дБ}}}{20}}) = (u_{\text{дБ}} + i_{\text{дБ}})/2$.

Кроме десятичных логарифмов используются также и натуральные логарифмы. При этом уровень помех измеряется в неперах:

Напряжение: $u_{\text{Нп}} = \ln(u_x/u_0)$, где $u_0 = 1\text{ мкВ}$;

Ток: $i_{\text{Нп}} = \ln(i_x/i_0)$, где $i_0 = 1\text{ мкА}$;

Напряженность электрического поля: $E_{\text{Нп}} = \ln(E_x/E_0)$, где $E_0 = 1\text{ мкВ/м}$;

Напряженность магнитного поля: $H_{\text{Нп}} = \ln(H_x/H_0)$, где $H_0 = 1\text{ мкА/м}$;

Мощность: $P_{\text{Нп}} = 0,5\ln(P_x/P_0)$, где $P_0 = 1\text{ пВт}$.

Между децибелом и непером существуют соотношения: $1\text{ Нп} = 8,686\text{ дБ}$ или $1\text{ дБ} = 0,115\text{ Нп}$.

Приведем наиболее часто используемые характерные значения дБ и соответствующие им отношения стоящие под знаком логарифма:

2:1 – 6 дБ; 10:1 – 20 дБ = 2,3 Нп; 100:1 – 40 дБ = 4,6 Нп; 1000:1 – 60 дБ = 6,9 Нп; 10 000:1 – 80 дБ = 9,2 Нп; 100 000:1 – 100 дБ = 11,5 Нп; 1000 000:1 – 120 дБ = 13,8 Нп.

Таким образом, при обоих представлениях уровень помехи увеличивается на одну и ту же величину с каждым последующим порядком. Обозначения дБ и Нп указывают исключительно на вид использованной функции логарифма (\lg или \ln). Данные обозначения не являются единицами, но часто используются как таковые.

1.2.2. Степень передачи. Помехоподавление

Одним из понятий, характеризующих степень передачи системы, является понятие «помехоподавление». Понятие «**помехоподавление**» служит для характеристики защитного воздействия средств защиты от помех. Как правило, степень помехоподавления зависит от частоты. В качестве одной из количественных характеристик степени помехоподавления на той или иной частоте служит логарифм отношения напряжений на входе U_1 и на выходе U_2 фильтра, который называется **коэффициент затухания a_ϕ** , или напряженности поля в точках пространства перед экраном H_0 и за ним H_{em} (**коэффициент экранирования a_ϵ**):

$$a_\phi = 20\lg(U_1/U_2); \quad a_\epsilon = 20\lg(H_0/H_{em}).$$

1.3. Основные типы и возможные диапазоны значений электромагнитных помех

1.3.1. Узкополосные и широкополосные процессы

Помехи, создаваемые источниками (напряжения, токи, электрические и магнитные поля), могут возникать как в виде периодически повторяющихся, так и случайно распределенных во времени величин. В обоих случаях речь может идти как об узкополосных, так и о широкополосных процессах. Процесс называется **узкополосным**, когда энергия спектра сосредоточена в основном в относительно узкой полосе частот около некоторой фиксированной частоты ω_0 или **широкополосным**, если указанное условие не выполняется

При систематизации, в первом приближении, не смотря на бесконечное разнообразие вариантов, выделяют четыре типа помех. Характерные их примеры приведены на рис. 1.2..

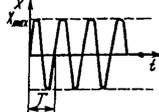
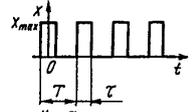
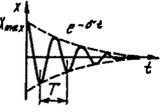
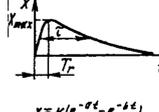
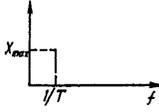
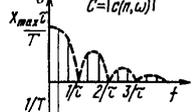
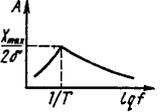
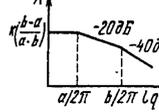
Периодические помехи		Непериодические, случайные помехи	
Узкополосные	Широкополосные	Узкополосные	Широкополосные
Временная область, изменение помех во времени			
 $x = X_{max} \sin \omega_p t$ $\omega_p = 2\pi/T$	 $x = \frac{X_{max} \tau}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c(n, \omega) \cos(n\omega t)$ $\omega_p = 2\pi/T$	 $x = X_{max} e^{-\sigma t} \cos \omega_p t$ $\omega_p = 2\pi/T$	 $x = K(e^{-\sigma t} - e^{-\beta t})$ $K = f_1(T_1, T_2, \tau)$ $a = f_2(T_1, \tau)$ $b = f_3(T_2, \tau)$
Частотная область, амплитудные спектры			
	 $C = c(n, \omega) $		
С — амплитудный спектр		А — спектр амплитудной плотности	

Рис. 1.2. Систематизация разновидностей электромагнитных помех

На данном рисунке приведены следующие типы помех:

- синусоидальная, постоянно действующая периодическая помеха частотой 50 Гц, проникающая из системы питания или высокочастотная несущая волна. Данная помеха имеет спектральную плотность, представляемую двумя линиями вида $X(\omega) = X_{max} (\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0))$ и представляет собой узкополосный процесс;
- последовательность прямоугольных (например, тактовых) импульсов. Данная бесконечная последовательность может быть представлена в форме ряда Фурье и является примером широкополосного процесса с дискретным спектром.
- периодические затухающие однократные импульсы, случайно возникающие, например, в системе электроснабжения и представляющие собой узкополосный процесс;
- одиночные импульсы, образованные двумя экспонентами (например, разряды атмосферного и статического электричества) и представляющие собой широкополосный процесс.

1.3.2. Противофазные и синфазные помехи

Помехи, возникающие в проводах, могут рассматриваться как противофазные или синфазные напряжения и токи.

Противофазные напряжения помех (поперечные, симметричные) возникают между проводами двухпроводной линии (u_d на рис. 1.3.). Противофазные помехи возникают через гальванические или полевые связи или преобразуются из синфазных помех в системах,

несимметричных относительно земли. Конкретные примеры возникновения противофазных помех рассматриваются в последующих разделах.

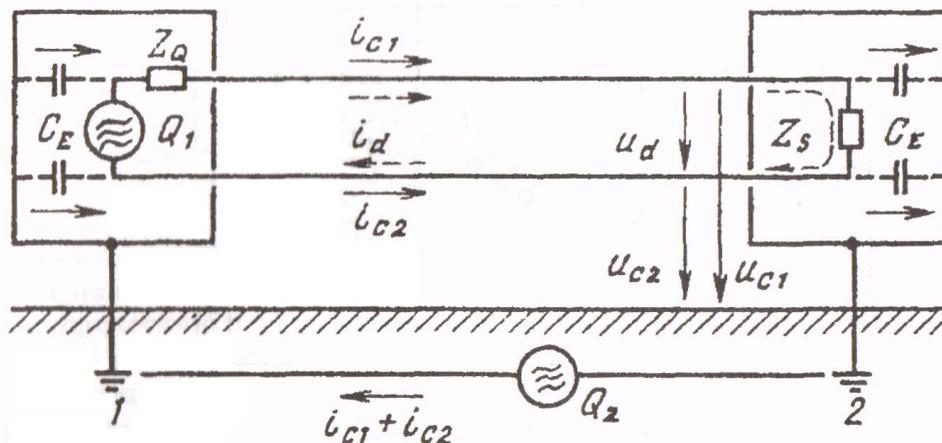


Рис. 1.3. Помехи, связанные с передачей сигналов по линии:

C_E - паразитные емкости относительно заземленного корпуса; Q_1 - источник противофазных помех; Q_2 - источник синфазных помех; Z_0 , Z_s - полные сопротивления источника и приемника помех; i_{C1} , i_{C2} - синфазные токи, i_d - противофазный ток; u_{C1} , u_{C2} - синфазные напряжения помех; u_d - противофазное напряжение помех.

Противофазные напряжения помех непосредственно накладываются на полезные сигналы в сигнальных цепях или на напряжение питания в цепях электроснабжения, воздействуют на линейную изоляцию между проводами и могут быть восприняты как полезные сигналы в устройствах автоматизации и тем самым вызывать ошибочное функционирование.

Синфазные напряжения помех (несимметричные, продольные напряжения) возникают между каждым проводом и землей (u_{C1} и u_{C2} на рис. 1.3.) и воздействуют на изоляцию проводов относительно земли.

Синфазные помехи обусловлены главным образом разностью потенциалов в цепях заземления устройства, например между точками 1 и 2 на рис. 1.3., вызванной токами в земле (аварийными, при замыканиях высоковольтных линий на землю, рабочими или токами молнии) или магнитными полями.

1.4. Земля и масса

Другими важными понятиями ЭМС являются понятия: земля и масса. С понятием "заземление" инженеры, работающие с силовыми устройствами, связывают, как правило, вопросы техники безопас-

ности и грозозащиты, например, устранение недопустимо высоких напряжений прикосновения. Инженеры же, работающие в области электроники, - скорее электромагнитную совместимость их схем, например устранение контуров заземления, влияние частоты 50 Гц, обращение с экранами кабелей и т. д.

Следует строго различать два понятия - защитное заземление (защитный провод) для защиты людей, животных и т. д. и массу, систему опорного потенциала, электрических контуров (это справедливо как для силовых, так и для слаботочных цепей). Земля и масса, как правило, в одном месте гальванически связаны друг с другом, но между ними существует большое различие: провода заземления проводят ток только в аварийной ситуации, нулевые провода - в нормальной рабочей ситуации и часто представляют общий обратный провод нескольких сигнальных контуров, ведущий к источнику. Это различие существенно и характеризуется следующими понятиями:

<i>Земля</i>	<i>Масса</i>
Защитный провод	Нейтральный провод
Заземление	Масса схемы
Защитное заземление	Нулевая точка
Нулевой провод заземления	Сигнальная масса
Провод заземленной системы опорного потенциала	Измерительная земля
Заземленный корпус	Нулевое напряжение (0 В)

Понятие «земля» поясняет рис. 1.4. .

В нормальном режиме по нейтральному проводу N протекает обратный ток электроприемников и его потенциал вследствие падения напряжения на его сопротивлении отличается от потенциала земли (за исключением эквипотенциальной шины, где он равен потенциалу земли). Защитный провод $ЗП$ в нормальном режиме тока не проводит и его потенциал равен потенциалу земли. Поскольку корпус оборудования присоединен к защитному проводу $ЗП$, то и его потенциал также равен потенциалу земли и не создает угрозы для людей и животных.

При замыкании одного из фазных проводов (на рис. 1.4. провода L_3) на корпус оборудования в фазном проводе возникает большой ток короткого замыкания и оборудование отключается предвключенным защитным автоматом Z_3 .

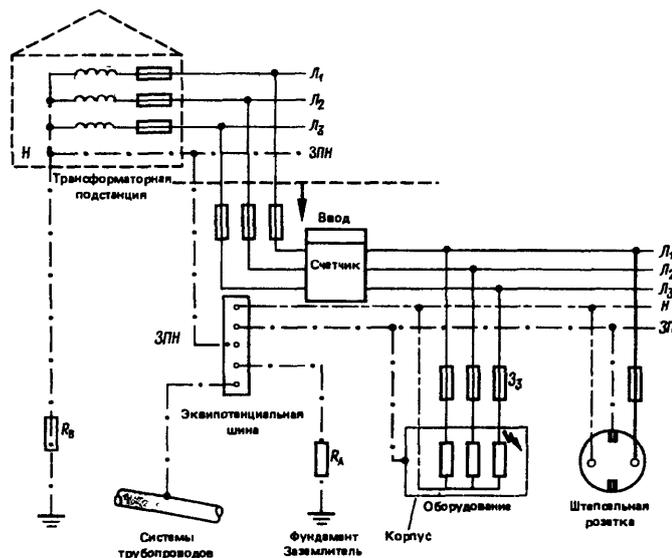


Рис. 1.4. Заземление в низковольтной сети:

L_1, L_2, L_3 – фазные провода сети; ЗПН – защитный провод нейтрали; ЗП – защитный провод; Н – нейтральный провод; Z_3 – защитный автомат; R_A, R_B – сопротивление заземлителя потребителя и подстанции

Понятие «масса» поясняет рис. 1.5..

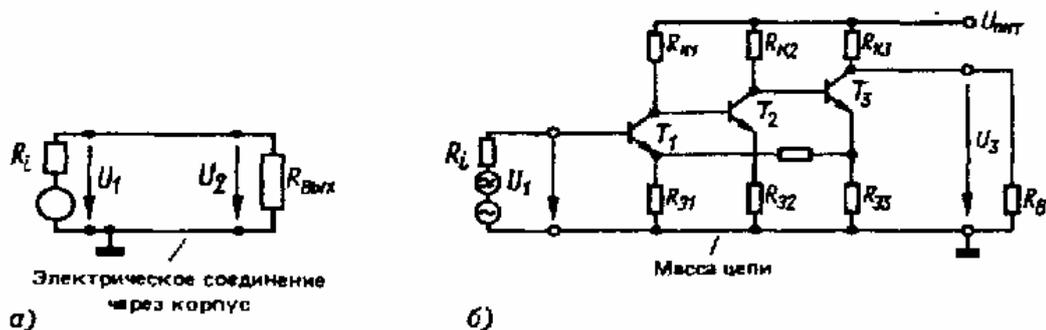


Рис. 1.5. К понятию «масса»

Под массой в схемотехнике понимают общую систему опорного потенциала, по отношению к которой измеряются узловые напряжения цепи (шина, провод опорного потенциала, корпус, нулевая точка). В простой цепи это просто обратный провод, в электронной схеме - общий обратный провод для всех электрических контуров (рис. 1.5. а,б). Масса может, но не должна иметь потенциал земли. Однако, как правило, она в одном месте непременно соединена с защитным проводом и тем самым заземлена. Масса выполняет те же функции, что и нейтральный провод. Прежде всего, на работу схемы не оказывает влияния заземление массы. Однако если занимающая достаточно обширное пространство масса заземлена в нескольких местах, возникает контур заземления (см. рис. 1.3). Тогда при различных потенциалах точек зазем-

ления могут протекать уравнивающие токи, а на полных сопротивлениях массы возникают падения напряжения, которые накладываются на напряжения, действующие вдоль отдельных контуров цепи и являются противофазными помехами. При высоких частотах это даже не требует гальванического заземления, так как при наличии печатных плат с навесным монтажом и плоской массой контуры заземления могут образовываться благодаря их емкостям относительно массы.

1.5. Способы описания и основные параметры помех

Помехи можно представить и описать как во временной, так и в частотной области. Однако, обычно не так важно точное описание формы помехи, как ее точные параметры, от которых зависит ее мешающее воздействие.

Для периодических помех такими являются: частота f и амплитуда X_{max} . Эти параметры определяют амплитуду напряжения помехи во вторичных контурах U_{max} .

Для непериодических помех важнейшими параметрами являются следующие:

- скорость изменения $\Delta x / \Delta t$ (скорость нарастания или спада). Данная величина определяет максимальное напряжение помехи U_{smax} , вызванной во вторичной цепи;

- интервал времени Δt , в течение которого помеха x имеет максимальную скорость изменения амплитуды; этот интервал идентичен длительности действия напряжения помехи u_s во вторичной цепи;

- максимальное значение изменения амплитуды Δx , пропорциональное интегралу напряжения помехи вторичной цепи по времени (площади импульса помехи).

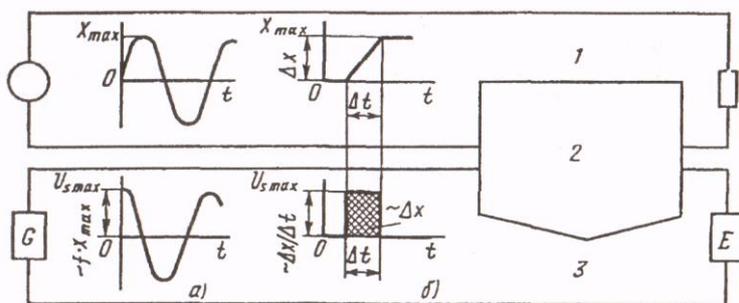


Рис. 1.6. Пояснение параметров периодических (а) и непериодических переходных (б) помех: E – приемник сигналов; G – источник сигналов; x – помеха (напряжение или ток); u_s – напряжение помехи, обусловленное связью; 1 – влияющий контур; 2 – гальваническая, емкостная или индуктивная связь; 3 – контур, подверженный влиянию

Для взаимосвязанного представления этих величин с точки зрения электромагнитной совместимости используют при периодических помехах амплитудный спектр, а для импульсных помех – т.н. спектр амплитудной плотности. Оба этих представления обеспечивают:

- оценку воздействия помехи на систему;
- расчет воздействий, обусловленных заданной связью;
- выбор параметров средств подавления помех, например фильтров;
- определение граничных областей, например, максимального возможного или допустимого излучения помех или охарактеризовать границы помехоустойчивости;
- получение представлений о воздействии при испытаниях согласно нормам электромагнитной совместимости, т.е. о параметрах генераторов, применяемых при испытаниях.

1.5.1. Описание электромагнитных влияний в частотной и временной областях

В принципе электромагнитные влияния могут рассматриваться как во временной, так и в частотной области. Однако поскольку передаточные свойства путей связи и средств помехоподавления удобнее представлять в частотной области, такое представление чаще всего предпочитают и для помех. Пересчет периодических процессов из временной области в частотную выполняют при помощи ряда Фурье, пересчет однократных импульсных процессов - при помощи интеграла Фурье.

1.5.2. Представление периодических функций времени в частотной области. Ряд Фурье.

Синусоидальные или косинусоидальные помехи (гармонические процессы) могут быть представлены как во временной, так и в частотной областях непосредственно (рис. 1.7.). В частотной области помеха характеризуется угловой частотой ω и частотой колебаний $f = \omega / 2\pi$.

Несинусоидальные периодические функции - например, пилообразной или прямоугольной формы импульсы напряжения или тока выпрямителей которые, в некоторых случаях, возможно описать аналитически, - могут быть представлены в частотной области как

бесконечная сумма синусоидальных и косинусоидальных колебаний, т. е. рядом Фурье.

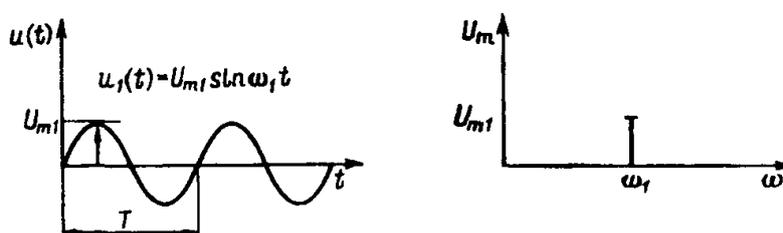


Рис 1.7. Представление синусоидальной помехи во временной и частотной областях

Например, можно представить себе несимметричное напряжение прямоугольной формы возникшим как наложение основного колебания u основной частоты $f_1 = 1/T$ и бесконечно многих гармонических колебаний u_v с частотами $v f_1$. Зависимость амплитуды отдельных колебаний от частоты представляет собой дискретный линейчатый спектр (рис. 1.8.) Наименьшая встречающаяся в линейчатом спектре частота - основная частота.

Частоты высших гармоник являются значениями, кратными этой основной частоте, например $f_3 = 3f_1$.

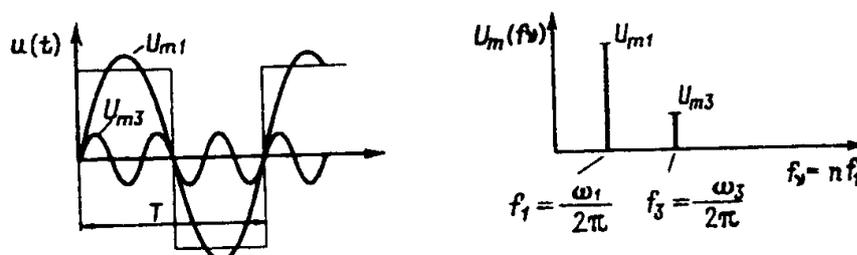


Рис 1.8. Периодическая несинусоидальная функция

Аналитически ряд Фурье любой функции времени может быть представлен в различных формах:

Нормальная:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (U_n' \cos n\omega t + U_n'' \sin n\omega t),$$

$$U_n' = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(n\omega_1 t) dt, \quad U_n'' = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(n\omega_1 t) dt, \quad U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt. \quad (1.1.)$$

Коэффициенты U_n' и U_n'' - амплитуды отдельных колебаний. Составляющая U_0 соответствует среднему арифметическому значению функции времени (постоянная составляющая).

Амплитудно-фазовая: Так как синусоидальные колебания с соответствующим фазовым сдвигом могут быть представлены и как косинусоидальные, например $\sin(90^\circ \pm \alpha) = \cos \alpha$, вместо нормальной формы часто применяют амплитудно-фазовую форму:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n), \quad (1.2.)$$

$$\text{где } U_n = \sqrt{U_n'^2 + U_n''^2}; \quad \varphi_n = -\text{arctg}(U_n'' / U_n')$$

Комплексная.

Если дополнять вышеприведенные уравнения мнимой частью и заменить тригонометрические функции по формуле Эйлера $\cos x + j \sin x = e^{jx}$ экспоненциальными функциями, получаем уравнение в комплексной форме:

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{C}_n e^{jn\omega_1 t} = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (\dot{C}_{+n} e^{jn\omega_1 t} + \dot{C}_{-n} e^{-jn\omega_1 t}), \quad (1.3.)$$

$$\text{Где } \dot{C}_n(\pm n\omega_1) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt = |\dot{C}_n| e^{j\varphi_n} = C_n e^{j\varphi_n}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

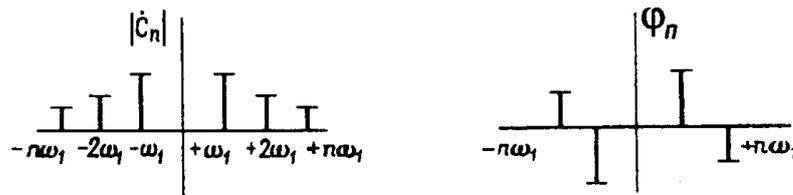


Рис 1.9. Амплитудный и фазовый спектры комплексного ряда Фурье

Так как функция $u(t)$ будучи представленная комплексным рядом Фурье (1.3.) остается действительной, то в правой части вводятся отрицательные частоты (чтобы мнимые части сократились). Учет отрицательных частот приводит к двустороннему спектру (рис. 1.9.). Идентичные вещественные части обоих слагаемых в (1.3.) за знаком суммы (для положительных и отрицательных частот $\pm n\omega_1$) образуют физически измеримую амплитуду U_n , причем

$$|C_{+n}| + |C_{-n}| = U_n, \quad C_0 = U_0.$$

При анализе ЭМС вместо двустороннего математического спектра $\dot{C}_n = f(\pm n\omega_1)$ чаще всего рассчитывают односторонний «физический» спектр $2|\dot{C}_n| = f(\pm n\omega_1)$ только для положительных n , амплитуды которого отличаются на коэффициент 2 от амплитуд двустороннего спектра. Значения амплитуд одностороннего спектра измеримы, они совпадают со значениями коэффициентов косинусоидальной формы, т.е. соответствуют значительным частям векторов переменного напряжения той же частоты.

В заключение на рис. 1.10. показаны импульсы прямоугольной формы двух периодически изменяющихся напряжений одной и той же основной частоты, однако различной скважности, и относящиеся к ним линейчатые спектры. Из вышесказанного можно установить следующее: наименьшая частота f_1 является основной частотой. Ее значение связано со значением периода T : $f_1 = 1/T$

Амплитуды высших гармоник появляются с одинаковым интервалом $\Delta f = f_1 = 1/T$ их частоты кратны основной частоте $f_n = nf_1$

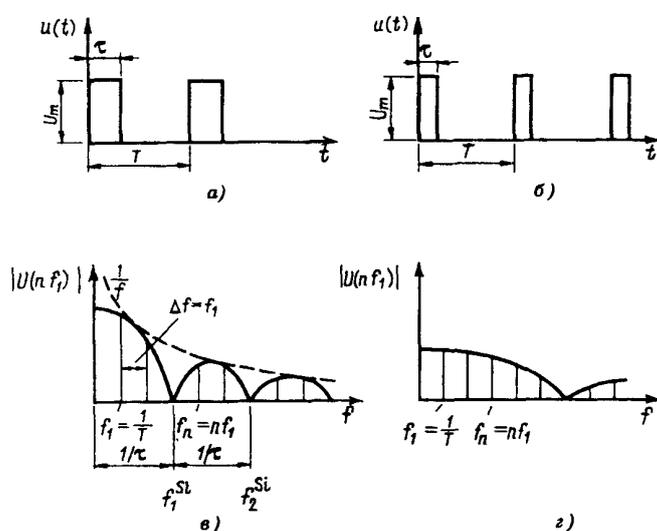


Рис. 1.10. Линейчатые спектры двух периодических последовательностей прямоугольных импульсов напряжений с различной скважностью (1:2):

функция $Si(x)$ - огибающая спектральных амплитуд (сплошная кривая);
 функция $1/f$ - огибающая функции $Si(x)$ (пунктирная кривая)

Ряд Фурье для последовательности прямоугольных импульсов имеет вид:

$$u(t) = U_m \frac{\tau}{T} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{T}{2n\pi\tau} \left(\sin \frac{2n\pi\tau}{T} \cos n\omega_1 t + \left(1 - \cos \frac{2n\pi\tau}{T} \right) \sin n\omega_1 t \right) \right]$$

Коэффициенты (спектральные амплитуды) (без постоянной составляющей) определяются формулой:

$$U_n = 2U_m \frac{\tau}{T} \frac{\sin(n\pi\tau/T)}{(n\pi\tau/T)}$$

Огибающая спектральных амплитуд следует функции $Si(x) = \sin(x)/x$. Первое значение нуля этой функции соответствует обратной величине длительности импульса

$$f_1^{Si=0} = 1/\tau$$

Другие нулевые значения следуют с интервалом $nf_1^{Si=0}$. На практике нулевые значения появляются не столь явно выраженными, как на рис. 1.10, так как из-за неизбежных асимметрий (например, экспоненциальных нарастаний и спада прямоугольных импульсов) они сглаживаются.

Постоянный коэффициент при функции $Si(x)$ равный $2U_m\tau/T$ при неизменном периоде пропорционален площади импульса $U_m\tau$. Таким образом, высокие узкие импульсы при низких частотах могут иметь такой же спектр, как низкие широкие. Поэтому в вышеприведенном примере спектральные амплитуды из-за меньшей на 50% площади импульсов имеют только половинное значение.

Огибающая амплитуд функции $Si(x)$ есть функция $1/x$. Для прямоугольных импульсов с бесконечно большой длительностью периода T спектральные линии и максимумы функции $Si(x)$ бесконечно сближаются. Получается известный спектр $1/f$ ступенчатой функции.

Подобным образом можно рассмотреть и другие формы импульсов с другими огибающими, например, треугольные импульсы, огибающая которых выражается функцией $Si^2(x)$

1.5.3. Представление непериодических функций времени в частотной области. Интеграл Фурье.

Ряд Фурье допускает представление в частотной области только периодических функций времени. Однако часто имеют дело с непериодическими функциями, характерными, например, для

коммутационных процессов, молнии или разрядов статического электричества и т. д.

При определении спектра непериодической импульсной функции выполним предельный переход, воспользовавшись комплексной формой записи ряда Фурье для периодических функций (пределы интегрирования $-T/2$ и $+T/2$):

$$u(t)_{\text{пер}} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} C_n e^{jn\omega_1 t} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \right] e^{jn\omega_1 t}$$

Так как в линейчатом спектре ряда Фурье расстояние между спектральными линиями соответствует

$$\Delta f = \Delta\omega / 2\pi = f_1 = 1/T$$

Можно также записать

$$u(t)_{\text{пер}} = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\Delta\omega \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \right] e^{jn\omega_1 t}$$

Далее выполняется предельный переход при $T \rightarrow \infty$ и $\Delta\omega \rightarrow 0$. При этом конечное расстояние между спектральными линиями $\Delta\omega$ за знаком суммы переходит в бесконечно малое расстояние $d\omega$, дискретная переменная $n\Delta\omega$ в непрерывную переменную ω , а сумма – в интеграл. Таким образом, получают интеграл Фурье для непериодической функции:

$$u(t)_{\text{непер.}} = \lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta\omega \rightarrow 0}} u(t)_{\text{пер}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \underbrace{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{j\omega t} dt \right)}_{\dot{X}(\omega)} e^{j\omega t} d\omega$$

где $\dot{X}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt$ - представляет собой преобразование Фурье

функции $u(t)$ называемое спектральной плотностью $u(t)$; $|\dot{X}(\omega)|$ носит название плотности распределения амплитуд. Для непериодической функции $u(t)$ обратное преобразование Фурье имеет вид:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{X}(\omega) e^{j\omega t} dt$$

Следовательно, преобразование Фурье и его обращение взаимобратны с точностью до множителя $1/2\pi$.

Название «спектральная плотность» происходит от того, что спектральная функция $\dot{X}(\omega)$ идентична линейчатому спектру \dot{C}_n , отнесенному к расстоянию между соседними частотами. Так как $T = 1/\Delta f = 2\pi/\Delta\omega$, получаем

$$\dot{C}_n = \Delta f \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-j\omega t} dt$$

Если отнести амплитуды \dot{C}_n к Δf и образовать предельное значение для $T \rightarrow \infty$ (соответственно $\Delta f \rightarrow 0$), получим

$$\lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta f \rightarrow 0}} \frac{\dot{C}_n}{\Delta \omega} = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{j\omega t} dt = \dot{X}(\omega),$$

иначе говоря, спектральную плотность.

Если, например, линейчатый спектр \dot{C}_n измеряется в вольтах, то спектральная плотность $\dot{X}(\omega)$ сравнимого однократного процесса имеет размерность В/Гц.

Очевидно, непериодические процессы тоже могут быть представлены как наложение синусоидальных или косинусоидальных колебаний. Однако в отличие от периодических процессов здесь участвуют все частоты от $-\infty$ до $+\infty$ с амплитудами $\dot{X}(\omega)df$. Так как при однократных процессах содержащаяся в одном импульсе конечная энергия распределяется на бесконечное множество частот, то амплитуда отдельной спектральной составляющей должна быть бесконечно малой. Чтобы избежать этой неопределенности, относят энергию импульса к частоте и получают, таким образом, спектральную плотность, предельное значение которой при $\Delta f \rightarrow 0$ остается конечным и как раз соответствует преобразованию Фурье.

1.5.4. Возможные диапазоны значений электромагнитных помех

Параметры помех, в зависимости от электромагнитной обстановки на энергообъекте могут изменяться в очень широком диапазоне. Возможные диапазоны значений параметров электромагнитных помех приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2.

Возможные диапазоны значений параметров помех

Параметр	Обозначение	Значение
Частота, Гц	f	0-10 ¹⁰
Максимальное значение напряжения, В	U_{max}	10 ⁻⁶ -10 ⁶
Скорость изменения напряжения, В/с	du/dt	0-10 ¹²

Таблица 1.2. (продолжение)

Напряженность электрического поля, В/м	E	$0-10^5$
Максимальное значение тока, А	I_{max}	$10^{-9}-10^5$
Скорость изменения тока, А/с	di/dt	$0-10^{11}$
Напряженность магнитного поля, А/м	H	$10^{-6}-10^8$
Время нарастания импульса, с	T_r	$10^{-9}-10^{-2}$
Длительность импульса, с	τ	$10^{-8}-10$
Энергия импульса, Дж	W	$10^{-9}-10^7$

1.5.5. Спектры некоторых периодических и импульсных процессов

В таблице 1.3. приведены «физические» спектральные плотности $2|\dot{X}(\omega)|$ некоторых импульсных процессов. В этой же таблице приведены графики «физических» спектральных плотностей в линейной и логарифмической системе координат.

Таблица 1.3.
Спектры некоторых импульсных процессов

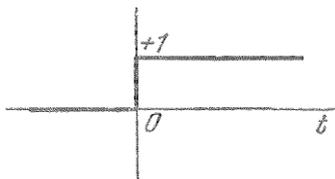
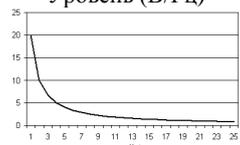
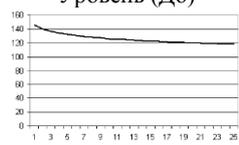
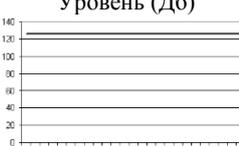
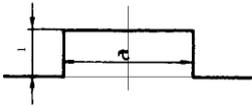
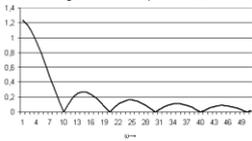
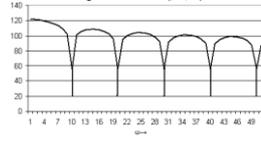
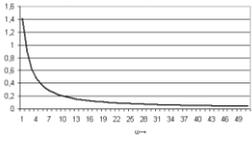
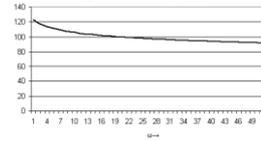
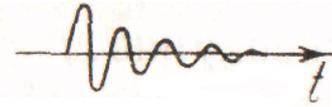
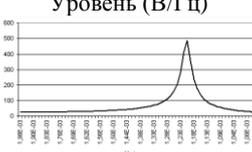
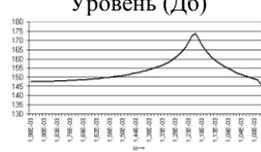
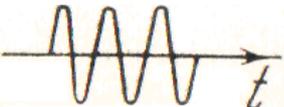
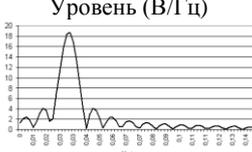
№п.п.	Форма импульса $f(t)$	Спектр импульса $2 \dot{X}(\omega) $
1	<p>Единичная функция $\sigma(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1/2 & t = 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$</p> 	<p>$\dot{X}(\omega) = \frac{1}{j\omega}$, $2 \dot{X}(\omega) = \frac{2}{\omega}$</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Уровень (В/Гц)</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Уровень (Дб)</p>  </div> </div>
2.	<p>Единичная импульсная функция</p> <p>$\delta(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \infty & t = 0 \\ 0 & t > 0 \end{cases}$</p> <p>$\int_{0_-}^{0_+} \delta(t) dt = 1$</p>	<p>$\dot{X}(\omega) = 1$, $2 \dot{X}(\omega) = 2$</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Уровень (В/Гц)</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Уровень (Дб)</p>  </div> </div>

Таблица 1.3.(продолжение)

<p>3.</p>	<p>Прямоугольный импульс $u(t) = h(\sigma(t + \tau/2) - \sigma(t - \tau/2))$</p>  <p>$h = 1;$ $\tau = 0,628$</p>	$\dot{X}(\omega) = 2h \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega}$ $2 \dot{X}(\omega) = 4h \left \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega} \right $  
<p>4.</p>	<p>Экспоненциальный импульс $u(t) = e^{\beta t} \sigma(t)$ $\beta = -1$</p> 	$\dot{X}(\omega) = \frac{1}{\beta + j\omega}$ $2 \dot{X}(\omega) = 2\sqrt{\frac{1}{\beta^2 + \omega^2}}$  
<p>5.</p>	<p>Затухающая синусоида $u(t) = e^{-\alpha t} \sin(\omega_1 t) \sigma(t)$ $\alpha = 0,04;$ $\omega_1 = 0,0314.$</p> 	$\dot{X}(\omega) = \frac{\omega_1}{\alpha^2 - \omega^2 + \omega_1^2 + 2j\alpha\omega}$ $2 \dot{X}(\omega) = 2\omega_1 \sqrt{\frac{1}{(\alpha^2 - \omega^2 + \omega_1^2)^2 + 4\alpha^2\omega^2}}$  
<p>6.</p>	<p>Импульс в форме отрезка синусоиды, состоящего из целого числа периодов n $u(t) = (\sigma(t + nT/2) - \sigma(t - nT/2)) \sin \omega_0 t$ $n = 3;$ $\omega_0 = 0,0314$</p> 	$\dot{X}(\omega) = (-1)^n \frac{2j\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin n\pi \frac{\omega}{\omega_0}$ $2 \dot{X}(\omega) = 2 \left (-1)^n \frac{2j\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin n\pi \frac{\omega}{\omega_0} \right $  

1.5.6. Учет путей передачи и приемников электромагнитных помех

Очень многие задачи электротехники сводятся к изучению результатов воздействия некоторых процессов на устройство той или иной степени сложности. Схемы замещения этих устройств, используемые при анализе электрических процессов, включают схемы замещения как составляющих эти устройства элементов, так и различные паразитные связи (активные, индуктивные и емкостные).

Элементы устройств принято подразделять на две основные группы: *нелинейные неинерционные* и *линейные инерционные* (или динамические). Принципиально любой элемент электротехнического устройства необходимо рассматривать как *нелинейный инерционный*. Однако решение задач при столь общих предположениях связано со значительными математическими трудностями. Поэтому указанное выше разделение элементов на линейные и нелинейные (неинерционные) является целесообразным. Погрешность от подобной идеализации может быть оценена в конкретной задаче. Системы, содержащие в своем составе линейные инерционные элементы будут соответственно классифицироваться как линейные инерционные, а системы, содержащие в своем составе нелинейные неинерционные элементы соответственно нелинейными неинерционными.

В инерционной системе значения процесса $y(t)$ на ее выходе зависят не только от значения процесса $x(t)$, действующего на входе в тот же момент времени t , но и от его значений в другие моменты времени. Линейная инерционная система характеризуется тем, что величина $y(t)$ получается *суперпозицией* (сложением) всех значений $x(t)$, каждое из которых умножается на весовой коэффициент $h(t, \tau)$, зависящий как от момента приложения τ процесса ко входу, так и от момента наблюдения t процесса на выходе системы. Если в процессе наблюдения параметры системы остаются неизменными, то значение весового коэффициента $h(t, \tau)$ зависит только от разности $t - \tau$: $h(t, \tau) = h(t - \tau)$. В этом случае значение процесса на выходе системы $y(t)$ связано с процессом на входе системы $x(t)$ следующим соотношением:

$$y(t) = \int_0^{+\infty} h(t - \tau)x(\tau)d\tau.$$

Функция $h(t, \tau)$ получила название *импульсной переходной функции*. Данная функция является реакцией системы на ее выходе при воздействии на вход единичной импульсной функции $\delta(t)$.

Вместо импульсной переходной функции в качестве характеристики линейной инерционной системы при анализе в частотной области используют так называемую передаточную функцию $\dot{k}(\omega)$ представляющую собой преобразование Фурье от $h(t, \tau)$:

$$\dot{k}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(u) e^{-j\omega u} du,$$

Где $u = t - \tau$.

Импульсная переходная функция линейной системы с постоянными параметрами связана с передаточной функцией обратным преобразованием Фурье:

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{k}(\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Модуль и аргумент передаточной функции $k(j\omega)$ называют частотной $C(\omega)$ и фазовой $\varphi(\omega)$ характеристиками линейной системы:

$$\dot{k}(\omega) = C(\omega) e^{j\varphi(\omega)}.$$

Шириной полосы пропускания частотной характеристики называют ширину основания прямоугольника, высота которого равна максимальной ординате $C^2(\omega_0)$, а площадь – площади под кривой квадрата частотной характеристики:

$$\Delta_c = \frac{\int_0^{\infty} C^2(\omega) d\omega}{C^2(\omega_0)}.$$

Если частотная характеристика имеет резко выраженную область резонанса в окрестности частоты ω_0 , и если $\omega_0 \gg \Delta_c$, то линейная система с такой характеристикой называется *узкополосной*.

Передаточная функция линейной инерционной системы позволяет достаточно просто определить спектральную плотность процесса на выходе системы при известной спектральной плотности процесса на входе системы:

$$\dot{X}_2(\omega) = \dot{k}(\omega) * \dot{X}_1(\omega)$$

Поэтому, если перемножить спектральную плотность процесса на выходе источника помехи (и соответственно на входе канала передачи помехи) $\dot{X}_H(\omega)$ с передаточной функцией канала передачи помехи $\dot{k}_{cb}(\omega)$, и далее с передаточной функцией приемника, подверженного

помехе $\dot{k}_{np}(\omega)$, то получим спектральную плотность помехи в приемнике $\dot{X}_n(\omega)$:

$$\dot{X}_n(\omega) = \dot{X}_n(\omega) \dot{k}_{cs}(\omega) \dot{k}_{np}(\omega)$$

В логарифмическом масштабе умножение соответствует сложению. Поэтому, если суммировать кривую плотности распределения амплитуд входной помехи с амплитудно-частотной характеристикой тракта передачи, например, с кривой затухания фильтра, то получим график плотности распределения амплитуд помехи после фильтра, а после графического обратного преобразования также ее приблизительный временной ход. Таким образом, с помощью измеренных спектров помех могут быть рассчитаны требуемые помехозащитные фильтры, экраны, испытательные импульсы для моделирования и т.д.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимается под электромагнитной совместимостью технических средств?
2. Что понимается под организационным обеспечением электромагнитной совместимости?
3. Что понимается под техническим обеспечением электромагнитной совместимости?
4. Перечислите виды электромагнитных помех.
5. Поясните понятия узкополосных и широкополосных электромагнитных помех.
6. Поясните понятия синфазных и противофазных электромагнитных помех.
7. Поясните понятия «земля» и «масса».
8. Поясните термины «уровень помехи» и «помехоподавление». Как для их характеристики используются относительные логарифмические масштабы?
9. Что такое децибел и непер? Как они соотносятся?
10. Как осуществляется переход представления электромагнитных помех из временной области в частотную область и наоборот?
11. Что такое спектр периодической помехи. Какой математический аппарат применяется для его получения?
12. Что такое спектральная плотность распределения амплитуд импульсной помех

2. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

Источники электромагнитных влияний могут быть естественного или искусственного происхождения.

Электромагнитные влияния наблюдаются во всем спектре электромагнитных колебаний начиная с частоты 0 Гц. Это электростатические и магнитостатические влияния постороннего поля на стрелочные измерительные приборы, осциллографы и измерительные мосты, влияния фона переменного тока частотой 50 Гц, линий электропередач, сверхнизкочастотных коммуникационных систем, радио- и телевизионных передатчиков, электро медицинской аппаратуры и устройств, радиолокационной техники, микроволновых печей и космических источников. К этому добавляются влияния многочисленных переходных процессов в электрических цепях разного рода, чьи широкополосные высокочастотные излучения охватывают большие участки спектра. В зависимости от того, возникают ли электромагнитные влияния при преднамеренном производстве и применении электромагнитных волн или они являются паразитными и имеют мало общего с первичной функцией источника, различают функциональные и нефункциональные источники помех.

Функциональные источники - это прежде всего радио- и телепередатчики, которые распространяют электромагнитные волны через передающие антенны в окружающую среду в целях передачи информации. К этой группе относятся также все устройства, которые излучают электромагнитные волны не для коммуникативных целей, например генераторы высокой частоты для промышленного или медицинского применения, микроволновые печи, устройства радиуправления и т. д.

Нефункциональные источники. К ним относятся автомобильные устройства зажигания, люминесцентные лампы, сварочное оборудование, релейные и защитные катушки, электрический транспорт, выпрямители тока, контактные и бесконтактные полупроводниковые переключатели, проводные линии и компоненты электронных узлов, переговорные устройства, атмосферные разряды, коронные разряды, коммутационные процессы в сетях высокого напряжения, разряды статического электричества, быстро меняющиеся напряжения и токи в лабораториях техники высоких напряжений, при проведении электрофизических экспериментов, технологическом использовании мощных импульсов и т. д.

В то время как соблюдение электромагнитной совместимости функциональных источников оказывается сравнительно простым (их

природа как передатчиков чаще всего очевидна с самого начала), то выявление нефункциональных источников оказывается сложной задачей. Их существование проявляется чаще всего в процессе поиска причины неожиданного аварийного поведения приемной системы. Поэтому идентификация нефункциональных источников помех является важной задачей при обеспечении ЭМС. Только когда установлены источники помех и их механизмы связи, обеспечение электромагнитной совместимости оказывается сравнительно простым.

2.1. Классификация источников помех

Источники электромагнитной энергии классифицируются в основном по картине их проявления в диапазоне частот, иными словами, по излучаемому ими высокочастотному спектру. Различают узкополосные и широкополосные источники. Как уже отмечалось, процесс называется **узкополосным**, когда энергия спектра сосредоточена в основном в относительно узкой полосе частот около некоторой фиксированной частоты ω_0 или **широкополосным**, если указанное условие не выполняется (рис. 2.1.).

Дадим количественные оценки определения широкополосного и узкополосного источника для чего введем понятие энергетического спектра импульсного или периодического процесса.

Для импульсного процесса энергетический спектр определяется формулой:

$$F(\omega) = \frac{2}{T} |\dot{X}(\omega)|^2,$$

где T – длительность импульса.

Для периодического процесса

$$F(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varepsilon}{2} |\dot{C}_n|^2 \delta(\omega - n\omega_0),$$

Где $\varepsilon = 2$ при $n=0$ и $\varepsilon = 1$ при $n \geq 1$.

Пусть энергетический спектр процесса имеет максимальное значение при частоте ω_0 равное $F(\omega_0)$. Тогда *шириной полосы энергетического спектра* назовем величину площади под кривой энергетического спектра, отнесенную к величине энергетического спектра на частоте ω_0 :

$$\Delta_{\Pi} = \frac{1}{2\pi F(\omega_0)} \int_0^{\infty} F(\omega) d\omega.$$

Эту величину можно трактовать как ширину равномерного в полосе Δ_{Π} энергетического спектра процесса, эквивалентного данному по средней мощности.

С учетом введенного определения Δ_{Π} условие узкополосности процесса определяется количественно, как $\omega_0 \gg \Delta_{\Pi}$. Если данное условие не выполняется, процесс следует рассматривать как широкополосный.

Источники узкополосных помех, как правило, являются искусственно созданными человеком. Это, например радиопередатчики, которые на предоставленных им частотах излучают больше мощности, чем допустимо, любительские радиопередатчики, устройства, излучающие высшие гармоники, возникающие вследствие нелинейности элементов передатчиков, медицинские и промышленные высокочастотные генераторы или просто электросеть частотой 50 Гц. Такие источники характеризуются амплитудой или действующим значением помехи при соответствующей частоте (линейчатый спектр).

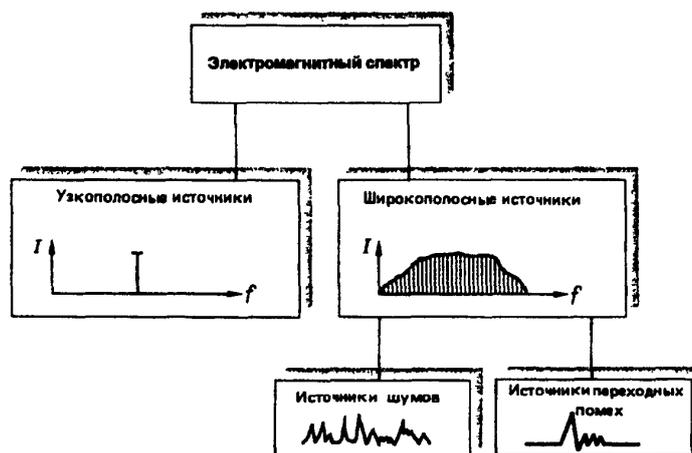


Рис. 2.1. Разделение передатчиков электромагнитной энергии на узкополосные и широкополосные источники

Широкополосные помехи обладают спектром с очень плотно или даже бесконечно близко расположенными друг к другу спектральными линиями (непрерывный спектр, спектральная плотность распределения амплитуд). Типичные представители - это естественные помехи (например, космический шум), а также все непериодические переходные процессы.

Источники широкополосных помех целесообразно подразделить также на источники шумовых и переходных помех. Шумовые помехи состоят из многих, вплотную соседствующих или перекрывающихся импульсов различной амплитуды, которые нельзя разделить. Переход-

ные помехи четко отличимы одна от другой и обладают сравнительно малой степенью повторяемости, проявляются в виде импульсов. Помехи могут быть распределены статистически, например, при короне на воздушной линии, быть периодическими, например в цепях фазовой отсечки тиристорных устройств или непериодическими, например при выключении катушек реле. Классическая электромагнитная совместимость, главной целью которой был контроль радиопомех, и современная интерпретация электромагнитной совместимости существенно различаются. Согласно первой, вполне могут быть допущены отдельные переходные импульсные помехи, т. е. одноразовые или редко повторяющиеся помехи в виде импульсов, в то время как при определенных обстоятельствах однократный импульс помехи в устройствах управления электростанцией может привести к дорогостоящим простоям, а в авиационных и космических устройствах - к тяжелым последствиям.

Источники периодических несинусоидальных помех, например сети вентиляльных преобразователей тока с линейчатым спектром высших гармоник, являются в зависимости от ширины полосы приемника узкополосными или широкополосными источниками, так как одна или несколько линий спектра могут быть расположены внутри полосы приемника. Широкополосные сигналы следует различать и по когерентности. При когерентных широкополосных сигналах реакция приемника пропорциональна ширине его полосы. Для некогерентных сигналов, спектральные составляющие которых соотносятся произвольно, реакция приемника пропорциональна квадрату корню ширины его полосы.

2.2. Источники узкополосных помех

2.2.1. Передатчики связи

Передатчики связи производят электромагнитную энергию в целях передачи или получения информации и излучают ее контролируемым образом в окружающую среду (функциональные передатчики). Их можно грубо разделить на пять групп (рис. 2.2.).

Разрешенные мощности передач на соответствующих частотах установлены в зависимости от регионального положения, времени и направленности передач в согласии с Международным телекоммуникационным союзом (ITU) и добровольно подчиняющимся ему национальными учреждениями для распределения спектра среди пользователей. У работающих на одной и той же частоте передатчиков связи электромагнитная совместимость основывается на их

пространственном отдалении друг от друга или ограниченном радиусе действия.



Рис. 2.2. Классификация передатчиков связи

Для поддержания сложившегося в международных отношениях договорного использования спектра ввод в эксплуатацию нового передатчика требует разрешения властей, которое может быть выдано только после проверки или доказательства его ЭМС. Радиоконтрольные службы осуществляют надзор за соблюдением технической спецификации передатчиков, обнаруживают незарегистрированные передатчики и радиопомехи и т. д. Наличие разрешения властей на эксплуатацию не препятствует передатчикам связи выступать в качестве мощных источников помех, несмотря на то, что в их непосредственной близости должны работать чувствительные приемные системы. Поэтому не следует удивляться, если автоматизированные системы действуют с ошибками, когда имеющий разрешение радиотелефонный аппарат слишком близко приближается к ним. По этой причине часто отказываются от радиотелефонов в непосредственной близости от систем управления технологическими процессами и энергетическими системами. Излучения передатчиков связи, как правило, узкополосные и чаще содержат несущую частоту, боковые полосы, а также гармонические и негармонические высшие составляющие. Передатчики связи функционируют, начиная от диапазона инфранизкой частоты в несколько десятков герц (для связи с подводными лодками) до нескольких сотен гигагерц.

2.2.2. Генераторы высокой частоты

Большое количество высокочастотных генераторов средней и большой мощности используется в промышленности, науке и медицине, а также в домашнем хозяйстве, например генераторы для высокочастотного нагрева, индукционной закалки, пайки и плавки, диэлектрической сушки клея, электротерапии, микроволновые печи. К ним следует добавить генераторы для имплантации ионов при катодном распылении, циклические высокочастотные ускорители элементарных частиц (циклотроны, синхротроны) и т. д. Все перечисленные приборы целенаправленно производят высокочастотную энергию, чтобы вызвать локальные электрофизические действия. Поэтому они относятся к группе функциональных передатчиков.

Посредством переменных магнитных полей 50 Гц - 1 МГц индукционными вихревыми токами могут быстро нагреваться проводящие детали. Глубина проникновения поля в деталь зависит от частоты.

Посредством высокочастотных электрических полей за счет освобожденного тепла вследствие объемного эффекта трения вибрирующих диполей можно быстро нагревать обладающие потерями диэлектрики. Частоты лежат, как правило, в интервале 1-100 МГц.

Электрические, магнитные и электромагнитные поля используются в медицине для теплового лечения суставов и внутренних органов (27—2450 МГц). Кроме этого, генераторы высокой частоты для возбуждения ультразвуковых колебаний находят применение в терапии (примерно 1 МГц) и диагностике (1—5 МГц), электромагнитные поля частотой, например, 2450 МГц, используются в микроволновых печах.

В фундаментальных исследованиях, испытаниях материалов, лучевой терапии, литографии ускоряют элементарные частицы до энергии 20 ГэВ при частотах 10—200 МГц.

Большинство высокочастотных устройств работают на частотах 13,56 МГц, 27,12 МГц, 40,68 МГц, 433,92 МГц, 2450 МГц, 5800 МГц, 24 125 МГц, которые предусмотрены для вышеупомянутых аналогичных применений. При достаточном экранировании установки могут применяться также другие частоты. При работе на предусмотренных частотах следует экспериментально доказать, что уровни высших гармоник излучений установок не превышают граничных значений для источников радиопомех. Кроме этого при наличии излучения следует обеспечить совместимость установок со средой обитания человека.

2.2.3. Радиоприемники. Приборы с кинескопами. Вычислительные системы. Коммутационные устройства

Хотя рассматриваемые в этом разделе приборы в основном являются объектами электромагнитных влияний, они нередко сами создают помехи. Все названные приборы для выполнения своих функций нуждаются в собственных генераторах, которые через входные и выходные провода, а также через шасси и корпуса отдают электромагнитную энергию во внешнюю среду.

1. Супергетеродинные приемники смешивают частоту входного высокочастотного напряжения с частотой гетеродина в так называемую промежуточную частоту, поступающую в усилители промежуточной частоты, и излучают как установленную частоту гетеродина, так и постоянную промежуточную частоту вместе с высшими гармониками. Промежуточная частота радиовещания составляет при амплитудной модуляции (АМ) 455 кГц, при частотной модуляции (ЧМ) 10,7 МГц. У приемников телевизионного вещания промежуточная частота звукового сопровождения составляет 5,5 МГц (ФРГ), 6,5 МГц (Восточная Европа) или 4,5 МГц (США), промежуточная частота изображения - 38,9 МГц, их средняя частота 36,5 МГц.

2. Приборы изображения (телевизионные приемники, терминалы вычислительных машин, осциллографы) создают помехи благодаря наличию в них генераторов развертки, используемых для построения изображения. Частота строк составляет 15,75 кГц у простых и примерно 35 кГц и даже 65 кГц у профессиональных мониторов. У высокочастотных осциллографов частота генератора отклоняющего напряжения может достигать 1 МГц.

3. Вычислительные системы выступают как передатчики помех от таймера центрального процессора, а также из-за влияния периферийных приборов (терминалы, печатающие устройства) и относящихся к ним соединительных линий. Коммутационные устройства напоминают о себе чаще всего при основной частоте колебаний выше 16 кГц в результате излучений, как на основной частоте, так и на частотах гармоник.

Излучения перечисленных в этом разделе приборов не должны превышать допустимые уровни радиопомех, установленные в соответствующих нормативных документах. При большой плотности расположения узла вычислительной машины - монитора, печатающего устройства, плоттера и других - может иметь место неправильное ее функционирование. Как правило, эти помехи можно устранить путем увеличения расстояния и соответствующей пространственной ориентацией компонентов.

2.2.4. Влияние на сеть

Под влиянием на сеть понимают появление высших гармонических составляющих напряжения и его колебания в сетях электроснабжения за счет электрического оборудования с нелинейной или меняющейся по времени вольтамперной характеристикой. Так, трансформаторы и двигатели с высокой индуктивной нагрузкой, управляемые при помощи электронных регуляторов приводы, вентильные преобразователи тока для электролиза, газоразрядные лампы, телевизионные приемники даже при синусоидальном напряжении сети вызывают несинусоидальные токи, которые вдоль их пути к электрооборудованию создают на полных сопротивлениях сети несинусоидальные падения напряжения. Падения напряжения, создаваемые токами потребителей, ведут к искажению синусоидальной формы напряжения сети с частотой 50 Гц и к появлению гармоник. Субгармоники, вызванные дуговыми электропечами и электросварочными аппаратами, достигают миллигерцевого диапазона и ведут к периодическим и непериодическим колебаниям напряжения. Как высшие гармоники, так и колебания напряжения могут привести к повреждению технических сооружений, электрическим и термическим перегрузкам конденсаторов и двигателей, к ошибочному функционированию устройств измерения, управления и регулирования, а также систем обработки данных, управления, линий передачи данных, приемников кругового обзора, устройств связи. При колебаниях напряжения возникает также физиологическое воздействие на человека, когда колебания яркости осветительных устройств (мерцания или фликер) воспринимаемые глазом, вызывают нежелательные воздействия на мозг. В то время как вентильный преобразователь тока, как правило, вызывает только гармоники кратные основной частоте, порядок которых для выпрямителя можно вычислить, например, согласно $k = np \pm 1$, где p - т.н. пульсность преобразователя, а n - числа натурального ряда ($n=1,2,3,\dots$) преобразователи частоты и переходные процессы вызывают помехи с любыми частотами. Наконец, к влиянию сети относят также асимметрию, вызванную включенными между фазами однофазными потребителями, например сварочными машинами или дуговыми электропечами.

2.2.5. Влияние линий электроснабжения

В густонаселенных областях воздушные линии электропередачи высокого напряжения с частотами 50 Гц и линии связи телеуправления газопроводами и нефтепроводами часто располагаются параллельно друг другу на протяженных участках. Вследствие омической, индуктив-

ной и емкостной связей возникают нежелательные влияния на линии связи и линии передачи данных, а также на устройства катодной защиты от коррозии трубопроводов. Кроме этого, недопустимо высокие напряжения прикосновения могут представлять угрозу для людей. Влияния сети разделяются на долговременные, кратковременные и импульсные. К источникам долговременного влияния относят рабочие токи при нормальной работе, токи заземления в сетях со скомпенсированной нейтралью, а также в проводах, находящихся под высоким напряжением и обладающих большой емкостью относительно земли. Источниками кратковременных влияний являются токи коротких замыканий и токи замыкания двух фаз на землю длительностью в несколько десятых секунды. Наконец, импульсные влияния возникают в результате перенапряжений при переключениях. Если раньше проблемы влияния решались исключительно мерами со стороны линии электропередачи, например путем симметричного расположения проводов трехфазной линии в виде равностороннего треугольника (суммарная напряженность поля примерно равна нулю), скручиванием несимметрично расположенных проводов, резонансным заземлением нейтрали (малые токи замыкания фаз на землю), то в 50-е годы было установлено заземление нейтрали сетей напряжением 220 кВ и появившихся в это время сетей 380 кВ. Влияние линий сильного тока является классической областью ЭМС.

2.3. Источники широкополосных импульсных помех

2.3.1. Исходный уровень помех в городах

Вследствие высокой плотности населения и движения транспорта в городах имеет место значительный исходный уровень широкополосных помех, который возникает от систем зажигания автомашин, городских транспортных магистралей, домашних приборов, газоразрядных ламп, местных генераторов, приборов цифровой техники. Измеренные в прошлом в разных городах исходные уровни помех имеют различный характер, который зависит от географического положения города и времени года. В национальных стандартах приведены уровни помех, различающиеся на 20—40 дБ в зависимости от вида транспорта (метро, трамвай на постоянном или переменном токе), а также от уровня общей плотности движения (включая воздушные сообщения).

Подробнее рассмотрим некоторые типичные источники широкополосных помех.

2.3.2. Автомобильные устройства зажигания

При прерывании первичного тока $i_1(t)$ в катушке зажигания возникает изменение тока $di_1(t)/dt$. Связанное с этим изменение магнитного потока $d\Phi_1(t)/dt$ индуцирует во вторичной обмотке катушки зажигания высокое напряжение $u_2(t)$ (рис.2.3).

Небольшие паразитные напряжения индуцируются также и в других проводящих контурах этой и соседних автомашин (магнитная связь проводящих контуров). Индуцируемый в обмотке высокого напряжения импульс вызывает на проводах зажигания высокую скорость изменения напряжения $du_2(t)/dt$, которая вследствие тока смещения $i_{cm} = C_{нар} du_2(t)/dt$ через паразитные емкости также может вызывать в соседних контурах и проводниках помехи (емкостная связь).

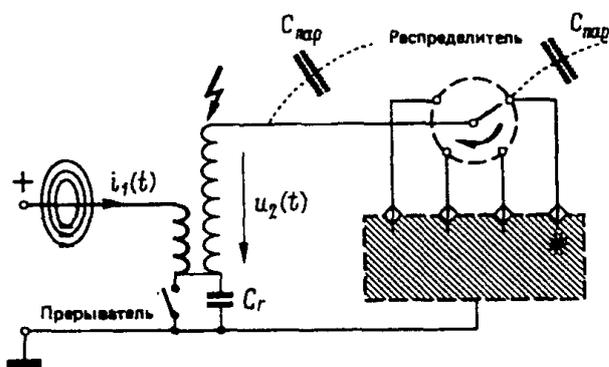


Рис. 2.3. Возбуждение импульса высокого напряжения в автомобильных устройствах зажигания:

C_r - искрогасительный конденсатор для защиты контактов прерывателя;
 $C_{нар}$ - паразитные емкости.

При разрыве тока распределителем в цепях зажигания в результате разряда емкости вторичной обмотки вновь возникают быстрые изменения напряжения и тока, которые за счет индукции и взаимного влияния вызывают помехи. В зависимости от того, соединены ли соседние системы петель или звездой и являются ли они высокоомными или низкоомными, влияние имеет емкостный или индуктивный характер. Типичные плотности амплитуд помех по напряженности электрического поля вблизи городских улиц лежат между -20 и $+20$ дБ мкВ/м/кГц. Частоты помех достигают гигагерцевого диапазона.

2.3.3. Газоразрядные лампы

Люминесцентные лампы низкого напряжения, встречающиеся в домашнем хозяйстве, офисах, универсамах, могут являться источниками помех (рис. 2.4).

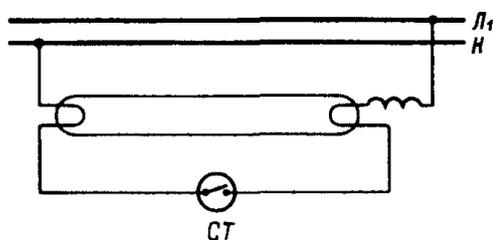


Рис. 2.4. Низковольтная люминесцентная лампа с катушкой индуктивности ограничения тока и стартером тлеющего разряда СТ

При включении в стартере СТ (лампа тлеющего разряда с биметаллическим электродом) возникает тлеющий разряд, в результате чего выделяется тепло, деформирующее биметаллический электрод, который замыкает цепь тока спиралей накала обоих главных электродов люминесцентной лампы. Одновременно замкнутый контакт гасит тлеющий разряд в стартере. После охлаждения биметаллического электрода ключ стартера вновь размыкается, причем разрыв приводит к возникновению на катушке индуктивности напряжения самоиндукции $Ldi(t)/dt$ в несколько киловольт. Это импульсное напряжение зажигает между предварительно нагретыми главными электродами газовый разряд.

При последующих прохождении тока через нуль разряд затухает, но затем периодически зажигается вновь при каждом полупериоде напряжения сети, поскольку напряжение зажигания и напряжение горения лампы в результате повышения температуры электродов соответственно понизились, (нагревание вызывает уменьшение анодного и катодного падений напряжения). Недостаточная температура электродов ведет к известным многократным попыткам зажигания люминесцентных ламп. При стационарной работе стартер тлеющего разряда больше не срабатывает, так как его напряжение зажигания больше напряжения горения и напряжения повторного зажигания люминесцентной лампы с теплыми электродами.

Люминесцентные лампы низкого напряжения создают помехи не только при включении вследствие появления одного или нескольких импульсов напряжения сравнительно большой амплитуды, но также при работе в результате периодических затуханий и новых зажиганий раз-

ряда или после каждого прохождения тока через нуль при амплитудах напряжения всего в несколько сотен вольт. Так как сильные помехи возникают только при включении, то они проявляются при радиоприеме в виде однократного щелчка или нескольких, едва ли поэтому являются важными. Однако они могут играть очень большую роль в другой ситуации, например, если лампа находится по соседству с высокочувствительными медицинскими и другими измерительными приборами, а также с пациентом, имеющим сердечный стимулятор. Электромагнитные влияния, излучаемые во время стационарной работы на основной частоте 100 Гц, при малых расстояниях до приемника и отсутствии мер помехозащиты, всегда создают помехи радиоприему в диапазоне средних и длинных волн. Помехи появляются преимущественно вдоль проводов питания ламп. Люминесцентные лампы с электронными включающими устройствами содержат генератор высокой частоты (30 - 50 кГц), который питает лампу через LC-звено (для ограничения тока). Типичные значения содержания высших гармоник тока питания: 90% — третья гармоника, 75% — пятая и 60% — седьмая гармоника. Эти высшие гармоники в зависимости от требований стандарта должны уменьшаться посредством соответствующей фильтрации до допустимых значений, что связано с увеличением габаритных размеров лампы и затрат на ее изготовление. Наконец, наряду с чистым воздействием лампы на сеть модулированное низкой частотой инфракрасное излучение может также оказывать влияние, например при инфракрасном телеуправлении. Люминесцентные лампы для более высоких напряжений (например, световая реклама) не нуждаются в предварительном нагревании, так как их напряжение питания в каждом отдельном случае без особых трудностей может быть скоординировано с соответствующими напряжениями зажигания и горения.

Газоразрядные лампы высокого давления могут создавать существенные помехи вплоть до диапазона высоких и сверхвысоких частот (более быстрый пробой при высоком давлении и малых расстояниях между электродами). Высокая температура электродов и газа позволяет уменьшить электромагнитные влияния из-за меньших значений напряжений при обрывах тока и возобновлениях разряда.

2.3.4. Коллекторные двигатели

При перемене направления тока в двигателях постоянного тока и в универсальных коллекторных двигателях в обмотках и проводниках происходят быстрые изменения токов. Если при отделении края щеток и коллекторных пластин ток не равен нулю, то, как и у всех размыкаю-

щихся проводящих ток контактных выключателей он поддерживается через электрическую дугу (искрение щеток). При обрыве дуги возникает быстрое изменение тока $di(t)/dt$. Последнее индуцирует во включенных в цепь катушках индуктивности напряжение самоиндукции $Ldi(t)/dt$, а также в возможных соседних проводящих контурах напряжение взаимной индукции $Mdi(t)/dt$. Для локального ограничения помех включают последовательно в цепь катушки индуктивности, а параллельно со щетками — конденсаторы. Большие двигатели постоянного тока имеют специальные дополнительные полюса и компенсационные витки, которые индуцируют в обмотках якоря противодействующие напряжения и в момент отделения края щетки от края коллекторной пластины обесточивают обмотку.

2.3.5. Воздушные линии высокого напряжения

На поверхности проводов фаз воздушных линий высокого сверхвысокого напряжения напряженность электрического поля превышает в отдельных местах значение электрической прочности воздуха, что ведет к частичным разрядам. Вследствие неоднородности поля эти разряды существуют непосредственно вблизи провода, образуя так называемый коронный разряд. Частичные разряды вызывают в проводах импульсы тока со временами подъема и спада в диапазоне пикосекунд, которые распространяются вдоль проводов в виде электромагнитных волн. В совокупности многочисленные накладывающиеся друг на друга импульсы разрядов образуют источник шумовых помех, который ведет к нарушению радиоприема. Его спектр распространяется вплоть до диапазона ультравысоких частот.

Еще одним источником помех, который чаще всего наблюдается на линиях среднего напряжения, являются искровые разряды между неплотно соединенными металлическими частями или между металлическими частями и поверхностями изолятора. Спектр этих искровых разрядов простирается до очень высоких частот и вызывает в первую очередь помехи телевизионному вещанию.

Радиопомехи воздушных линий высокого напряжения в сильной степени зависят от погоды (плотности воздуха, дождя, инея) и формы верхней части опор. Несмотря на эти сложные зависимости, существуют документы, разработанные на основе обширных международных измерений, которые в определенной степени позволяют прогнозировать радиопомехи.

2.4. Источники широкополосных переходных помех

2.4.1. Разряды статического электричества

При импульсном разряде статического электричества в виде искры возникают переходные напряжения и токи, связанные с переходными электрическими и магнитными полями, которые вызывают не только функциональные помехи в вычислительных машинах, пишущих машинках, телефонных аппаратах или других электронных приборах, но могут вызвать разрушения электронных компонентов. В то время как комплексные системы, например клавиатуры вычислительных машин, программируемые управляющие устройства, являются сравнительно стойкими к разрядам статического электричества, то при непосредственном касании полупроводниковых элементов и электронных узлов слабые разряды статического электричества, которые оператор при определенных обстоятельствах совершенно не замечает, оказываются достаточными для повреждения полупроводниковых элементов.

Заряды статического электричества возникают в виде скопления носителей зарядов одной полярности при разделении сред, до этого плотно соприкасавшихся, из которых по крайней мере одна должна быть изолятором (иначе сразу бы возникла компенсация зарядов). Они появляются, например, при ходьбе по синтетическим коврам, вставании со стульев, соприкосновения с элементами из пластмасс, сбегании бумажных или пластмассовых лент с роликов, при протекании изолирующих жидкостей по трубам, завихрении пыли, выбросе газа из ракет, трении воздуха с летающим телом и т. д. В зависимости от взаимодействующих материалов заряды могут иметь положительную или отрицательную полярность. Наиболее часто проблемы ЭМС возникают в результате разрядов статического электричества между объектом и телом человека или малогабаритной мебелью (стульями, креслами, тележками с измерительными приборами и т.д.). Поэтому ниже подробнее представлены эти источники электромагнитных влияний.

В зависимости от обуви, покрытия пола и влажности воздуха человек может заряжаться примерно до 30 кВ. Начиная с этого напряжения, наступают заметные частичные разряды, которые так же, как у разрядников самолетов, вызывают увеличение проводимости окружающей среды. В результате устанавливается стационарный потенциал равновесия. Обычно возникающие при ходьбе по коврам потенциалы имеют значение от 5 до 15 кВ. Такого же порядка, однако, несколько меньшими по значению вследствие больших емкостей оказываются потенциалы мебели. Потенциалы до 2000 В часто не принимаются во внимание, од-

нако они вполне достаточны для того, чтобы повредить полупроводниковые компоненты.

Накопленная энергия в зависимости от емкости заряженного тела, равной 50 - 1500 пФ (емкость человека — 150 пФ) может составлять несколько десятых долей джоуля. Само по себе существование разрядов статического электричества редко создает проблемы ЭМС, например при разрядке лимбов измерительных приборов, экранов телевизоров и т. Д. Проблемы возникают при быстром импульсном разряде между заряженными телами, во время которого появляются импульсы тока со временем нарастания в наносекундном или субнаносекундном диапазоне. Не быстрые изменения напряжений, а импульсные разрядные токи и связанные с ними изменяющиеся во времени магнитные поля ведут, как правило, к нежелательным электромагнитным влияниям. Во многих случаях феномен разрядов статического электричества можно с хорошим приближением смоделировать при помощи сравнительно простой схемы замещения (рис. 2.5).

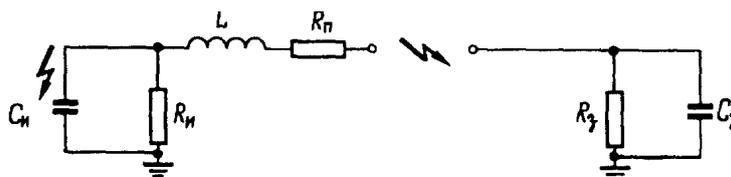


Рис 2.5. Схема замещения цепи разряда заряженного тела человека или заряженного проводящего предмета:

C_u, R_u - эквивалентные параметры замещения статически заряженного тела;

R_n - последовательное сопротивление;

C_3, R_3 - емкость и сопротивление по отношению к земле объекта, через который происходит разряд или перезаряд

Сопротивление R_n в зависимости от источника помех имеет примерные значения: для человека 1 кОм, для малой мебели от 10 до 50 Ом. Если рассматривать разряд непосредственно у земли ($R_3 \rightarrow 0, C_3 \rightarrow \infty$) и принять индуктивность цепи разряда 1 мкГн/м, то в первом случае $R_n \gg \omega L$, т. е. разряд затухает аperiodически с постоянной времени $T = C_u R_n$. Во втором случае $R_n \ll \omega L$, т. е. имеет место колебательный разряд с частотой $f = 1/2\pi\sqrt{LC_u}$ (рис. 2.6).

Время нарастания тока можно оценивать постоянной времени L/R_n . Типичную крутизну фронта тока составляют несколько десятков ампер в наносекунду, типичные максимальные амплитудные значения тока от 2 до 50 А. Обычно при разряде с тела человека имеет место большая крутизна фронта тока, при разрядке с предметов - большие амплитуды тока. В обоих случаях это объясняется различными значениями сопротивления R_n .

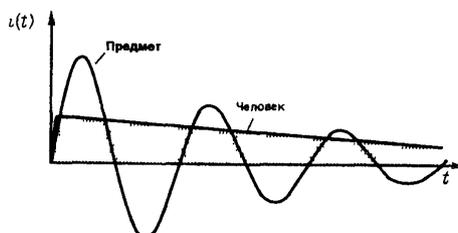


Рис. 2.6. Кривая изменения тока при разряде тела человека или проводящего предмета (например, малогабаритной мебели)

Параметры тока и наблюдаемое изменение его во времени колеблются в широких границах. При разряде с тела человека разряд различается в зависимости от того, исходит ли искра с кончика пальца, с большой площади тела или от инструмента (гаечный ключ), который находится в руке и т.д. Искра обладает сильно нелинейными свойствами. При слабом заряде, т.е. при потенциалах тела человека ниже примерно 8 кВ, а для проводящих предметов ниже примерно 3 кВ, искра при определенных обстоятельствах, вследствие недостаточного получения дополнительных зарядов из соседних с ней областей прерывается на короткое время и вновь зажигается, когда потенциал зоны разряда (например, кончик пальца) в результате дополнительного притока зарядов вновь поднимется. Формы кривых тока имеют в этом случае сложный вид, особенно фронт импульса. Для описания этих вариантов сосредоточенные компоненты простой схемы замещения согласно рис. 2.5 заменяются распределенными параметрами, и переходные процессы описываются теорией длинных электрических линий.

До настоящего времени мы исходили из того, что заряженное тело разряжается непосредственно на землю ($R_3 \rightarrow 0$, $C_3 \rightarrow \infty$) и тем самым оно принимает за короткое время потенциал земли. Но часто имеют место случаи, когда во время разряда часть зарядов стекает на другое изолированное тело ($R_3 \rightarrow \infty$) например, при касании к интегральной схеме, лежащей на рабочем столе, или при касании к электронному узлу. Искра прерывается тогда, когда оба тела приняли равный потенциал, если не учитывать падение напряжения на искре.

Если до появления искры на конденсаторе C_u находится заряд $Q = C_u U_u$, то новый потенциал U_u^* обоих тел может быть найден из формулы:

$$Q = (C_u + C_3)U_u^*$$

Исходя из этого потенциала параллельно включенные емкости разряжаются затем с постоянной времени

$$T_3 = (C_u + C_3)R_u R_3 / (R_u + R_3)$$

причем, как правило, может быть принято $R_n \ll R_u$ и $R_n \ll R_3$.

2.4.2. Коммутация тока в индуктивных цепях

Отключаемые катушки индуктивности представляют собой чаще всего встречающиеся источники переходных помех в промышленных установках или в аппаратуре управления. Примером являются бесчисленные релейные катушки и катушки контакторов в устройствах автоматического управления и исполнительных органов, (например, приводы электромагнитных клапанов), а также все обмотки электрических машин и трансформаторов. При отключении возникают высокие переходные перенапряжения, которые могут приводить к повторному включению коммутируемого участка, к пробое изоляции катушки, а также к электромагнитным влияниям на соседние компоненты и коммутируемые цепи. Механизм возникновения помех всегда один и тот же, однако следует различать выключение и включение контуров тока с индуктивной нагрузкой. При отключении индуктивной цепи с током расходящиеся контакты вызывают изменение тока - di/dt . С этим связано изменение потока $-d\Phi/dt$, которое в результате самоиндукции индуктирует напряжение в цепи тока. Это напряжение в основном приложено к размыкающимся контактам и поддерживает коммутационную дугу. В цепях переменного тока дуга гаснет незадолго до прохождения тока через ноль и вновь не зажигается, если электрическая прочность контактного промежутка возрастает быстрее, чем напряжение между контактами. В цепях постоянного тока ток обрывается только тогда, когда контакты настолько удалены друг от друга, что необходимое напряжение горения дуги превышает фактически имеющееся напряжение.

Наибольшее влияние возникает в результате обрыва тока, когда распад дуги и быстрое нарастание напряжения на промежутке при разведенных контактах заставляет ток падать до нуля с большой крутизной di/dt . Возникающие в результате этого ЭДС самоиндукции достигают даже у контактов низкого напряжения нескольких киловольт. Использование этого явления имеет место в автомобильных устройствах зажига-

ния с прерывателями, в классических искровых индукторах, а также в индуктивных накопителях энергии, используемых в мощной импульсной электроэнергетике.

При включении индуктивных цепей протекают аналогичные процессы. Как только контакты сблизилась на определенное расстояние, может произойти пробой газового промежутка, а затем при вибрации контактов многократно повторяется, хотя с меньшими амплитудами, описанное выше явление, которое имеет место при отключении цепи.

Важно понимать, что создает помехи не искра как таковая, как иногда неверно интерпретируется, а ее исчезновение (обрыв тока) или ее возникновение (электрический пробой с гашением дуги или повторными зажиганиями). Чрезвычайно короткое время, необходимое для образования пробоя между контактами и для гашения дуги, объясняет высокие наблюдаемые крутые фронты изменения тока. У полупроводниковых выключателей в силовоточной электронике крутизна, как правило, меньше, однако появление высоких напряжений происходит качественно таким же образом. Уровень действующих напряжений устанавливается в зависимости от паразитной емкости катушки (рис.2.7).

Магнитная энергия, накопленная в индуктивности L к началу процесса отключения, рассчитывается по формуле $W_M = \frac{1}{2} LI^2$

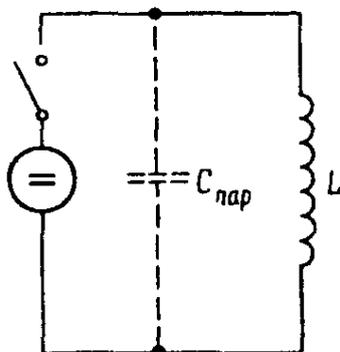


Рис. 2.7. К приближенному определению максимального значения напряжения самоиндукции с учетом емкости катушки индуктивности

При разомкнутом выключателе ток катушки I может замыкаться только через емкость обмотки $C_{пар}$, причем первоначально накопленная энергия переходит из индуктивности в емкость и обратно. Если рассмотреть момент, в который вся энергия как раз находится в емкостном накопителе, то, пренебрегая потерями, получим максимально возможное значение напряжения из формулы:

$$W_{ЭП} = \frac{1}{2} C_{пар} U_{max}^2 = \frac{1}{2} LI^2 .$$

Само собой разумеется, при этом речь идет только о приближительной оценке, которая, однако, является достаточно надежной. На практике максимально достижимое перенапряжение отключения существенно зависит от гасящих свойств выключателя (коммутационная среда, газ или вакуум, наличие нескольких последовательно включенных контактов и т. д.). Чем больше требуемое напряжение горения, тем раньше обрывается ток и тем больше скорость изменения тока di/dt . Перенапряжения в коммутируемых индуктивных цепях являются наиболее частыми причинами помех в электронных устройствах управления.

2.4.3. Переходные процессы в сетях низкого напряжения

Переходные перенапряжения или изменения напряжения в сетях низкого напряжения возникают преимущественно при обычных включениях индуктивных потребителей, что обсуждалось ранее. Однако кроме этого, перенапряжения возникают также при включении емкостных нагрузок, срабатывании выключателей защиты и предохранителей при коротком замыкании, переключениях в нагруженных сетях, а также в результате атмосферных разрядов (воздействие молнии). Повторяющиеся переходные процессы возникают в результате периодических коммутационных процессов в выпрямителях тока. В связи с различным происхождением и весьма различными внутренними сопротивлениями сетей максимальное (амплитудное, пиковое) значение U , крутизна dU/dt , временной ход и количество энергии в помехе колеблются в широких пределах. При заданном сопротивлении энергия рассчитывается как

$$W = \int \frac{u_{II}^2}{R} dt$$

Общие суждения о перенапряжениях могут поэтому быть основаны только с учетом статистической природы явлений. Так, можно установить, что перенапряжения на промышленных предприятиях и в жилых домах меньше различаются по своему значению, чем по частоте возникновения, и что высокие перенапряжения (больше 3 кВ) сравнительно редки (воздействие молнии, срабатывание предохранителей). К счастью, высокие перенапряжения на пути их распространения по проводам низкого напряжения очень быстро гасятся как по амплитуде, так и по крутизне. В результате их опасное воздействие ограничивается областями, соседствующими с местами возникновения.

2.4.4. Переходные процессы в сетях высокого напряжения

В распределительных устройствах при замыкании и размыкании разъединителей возникают многочисленные повторные зажигания, которые могут вызвать во вторичных устройствах перенапряжения до 20 кВ. Они могут приводить к ложному срабатыванию защиты сети или даже к повреждению вторичных устройств. На примере подключения короткого обесточенного участка линии к находящейся под напряжением сборной шине можно наглядно объяснить причину возникновения перенапряжений (рис. 2.8). Если напряжение пробоя сближающихся контактов становится меньше максимального значения переменного напряжения, происходит первый пробой, во время которого подключаемый участок линии приобретает потенциал шины. Если ток уменьшился до значений, которыми можно пренебречь, дуга обрывается. Так как изолированный участок линии сохраняет свой потенциал, второй пробой происходит, если мгновенное значение переменного напряжения общей шины вновь отличается от значения потенциала отсоединенного участка линии на значение напряжения пробоя ставшего за это время меньшего промежутка между контактами. Этот процесс неоднократно повторяется до тех пор, пока контакты не будут касаться друг друга (рис. 2.8).

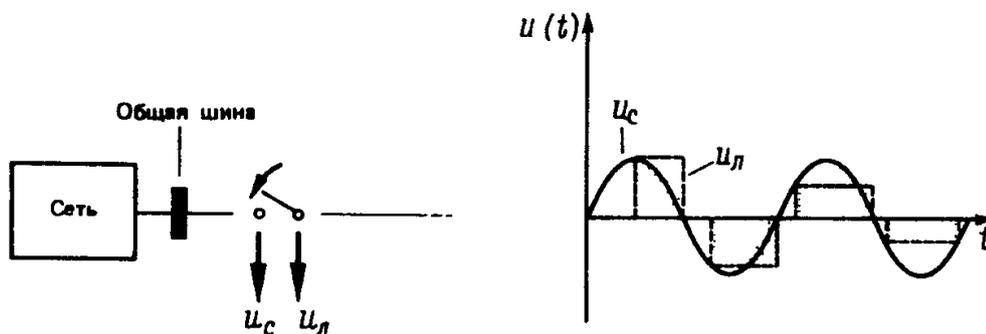


Рис. 2.8. Возникновение перенапряжения при включении короткой ненагруженной линии (идеальный случай)

Быстрые положительные и отрицательные изменения потенциала подключаемого участка линии вызывают токи смещения через паразитные емкости относительно соседних проводов $i = C_{\text{пар.}} dU / dt$, максимальные значения которых из-за большой крутизны изменения напряжения могут принимать большие значения. Обусловленные током заряда линии и током смещения магнитные поля индуктируют в соседних контурах напряжения помех. Изображенная на рис. 2.8. форма напряжения действительна только для "электрически

коротких" участков линии, время пробега волны по которыми мало по сравнению с временем развития пробоя (от нескольких десятков до сотен наносекунд в зависимости от расстояния между контактами). Даже в этом случае зарядка и перезарядка протекают не так гладко, как изображено на рис. 2.8., а подобно колебательному переходному процессу. Токи утечки могут вызвать снижения напряжения на линии (на рис. 2.8. это снижение не показано). Если время пробега волны в отключенной линии больше, чем время развития повторных зажигания, то при каждом пробое возникают волны напряжения и тока, которые в конце линии отражаются и делают более сложным изменение напряжения, чем показанное на рис. 2.8. Распространяющиеся вдоль отключенного провода волны наводят в параллельно проходящих проводах напряжения и токи помех.

При размыкании разъединителей протекают очень похожие процессы, однако при этом амплитуды изменений потенциала или волн после начала процесса размыкания с увеличением расстояния между контактами увеличиваются и даже могут принять двойное максимальное значение. Описанные процессы в элегазовых распределительных устройствах высокого напряжения, у которых времена нарастания процессов первичного и повторного зажигания лежат в наносекундном диапазоне, могут вызвать многие проблемы. Коммутационные процессы в этом случае внутри закрытой конструкции сопровождаются волнами, которые из-за неравномерности волнового сопротивления (изолированные фланцевые соединения, ответвления, проводники) частично отражаются, частично проходят дальше или даже могут выходить во внешнее пространство.

2.4.5. Переходные процессы в испытательных устройствах высокого напряжения и электрофизической аппаратуре

Для доказательства прочности изоляции электроэнергетического оборудования высокого напряжения при воздействии внутренних и внешних перенапряжений создаются грозовые и коммутационные испытательные импульсы с длительностью фронта порядка микро- и миллисекунд и с амплитудными значениями в несколько мегавольт. Импульсные напряжения амплитудной десятки мегавольт со временем нарастания несколько наносекунд и импульсными токами мегаамперного диапазона используются в электрофизических установках для исследований управляемых термоядерных реакций. Из-за высокого уровня помех (120 дБ и более) получение измерительных сигналов низкого напряжения при проведении испытаний изоляции и электрофизических экспериментов при помощи осциллографа и быстродействующего са-

мопишущего прибора оказывается очень сложным. Однако такие измерения относятся к техническим будням исследовательских лабораторий высокого напряжения. Работа в условиях сильных помех привела уже очень давно к тонкому пониманию проблем ЭМС и поэтому именно инженеры и техники высоких напряжений повсеместно занимаются вопросами ЭМС, в частности электромагнитными импульсами ядерных взрывов, разрядами статического электричества, внутренней грозозащитой.

2.4.6. Электромагнитный импульс молнии

Молния и связанные с ней переходные поля обуславливают сильное электромагнитное влияние в месте удара и вблизи него. При разработке защитных устройств внешней грозозащиты за основу, например, могут быть приняты следующие максимальные параметры тока молнии:

- максимальное значение тока $I_{max} = 200$ кА;
- крутизна нарастания тока в течение 100 нс $di/dt = 300$ кА/мкс;
- крутизна нарастания тока в течение 1 мкс $di/dt = 150$ кА/мкс;
- заряд $Q = \int i dt = 500$ Кл;
- интеграл квадрата тока $\int i^2 dt = W/R = 10^7$ А²/с.

Большое число учитываемых параметров тока молнии объясняется многообразием воздействия на объекты. Так, максимальное значение тока определяет ожидаемое увеличение потенциала при протекании по объекту, обладающему активным сопротивлением, крутизна тока - индуктируемые напряжения, заряд - оплавление проводников в месте удара, интеграл квадрата тока - адиабатический нагрев проводника током молнии.

Численные значения параметров, выбираемых при испытаниях, зависят от требований к защите и значения объекта. Большинство молний имеют максимальные значения токов, не превышавших несколько десятков килоампер. С точки зрения внутренней защиты от молнии в каждом отдельном случае по уравнениям Максвелла могут быть рассчитаны электрические и магнитные поля, связанные с полным током молнии или ее частичными токами в заземленном сооружении, а также индуктированные ими токи во вторичных цепях и устройствах обработки данных и др. При этом необходимо учитывать ряд таких факторов, как удаление от места удара молнии, конфигурацию приемной системы, характеристики зданий и т. д. Число грозовых дней в году для определенного места можно приблизительно рассчитать по картам мировой грозовой активности, линии на которой соответствуют определенным числам грозовых дней. Эта информация по многим причинам очень

важна, например, для страхования имущества экспортных фирм и т. д. Из этой информации можно узнать, например, что Кения имеет 240 грозовых дней, в то время как некоторые места в Западной Европе только 10—30 грозовых дней в году.

2.4.7. Электромагнитный импульс ядерного взрыва

Мгновенное освобождение ядерной энергии при ядерном взрыве сопровождается интенсивным импульсом излучения γ -квантов (высокоэнергетическое рентгеновское излучение с энергией порядка МэВ, которое распространяется по всем направлениям со скоростью света). При взрыве на большой высоте над поверхностью Земли (например, 400 км) эти кванты в слоях атмосферы вследствие эффекта Комптона освобождают электроны, большая часть которых сохраняет первоначальное направление движения γ -кванта и на своем дальнейшем пути к Земле за счет ударной ионизации образуют многочисленные вторичные электроны. Летящие к Земле электроны создают вместе с малоподвижными положительными ионами воздуха электрический диполь. За счет отклонения электронов в магнитном поле Земли создается магнитный диполь. Изменяющиеся во времени и в пространстве распределение заряда и тока обуславливает изменяющееся электромагнитное поле, называемое электромагнитным импульсом ядерного взрыва. Согласно доступной литературе, этот импульс имеет вид, близкий к двойной экспоненте (качественно аналогичный нормированному грозовому импульсу) с длительностью фронта примерно 5 нс и временем спада примерно 200 нс (рис. 2.9.).

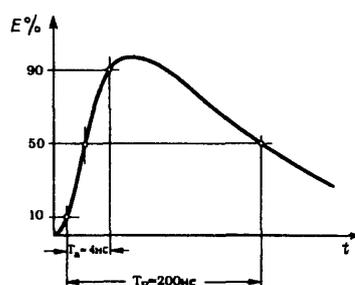


Рис. 2.9. Временная характеристика напряженности электрического поля ядерного электромагнитного импульса

Максимальное нормированное значение напряженности электрического поля равно 50 кВ/м. В дальнейшем поле максимальное значение напряженности внешнего магнитного поля рассчитывается по формуле $H_{max} = E_{max}/377$ и равно 133 А/м. Аналогичные эффекты возникают при взрывах вблизи Земли, поэтому различают высотные и поверхностные электромагнитные импульсы.

При взрыве у поверхности Земли доминируют термические и механические эффекты. Кроме того, имеется магнитодинамический электромагнитный импульс, протекающий очень медленно в течение секунд и минут в виде переходного процесса, вызванного взаимодействием между магнитным полем Земли и расширяющимися ионизованными массами газа в атмосфере. Специфика электромагнитного импульса ядерного взрыва состоит в том, что его действие распространяется на значительные площади. Особенно опасны воздействия импульса на протяженные системы (сети электроснабжения, телефонные сети) в которых вследствие распределенного наведения и образования волн может аккумулироваться значительная энергия. При магнитодинамическом электромагнитном импульсе появляются низкочастотные, наведенные индуктивным путем токи в сетях электроснабжения, которые могут вызвать насыщение стали в силовых трансформаторах. Масштаб возможных электромагнитных влияний ядерных взрывов является в настоящее время предметом исследований и по нему ведутся дискуссии.

2.5. Классы окружающей среды

Многообразие представленных выше источников помех вызывает необходимость упрощенного стандартизированного описания электромагнитной обстановки введением типовых классов окружающей среды.

2.5.1. Классификация окружающей среды по помехам, связанным с проводами

Класс 1 (очень низкий уровень помех):

-коммутационные перенапряжения в цепях управления подавлены соответствующими цепями;

-линии сильного тока и линии управления проложены отдельно от частей установок более высокого класса;

-линии электропитания на обоих концах снабжены заземленными экранами и сетевыми фильтрами;

-наличие люминесцентных ламп.

Пример: помещение для вычислительной техники.

Класс 2 (низкий уровень помех):

-коммутационные перенапряжения при отключениях реле частично ограничены, контакторы отсутствуют;

- линии сильного тока и линии управления проложены отдельно от частей установок более высокого класса;
- раздельная прокладка неэкранированных линий питания и линий управления, сигнальных линий;
- наличие люминесцентных ламп.

Пример: контрольно-измерительные щиты на электростанциях, промышленных предприятиях.

Класс 3 (уровень промышленных помех):

- релейные катушки не снабжены ограничительными цепями, нет контакторов;
- необязательное разделение линий сильного тока и линий управления от частей установок с более высоким уровнем помех;
- линии питания проложены раздельно от линий управления, сигнальных и телефонных линий;
- необязательное отделение линий управления, сигнальных и телефонных линий друг от друга;
- может использоваться общая система заземления.

Пример: щиты управления электростанций и промышленных объектов.

Класс 4 (высокий уровень промышленных помех):

- реле и контакторы, не снабженные ограничительными цепями;
- необязательное отделение проводов от частей установок с различным уровнем помех;
- совместная прокладка линий управления, сигнальных и телефонных линий; использование многожильных кабелей для линий управления и сигнальных линий.

Пример: установки открытого типа электростанций и устройства управления технологическими процессами, распределительные устройства высокого напряжения.

Класс X (экстремальный уровень помех). Здесь речь идет, как правило, о работе приборов в непосредственной близости от источников экстремальных помех. Для этих особых случаев, которые по своей природе не могут быть учтены обычно действующими нормами, должны быть достигнуты особые договоренности между производителем и потребителем приборов, устройств или при определенных обстоятельствах потребителем должны быть приняты дополнительные меры для подавления помех.

2.5.2. Классификация окружающей среды по помехам, вызванным электромагнитным излучением

Класс 1: низкий уровень электромагнитного излучения, например местные радио- и телевизионные станции находятся на расстоянии более чем 1 км, допустимо наличие разговорных радиоприборов низкой мощности.

Класс 2: средняя интенсивность электромагнитного излучения. Работающие радиотелефоны должны располагаться на расстоянии $l > 1$ м от чувствительных устройств.

Класс 3: очень сильное электромагнитное излучение, вызванное, например приборами радиотелефонии большой мощности в непосредственной близости от устройств.

Класс 4: очень сильное излучение. Степень строгости контроля должна быть согласована между заказчиком и изготовителем.

Аналогичным образом можно установить классы окружения на борту самолетов и судов, в исследовательских установках или в зависимости от климатических условий (например, для условий возникновения разрядов статического электричества) и т. д. Перечисленные в п. 2.5.1 и 2.5.2 критерии могут быть предметом договоренности, между классами окружающей среды нет резких границ. С точки зрения экономичности мер по обеспечению ЭМС нельзя без проверки отдавать предпочтение максимальному классу окружающей среды. Напротив, нужно тщательно взвесить на основании стратегии минимального риска вероятность возникновения помех, стоимость сооружений, расходы на простой по сравнению с дополнительными расходами на работу без помех в определенном классе окружающей среды.

Выбранный класс окружающей среды устанавливает строгость контроля, т.е. амплитуды испытательных напряжений и токов, которые, например должны в 2 раза или на 6 дБ превышать уровень помех, характерных для соответствующих классов окружающей среды.

Вопросы для самопроверки

1. Поясните понятия «функциональные» и «нефункциональные» источники электромагнитных помех
2. Поясните понятия «широкополосный» и «узкополосный» источник электромагнитных помех. Что является количественной характеристикой, данных понятий?
3. Какая характеристика называется шириной полосы энергетического спектра ?

4. Как влияют дуговые печи и сварочные установки на электромагнитную обстановку?
5. Как влияют мощные выпрямители и преобразователи частоты на электромагнитную обстановку?
6. Какие технические средства определяют электромагнитную обстановку в городах?
7. Поясните физические процессы, происходящие в газоразрядных лампах и приводящие к появлению электромагнитных помех
8. Поясните физические процессы, происходящие на высоковольтных воздушных линиях и приводящие к появлению электромагнитных помех
9. Поясните физические процессы, происходящие в коллекторных электродвигателях и приводящие к появлению электромагнитных помех
10. Поясните физические процессы, происходящие в системах зажигания автомобилей и приводящие к появлению электромагнитных помех
11. Почему разряд статического электричества представляет собой источник электромагнитных помех?
12. Почему коммутация катушек индуктивности приводит к появлению электромагнитных помех?
13. Какие процессы в сетях низкого напряжения вызывают возникновение электромагнитных помех?
14. Какие процессы в сетях высокого напряжения вызывают возникновение электромагнитных помех?
15. Какие физические процессы при ударе молнии приводят к возникновению электромагнитных помех?
16. Какие физические процессы, происходящие при ядерном взрыве, вызывают появление электромагнитного импульса? Какими параметрами характеризуется электромагнитный импульс?
17. Какие классы окружающей среды выделяются при передаче электромагнитных помех по проводам?
18. Какие классы окружающей среды выделяются при передаче электромагнитных помех электромагнитным излучением?

3. МЕХАНИЗМЫ ПОЯВЛЕНИЯ ПОМЕХ И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ИХ СНИЖЕНИЮ

3.1. Обзор

Существенным при рассмотрении технико-экономических проблем электромагнитной совместимости является значение механизмов связи K между источником помех Q и чувствительным к помехам элементом прибора S , обусловленных механизмами воздействий и соответствующих основных правил, по которым можно эффективно противостоять этим воздействиям уже на стадии проектирования, создания устройств. Рисунок 3.1 дает представление о принципиально возможных видах связи между двумя контурами с током, (1 и 2) или о путях проникновения помехи z от источника Q к элементу S по проводам или через поле. В первом случае говорят о гальванической связи, а во втором, в зависимости от условий, о внутренней или внешней емкостной связи (если преобладает электрическое поле), зависящей от частоты и расстояния между источником и чувствительным элементом, или же об индуктивной связи (если преобладает магнитное поле). Используется также понятие электромагнитной связи. В этом случае между напряженностями электрического и магнитного полей существует строгое соотношение: $E/H = 377 \text{ Ом}$.

Далее рассматриваются виды появления помех (влияния), обусловленные различными механизмами связи, с целью получить данные, которые можно было бы положить в основу руководящих материалов по обеспечению электромагнитной совместимости на стадии проектирования, создания приборов. Для этого во многих случаях целесообразно и достаточно использовать простые и наглядные модели. Однако при этом не следует забывать, что при проектировании современных электронных приборов и систем для обеспечения их электромагнитной совместимости необходимы более точные модели, которые позволяют производить компьютерную обработку влияния и делают возможным введение экспертной системы поддержки работ в области электромагнитной совместимости.

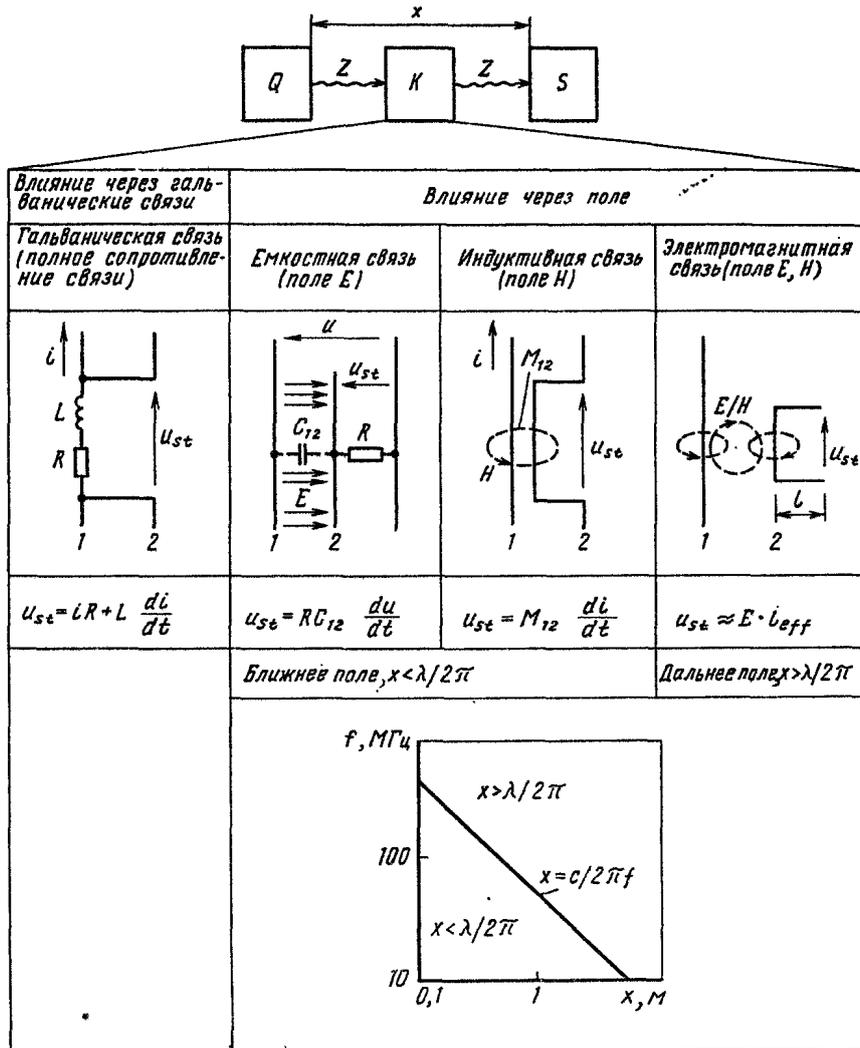


Рис. 3.1. Механизмы связи между контурами:

1 и 2 - влияющий и испытывающий влияние контуры; c - скорость света; l_{eff} - эффективная длина антенны; f - частота; λ - длина волны

3.2. Гальваническое влияние

Гальваническое влияние может осуществляться через общие полные сопротивления, как правило, через сопротивления сетевых проводов, систем опорных потенциалов или через систему защитных и заземляющих проводов.

3. 2.1. Гальваническое влияние через цепи питания и сигнальные контуры

В качестве примера на рис. 3.2 *а* показана схема питания постоянным напряжением логических модулей $B_1 - B_n$, в которой изменение тока одного модуля (di/dt) генерирует напряжение помехи u_{st} из-за падения напряжения на R и L , накладывающегося на напряжение питания и, а на рис. 3.2 *б* - аналоговая схема, в которой при подключении нагрузки R_L возникает напряжение помехи на полном сопротивлении общего для двух сигнальных контуров участка системы опорного потенциала. Это напряжение накладывается непосредственно на входное напряжение операционного усилителя $OV1$ и тем самым искажает входной сигнал второго усилителя $OV2$.

Упрощенно в обоих случаях напряжение помехи

$$u_{st} = R\Delta i + L\Delta i / \Delta t . \quad (3.1.)$$

Реальные значения u_{st} составляют милливольты или вольты. Например,

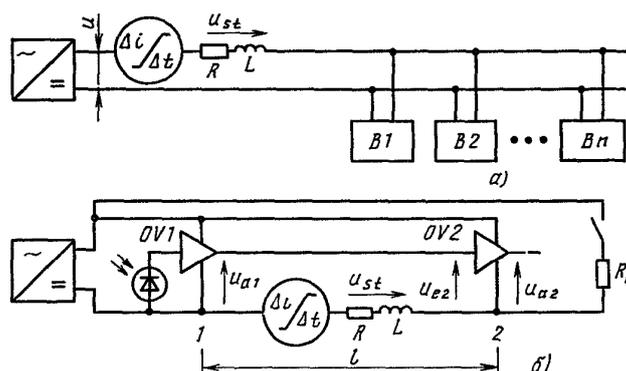


Рис. 3.2. Примеры гальванических связей в цепях электропитания (*а*) и в сигнальных контурах (*б*)

для схемы на рис. 3.2, *б* напряжение между точками 1 и 2 при длине провода 10 см, погонной индуктивности 5 мкГн/м, сопротивлении 1 мОм, токе $\Delta i = 1$ А и времени $\Delta t = 1100$ нс напряжение помехи составит:

$$u_{st} = 10^{-3} \times 1 + 0,5 \times 10^{-6} \times 0,1 \times 1 / (100 \times 10^{-9}) = 501 \text{ мВ} \quad (3.2.)$$

Это напряжение, как видно из (3.1), при заданных значениях Δi и $\Delta i/\Delta t$ тем ниже, чем меньше параметры полных сопротивлений общих цепей. Согласно известному соотношению активное сопротивление проводника

$$R = l / \gamma F , \quad (3.3.)$$

где F - площадь поперечного сечения проводника; l - его длина; γ - электрическая удельная проводимость материала.

Поэтому проводник необходимо выбирать предельно коротким, а его сечение должно быть, возможно большим. При этом следует иметь в виду, что при больших скоростях $\Delta i / \Delta t$ изменения тока с увеличением поперечного сечения проводника все заметнее проявляется поверхностный эффект (рис. 3.3). Если для проводника с постоянной площадью поперечного сечения прямоугольной формы $F = ab$ изменять отношение ширины a к толщине b , то в области высоких частот (при глубине проникновения электромагнитного поля $\delta = 1 / \sqrt{1 / \mu_0 \gamma \pi f} < b$) будет иметь место зависимость, приведенная на рис. 3.4. Она показывает, что изменение a/b от 1 до 100 приводит к относительно малому изменению сопротивления (повышению менее чем в 1,5 раза). Важным является не столько увеличение сопротивления, сколько существенное (примерно десятикратное) снижение составляющей напряжения помехи, обусловленной уменьшением индуктивности (рис. 3.5, *з*).

Несмотря на то, что активное сопротивление из-за влияния поверхностного эффекта в области частот, представляющих интерес, может возрасти по сравнению с сопротивлением при постоянном токе в 10-1000 раз (см. рис. 3.3), активная составляющая напряжения помехи $u_{stR} = R \Delta i$ при достаточно обоснованном выборе сечения проводника обычно остается сравнительно малой (милливольты) по отношению к индуктивной составляющей:

$$u_{stL} = L \Delta i / \Delta t. \quad (3.4.)$$

Это видно, например, из уравнения (3.2). При указанном ранее $\Delta i / \Delta t$ индуктивность линии с проводниками цилиндрической формы (рис. 3.5, *а*) приближенно рассчитывается так:

$$L = l(\mu_0 / \pi) \ln(2d / D), \quad (3.5.)$$

а линии с плоскими расположенными близко друг к другу проводниками прямоугольного сечения (рис. 3.5, *б*) (полагая $d \ll b$ и $d \ll a$, что часто приемлемо на практике) - по выражению

$$L = l(2\mu_0 / \pi) \ln \left(1 + \frac{1}{1 + a/b} \right). \quad (3.6.)$$

Из приведенных формул следует, что для уменьшения L и самым u_{st} имеются следующие возможности: сокращение длины проводов, для круглых проводов заданной площади сечения или диаметра - сокращение до минимального расстояния между проводами, а для проводников прямоугольного сечения - увеличение отношения a/b . Если отношение d/D в (3.5) в лучшем случае теоретически может быть снижено до единицы, то отношение a/b в (3.6) достигает десяти и более. Поэтому линия с плоскими проводами, показанная на рис. 3.5, *б*, обладает гораз-

до меньшей индуктивностью, что видно из сравнения характеристик на рис. 3.5, *в* и 3.5, *г*.

Для снижения гальванического влияния в соединительных проводах цепей питания и сигнальных контурах рекомендуют следующие мероприятия:

- выполнение соединений между двумя или более контурами с возможно низким полным сопротивлением, особенно низкой индуктивностью. Для этого согласно (3.3)-(3.6) требуется по возможности меньшая длина общих линий (см. рис. 3.2), большое сечение проводников (особенно для проводников системы опорного потенциала, общей для многих контуров), малые расстояния d между проводами цепей питания (расположение прямого и обратного проводов рядом друг с другом), выполнение системы опорного потенциала в печатных платах, жгутах, разъемах, соединений с корпусом, землей, а при возможности и проводов питания в виде плоских шин (рис. 3.6). В этих случаях (рис. 3.6, *б*) возможно обеспечение больших емкостей, выполняющих роль защитных конденсаторов. Эффективным является выполнение соединений шин системы опорного потенциала в виде многих параллельных кабелей (рис. 3.7.), благодаря чему одновременно компенсируются как емкостные, так и индуктивные влияния;

- гальваническая развязка, т.е. устранение совместных проводящих соединений между различными контурами, или же гальваническое разделение контуров таким образом, чтобы ток наиболее мощного контура или ток фильтра не протекал по слаботочному контуру. Это осуществляется отказом от общих обратных проводников в цепях передачи сигналов (рис. 3.8, *а*), от использования проводов заземления, корпусов приборов, машин и технологических устройств в качестве проводов сигнальных цепей. Систему опорного потенциала, если это требуется, необходимо присоединять лишь к точкам заземления или к корпусу прибора. Системы опорных потенциалов аналоговых модулей (*B1-B4* на рис. 3.8, *б*) и системы питания компонентов *K1-K3* устройств автоматизации (рис. 3.8, *в*) следует соединять звездой. Целесообразно отдельно питать мощные электрические и аналоговые, дискретные функциональные элементы в целях устранения влияния внутреннего сопротивления питающей сети (рис. 3.8, *г*);

- разделение потенциалов, т.е. устранение любых гальванических контактов между контурами при функционально связанных сигнальных и силовых цепях (рис. 3.8, *д*) в системах, в которых не предусматривается обмен информацией;

- выбор скорости изменения тока $\Delta i / \Delta t$ не большей, чем требуется

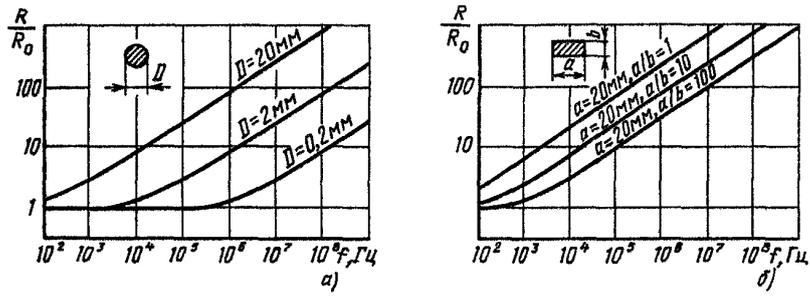


Рис. 3.3. Влияние проникновения тока на сопротивление проводов круглого (а) и прямоугольного (б) сечений.

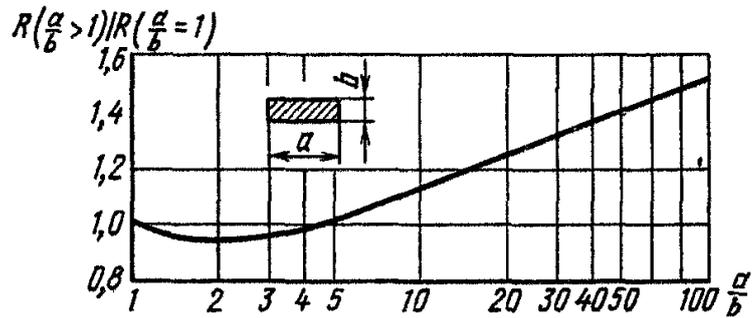


Рис. 3.4. Зависимость относительного сопротивления $\frac{R(a/b > 1)}{R(a/b = 1)}$ проводника прямоугольного сечения от отношения его сторон a/b при постоянстве сечения $a \times b$

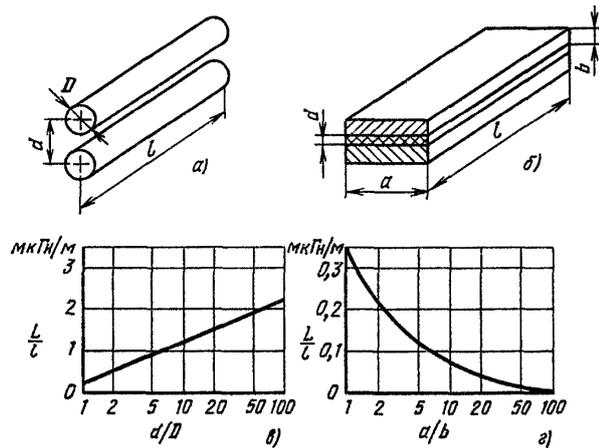


Рис. 3.5. Зависимости погонных индуктивностей (в, г) от соотношений размеров линий с проводами круглого (а) и прямоугольного (б) сечений

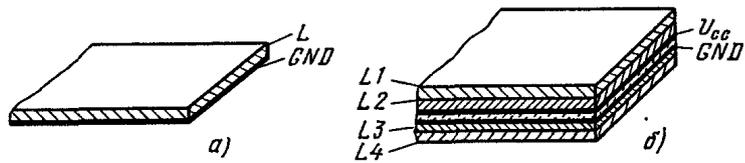


Рис. 3.6. Многослойные платы с плоскими шинами системы опорного потенциала GND (а) и шинами электропитания GND и U_{CC} (б):
 L - поверхности печатных плат

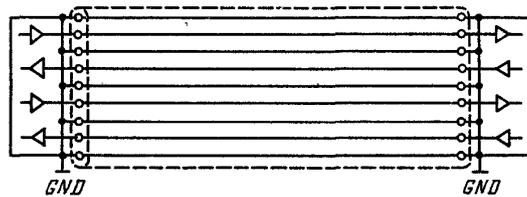


Рис. 3.7. Плоский кабель с распределенными по ширине проводниками системы опорного потенциала GND

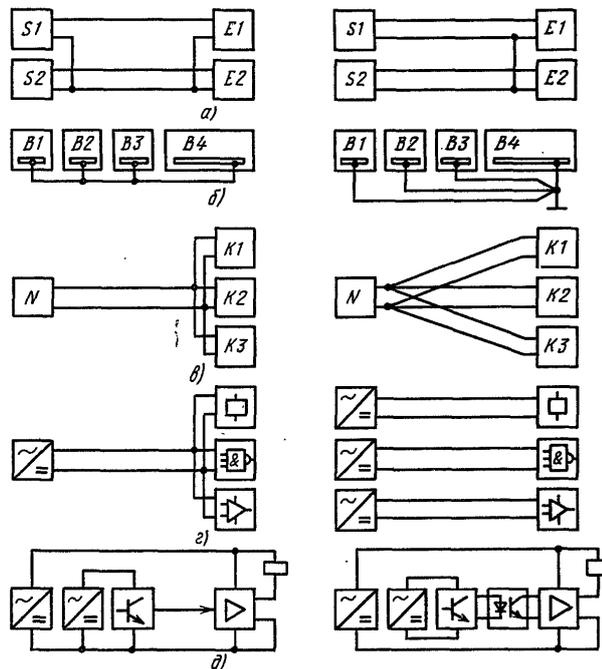


Рис. 3.8. Примеры неудачной (слева) и удовлетворительной (справа) реализации по снижению помех в гальванически связанных сигнальных контурах и цепях питания

по условиям функционирования. Однако это не всегда удается осуществить, например, если нормальное функционирование электротехнического устройства сопровождается определенным значением $\Delta i / \Delta t$. Напротив, в логических системах скорость изменения тока зависит от рабочей скорости коммутации в контурах. Поэтому она принципиально не должна быть выше, чем требуемая для осуществления функциональной задачи или для обеспечения операционной скорости.

3.2.2. Гальваническое влияние по контурам заземления

На рис. 3.9, а показаны два прибора G_1 и G_2 , пространственно разделенные друг от друга. Они могут находиться в одном или разных зданиях. По условиям техники безопасности корпуса приборов должны быть заземлены. Имеющийся контур полезного сигнала также заземляется в двух местах, у приборов. Между точками 1 и 2 может возникнуть разность потенциалов, обусловленная током в контуре заземления, например током замыкания на землю или током молнии (на рис. не показано). Эта разность потенциалов U_{12} вызывает ток помехи I_{st} . На внутреннем сопротивлении входной цепи прибора Z_s возникает напряжение помехи U_{st} , наложенное на входной сигнал. При синусоидальной форме напряжения напряжение помехи рассчитывается по формуле (рис. 3.9, б):

$$U_{st} = U_{12} \frac{Z_s}{Z_s + Z_Q}$$

При этом предполагается, что полное сопротивление линии Z_L пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлениями Z_s .

Если $Z_s \gg Z_Q$, то $U_{st} \approx U_{12}$ а при $Z_s = Z_Q$ $U_{st} = 0,5U_{12}$.

Мероприятия по снижению влияния по цепям заземления заключаются в снижении разности потенциалов U_{12} за счет уменьшения сопротивления между точками 1 и 2 (рис. 3.9.).

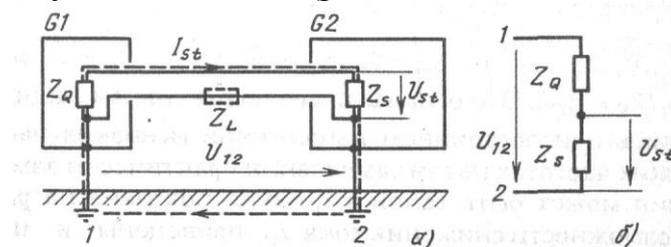


Рис. 3.9. Гальваническое влияние через замкнутую петлю заземления: а - схема устройства; б - схема, поясняющая формирование напряжения помехи U_{st}

Это достигается, например, выполнением пола в виде проводящей эквипотенциальной поверхности F (рис. 3.10, а), соединение приборов массивными проводниками PA (рис. 3.10,б) или же экранированием сигнальных линий с заземлением экранов

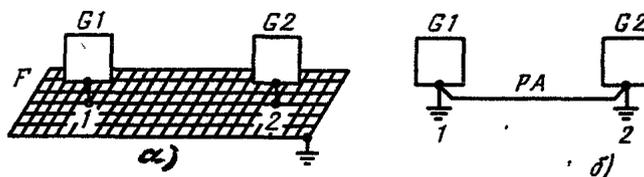
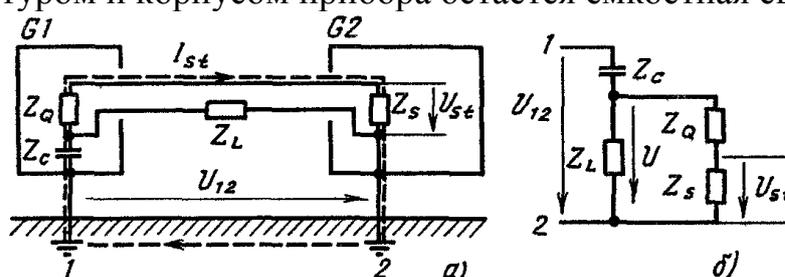


Рис. 3.10. Снижение гальванического влияния при помощи заземленной плоскости (а) или массивного проводника PA , соединяющего точки заземлений приборов $G1$ и $G2$ (б)

у обоих концов , а также уменьшением тока I_{st} . Для этого существует ряд возможностей. Одной из них является разделение контуров заземления, например прибора $G1$ (рис. 3.11, а). Однако при этом между сигнальным контуром и корпусом прибора остается емкостная связь Z_c . В



3.11. Гальваническое влияние через разомкнутую петлю заземлений:

а - схема устройства; б - схема, поясняющая формирование напряжений помехи U_{st} .

этом случае (рис. 3.11) возникает напряжение помехи U_{st} , величина которой зависит от сочетания сопротивлений Z_c, Z_L, Z_Q, Z_S и может быть найдена путем расчета согласно электрическому расчету.

При $f = 0$; $Z_c = \infty$ и $U_{st} = 0$, а при $f \rightarrow \infty$; $Z_c \rightarrow 0$ и $U_{st} = U_{12} Z_S / (Z_S + Z_Q)$. Это означает, что эффективная защита возможна лишь при постоянном напряжении и низких частотах. При высоких частотах петля заземления практически замкнута, ситуация может быть такой же, какая показана на рис. 3.9.

3.3. Емкостное влияние

Причиной емкостного влияния могут быть паразитные, т.е. неустраняемые схемным путем, емкости между проводами или проводящими предметами, принадлежащими разным токовым контурам. Практический интерес представляют следующие случаи:

- влияющий и испытывающий влияние контуры гальванически разделены;
- оба контура имеют общий провод системы опорного потенциала;
- провода токового контура имеют большую емкость относительно земли.

3.3.1. Гальванически разделенные контуры

На рис. 3.12,а показана упрощенная модель емкостного влияния. Предполагается, что длина контура l мала по сравнению с длиной волны самой высокой учитываемой частоты. Система проводников 1,2 принадлежит к влияющему контуру, а 3, 4 - контуру, испытывающему влияние. Соответствующие элементы R_Q, R_S и C_{12} образуют полное сопротивление Z_i влияющего контура (рис. 3.12, б), а элементы R_Q, R_S и C_{34} - полное сопротивление Z контура, испытывающего емкостное влияние.

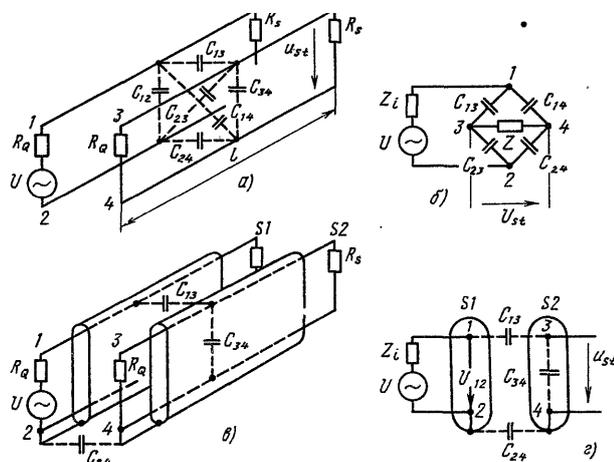


Рис. 3.12. Емкостное влияние между гальванически разделенными контурами: а - модель влияния; б - схема замещения; в - модель влияния при экранировании обоих контуров; г - схема замещения при наличии экранов

Отсюда нетрудно заметить, что напряжение помехи U_{st} равно нулю, если соблюдается условие симметрии:

$$C_{13} / C_{23} = C_{14} / C_{24}$$

Это условие можно обеспечить попарным скручиванием проводников (провода 1 с проводом 2, провода 3 с проводом 4), а в некоторых случаях - включением симметрирующих конденсаторов.

Следующей возможностью снижения емкостного влияния в гальванически разделенных контурах является применение экранированных проводов (рис. 3.12, в) с экранами S_1 и S_2 из хорошо проводящего материала, которые, как правило, соединяются с одной стороны с проводом системы опорного потенциала какого-либо контура. Благодаря этому увеличивается емкость связи C_{13} . В ненагруженном состоянии для контура, испытывающего влияние (рис. 3.12, з) можно записать:

$$U_{st}/U_{12} = 1/(1 + C_{34}/C_{13} + C_{34}/C_{24}).$$

Из этого уравнения следует, что экранирующее воздействие тем лучше, чем больше емкость C_{34} проводника относительно экрана по сравнению с емкостями C_{13} и C_{24} .

3.3.2. Контур с общим проводом системы опорного потенциала

Такие контуры типичны для аналоговых и цифровых схем. В качестве примера на рис. 3.13, а приведена логическая схема, в которой может произойти непредусмотренное изменение состояния переключающего элемента при изменении сигнала на выходе элемента А из-за наличия паразитной емкости C_{13} .

На рис. 3.13, б приведена соответствующая схема замещения. Принимая $R_s \gg R_Q$, записываем напряжение помехи в операторной форме:

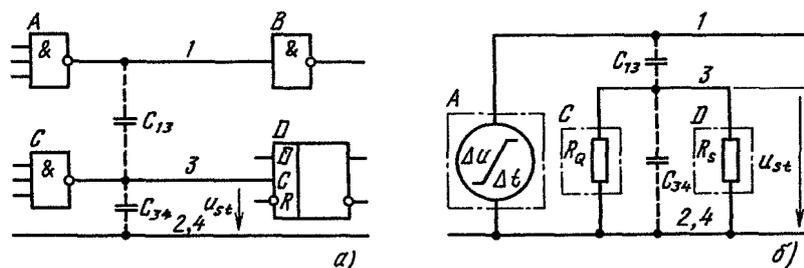


Рис. 3.13. Емкостное влияние контуров с общим проводом системы опорного потенциала 2, 4:

а - схема с элементами логики; б - схема замещения; 1,2 - влияющий контур; 3, 4 - контур, испытывающий влияние; C_{13} - паразитная емкость связи

$$u_{st}(p) = \left[\left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right) \frac{1}{p^2} \right] \frac{p C_{13} R_Q}{1 + p R_Q (C_{13} + C_{34})} \quad (3.11)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$u_{st} = R_Q C_{13} \left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right) (1 - e^{-t/R_Q(C_{13}+C_{34})}). \quad (3.12.)$$

В этих уравнениях $\Delta u / \Delta t$ представляет собой постоянную скорость линейно возрастающего выходного напряжения элемента A в интервале $0 \leq t \leq \Delta t$ (рис.3.14, а).

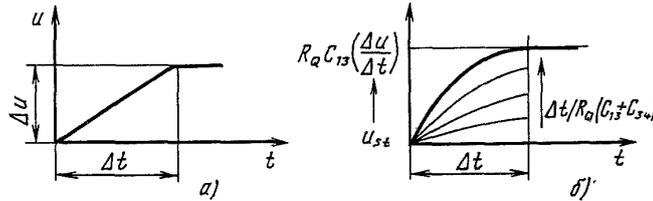


Рис. 3.14. Выходной сигнал элемента A на рис. 3.13, а (а) и сигнал помехи u_{st} в интервале времени $0 \leq t \leq \Delta t$ (б)

Изменение во времени напряжения помехи согласно (3.12) показано на рис. 3.14, б. Если постоянная времени $R_Q(C_{13} + C_{34}) \ll \Delta t$ максимально возможное напряжение помехи определяется по формуле:

$$u_{st \max} = R_Q C_{13} \left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right). \quad (3.13)$$

Емкость связи C_{13} , входящая в уравнения (3.11) - (3.13), определяется геометрическими размерами и топологией проводников. В простейшем случае проводники диаметром D и длиной l , расположенные параллельно друг другу на расстоянии d (рис. 3.15), имеют емкость связи

$$C_{13} = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r l}{\ln[d/D + \sqrt{(d/D)^2 - 1}]}$$

Реальные значения емкости C_{13} составляют от 5 до 100 пФ/м.

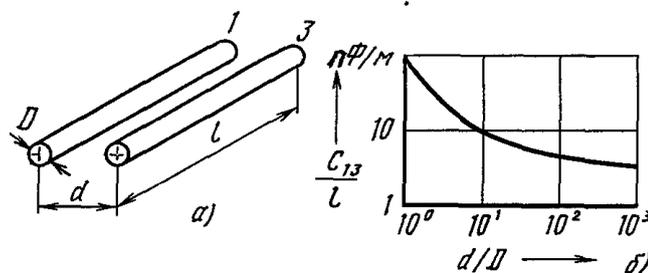


Рис. 3.15. Параллельно проложенные цилиндрические проводки (а) и зависимость погонной индуктивности C_{13}/l от отношения d/D (б)

Например, при $C_{13} = 100$ пф/м, $R_0 = 50$ Ом, $l = 0,1$ м и $\Delta u / \Delta t = 4$ В/нс из (3.13) ориентировочное значение максимального напряжения помехи составляет примерно 2 В.

Мероприятия по снижению емкостного влияния контуров с общим проводом системы опорного потенциала следующие:

-обеспечение малой емкости связи C_{13} из-за сокращения длины проводов l , уменьшения диаметра провода D , увеличения расстояния d между проводами 1 и 2, исключения параллельной их прокладки, применения изоляции проводов и печатных плат с малой диэлектрической проницаемостью;

-увеличение емкости C_{34} путем размещения сигнальных проводков между проводниками системы опорного потенциала (см. рис. 3.7), скрутки сигнальных проводов и проводов системы опорного потенциала, использования свободных жил кабеля в качестве проводников системы опорного потенциала, расположение плоских проводов системы опорного потенциала на минимальном расстоянии при монтаже (на печатных платах, в плоских соединительных жгутах), что также сказывается благоприятно и при снижении гальванических влияний;

-выполнение предельно низкоомными токовых контуров, подверженных влиянию;

-ограничение скорости изменения напряжения $\Delta u / \Delta t$ (в логических схемах скорость переключения должна быть не выше, чем требуемая для функционирования);

-экранирование проводов и контуров, чувствительных к влиянию (экраны S на рис. 3.16, a , провода и экранные дорожки S на печатных платах рис. 3.17, экранирующие пластины между печатными платами SW или отсеки SG для отдельных модулей (рис. 3.18), металлизация пластмассовых корпусов).

Под влиянием экрана существенно уменьшается емкость C_{13} , а емкость C_{34} увеличивается, что в соответствии с (3.12) и (3.13) приводит при одной и той же скорости изменения напряжения $\Delta u / \Delta t$ к снижению напряжения помехи.

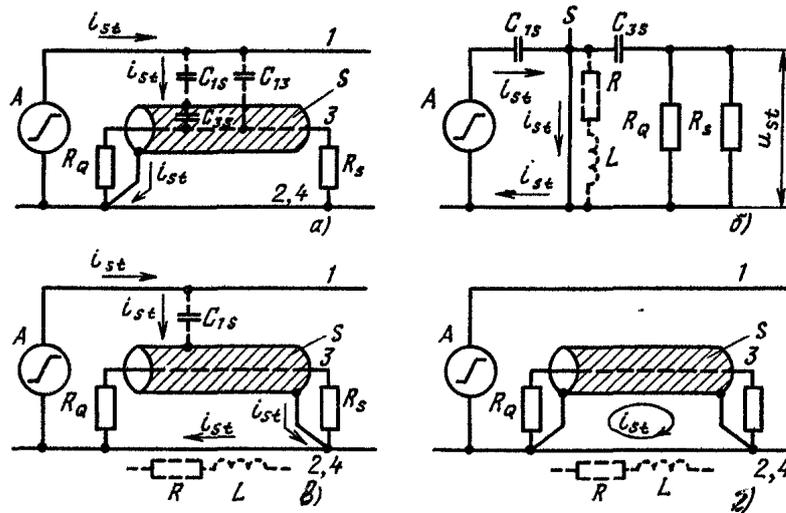


Рис. 3.16. Экранирование линии:

а - целесообразное соединение экрана S с системой опорного потенциала 2, 4; б - схема замещения; в - нецелесообразное соединение экрана с системой опорного потенциала; г - двустороннее соединение экрана с проводом опорного потенциала; A - источник помех ($\Delta u / \Delta t$); R_q - выходное сопротивление источника помех; R_s - входное сопротивление ступени в экранированном контуре

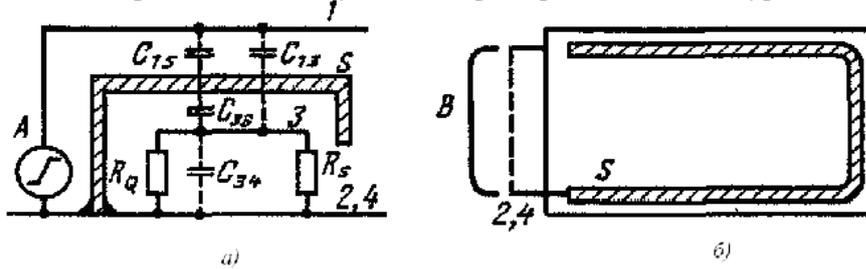


Рис. 3.17. Экранирующие дорожки на печатных платах:

а - экранирующая дорожка S (схема замещения такая же, что и на рис. 3.16, б); б - короткозамкнутая дорожка - экран S с перемычкой B служит также защитой от индуктивного влияния

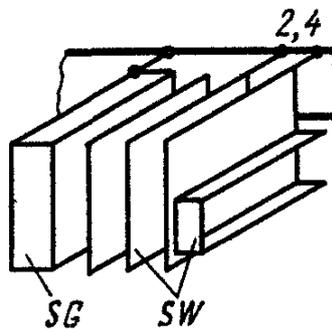


Рис. 3.18. Экранирование функциональных блоков печатных плат перегородками SW или функциональных модулей коробками SG :
2, 4 — пластина опорного потенциала

В любом случае экран S должен быть изготовлен из хорошо проводящего материала, чтобы на сопротивлении экрана R и его индуктивности L (рис. 3.16, б) не было заметного падения напряжения, накладывающегося на полезный сигнал в защищаемом корпусе. Экран в источнике питания должен быть соединен с проводом системы опорного потенциала (например, с проводом 2 и 4 на рис. 3.16, б). При соединении экрана с системой опорного потенциала у чувствительного к помехам элемента (рис. 3.16, в) ток вызывает падение напряжения помехи u_{st} на сопротивлении R и индуктивности L провода системы опорного потенциала, которое накладывается на входное напряжение защищаемого контура.

Двустороннее присоединение экрана к системе опорного потенциала (рис. 3.16, г) целесообразно тогда, когда экран предназначен для ослабления воздействующего магнитного поля. Впрочем, ток i_{st} в контуре, образованном экраном S и проводом системы опорного потенциала 2, 4, не должен создавать в проводе 2, 4 недопустимого напряжения помехи, попадающего в защищаемый контур.

3.3.3. Токовые контуры с большой емкостью относительно земли

В длинных заземленных с одной стороны сигнальных линиях при появлении изменяющегося во времени напряжения Δu протекает ток помехи i_{st} , обусловленный емкостями C_1 и C_2 , и вследствие несимметрии относительно земли часть синфазного напряжения Δu и преобразуется в противофазное напряжение u_{st} суммирующееся с напряжением сигнала, поступающего от источника (рис. 3.19, а)

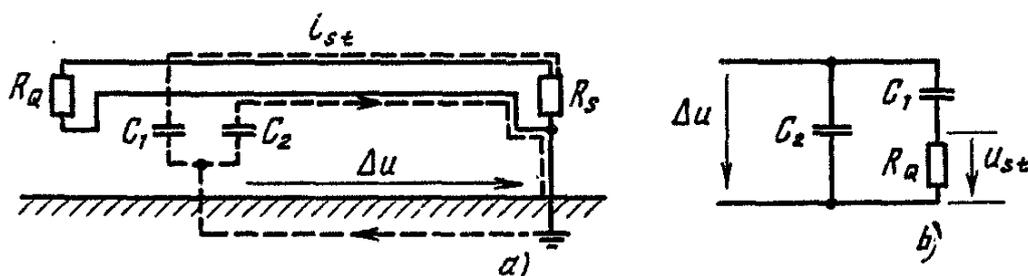


Рис. 3.19. Односторонне заземленная линия с большими емкостями на землю C_1 и C_2 (а) и ее схема замещения при $R_S \gg R_Q$ (б)

Принимая напряжение Δu изменяющимся по синусоидальному закону, например с частотой сети, можно записать выражение для напряжения помехи (рис. 3.19, б):

$$U_{st} = \Delta U / \sqrt{1 + 1/(2\pi f C_1 R_Q)^2} \quad (3.15)$$

Например, при $\Delta U = 100$ В, $f = 50$ Гц, $C_1 = 2000$ пФ и $R_Q = 150$ Ом напряжение помехи составляет 9,4 мВ. Этого достаточно, чтобы практически исключить передачу слабых сигналов, например, от термоэлементов, что, впрочем, не так часто встречается. Из (3.15) следует, что при $f = 0$ $U_{st} = 0$, а при бесконечно высокой частоте $U_{st} = \Delta U$. Это означает, что при высоких частотах напряжение помехи соответствует синфазному напряжению ΔU .

Средства борьбы с помехами сводятся к:

- устранению соединения с землей приемной ступени, точнее, к устранению гальванической связи между системой опорного потенциала и корпусом прибора, что не всегда рекомендуется и при высоких частотах часто не эффективно;

- выполнению сигнального контура предельно низкоомным (малые значения R_Q , R_S);

- экранированию сигнальной линии (рис. 3.20, а, б). При этом напряжение помехи снижается до значения

$$U'_{st} = \Delta U' / \sqrt{1 + 1/(2\pi f C_{SL} R_Q)^2}$$

При наличии последовательного резонансного контура становится возможным повышение напряжения помехи (рис. 3.20, б).

При заземлении экрана (рис. 3.20, в) может наблюдаться увеличение емкости провода относительно земли ($C_{SL} > C_1$), что приводит [(3.15), рис. 3.20, г] к большему напряжению помехи, чем при отсутствии экрана.

Хорошие результаты снижения напряжения помехи могут дать:

- симметричное относительно земли выполнение линий передачи сигналов (рис. 4.20, д, е); при полной симметрии $U_{st} = 0$;

- введение на приемном конце элементов, разделяющих потенциалы [реле, оптической развязки, разделительного трансформатора (рис. 3.20, ж, з)]. Проникновение помехи в этом случае возможно через паразитную емкость разделяющих элементов C_{st} ($C_{st} \ll C_1$; $C_{st} \ll C_2$);

- применение для передачи сигналов световодов (рис. 3.20, и). Этот способ практически устраняет влияние емкости C_{st} .

3.3.4. Емкостное влияние молнии

Если молния ударяет непосредственно в землю или находящиеся вблизи проводящие предметы (молниеприемники, осветительные мачты, металлические фасады и т.п.), то канал молнии В (рис. 3.21) кратковременно приобретает

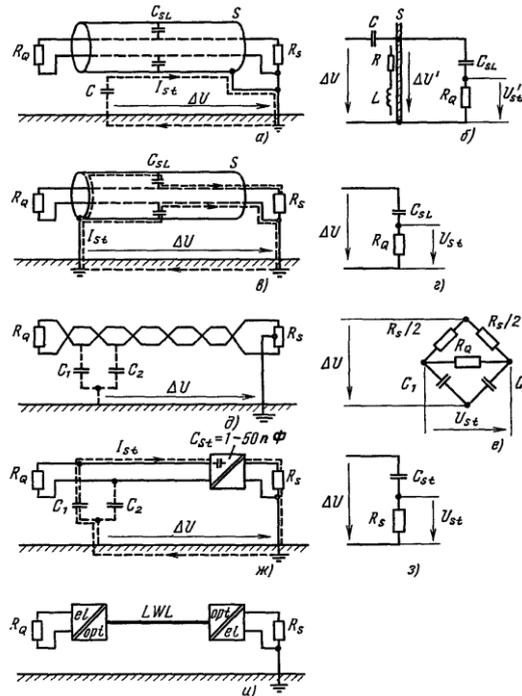


Рис. 3.20. Способы защиты контуров с большими емкостями относительно земли

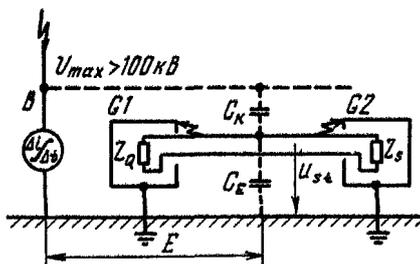


Рис. 4.21. Емкостное влияние молнии на линию:

B — канал разряда молнии; $G1, G2$ — приборы; C_k, C_E — емкости связи относительно земли

высокий потенциал ($U_{max} > 100$ кВ) вследствие падения напряжения на сопротивлении заземления. В результате потенциал сигнальной линии при наличии емкостей C_K и C_E повысится до значения

$$u_{st} = U_{max} C_K / (C_K + C_E)$$

Если нет устройств, защищающих от перенапряжений, то входная изоляция приборов $G1$ и $G2$ будет повреждена, а в лучшем случае (слабая интенсивность молнии, большое расстояние до места удара, дающее малое значение C_K) возникает интенсивная помеха. Эффективная защита может быть обеспечена экранированием сигнальной линии.

3.4. Индуктивное влияние

Индуктивное влияние обусловлено паразитным потокосцеплением между контурами промышленных устройств и образованными при ударах молнии или разрядах статического электричества.

В качестве первого простого примера на рис. 3.22, а показаны два индуктивно связанных контура. Если в контуре 1 имеет место быстрое изменение тока $\Delta i / \Delta t$, например при коммутациях, то в контуре 2 индуктируется напряжение помехи

$$u_{st} = L_{12} \Delta i / \Delta t = -\Delta \Phi / \Delta t, \quad (3.18)$$

где Φ - магнитный поток, пронизывающий контур 2; L_{12} - взаимная индуктивность контуров 1 и 2.

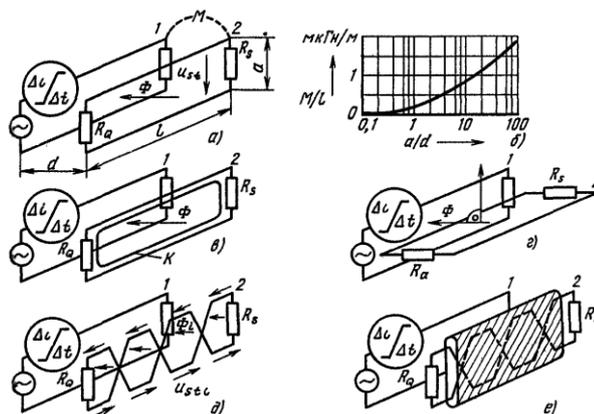


Рис. 3.22. Индуктивное влияние между промышленными токовыми контурами: а - принципиальная схема двух токовых контуров 1 и 2 с расстоянием d ними; б - погонная взаимная индуктивность M/l в зависимости от a/d ; в-е меры по снижению влияния (пояснения см. в тексте)

Взаимная индуктивность зависит от конфигурации и размеров контуров, и для показанных на рис. 3.22, а. контуров она рассчитывается как:

$$L_{12} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \left[1 + \left(\frac{a}{d} \right)^2 \right]. \quad (3.19.)$$

Погонная взаимная индуктивность в зависимости от отношения a/d может быть определена из графика на рис. 3.22, б.

Используя (3.18) и (3.19) при $l = 1$ м, $a/d = 0,1$ и $\Delta i / \Delta t = 1000$ А/с, получаем напряжение помехи $u_{st} = 2,3$ В.

Второй пример - разряд статического электричества на проводящий корпус прибора С (рис. 3.23). В контуре, находящемся внутри прибора и удаленном от проводника с током разряда i_{ESD} на среднее расстояние r_0 , индуктируется напряжение

$$u_{st} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{al}{r_0} \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (3.20.)$$

Где l и a - длина и ширина контура соответственно.

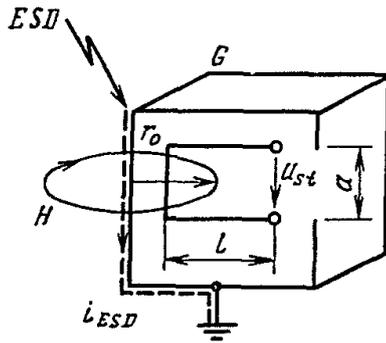


Рис. 3.23. Индуктивное влияние разряда статического электричества ESD на петлю l , а внутри прибора G

При выводе (3.20) использованы элементарные соотношения:

$$u_{st} = a l \Delta B / \Delta t, \quad B = \mu_0 H, \quad \text{и} \\ H = i / 2\pi r_0$$

Например, при $a = l = 1$ см, $r_0 = 5$ см и скорости изменения тока во времени 10 А/нс, возможной при разряде статического электричества, напряжение помехи равно 4 В.

Следующие примеры индуктивного влияния показаны на рис. 3.24 и 3.25. Магнитное поле канала молнии индуцирует в контурах напряжения, которые можно определить из (3.20).

На рис. 3.24 выделены два таких контура. Первый образован проводами сигнального контура и имеет площадь $a_1 l$. Второй, площадью $a_2 l$, создан заземленным проводом сигнального контура и землей. При $r_0 = 25$ м, $l = 20$ м, $a_1 = 0,4$ см, $a_2 = 60$ см и $\Delta i / \Delta t = 200$ кА/мкс из (3.20) вычисляется напряжение $u_{st1} = 128$ В в первой петле, $u_{st2} = 19,2$ кВ - во второй. Эти напряжения могут привести, к пробоям и связанным с ними повреждениям приборов G_1 и G_2 , если не предусмотрены специальные защитные меры

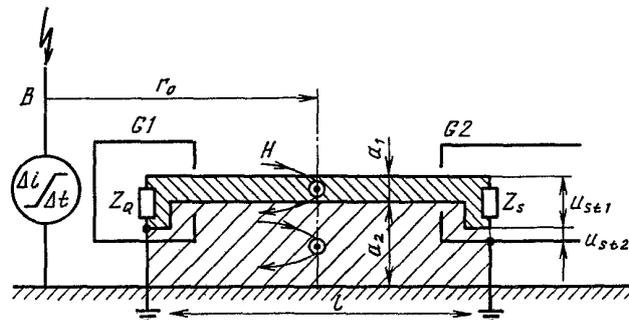


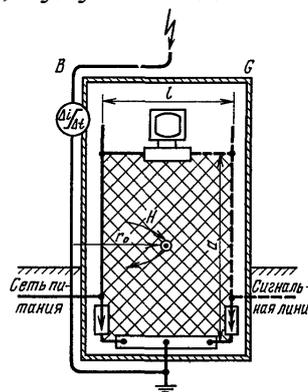
Рис. 3.24. Индуктивное влияние тока молнии на электрические контуры в устройстве автоматизации:

B - канал молнии; G_1, G_2 - приборы устройства

Рисунок 3.25 дает представление о петле в здании G , образованной сетью питания и линией передачи данных. При $r_0 = 11$ м, $a = 15$ м, $l = 10$ м и $\Delta i / \Delta t = 200$ кА/мкс индуцированное в петле напряжение со-

гласно (3.20) достигает 540 кВ. При отсутствии средств защиты, включенные в обе сети компьютеры, несомненно, будут выведены из строя.

Рис. 3.25. Индуктивное влияние тока молнии на электрический контур внутри здания G образованный проводами питания и сигнальными линиями при ударе молнии в молниеприемник В здания.



Мероприятия по снижению индуктированных напряжений предусматривают на основе соотношений (3.18)-(3.20):

- снижение до возможных пределов взаимной индуктивности L_{12} , т.е. уменьшение l за счет сокращения длины проводников, увеличение расстояния между сетевыми и информационными проводами, уменьшение площади контура, подвергающегося воздействию;

- уменьшение скорости изменения во времени потока $\Delta\Phi/\Delta t$ при помощи короткозамкнутой петли K , расположенной непосредственно у сигнального контура (рис. 3.22, в), или соединение печатной панели экрана S мостиком B в замкнутое кольцо (см. рис. 3.17, б);

- осуществление связи контуров 1 и 2 ортогонально направлению силовым линиям магнитного поля (рис. 3.22, з). Этот способ эффективен в устройствах, выполненных в виде катушек;

- компенсация индуктированного в контуре 2 напряжения путем скрутки проводов (рис. 3.22, д). При этом частичные потоки Φ_i создают напряжения, направленные противоположно.

- снижение действия созданного магнитного потока путем скручивания соединительных проводов контура 1. При этом создаются встречно направленные компоненты потока, а их воздействие на вторичный контур компенсируется;

- экранирование кабелей, соединительных проводов (рис. 3.22, е), модулей и приборов ферромагнитными экранами (трубами, металлическими шлангами, стальными корпусами), причем экранирующее воздействие тем сильнее, чем выше магнитная проницаемость материала и толще стенка экрана. Проводящие соединения между экраном и землей необязательны, однако они необходимы для защиты от напряжения прикосновения. Для ослабления воздействий, вызванных молнией, применяется ферромагнитное экранирование кабелей передачи данных, проложенных по воздуху, экраны заземляются на обоих концах.

3.5. Воздействие электромагнитного излучения

Причиной воздействия излучения являются электромагнитные волны, излучаемые токовым контуром и распространяющиеся в окружающем пространстве со скоростью света $c = 300000 \text{ км/с}$ (см. рис. 3.26, а). Между длиной волны λ и частотой f существует известная связь:

$$\lambda = c / f \quad (3.21)$$

При $x > \lambda/l$ или же $x > c/2\pi f$ соблюдаются условия дальнего поля. Эти условия необходимо учитывать при частоте 1 МГц на расстоянии $x = 50 \text{ м}$, а при частоте 1 ГГц - на расстоянии $x = 5 \text{ см}$ от источника (при частоте 10 МГц $x = 5 \text{ м}$, а при $f = 100 \text{ МГц}$ $x = 0,5 \text{ м}$). Напряженность электрического поля на расстоянии x от источника

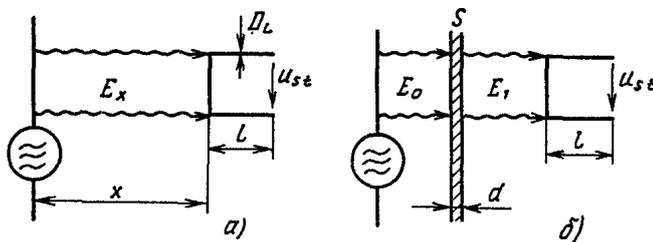


Рис. 3.26. Электромагнитное влияние на контур длиной l без экрана (а) и с экраном S толщиной d (б)

мощностью P может быть определена из соотношения

$$E_x = 0,3\sqrt{P} / x, \quad (3.22)$$

При воздействии электромагнитной волны на электропроводные объекты вследствие антенного эффекта возникают высокочастотные напряжения, непосредственно или косвенно являющиеся помехами в сигнальных контурах. Приблизительно индуктируемая ЭДС в антенне рассчитывается

$$U_{st} = E_x l_{eff}, \quad (3.23)$$

l_{eff} - эффективная длина антенны.

Длина l_{eff} зависит от размеров устройства, обладающего антенными свойствами (D_L и l на рис. 3.26, а) и длины падающей волны. Для конкретных объектов она определена в нормах DIN/VDE0848, ч.1. Например, при частоте $f=300 \text{ МГц}$, $E_x=10 \text{ В/см}$, $l = 0,1 \text{ м}$, $l=0,2 \text{ м}$, напряжение $U_{st} = 2 \text{ В}$.

Защитой от электромагнитного поля, как для ослабления излучения, так и для уменьшения проникновения, служат экранирующие стенки, устанавливаемые между источником и приемником (рис. 3.26, б). Такой стенкой напряженность падающего поля уменьшается от значения E_0 до значения E_1 . Это обусловлено, с

одной стороны, поглощением энергии поля в материале экрана, а с другой - отражением падающей волны. Затухание зависит от толщины экрана, электропроводности и магнитной проницаемости материала, частоты излучения.

Вопросы для самопроверки

1. Какие виды возможных связей между контурами и какие виды возможных путей проникновения помех вам известны?
2. Какие существуют способы снижения гальванического влияния и проникновения электромагнитных помех из одного контура в другой?
3. Какие существуют способы снижения гальванического влияния и проникновения электромагнитных помех по цепям заземления?
4. Какие существуют способы снижения емкостного влияния и проникновения электромагнитных помех из одного контура в другой?
5. Какие существуют способы снижения емкостного влияния контуров с общим проводом системы опорного потенциала?
6. Какие существуют способы снижения емкостного влияния токовых контуров с большой емкостью относительно земли?
7. Чем опасно емкостное влияние молнии на сигнальные линии?
8. Какие существуют способы снижения индуктивного влияния и проникновения электромагнитных помех из одного контура в другой?
9. В чем состоит опасность индуктивного влияния разряда статического электричества на корпус прибора?
10. В чем состоит опасность индуктивного влияния разряда молнии в молниеотвод при наличии вблизи сигнальных линий?
11. В чем состоит опасность индуктивного влияния тока молнии на электрический контур внутри здания образованный проводами питания и сигнальными линиями при ударе молнии в молниеприемник здания?
12. При каких параметрах помехи начинают соблюдаться условия «дальнего поля»?
13. Назовите способы снижения помех от излучения электромагнитного поля.

4. ПАССИВНЫЕ ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ И ЗАЩИТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

4.1. Обзор

При обеспечении электромагнитной совместимости во многих случаях необходимо ослабить эмиссию помех, обусловленную гальваническими связями с источниками, или проникновение таких помех через чувствительный элемент, предотвратить возникновение перенапряжений в потенциальных источниках помех и ограничить опасные для изоляции перенапряжения или для функционирования напряжения помех, а также ослабить излучаемые источником электромагнитные поля и предотвратить проникновение этих полей через чувствительные элементы. Для этого используются пассивные помехоподавляющие устройства в виде фильтров, ограничителей напряжения и экранов. В зависимости от решаемой задачи они могут быть установлены непосредственно у чувствительного элемента (рис. 4.1, б) или у источника (рис. 4.1, в). Наглядно защитное действие таких компонентов представляется в виде отношения z/z_r .

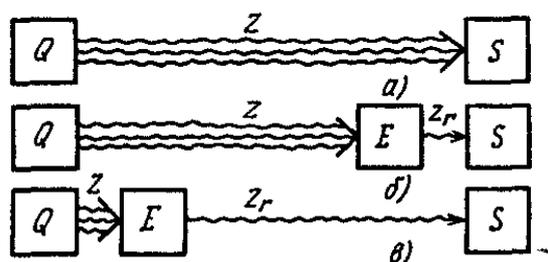


Рис. 4.1. Взаимные расположения источника помех Q , приемника S и защитного компонента E :

а - защита отсутствует; б - защита приемника; в - подавление помехи у источника

4.2. Фильтры

4.2.1. Принцип действия

Помехоподавляющие фильтры представляют собой элементы для обеспечения затухания поступающей по проводам помехи. Целесообразное их применение предполагает, что спектральные составляющие полезного сигнала и помехи достаточно отличаются друг от друга. Это позволяет при соответствующих параметрах фильтра обеспечить селективное демпфирование помехи при отсутствии заметного искажения полезного сигнала. При этом собственно эффект демпфирования достигается делением напряжения. Поясним это на простейшем примере.

Если в низкочастотный контур полезного сигнала (полезные величины \dot{U}_N, \dot{I}_N на рис. 4.2, а) поступает высокочастотное напряжение помехи \dot{U}_0 , то на полном сопротивлении приемника \dot{Z}_S появляется составляющая напряжения помехи

$$\dot{U}_{st} = \dot{U}_0 \frac{\dot{Z}_S}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_S} \quad (4.1)$$

Введение зависящего от частоты продольного полного сопротивления \dot{Z}_L (рис. 4.2, б), например, в форме ωL , представляющего для низкочастотного тока \dot{I}_{st} - очень малое, а для высокочастотного тока \dot{I}'_{st} - очень большое сопротивление, обеспечивает ослабление помехи, и составляющая, напряжения помехи снижается до

$$\dot{U}'_{st} = \dot{U}_0 \frac{\dot{Z}_S}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_L + \dot{Z}_S} \quad (4.2.)$$

Достижимый эффект затухания можно характеризовать коэффициентом затухания - отношением падений напряжений на \dot{Z}_S при наличии \dot{Z}_L и без него:

$$\left| \frac{\dot{U}_{st}}{\dot{U}'_{st}} \right| = \left| \frac{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_L + \dot{Z}_S}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_S} \right|. \quad (4.3.)$$

Коэффициент затухания приводится, как правило, в виде логарифма отношения напряжений и выражается в децибелах:

$$a_e = 20 \lg \left| \frac{\dot{U}_{st}}{\dot{U}'_{st}} \right|. \quad (4.4)$$

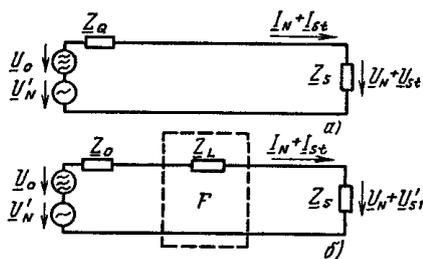


Рис. 4.2. Цепь без фильтра (а) и с фильтром (б)

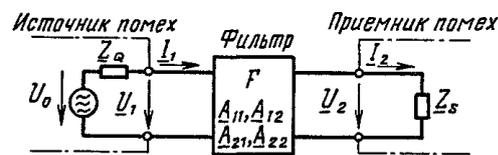


Рис. 4.3. Токовый контур с фильтром

Согласно (4.3) эффект затухания зависит не только от \dot{Z}_L , но и от полных сопротивлений \dot{Z}_Q и \dot{Z}_S .

В общем случае, фильтр F любой структуры представляет собой четырехполюсник, объединяющий источник помехи и приемник (рис. 4.3). Для расчета фильтра пригодны известные соотношения:

$$\dot{U}_1 = \dot{A}_{11}\dot{U}_2 + \dot{A}_{12}\dot{I}_2; \quad (4.5)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{A}_{21}\dot{U}_2 + \dot{A}_{22}\dot{I}_2, \quad (4.6)$$

Где $\dot{A}_{11}, \dot{A}_{12}, \dot{A}_{21}, \dot{A}_{22}$ - комплексные параметры четырехполюсника.

Их конкретные значения для простейших фильтровых структур представлены в табл. 4.1.

Далее (рис. 4.3) можно записать:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_1 + \dot{Z}_Q \dot{I}_1; \quad (4.7)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{Z}_S \dot{I}_2. \quad (4.8)$$

Напряжение на входе приемника без фильтра определяется как

$$\dot{U}_{20} = \dot{U}_0 \frac{\dot{Z}_S}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_S}. \quad (4.9)$$

Аналогично (4.4) ослабление сигнала в фильтре описывает как логарифм отношения напряжений на входе приемника без фильтра \dot{U}_{20} и с фильтром \dot{U}_2 :

$$a_e = 20 \lg |\dot{U}_{20} / \dot{U}_2|. \quad (4.10)$$

Коэффициент затухания в фильтре любой структуры в соответствии с (4.5)-(4.10) можно выразить как

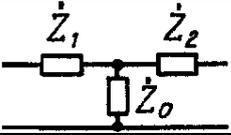
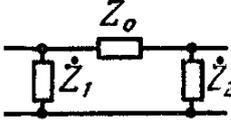
$$a_e = 20 \lg \left| \frac{\dot{Z}_S}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_S} \dot{A}_{11} + \frac{1}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_S} \dot{A}_{12} + \frac{\dot{Z}_Q \dot{Z}_S}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_S} \dot{A}_{21} + \frac{\dot{Z}_Q}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_S} \dot{A}_{22} \right|. \quad (4.11)$$

Таблица 4.1.

Параметры четырехполюсников простейших схем фильтров

Схема	Коэффициент			
	\dot{A}_{11}	\dot{A}_{12}	\dot{A}_{21}	\dot{A}_{22}
	1	\dot{Z}_1	0	1
	1	0	$1/\dot{Z}_0$	1
	$1 + \dot{Z}_1 / \dot{Z}_0$	\dot{Z}_1	$1/\dot{Z}_0$	1
	1	\dot{Z}_2	$1/\dot{Z}_0$	$1 + \dot{Z}_2 / \dot{Z}_0$

Таблица 4.1. (Продолжение)

	$1 + \dot{Z}_1 / \dot{Z}_0$	$\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_0}$	$1 / \dot{Z}_0$	$1 + \dot{Z}_2 / \dot{Z}_0$
	$1 + \dot{Z}_0 / \dot{Z}_2$	\dot{Z}_0	$1 / \dot{Z}_1 + 1 / \dot{Z}_2 + \frac{\dot{Z}_0}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}$	$1 + \dot{Z}_0 / \dot{Z}_1$

Отсюда следует, что коэффициент затухания зависит, с одной стороны от параметров фильтра $\dot{A}_{11}, \dot{A}_{12}, \dot{A}_{21}, \dot{A}_{22}$ (см. табл. 4.1), а с другой - от полных сопротивлений участвующих в процессе источника и приемника помех, что уже отмечалось в связи с обсуждением (4.4). Коэффициент затухания в зависимости от конкретных условий может иметь сильно различающиеся значения для одного и того же фильтра (рис. 4.4).

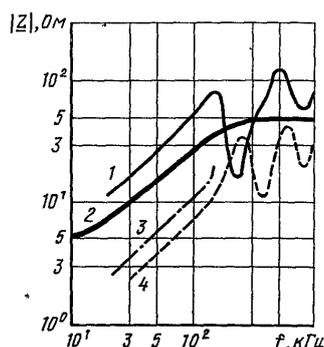


Рис. 4.4. Кажущееся сопротивление электроэнергетических сетей:

1 - жилые территории с воздушными линиями электропередачи; 2 - публикация 3 CISFR; 3 - промышленные сети; 4 - жилые территории с кабельными линиями

Один и тот же фильтр при различных условиях, т.е. в зависимости значения и частотных характеристик полных сопротивлений \dot{Z}_0 и \dot{Z}_s , может вызывать сильно различающееся затухание. Поэтому, практически невозможно задать общую характеристику фильтра независимо от конкретных условий, и приводимые в фирменных каталогах значения коэффициента затухания фильтров согласно (4.10) относятся всегда к особому случаю системного согласования ($\dot{Z}_0 = \dot{Z}_s$) и к средним значениям \dot{Z}_0 и \dot{Z}_s , например 50, 60, 150 или 600 Ом. Соответствующие нормированные в международном масштабе схемы для измерения коэффициента затухания $a_e(f)$ приведены на рис. 4.5.

Паспортные данные о коэффициенте затухания $a_e(f)$ можно использовать лишь при конкретных обстоятельствах, а именно в качестве показателя качества при изготовлении фильтра или как характеристику при сравнении фильтров одинаковой конструкции, поставляемых раз-

личными изготовителями, также при анализе фильтрового действия в сопоставимых схемах.

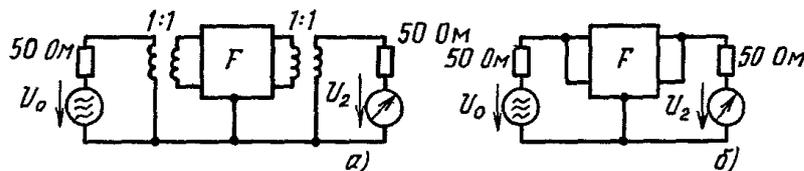


Рис. 4.5. Схемы для измерений симметричного (а) и асимметричного коэффициентов затуханий (б) a_e фильтров:

при $Z_0 = Z_s = 50 \text{ Ом}$ из (4.10) следует $a_e = 20 \lg U_0/2 U_2$, дБ, так как $U_{20} = U_0/2$ согласно (4.9).

Рекомендации по выбору структуры фильтра

Таблица 4.2

Сопротивление источника	Схема фильтра	Сопротивление приемника
Мало		Мало
Велико		Велико
Мало		Велико
Велико		Мало
Мало, неизвестно		Мало, неизвестно
Велико, неизвестно		Велико, неизвестно

Во всех остальных случаях фактическая эффективность фильтра определяется лишь экспериментально в соответствии с (4.10) или же расчетным путем согласно (4.11), если точно известно соотношение полных сопротивлений Z_0 и Z_s .

Если значения Z_0 и Z_s известны приблизительно, выбор подходящей фильтровой структуры может производиться с использованием данных табл. 4.2.

4.2.2. Фильтровые элементы

Основными составными элементами фильтров являются катушки индуктивности и конденсаторы. Они могут использоваться для подавления помех отдельно или в комбинации друг с другом (см. табл. 4.2). Рисунки 4.6 и 4.7 дают общие представления о важнейших видах исполнения фильтров. Фильтровые элементы представляют собой в зависимости от номинального напряжения и пропускной способности по току приборы для монтажа в помещениях, компактные элементы, встраиваемые в шкафы, приборы, в разъемы или чип-элементы для монтажа на печатных платах.

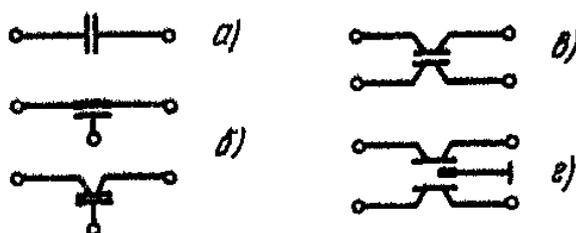


Рис. 4.6. Примеры выполнения помехозащитных конденсаторов:
 а - конденсатор с двумя выводами; б - конденсатор-ввод с тремя выводами;
 в - конденсатор-четырёхполюсник; г - многоэлементный конденсатор

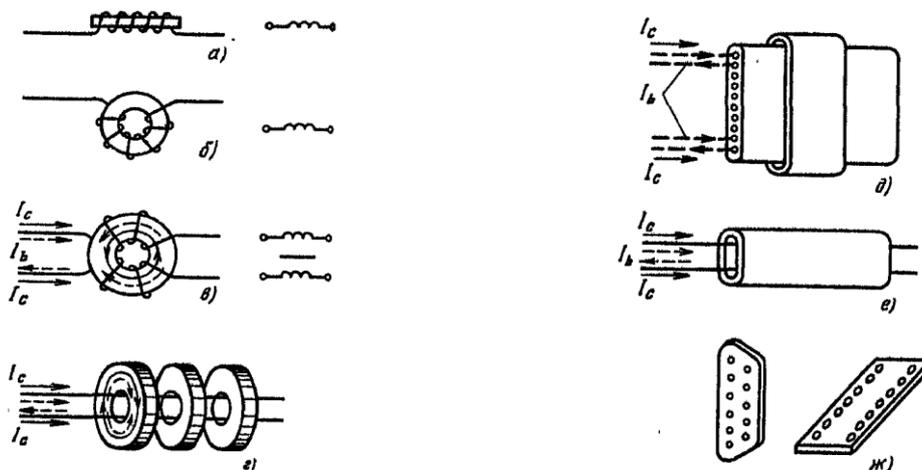


Рис. 4.7. Примеры выполнения помехозащитных катушек с рабочим током I_b , и синфазным током помехи I_c :

а - стержневая катушка; б - простейшая катушка с кольцевым сердечником; в - кольцевая катушка с двумя встречными обмотками и компенсацией магнитного потока, создаваемого рабочим током I_b ; г - ферритовые кольца; д - ферритовые сердечники для плоских жгутов; е - линии с повышенным затуханием, с охватывающей оболочкой из материала с высоким затуханием; ж - ферритовые пластины со многими отверстиями для штекерных соединений и интегральных схем

Двухполюсные конденсаторы (рис. 4.6, а) в зависимости от соединения их в токовую цепь (между прямым и обратным проводами или

же между проводом и землей) пригодны для защиты как от синфазных, так и от противофазных помех (рис. 4.8, б). Конденсаторы-вводы (рис. 4.6, б) при соединении с корпусом служат для защиты только от синфазных помех (рис. 4.8, б). Конденсаторы-четырёхполюсники (рис. 4.6, в) защищают от противофазных помех (рис. 4.8, в), а многосекционные конденсаторы (рис. 4.6, з) - как от противофазных, так и синфазных помех (рис. 4.8, з).

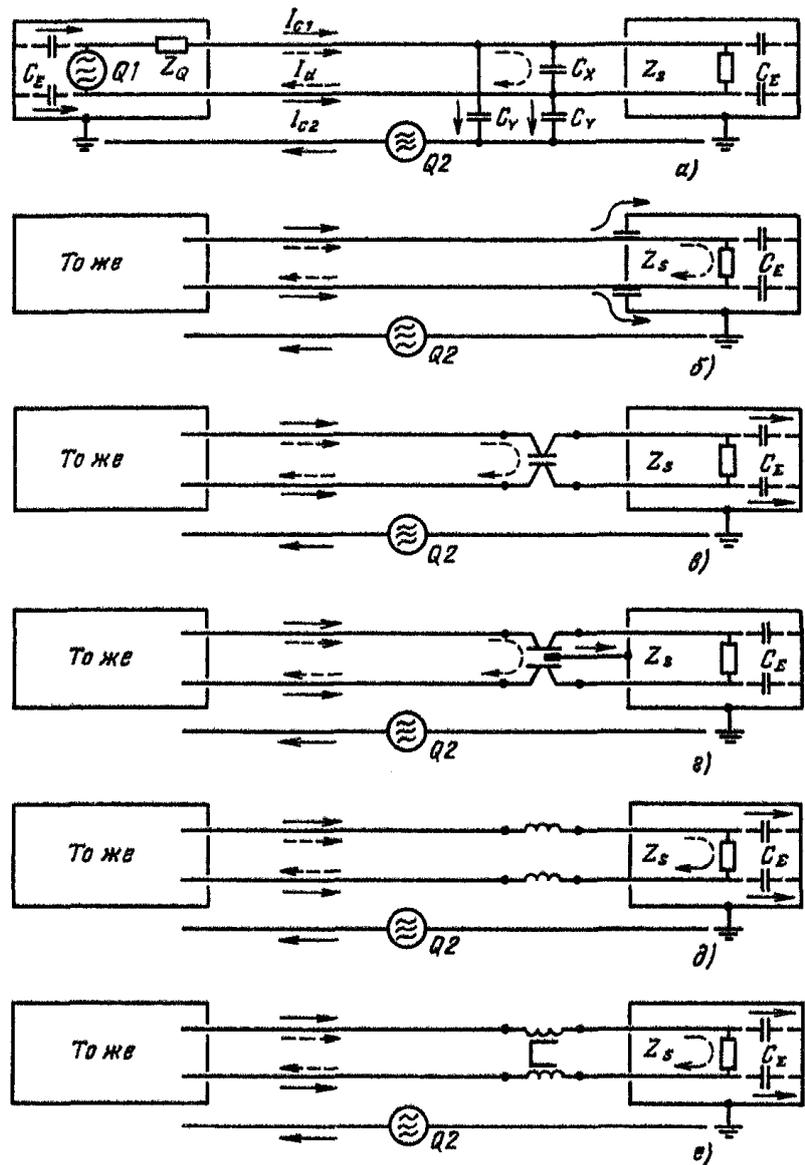


Рис. 4.8. Защита катушками индуктивности и конденсаторами от синфазных и противофазных токов помех (пояснения см. в тексте):

Q_1, Q_2 - источники противофазных I_d и синфазных I_c токов помех; C_E - паразитные емкости участка схемы относительно заземленного корпуса.

Защитные катушки индуктивности представляют собой катушки с возможно малыми емкостью и активным сопротивлением обмотки. Они имеют замкнутые или разомкнутые сердечники (стержни, кольца из ферромагнитного материала - трансформаторной стали, металлооксидной керамики, прессованного порошка из карбонильного железа). Катушки индуктивности со стержневым или простым кольцевым сердечником (рис. 4.7, а, б) демпфируют как синфазные, так и противофазные сигналы (рис. 4.8, д).

Так как в катушках индуктивности с сердечниками магнитная цепь не замкнута, то их магнитная проницаемость и индуктивность практически не зависят от рабочего тока. Впрочем, при больших токах габаритные размеры таких катушек индуктивности велики. Меньшие размеры имеют катушки индуктивности со скомпенсированным магнитным полем или током (рис. 4.7, в), в которых магнитное поле, создаваемое рабочим током I_b , компенсируется благодаря встречному включению обмоток. Такие катушки индуктивности демпфируют лишь синфазные токи I_c (рис. 4.8, е). Это же относится к ферритовым кольцам (рис. 4.7, з), одеваемым на провода или на плоские жгуты (рис. 4.7, д), к линиям с усиленным затуханием (рис. 4.7, е), имеющим, в частности, при частотах $f > 1$ МГц хорошие показатели затухания, к ферритовым пластинам со многими отверстиями (рис. 4.7, ж), применяемым в разъемах и внутренних соединениях.

При использовании катушек индуктивности и конденсаторов для фильтрации следует иметь в виду, что любой конденсатор наряду с емкостью C обладает паразитной индуктивностью L_p , зависящей от длины выводов конденсатора. Она особенно велика у двухполюсных конденсаторов и мала у коаксиальных конденсаторов-выводов. Каждая катушка индуктивности в дополнение к ее индуктивности L имеет паразитную емкость C . Поэтому для кажущегося сопротивления существует зависимость от частоты, представленная на рис. 5.9, обладающая резонансной точкой, в отличие от

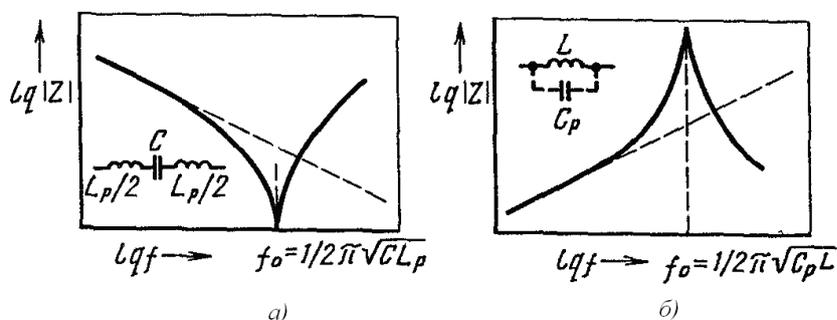
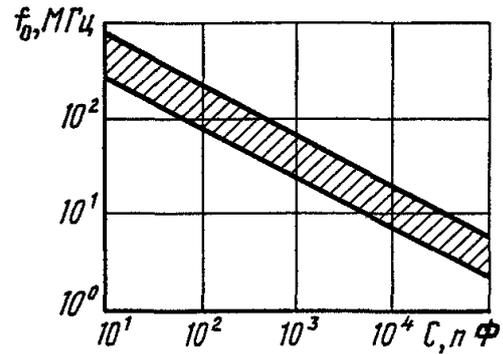


Рис. 4.9. Частотные зависимости кажущихся сопротивлений конденсатора (а) и катушки индуктивности (б)

Рис. 4.10. Значения собственных резонансных частот f_0 помехоподавляющих конденсаторов в зависимости от их емкости C



идеальной характеристики. Сведения о собственных резонансных частотах конденсаторов, применяемых для подавления помех, приведены на рис. 4.10. Пренебрегая активной составляющей, можно для зависимостей на рис. 4.9 использовать следующие выражения.

Для конденсаторов (рис. 4.9, а) кажущееся сопротивление

$$\dot{Z} = \frac{1}{j\omega C} + j\omega L_p \quad (4.12)$$

Идеальная характеристика при отсутствии L_p рассчитывается как

$$\lg|\dot{Z}| = \lg(1/2\pi C) - \lg f. \quad (4.13)$$

Реальная характеристика с учетом L_p :

$$\lg|Z| = \lg \left| \frac{(f/f_0)^2 - 1}{2\pi f C} \right| \quad (4.14)$$

где $f_0 = 1/2\pi\sqrt{CL_p}$.

Для катушек индуктивности (рис. 4.9, б) кажущееся сопротивление

$$\dot{Z} = \frac{j\omega L \frac{1}{j\omega C_p}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C_p}} \quad (4.15)$$

идеальная характеристика при отсутствии C_p

$$\lg|\dot{Z}| = \lg 2\pi L + \lg f; \quad (4.16)$$

реальная характеристика с учетом C_p

$$\lg|\dot{Z}| = \lg \left| \frac{2\pi f L}{1 - (f/f_0)^2} \right|. \quad (4.17)$$

Здесь $f_0 = 1/2\pi\sqrt{C_p L}$.

В дополнение к сказанному определим коэффициент затухания, дБ, фильтра - поперечного конденсатора (например, C_X на рис. 4.8, а), обладающего индуктивностью, в режиме согласования ($\dot{Z}_0 = \dot{Z}_S + \dot{Z}_A$).

При $A_{11} = 1$, $A_{12} = 0$, $A_{21} = 1/Z_0$, $A_{22} = 1$ из (4.11)

$$a_e = 20 \lg |1 + \dot{Z}_A / 2\dot{Z}_0|. \quad (4.18)$$

При кажущемся сопротивлении конденсатора $\dot{Z}_0 = 1/j\omega C + j\omega L_p$ и $\omega_0 = 1/\sqrt{CL_p}$ для резонансной частоты коэффициент затухания

$$a_e = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\omega C Z_A}{2[1 - (\omega/\omega_0)^2]} \right)^2 \right]. \quad (4.19)$$

Для частот, отличающихся от ω_0 , можно использовать следующие приближения:

- при $(\omega/\omega_0)^2 > 1$ и $(\omega C Z_A / 2)^2 > 1$

$$a_e = 20 \lg \pi C Z_A + 20 \lg f; \quad (4.20)$$

- при $(\omega/\omega_0)^2 > 1$ и $(Z_A / 2\omega L_p)^2 > 1$

$$a_e = 20 \lg Z_A / 4\pi L_p - 20 \lg f. \quad (4.21)$$

На рис. 4.11 показаны прямые, рассчитанные по (4.20) и (4.21) для определенного значения Z_A , а также зависимость коэффициента затухания a_e от частоты при различных C и L_p . Уравнения (4.19)-(4.21) совместно с рис. 4.11 показывают, что при заданной емкости C коэффициент затухания a_e тем выше, чем больше Z_A и меньше паразитная индуктивность конденсатора L_p .

Отсюда можно сделать два вывода:

- не каждый имеющийся в распоряжении конденсатор можно использовать в качестве помехоподавляющего;

- емкостный фильтр предпочтителен, если имеют место высокие сопротивления источника и приемника помех (см. табл. 4.2).

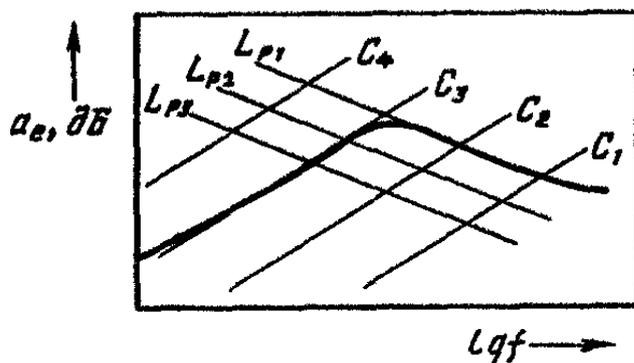


Рис. 4.11. Коэффициент затухания a_e фильтра, состоящего из реальных конденсаторов, в зависимости от частоты f :

$$L_{p3} > L_{p2} > L_{p1}; \quad C_4 > C_3 > C_2 > C_1$$

Коэффициент затухания фильтра любой другой структуры можно таким же образом приближенно или точно рассчитать. Рисунок 4.12, б дает представление о затухании LC-фильтра с реальными элементами (рис. 4.12, а); в зависимости от диапазона частот коэффициент затухания определяется параметрами фильтра L , C или паразитными параметрами L_p , C_p . При низких частотах, когда элементы фильтра можно считать идеальными, коэффициент затухания a_e увеличивается пропорционально квадрату частоты. Затем начинает сказываться влияние паразитных параметров L_p и C_p , и a_e остается приблизительно неизменным. При высоких частотах эффект демпфирования в основном определяется паразитными параметрами L_p , C_p , и коэффициент a_e уменьшается обратно пропорционально квадрату частоты.

Все предыдущие рассуждения относятся к случаю синусоидальной помехи. Если имеет место импульсная помеха, то необходимо определить ее спектр и на основании изложенного материала можно определить коэффициент затухания.

Отметим, что демпфирующие свойства фильтра при импульсном воздействии не всегда выражаются зависимостью a_e от частоты, так как часто затрудняется переход от частотной области во временную вследствие нелинейности элементов фильтра, в частности катушек индуктивности.

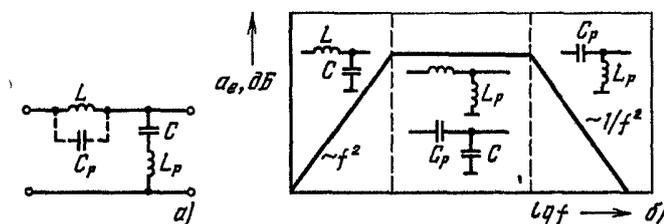


Рис. 4.12. Коэффициент затухания a_e фильтра LC :

а - схема замещения фильтра; б - принципиальная частотная зависимость коэффициента затухания a_e

Однако при известной форме импульса помехи (рис. 4.13) в первом приближении можно при выборе фильтра исходить из того, что область пропускания фильтра должна достигать по крайней мере частот $f_g = 1/\Delta t$ или $f_g = 1/T_r$. Например, при времени нарастания $T_r = 5$ нс частота $f_g = 200$ МГц.

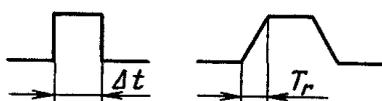


Рис. 4.13. Формы импульсов

4.2.3. Сетевые фильтры

Сетевые помехоподавляющие фильтры представляют собой фильтры низких частот, свободно пропускающие напряжение сети (полезный сигнал) и фильтрующие содержащиеся в сети высокочастотные составляющие (гармонические, в том числе и образующие спектр импульсных помех). Их применение преследует две цели: во-первых, защиту устройства от помех, поступающих из сети питания, и, во-вторых, снижение уровня эмиссии возможной помехи, исходящей от прибора по проводам питания. Продольный элемент фильтра выбирается с учетом потребляемого из сети тока. Хотя обычно значение полного сопротивления источника и приемника помех неизвестно, часто можно принять сопротивление со стороны сети малым, а со стороны нагрузки - большим. В связи с этим для защиты приборов от помех со стороны сети доминируют фильтры (см. строку 3 в табл. 4.2). На рис. 4.14 приведена схема фильтра, содержащего катушку индуктивности со скомпенсированным магнитным полем. Фильтр содержит конденсатор C_x для демпфирования симметричных напряжений помехи и два конденсатора

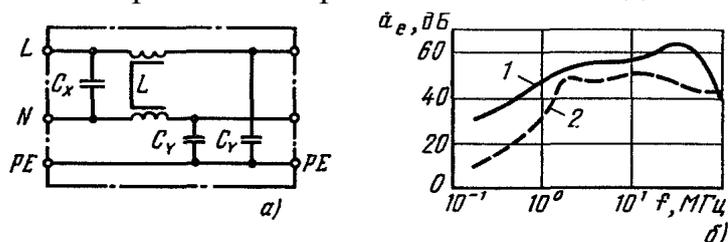
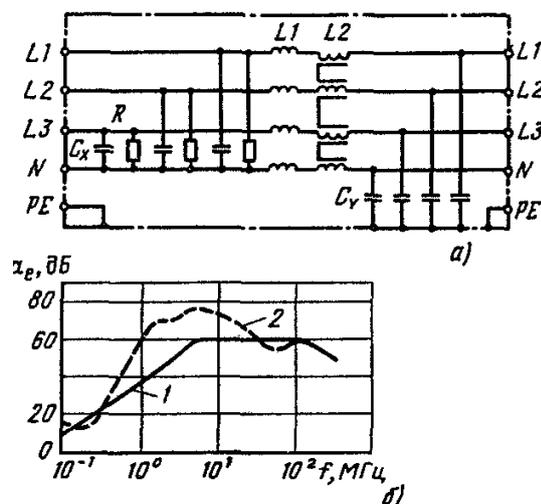


Рис. 4.14. Пример сетевого фильтра на 250 В, 1 А:

а - схема, $C_x = 0,1$ мкФ, $C_y = 2 \times 3$ нФ, $L = 2 \times 3,7$ мГн; б - частотная зависимость α_e , схемы измерений согласно рис. 4.5; 1 - асимметричные помехи; 2 — симметричные помехи

Рис. 4.15. Пример трехфазного сетевого фильтра на 440 В, 16 А:

а - схема, $L1 = 60$ мГн, $L2 = 4,4$ мГн, $C_x = 2,2$ мкФ, $C_y = 15$ нФ, R - разрядные сопротивления; б - частотная зависимость α_e : 1 - асимметричные помехи; 2 - симметричные помехи



C_Y для отвода асимметричных токов помехи. Впрочем, существует множество вариаций фильтров, различающихся в зависимости от изготовителя схемными и конструктивными деталями и поэтому обладающих различными демпфирующими свойствами.

В заключение приведем схему и частотную характеристику трехфазного сетевого фильтра (рис. 4.15).

Через типичные для сетевых фильтров конденсаторы, включенные между проводами сети и, как правило, заземленным корпусом прибора (C_Y на рис. 4.14 и 4.15), в нормальном режиме протекает ток. При этом не должно создаваться опасности при прикосновении к корпусу прибора в отсутствие или повреждении заземляющего провода. Поэтому ток через конденсаторы не должен превышать значений, лежащих в диапазоне 0,75-3 мА, что соответствует предельному значению емкости конденсаторов C_Y .

Приведенный пример иллюстрирует, что при использовании фильтров необходимо удовлетворять требованиям соответствующих норм по технике безопасности (напр. VDE 0565).

Библиографический список источников информации

1. Э. Хабигер Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике: Пер. с нем./ И.П. Кужекин; Под ред. Б.К. Максимова.-М.: Энергоатомиздат, 1995.-304 с.: ил.
2. А. Шваб Электромагнитная совместимость. Пер. с нем. В.Д. Мазина и С.А. Спектора 2-е изд., перераб. и доп./ Под ред. Кужекина. М.: Энергоатомиздат, 1998. 480 с., ил.
3. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике./ Под ред. А.Ф. Дьякова.-М.: Энергоатомиздат, 2003.-768 с.
4. Гармоники в электрических системах: Пер. с англ./Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер.- М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с., ил.
5. Кармашев В.С. Электромагнитная совместимость технических средств.Справочник. – М.; 2001.