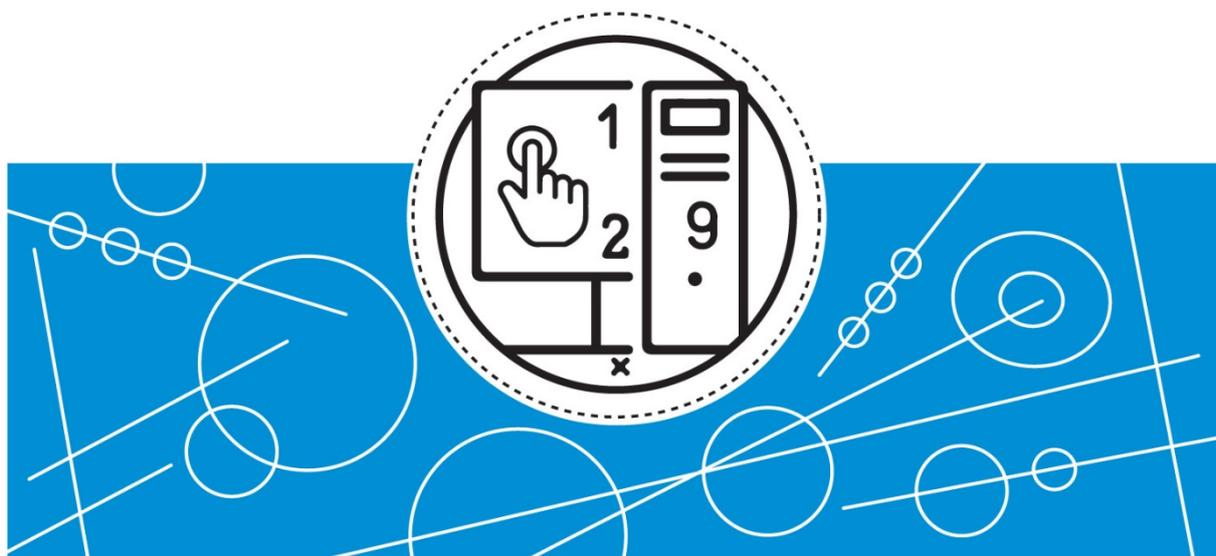


ІТМО

Г.Н. ЛУКЬЯНОВ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ



**Санкт-Петербург
2026**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Г.Н. Лукьянов

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлениям подготовки 12.04.01, 15.04.04
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры**

ИТМО

**Санкт-Петербург
2026**

Лукьянов Г.Н., Электромагнитная совместимость – СПб: Университет ИТМО, 2026. – 60 с.

Рецензент: Коняхин И.А., доктор технических наук, профессор (квалификационная категория "ординарный профессор"), институт "Высшая инженерно-техническая школа" Университета ИТМО.

Пособие посвящено одной из самых актуальных задач современной электроники и автоматизации — обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств. В условиях тотальной цифровизации и миниатюризации устройств вопросы помехоустойчивости и минимизации электромагнитного загрязнения среды становятся критическим фактором надежности систем. Особенное значение ЭМС имеет в измерительных системах и устройствах, так как сигнал помехи, наведенной посторонним электромагнитным излучением, может в сотни и тысячи раз превышать собственно измеряемый сигнал. Меры, позволяющие существенно уменьшить влияние помехи, рассмотрены в данном учебном пособии. Для облегчения понимания в пособии приводится ряд практических примеров. Учебное пособие является методическим обеспечением при изучении курса «Электромагнитная совместимость» образовательных программ магистратуры 12.04.01 «Приборостроение», 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» в Университете ИТМО.

ИТМО

Университет ИТМО – национальный исследовательский университет, ведущий вуз России в области информационных, фотонных и биохимических технологий. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию – ICPC (единственный в мире семикратный чемпион), Google Code Jam, Facebook Hacker Cup, Яндекс.Алгоритм, Russian Code Cup, Topcoder Open и др. Приоритетные направления: IT, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication. Входит в ТОП-100 по направлению «Автоматизация и управление» Шанхайского предметного рейтинга (ARWU) и занимает 74 место в мире в британском предметном рейтинге QS по компьютерным наукам (Computer Science and Information Systems). Представлен в мировом ТОП-200 по телекоммуникационным технологиям (Telecommunication engineering), а также в ТОП-300 по нанонаукам и нанотехнологиям (Nanoscience & Nanotechnology) ARWU. Входит в ТОП-200 по инженерным наукам (Engineering and Technology), в ТОП-300 по физике и астрономии (Physics & Astronomy), наукам о материалах (Materials Sciences), а также по машиностроению, аэрокосмической и промышленной инженерии (Mechanical, Aeronautical & Manufacturing Engineering) рейтинга QS. Лидер проекта «Приоритет – 2030».

© Университет ИТМО, 2026

© Лукьянов Г.Н., 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Природные помехи.....	6
1.1. Основные определения.....	6
1.2. Солнце.....	6
1.3. Атмосферное электричество. Молнии.....	8
2. Техногенные помехи.....	11
2.1. Природа и примеры помех.....	11
2.2. Классификация помех.....	14
2.3. Коэффициент ослабления помехи.....	14
2.4. Помехи с частотой сети (50 Гц).....	17
2.5. Статическое электричество.....	18
2.6. Помехи от сетей мобильной связи, радио и телевизионных передатчиков.....	19
2.7. Частоты сотовой связи в России.....	20
3. Основы теории электромагнитного поля.....	24
3.1. Основные параметры ЭМ полей.....	24
3.2. Магнитные и электрические поля.....	25
3.3. Электростатическое поле.....	25
3.4. Статическое магнитное поле.....	27
3.5. Переменное электрическое поле – емкостные токи.....	27
3.6. Переменное магнитное поле.....	29
4. Распространение помех и их подавление.....	31
4.1. Синфазный дроссель.....	31
4.2. Электромагнитные помехи на конструкциях.....	31
4.3. Заземление, общая точка схемы.....	33
4.4. Силовые устройства (шкафы, мощные потребители).....	34
4.5. Гальваническая развязка.....	36
4.6. Электромагнитная совместимость и печатные платы.....	37
4.7. Паразитные связи на печатных платах.....	37
4.7.1. Паразитная гальваническая связь.....	37
4.7.2. Паразитная емкостная связь.....	40
4.7.3. Паразитная индуктивная связь.....	40
4.7.4. Паразитная связь через электромагнитные волны.....	42
4.7.5. Синфазная и противофазная помехи.....	43
5. Особенности размещения электронных компонентов на печатной плате.....	45
5.1. Особенности разводки печатных плат.....	45
5.2. Входные цепи.....	48
5.3. Особенности работы с МОП и БТИЗ – транзисторами.....	48
6. Экранирование.....	50
6.1. Защитный экран.....	50

6.2. Экранирование входных проводов. Особенности заземления экранной оплетки входных проводов.....	51
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	53
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	54
ЛИТЕРАТУРА.....	56

ВВЕДЕНИЕ

Современная техносфера перенасыщена источниками электромагнитных полей: от смартфонов и базовых станций 5G до мощных преобразователей частоты и систем промышленной автоматизации. В этих условиях электронные модули должны не только корректно функционировать и сохранять работоспособность в сложной помеховой обстановке, но и сами не становиться «электромагнитным мусором», нарушающим работу соседних систем. Вопрос электромагнитной совместимости (ЭМС) перестал быть узкоспециализированной инженерной задачей и стал критическим условием жизнеспособности любого устройства.

Действие этих устройств базируется на применении электромагнитных (ЭМ) полей, которые являются носителями ЭМ энергии, перемещаются в пространстве со скоростью света и взаимодействуют с техническими устройствами. Такое же влияние на электронные устройства, такие как измерительные приборы и электрические сети оказывают и природные факторы – солнечная активность и атмосферное электричество, что также приводит к появлению нежелательных ЭМ полей, отрицательно влияющих на их работу.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) – это способность технического средства функционировать в заданной электромагнитной среде с требуемым качеством, не создавая при этом недопустимых помех другим средствам.

Материалы пособия предназначены для студентов магистратуры в рамках дисциплины «Электромагнитная совместимость» и направлены систематизировать знания в области ЭМС, а также достичь следующие планируемые результаты при изучении данной дисциплины:

знания: номенклатуры теории помехоустойчивости; актуализации нормативных документов в области проектирования и функционирования АСУП; возможных источников помех и их влияния на информационно-измерительные комплексы;

умения: анализировать работу АСУП с помощью технической диагностики; контролировать выполнение нормативов по АСУП; выделять важнейшие источники помех и минимизировать их влияние;

навыки: анализа номенклатуры измеряемых параметров функционирования АСУП; контроля соблюдения нормативных сроков актуализации АСУП; владения методами оценки помех.

Методические рекомендации для преподавателей и обучающихся по применению пособия в учебном процессе при изучении электромагнитных явлений основаны на теоретической базе, а именно изучению системы уравнений Максвелла и теории ЭМ поля, а также на практической базе: многолетнем опыте устройств заземлений, борьбы с помехами, правилах разводки и трассировки печатных плат, устройстве гальванических развязок и т.д.

1. ПРИРОДНЫЕ ПОМЕХИ

1.1. Основные определения

Согласно техническому регламенту Таможенного союза ТР ТС 020/2011 "Электромагнитная совместимость технических средств", *ЭМС технических средств* есть способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной ЭМ обстановке и не создавать недопустимых ЭМ помех другим техническим средствам.

Под *помехой* понимается какое-то постороннее воздействие ЭМ природы, которое можно рассматривать как сигнал, действующий одновременно с измеряемым сигналом и смешивающийся с ним. Его присутствие приводит к появлению погрешности измерения. Классификация помех возможна по ряду признаков.

Внешние помехи (наводки) подразделяются на природные и промышленные или индустриальные.

Наиболее распространенными источниками природных атмосферных помех являются грозовые разряды.

Индустриальные помехи вызваны действием различных энергетических установок, электродвигателей, источников радиоизлучений, компьютеров, электросварочных аппаратов, систем зажигания и т.д.

Также помехи подразделяются на *детерминированные* и *случайные*, а также *гармонические* и *импульсные*.

Детерминированные помехи представляют собой гармонические или импульсные паразитные сигналы. Чаще всего это наводки с частотой питающей сети, 50 Гц.

Случайные (флуктуационные) помехи представляют собой случайные процессы, вызванные одновременным действием нескольких источников сигналов, например, излучением нескольких радиостанций.

1.2. Солнце

До верхних слоев атмосферы доходит удельная мощность солнечного излучения около 1300 Вт/м^2 . До поверхности Земли в ясный летний день доходит около 900 Вт/м^2 [1]. В атмосфере происходит поглощение ультрафиолетовой и инфракрасной части спектра излучения.

На рисунке 1 представлены изображения Солнца в различных областях спектра излучения (на длинах волн $0,171 \text{ мкм}$, $0,284 \text{ мкм}$ и $0,304 \text{ мкм}$).

Рисунок 2 показывает выброс Солнцем протуберанца, состоящего из заряженных частиц, и рисунок 3 представляет влияние этого потока заряженных частиц на магнитное поле Земли.

Солнце создает природные помехи главным образом через возмущения магнитного поля Земли. В грунте и в воде индуцируются большие

флуктуирующие токи. Возникает градиент напряжения между грунтом и водой (рисунок 4). Эти токи, проходя по земле, создают на ней падение напряжения, которое может вывести из строя локальные компьютерные сети, если они не имеют гальванической развязки и расположены в разных зданиях, имеющих разные заземления.

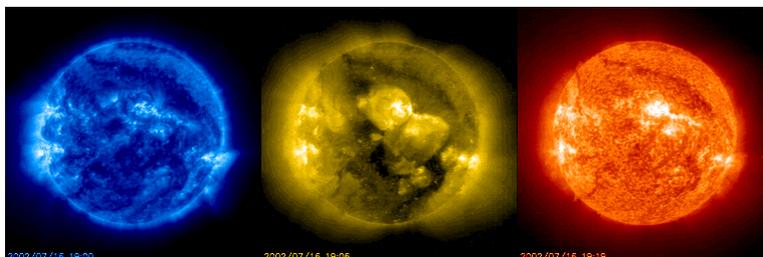


Рис. 1. Изображение Солнца на длинах волн 0,171 мкм, 0,284 мкм и 0,304 мкм (слева направо)

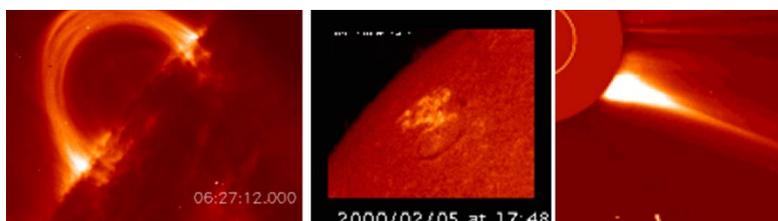


Рис. 2. Солнечные протуберанцы

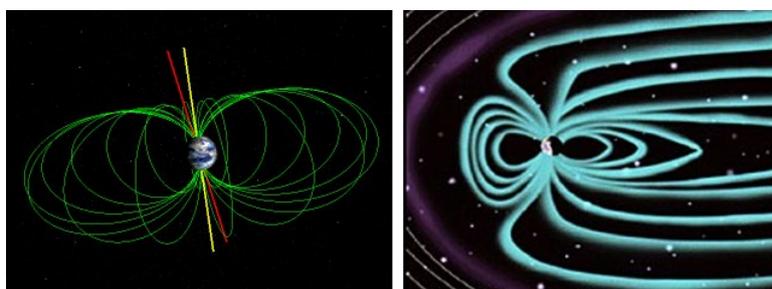


Рис. 3. Магнитное поле Земли: в спокойном состоянии (слева), после встречи с протуберанцем (справа)

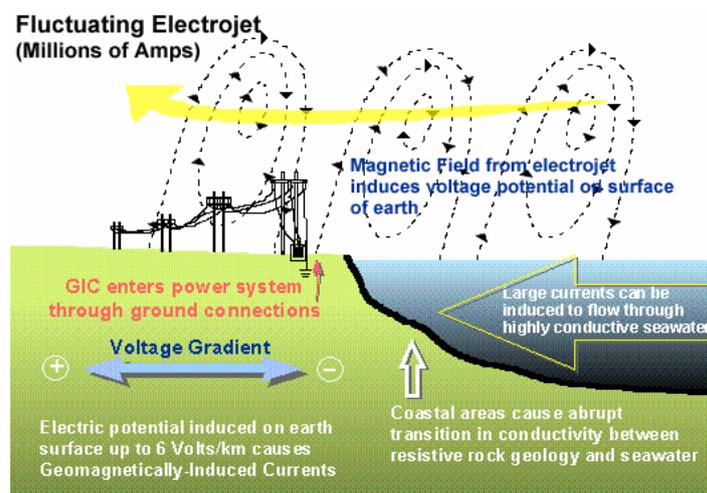


Рис. 4. Магнитная буря и линия электропередачи [2]

1.3. Атмосферное электричество. Молнии

Облака несут потенциал величиной до нескольких миллионов вольт относительно поверхности Земли, чаще отрицательный.

Направление тока молнии может быть как от Земли к облаку при отрицательном заряде облака (примерно 90 % случаев), так и от облака к Земле. Длительность разряда молнии составляет в среднем от 0.2 с до 1–1.5 с, длительность переднего фронта разрядного импульса от 3 до 20 мкс, ток от единиц до сотен кА, температура в канале достигает 20 000 °С, молния сопровождается мощным магнитным полем и радиоволнами. Молнии образуются также при пылевых бурях, метелях, извержениях вулканов. Крутизна переднего фронта импульса тока молнии нормируется как интервал времени между уровнями тока от 30 % до 90 % от максимального значения.

Качественная зависимость развития разряда молнии представлена на рисунке 5.

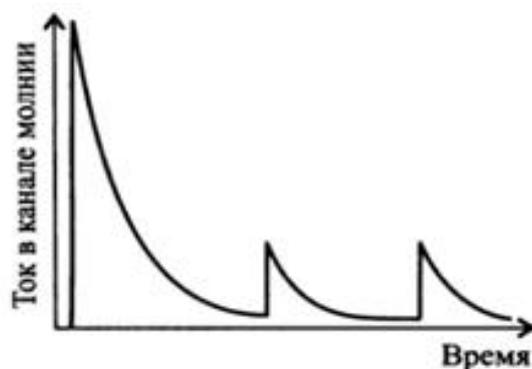


Рис. 5. Качественная зависимость развития разряда молнии, который происходит в виде нескольких последовательных импульсов, I – ток, t – время [4]

Зависимость тока молнии $i(t)$ от времени t описывается выражением [3, 4]:

$$i(t) = \frac{I \cdot (t/\tau_1)^{10} \cdot e^{-t/\tau_2}}{k[1 + (t/\tau_1)^{10}]},$$

где I – максимальное значение тока; k – корректирующий коэффициент, τ_1 – постоянная времени фронта; τ_2 – постоянная времени спада.

Зависимость тока первого и второго импульса молнии и их производных от времени представлена на рисунке 6.

Крутизна фронта в последующих импульсах значительно больше, чем в первом. Максимальная скорость нарастания 1-го импульса составляет 25 кА/мкс, последующих импульсов 280 кА/мкс.

Электрический потенциал грозового облака во время дождя может составлять от 10^7 В до 10^{10} В. Когда напряженность электрического поля между облаком и поверхностью земли достигает 500–1000 В/м, начинается электрический разряд с острых предметов (мачты, трубы, деревья и т.п.). В ходе разряда молнии напряженность поля может резко менять свое направление.

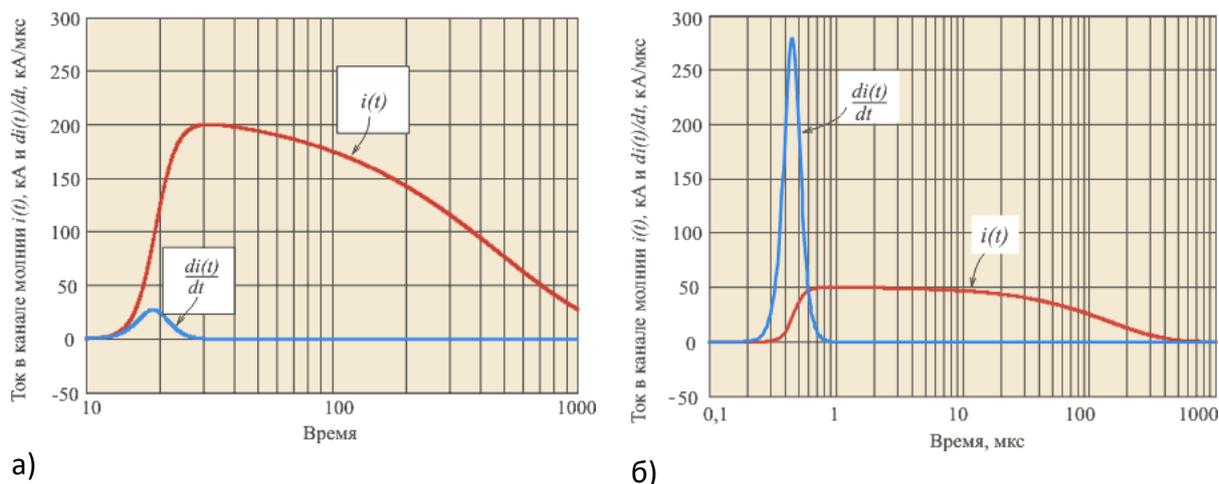


Рис. 6. Зависимость тока первого (а) и второго (б) импульса молнии и его производной от времени [3, 4]

Высокая напряженность поля, вызванная атмосферным электричеством, может наводить потенциалы величиной в несколько тысяч вольт в плавающих цепях с высоким сопротивлением изоляции на землю и приводить к пробоем оптронам в модулях гальванической развязки. Для защиты от атмосферного электричества гальванически изолированные цепи, не имеющие низкоомного пути на землю, должны быть помещены в заземленный электростатический экран или соединены с землей через резистор сопротивлением 0.1–1 Мом. В частности, атмосферное электричество является одной из причин, прокладывания промышленных сетей экранированным кабелем. Экран нужно заземлять только в одной точке.

При производстве электронных компонентов приходится применять специальные меры для их защиты. В частности, МОП-транзисторы имеют в своей структуре так называемые защитные диоды, которые защищают транзистор от выхода из строя пробоем. Затвор отделяется от полупроводниковой подложки (Si) слоем диэлектрика, в качестве которого обычно используется двуокись кремния (SiO₂) (рисунок 7). Чтобы защитить этот диэлектрический слой от пробоя, применяется защитный диод (рисунок 8, 9).

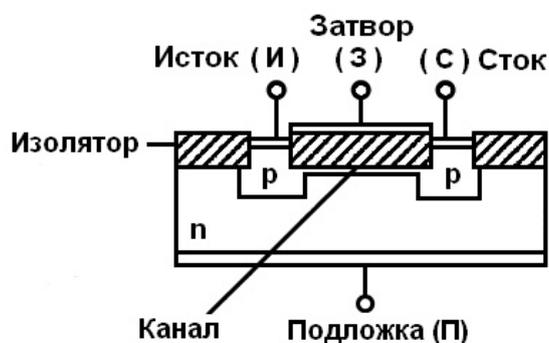


Рис. 7. Затвор отделен от полупроводника (Si) слоем диэлектрика, в качестве которого обычно используется двуокись кремния (SiO₂)

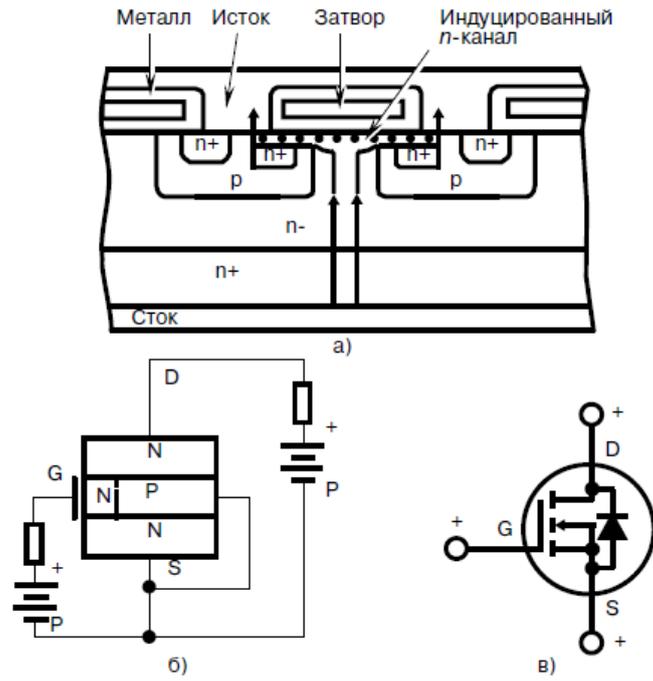


Рис. 8. МОП-транзистор с входящим в его структуру защитным («паразитным») диодом: а – структура, б – схема включения, в – схема включения паразитного диода [8]

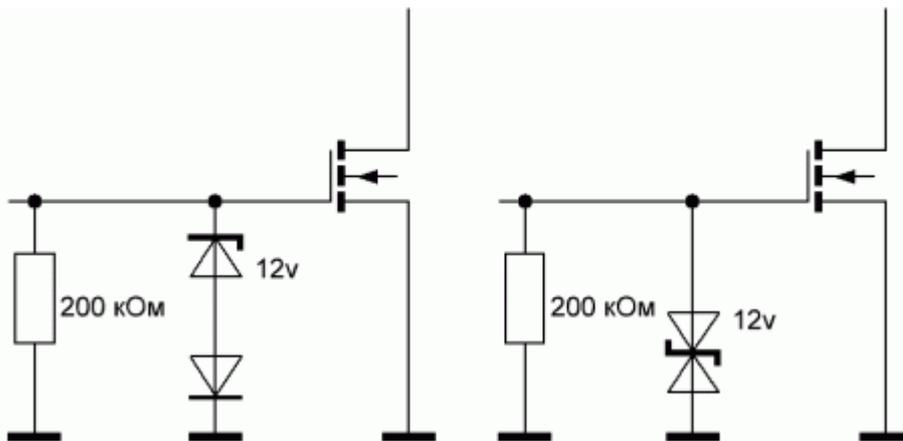


Рис. 9. Использование диода как ограничительного элемента в импульсных схемах с индуктивной нагрузкой [8]

2. ТЕХНОГЕННЫЕ ПОМЕХИ

2.1. Природа и примеры помех

Электромагнитные помехи возникают вследствие природных или технических явлений. Примерами естественных помех могут служить атмосферные или электростатические разряды (Electro Static Discharge, ESD), рассмотренные выше. Они оказывают большое влияние на функционирование электронного оборудования.

В промышленном оборудовании основным источником помех являются процессы переключения в электрических цепях, сопряженные с быстрым изменением токов и напряжений. Это ведет к появлению электромагнитных помех, которые могут быть как периодическими, так и случайными.

Электромагнитная связь между источником и приемником помех может возникать как результат следующих обстоятельств:

- гальванической связи (наиболее распространенный случай), которая создает симметричные помехи;
- емкостной связи, возникающей в результате воздействия переменного электрического поля на паразитные конструктивные емкости;
- индуктивной связи, вызванной нахождением проводника, по которому течет ток, в переменном магнитном поле;
- электромагнитной связи, которая может иметь кондуктивный характер (возникает как наводка на проводники в кабельных жгутах или на проводящие дорожки печатной платы) либо распространяется путем излучения (если ширина зазора между источником и приемником помехи превышает 0.1λ , т.е. длины волны излучения λ).

Когда кондуктивная помеха наводит в проводниках ток с одинаковой амплитудой, протекающий как в прямом, так и в обратном направлении, она называется симметричной, или дифференциальной, помехой. Если ток помехи замыкается на землю или протекает по проводнику в одном направлении, то такая помеха называется асимметричной, или синфазной.

В качестве источников помех могут выступать различные электрические и электронные приборы, устройства и компоненты, в том числе: электродвигатели и трансформаторы, выключатели мощности, разрядники, тиристоры, стабилизаторы и выпрямители, реле, объемные резисторы, мощные транзисторы, диоды, пленочные резисторы, герконовые реле, высокочастотные транзисторы, интегральные схемы.

Рисунок 10 иллюстрирует чувствительность к помехам различных устройств и электронных компонентов.

Помехи, имеющие периодический или аperiodический характер в определенном временном интервале, могут быть математически представлены в виде наложения гармонических сигналов различной частоты и амплитуды.

Типичные виды периодических сигналов помехи и их спектральные представления представлены на рисунках 11, 12.

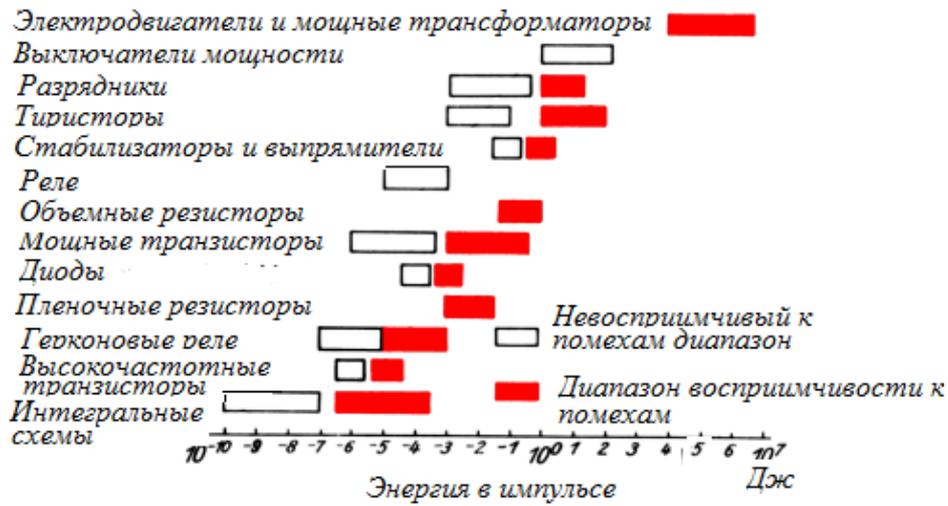


Рис. 10. Чувствительность к помехам различных устройств и электронных компонентов

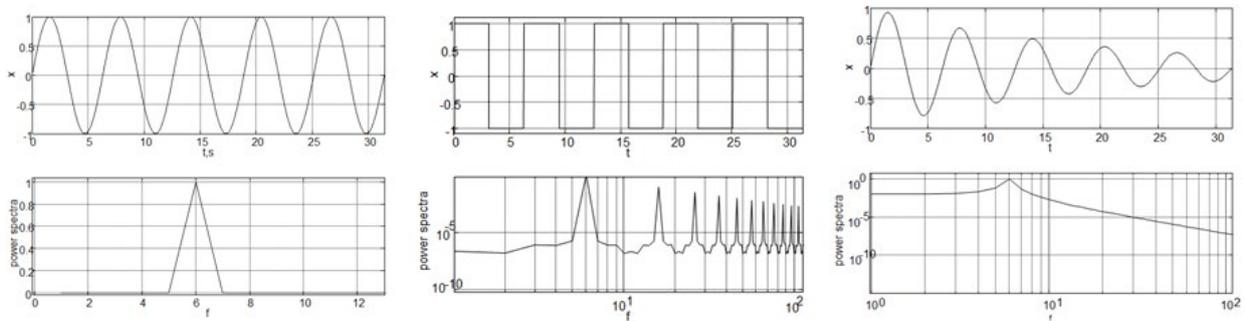


Рис. 11. Типичные виды сигналов помехи (верхние графики и их спектральные представления (нижние графики). Слева – синусоидальный сигнал, $x = \sin(\omega t)$; середина – прямоугольный сигнал, справа – аperiodический сигнал $x = x_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t)$

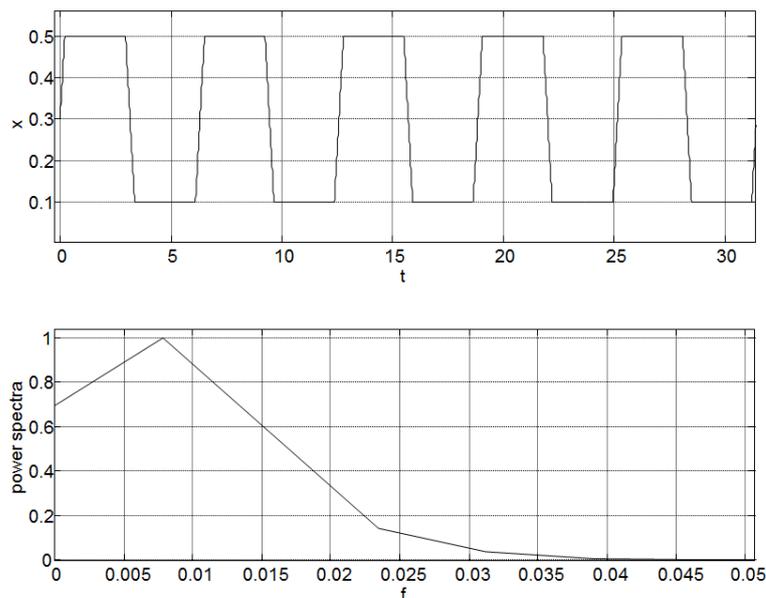


Рис. 12. Широкополосная помеха в виде трапецидального сигнала (верхний график) и его спектр (нижний график)

Источником широкополосных помех (рисунок 11 – средний, рисунок 12) являются полупроводниковые ключи; логические интегральные схемы; микроконтроллеры и т.д. Помехи вызываются внутренними процессами в этих устройствах и работой тактовых генераторов. Сигналы указанных помех имеют периодический характер и могут быть разложены в частотный спектр с помощью преобразования Фурье.

Синусоидальная помеха (рисунок 11, слева) в большинстве случаев возбуждается электрической сетью и имеет частоту 50 Гц. Для подавления такой помехи разработано много методов, среди которых как схемные и конструктивные, так и программные. К схемным можно отнести, например, применение интегрирующих аналого-цифровых преобразователей с временем интегрирования напряжения сигнала, кратным периоду сети, а также фильтры, пассивные или активные; к конструктивным – специальные экраны; к программным – программные фильтры разных типов.

Далее приводятся аппроксимирующие выражения, которые можно использовать при расчете амплитуд и частот излома для трапецеидальных сигналов. Пример такого сигнала и его спектра в асимптотах приведен на рисунке 12. От основной частоты сигнала до первой из частот излома f_{g1} график спектральной зависимости амплитуды сигнала от частоты идет параллельно оси частот. На участке между первой и второй (f_{g2}) частотами излома амплитуда уменьшается с крутизной 20 дБ/дек, а на последнем участке – с крутизной 40 дБ/дек.

На первом участке спектра в диапазоне частот f_0 – f_{g1} амплитуда сигнала не зависит от частоты:

$$A_n \cong \frac{2A_0 t_i}{T_0}.$$

На втором участке в диапазоне частот f_{g1} – f_{g2} амплитуда сигнала падает с крутизной 20 дБ на декаду:

$$A_n = \frac{1}{\pi \cdot t_i}, \quad A_n \approx A_0 \frac{2}{n \cdot \pi}.$$

На третьем участке (частота выше f_{g2}) амплитуда сигнала падает с крутизной 40 дБ на декаду:

$$f_{g2} = \frac{1}{\pi \cdot t_i},$$

$$A_n \approx A_0 \frac{2 \cdot T_0}{\pi^2 \cdot n^2 \cdot t_s}.$$

В вышеприведенных выражениях A_0 – амплитуда исходного сигнала; A_n – амплитуда n -й гармоники; T_0 – период основной частоты сигнала; t_i – длительность импульса; t_s – время переключения ($t_r = t_f$); n – номер гармоники основной частоты; n_{g1} – номер гармоники частоты f_{g1} ; n_{g2} – номер гармоники частоты f_{g2} ; f_0 – основная частота.

2.2. Классификация помех

По характеру воздействия на измерительный сигнал помехи разделяются на аддитивные и мультипликативные. Первые суммируются с измерительным сигналом, вторые модулируют измерительный сигнал.

По механизму воздействия на измерительные цепи различают:

- помехи нормального вида (поперечные);
- помехи общего вида (продольные).

Поперечные и продольные помехи действуют главным образом на соединительные линии и имеют широкий спектр частот.

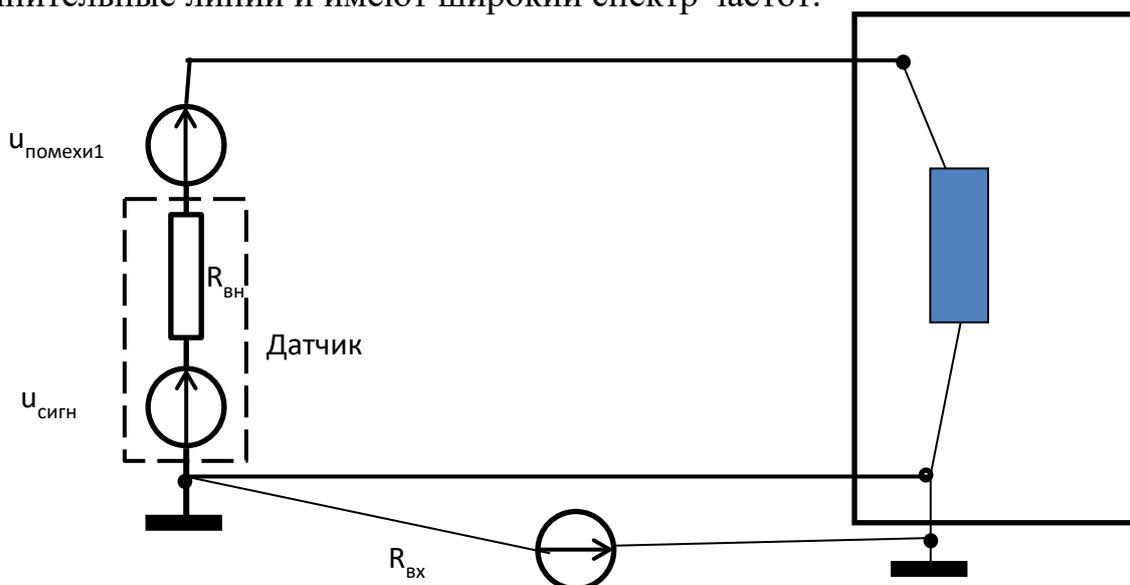


Рис. 13. Формирование помех: $U_{\text{помехи1}}$ – помеха нормального вида (поперечная помеха), $U_{\text{помехи2}}$ – помеха общего вида (синфазная помеха, продольная помеха), $U_{\text{сигн}}$ – напряжение сигнала, $R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление источника сигнала, $R_{\text{вх}}$ – входное сопротивление прибора

Помехи нормального вида (поперечные, рисунок 13) возникают в измерительной цепи как в электромагнитном контуре. Помехи нормального вида обусловлены наличием кондуктивных, емкостных и индуктивных связей измерительных цепей с внешними источниками электрических и электромагнитных сигналов.

2.3. Коэффициент ослабления помехи

Коэффициент ослабления помехи вводят, чтобы дать численное значение этому ослаблению. Рассматривают коэффициент ослабления помехи нормального вида (NMR, normal mode rejection) и коэффициент ослабления помехи общего вида (CMR, common mode rejection). Важно также, что помеха нормального вида – это поперечная помеха, а помеха общего вида – это синфазная, или продольная, помеха.

Коэффициент ослабления помехи нормального вида NMRR (normal mode rejection ratio, рисунок 14) определяется как

$$NMRR = 20 \lg \frac{U_{ax}}{U_n}, \text{ дБ},$$

где U_{ax} – напряжение на входе схемы, U_n – напряжение помехи.

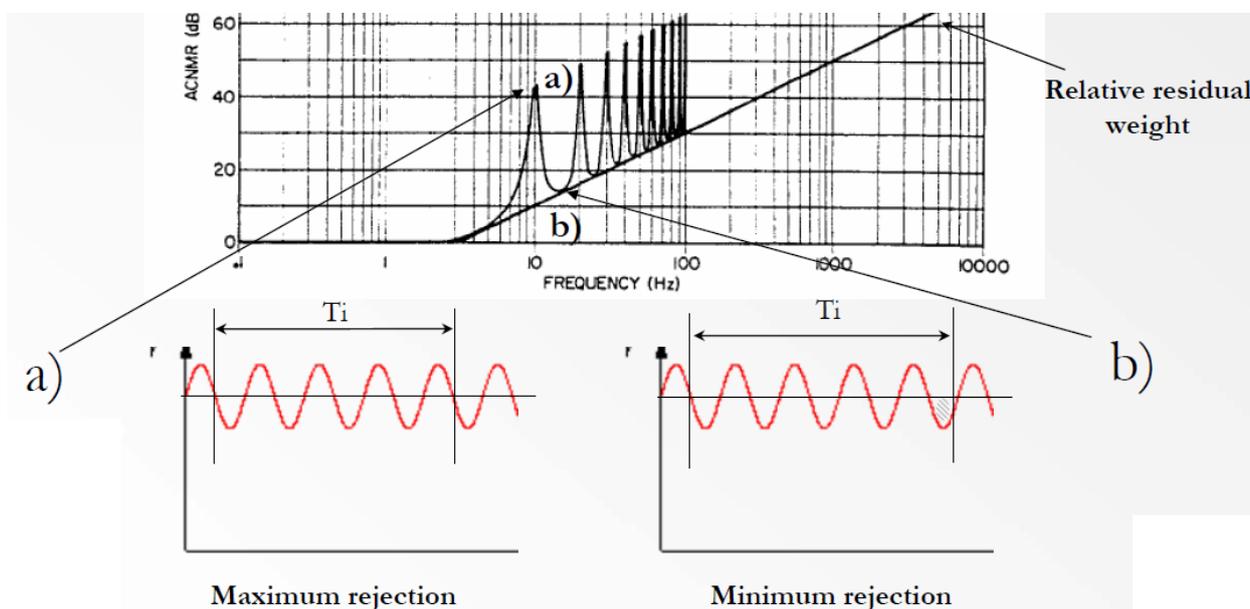


Рис. 14. Коэффициент подавления помехи нормального вида в зависимости от частоты [9]. Иллюстрируется максимальное подавление, когда не период измерения приходится целое число периодов помехи (четное число полупериодов), рисунок 12а, и минимальное, когда число периодов помехи нецелое (нечетное число полупериодов), рисунок 12б

Коэффициент ослабления помехи общего вида CMRR (common mode rejection ratio) определяют отношением максимального значения напряжения помехи U_{nmax} к максимальной погрешности измерения ΔU :

$$CMRR = 20 \lg \frac{U_{nmax}}{\Delta U}, \text{ дБ}.$$

В характеристиках приборов обычно указывают коэффициенты ослабления помехи общего вида на постоянном токе или переменном токе промышленной частоты 50 Гц. Для интегрирующих приборов значение коэффициента ослабления помехи является результатом совместного влияния защитного экрана и процесса интегрирования. Коэффициент ослабления помехи измеряют при включении между входными зажимами измерительного прибора сопротивления, эквивалентного внутреннему сопротивлению источника сигнала (обычно до 1000 Ом).

Для измерения помех часто используются единицы отношения величин, измеряемые в децибелах (дБ). Единица децибел (дБ) применяется для представления соотношений между величинами, отличающимися на много порядков. Кроме этого, дБ используют для выражения амплитуды сигнала

относительно какого-то уровня, принятого за опорный. Отношение мощностей P_2 и P_1 в децибелах определяется как

$$p = 10 \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right), \text{ дБ.}$$

Если, например, мощность на выходе усилителя мощности $P_2=10$ Вт, а какая-то минимальная должна иметь величину $P_1=5$ Вт, то их отношение равно

$$p = 10 \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 10 \lg \left(\frac{10}{5} \right) \approx 3 \text{ дБ.}$$

Если выходной импеданс при этом постоянен, тогда

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R},$$

т.е. мощность пропорциональна квадрату напряжения или тока. В этом случае можно выразить отношение напряжений или токов в дБ следующим образом:

$$u = 10 \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 10 \lg \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 = 20 \lg \left(\frac{U_2}{U_1} \right), \text{ дБ,}$$

$$i = 10 \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 10 \lg \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 = 20 \lg \left(\frac{I_2}{I_1} \right), \text{ дБ.}$$

Отношения плотности мощности или напряженности электромагнитного поля также выражают в децибелах.

Пусть электрическое поле $E=3$ В/м действует на какую-то поверхность, частично отражается, и напряженность отраженного поля $E_o=1$ В/м, тогда отношение напряженностей равно

$$e = 20 \lg \left(\frac{E}{E_o} \right) = 20 \lg \left(\frac{3}{1} \right) = 10 \text{ дБ.}$$

Коэффициенты усиления антенн и усилителей, затуханий кабеля или фильтра также часто приводят в дБ.

Если сигнал на входе усилителя имеет мощность $P_{вх}=1$ Вт и при этом мощность на его выходе $P_{вых}=100$ Вт, то коэффициент усиления по мощности

$$K = 10 \lg \left(\frac{P_{вых}}{P_{вх}} \right) = 10 \lg \left(\frac{100}{1} \right) = 20 \text{ дБ.}$$

Если на входном разъеме кабеля напряжение $U_{вх}=3$ В и на его выходном разъеме $U_{вых}=2,8$ В, то его коэффициент усиления равен

$$K = 20 \lg \left(\frac{U_{вых}}{U_{вх}} \right) = 20 \lg \left(\frac{2,8}{3} \right) = -0,6 \text{ дБ,}$$

а затухание составляет

$$D = 20 \lg \left(\frac{U_{вх}}{U_{вых}} \right) = 20 \lg \left(\frac{3}{2,8} \right) = 0,6 \text{ дБ}$$

Одной из величин, выражаемых в децибелах, является мощность сигнала в дБ относительно 1 мВт (дБ(мВт)). Для этой величины принято сокращение: дБм (dBm). Такие приборы, как осциллографы и анализаторы спектра, часто отображают измеренные значения именно в дБм. Несмотря на то, что дБм есть единица мощности, зная импеданс измерительного прибора, можно преобразовать дБм в вольты. Например, напряжение, выраженное как 0 дБм на анализаторе спектра с импедансом 50 Ом, равно величине:

$$0 \text{ дБм} = 10 \lg \left(\frac{P_x}{1 \text{ мВт}} \right) \Rightarrow P_x = 1 \text{ мВт}$$

$$P_x = \frac{U^2}{50 \text{ Ом}}, U = \sqrt{1 \text{ мВт} \cdot 50 \text{ Ом}} \approx 0,224 \text{ В}$$

Для практических расчетов удобно то, что удвоение напряжения соответствует прибавлению 6 дБ, а увеличение напряжения в 10 раз добавляет 20 дБ.

Если какой-то усилитель имеет усиление по напряжению $K_{дБ}=60$ дБ, то это означает, что входное напряжение усиливается в $K=1000$ раз. Если, например, усилитель AD8221 имеет значение CMRR =100 дБ, то это означает, что помеха общего вида ослабляется в 10000 раз.

2.4. Помехи с частотой сети (50 Гц)

Помехи с частотой сети (50 Гц) являются очень распространенными. Причина этого – наличие электрических сетей практически везде, нет их разве что в глухой сибирской тайге.

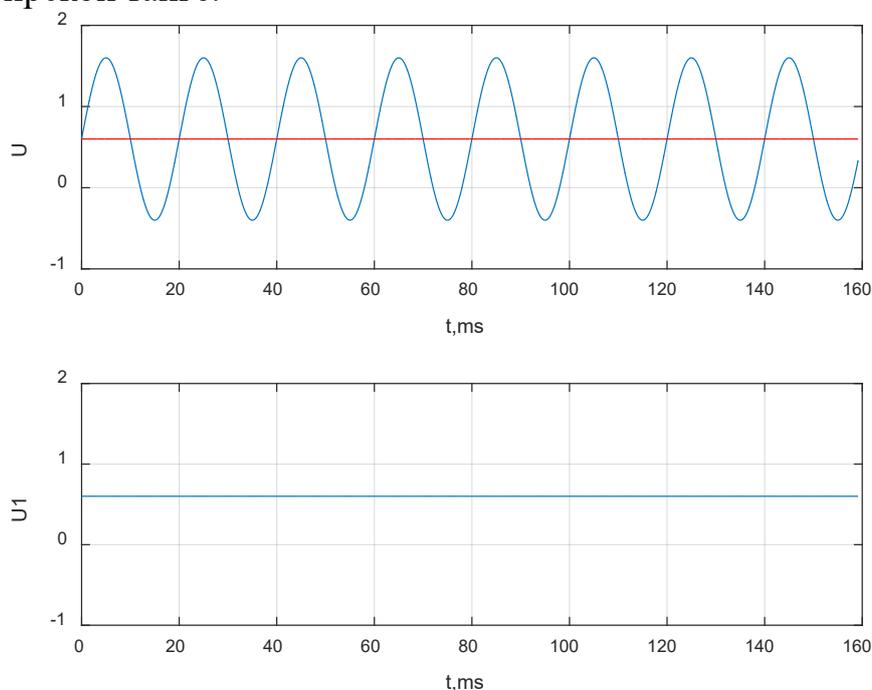


Рис. 15. Пример действия сетевой помехи на сигнал от датчика.
На верхнем рисунке красная линия – сигнал от датчика, синяя – сетевая помеха.
На нижнем – сигнал после подавления помехи

С точки зрения создания помех электрические сети являются большой проблемой на промышленных предприятиях, где имеется большое количество мощных потребителей энергии, таких как нагреватели, электродвигатели, трансформаторы. Электромагнитные поля от этих потребителей влияют на чувствительную измерительную аппаратуру с большим количеством датчиков, сигналы на выходе которых часто существенно ниже, чем наведенная на их провода помеха. Типичный пример приведен на рисунке 15.

2.5. Статическое электричество

Статическое электричество возникает на диэлектрических материалах. Электрический потенциал грозового облака также можно отнести к статическому электричеству, так как он возникает из-за трения облака об атмосферу. Величина заряда зависит от скорости движения трущихся тел, их материала и величины поверхности соприкосновения. Примерами трущихся тел могут быть:

- ременный привод;
- лента конвейера;
- синтетическая одежда и обувь на теле человека;
- поток непроводящих твердых частиц (пыли), газа или воздуха через сопло;
- движение непроводящей жидкости, заполняющей цистерну;
- автомобильные шины, катящиеся по непроводящей дороге;
- резиновые ролики под стульями, когда стулья перемещаются по непроводящему полу.

Человек, идущий по синтетическому ковру, может приобрести на теле потенциал 15 кВ относительно земли и окружающих предметов.

На рисунке 16 представлен график зависимости максимального напряжения, до которого может быть заряжен человек при контакте с различными материалами от относительной влажности воздуха.

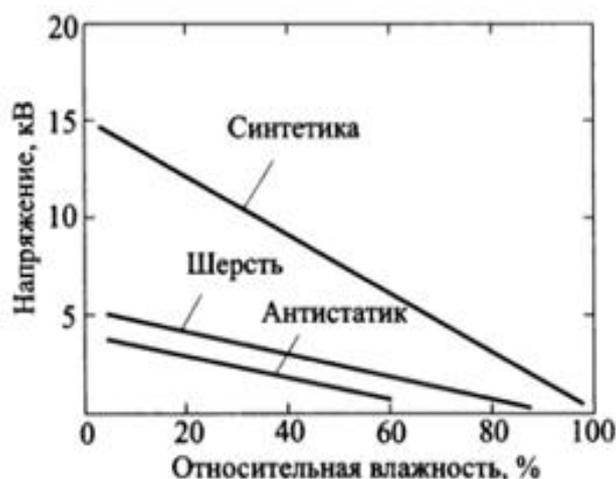


Рис. 16. Максимальное напряжение, до которого может быть заряжен человек при контакте с различными материалами (ГОСТ Р 51317.4.2)

Стандарты по электростатике:

- ГОСТ IEC_61340-5-1-2019 «Электростатика. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Общие требования»;
- ГОСТ IEC TR 61340-5-2 «Электростатика. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Руководство по применению»;
- ГОСТ Р 53734.5.6–2021 «Электростатика. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые»;
- ОСТ 11 073.062–2001 «Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Требования и методы защиты от статического электричества при разработке, производстве и применении».

2.6. Помехи от сетей мобильной связи, радио и телевизионных передатчиков

Электромагнитные помехи создаются проводниками, по которым течет переменный электрический ток или между которыми имеется переменное напряжение. Помеха может существовать в виде электромагнитной волны, когда расстояние от источника помехи до приемника превышает длину волны λ . Если расстояние до излучаемого элемента существенно превышает величину $\lambda / 2\pi$, то такое поле называется полем дальней зоны, в противоположном случае – полем ближней зоны.

В ближней зоне моделью передачи помехи является емкостная или индуктивная связь, в дальней зоне – модель распространения радиоволн от передающей к приемной антенне. Излученная мощность пропорциональна квадрату частоты. Поэтому, например, на частоте 50 Гц излучение очень слабое, и помеха передается через емкостную или индуктивную связь.

Источником электромагнитного поля помехи являются современные технические устройства, в том числе обеспечивающие связь и мобильный интернет, включая смартфоны и модемы, а также электродвигатели, электросварочные аппараты, трамваи, люминесцентные и LED-лампы, твердотельные регуляторы, компьютеры, теле- и радиостанции, цифровые части измерительных систем, космическое коротковолновое излучение, атмосферное электричество и молнии и др.

Ультракороткие волны (УКВ) – радиоволны с длиной волны 1 мм – 10 м. Диапазон частот УКВ, соответственно – от 30 МГц до 300 ГГц. Ультракороткие волны включают радиоволны из диапазонов метровых (МВ), дециметровых (ДМВ), сантиметровых (СМВ) волн и миллиметровых радиоволн (или диапазоны очень высоких частот – ОВЧ, ультравысоких частот – УВЧ, сверхвысоких частот – СВЧ, крайне высоких частот – КВЧ).

Диапазон УКВ является единственным, в котором осуществляются телевизионные передачи и организуется высококачественное частотно-

модулированное (FM) радиовещание. Диапазон частот FM (верхний УКВ-диапазон) составляет 87.5–108 МГц.

УКВ используются также:

- в системах радиолокации;
- ближней радионавигации и радиоастронавигации;
- радиотелеуправления и радиодистанциометрии.
- Радиоволны УКВ-диапазона применяются при изучении атмосферы звезд, планет, туманностей (радиоастрономия);
- в медицине для определения температуры биологических объектов (радиотермография);
- при изучении структуры и состава вещества (радиоспектрометрия).

АМ-диапазон разделяется на: ДВ – длинные волны; СВ – средние волны, (диапазон частот 100–1600 кГц); КВ – короткие волны. Диапазон КВ, в свою очередь разделяется на: 11 метров, 25.60–26.10 МГц (11,72–11,49 метра); 13 метров, 21.45–21.85 МГц (13,99–13,73 метра); 15 метров, 18.90–19.02 МГц (15,87–15,77 метра); 16 метров, 17.55–18.05 МГц (17,16–16,76 метра).

2.7. Частоты сотовой связи

Особенностью сотовой связи является разделение зоны покрытия на соты, формируемые покрытием базовых станций. Перекрывая друг друга, соты образуют сеть, внутри которой может свободно перемещаться абонент. Вышки, из которых состоит зона покрытия, работают на одной и той же частоте и обеспечивают непрерывность связи при перемещении между ними.

Частотные диапазоны делятся на технические и абонентские диапазоны. Для технических диапазонов выделяются частоты 5–80 ГГц. Абонентские диапазоны находятся в частотах 790–2700 МГц.

Основные стандарты передачи мобильных данных:

- 2G – GSM (Global System for Mobile Communications) – 0,9/1,8 ГГц;
- 3G – UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Скорость передачи данных в режиме UMTS составляет не более 2 Мбит/с (для неподвижного абонента), а при движении абонента, в зависимости от скорости, падает до 144 Кбит/с;
- 4G – LTE;
- 5G;
- 2,5G GPRS (General Packet Radio Service) – стандарт пакетной передачи данных по радиоканалу. Потенциально обеспечивается скорость 15 Кбайт/с (115 Кбит/с).

Технология 4G практически сравняла скорость мобильного интернета и домашнее широкополосное подключение. Существующий общий стандарт определяет 4G как сеть, в которой 100 Мб/с предоставляется для абонентов,

находящихся в движении, и до 1 Гбит/с в идеальных условиях (абонентское устройство не движется). При этом задержка колеблется в пределах 20–50 мс.

В июне 2015 года Международный союз электросвязи (МСЭ) разработал план развития технологии и определил ее название ИМТ-2020 (высокоскоростной интернет по технологии 5G). 5G – это новое поколение мобильной связи (G в названии от generation).

Стандарт 5G должен использоваться на скоростях 1–20 Гбит/сек. Переход на него дает высокую скорость передачи данных и ускоряет развитие беспилотного транспорта, умного города и интернета вещей с поддержкой одновременного подключения до 100 млн устройств на квадратный километр с задержкой не более 1 миллисекунды.

Если подходить формально, то в рамках 5G NR выделяется два диапазона:

Frequency Range 1. FR1 включает традиционные частоты, так называемый диапазон sub-6 GHz, т.е. ниже 6 ГГц. Часть диапазонов предыдущих поколений будут переданы под нужды 5G благодаря рефармингу частот. Более совершенные технологии кодирования позволят новому поколению связи быть на 30 % эффективнее, чем LTE, в том же спектре.

Frequency Range 2. FR2 включает принципиально новые частоты миллиметрового диапазона. Они стартуют с отметки в 24 ГГц, поднимаясь приблизительно до 50 ГГц и выше в зависимости от страны и оператора. Эти частоты имеют малую дальность распространения и проникающую способность. Их функционирование обеспечат не традиционные базовые станции, а Small cells – многочисленные малые соты.

FR1 неоднороден в различных регионах мира. Так, в Европе и США планируется использовать диапазон 3,4–3,8 ГГц, и наиболее серьезные разработчики технологий ориентируются именно на него. С другой стороны, Восток – Япония и Китай – планируют использовать 4,4–4,99 ГГц. Россия из-за нехватки частот в «западном» спектре планирует задействовать тот же диапазон, что и азиатские соседи.

Для каждого из слоев подходит определенный спектр частот и инфраструктура:

- Радиоволны в диапазоне низких частот, до 1 ГГц, благодаря своей проникающей способности хорошо работают в закрытых помещениях. Они обеспечат работу систем IoT, умных домов, M2M. Также частота 700 МГц может использоваться для обеспечения связью удаленных населенных пунктов;
- Средний спектр или mid-band frequencies (1–6 ГГц) сочетает в себе оптимальную емкость и покрытие для первичного внедрения eMBB, а далее – URLLC и mMTC;
- Миллиметровые волны (>24 ГГц) реализуют всю полноту возможностей 5G. Приоритетная сфера применения – высоконагруженные зоны трафика (хот-споты), массовые скопления пользователей.

Россия планирует строить сети пятого поколения на необычных частотах. Принятый во многих странах Европы и Азии диапазон 3,4–3,8 ГГц забраковали военные. Интересно, что по той же причине этот диапазон частот никак не могут выделить и в Соединенных Штатах. Президент России Владимир Путин одобрил позицию Совбеза РФ, который выступает против использования диапазона 3,4–3,8 ГГц. Вместо этого предлагается диапазон 4,4–4,9 ГГц и 24,5–29,5 ГГц.

В 2015 году в ходе Всемирной конференции радиосвязи (WRC-15) страны согласовали выделение частот для 5G в спектре до 6 ГГц. Евросоюз определил диапазон 3,4–3,8 ГГц; Южная Корея – 3,4–3,7 ГГц; Австралия – 3,4–3,7 ГГц. Отличились Япония и Китай: они решили развивать сразу два спектра ниже 6 ГГц. Япония – 3,6–4,2 ГГц, а также 4,4–4,9 ГГц. Китай – 3,3–3,6 ГГц и 4,8–5 ГГц.

США в области развития 5G вообще стоят особняком. Корневым диапазоном частот сетей пятого поколения там предполагается сделать сверхвысокие частоты. США уже провели два аукциона на частоты 5G диапазона выше 6 ГГц. Были проданы частоты спектра 24 ГГц и 28 ГГц. Позже планировалось провести аукционы еще на три диапазона сверхвысоких частот: 37, 39 и 47 ГГц.

FCC считает, что единственный способ для США сохранить технологическое лидерство и создать хоть какой-то противовес усиливающемуся доминированию китайской телекоммуникационной компании Huawei в мире – развивать сети на том же диапазоне частот ниже 6 ГГц, что и остальной мир.

Ко всем вышеперечисленным частотам применимы одни и те же правила:

- Чем ниже частота, тем больше ее зона распространения от вышки оператора;
- С повышением частоты повышается проникающая способность (прохождение сквозь стены и огибание препятствий);
- С повышением частоты увеличивается пропускная способность (скорость передачи данных).

Отдельно выделяются диапазоны частот для Wi-Fi (2,4 ГГц и 5 ГГц) и стандарт Bluetooth (IEEE 802.15.1). Последний включает в себя три основных класса мощности с пределами дальности действия 1 м, 10 м и 100 м (1 мВт, 2,5 мВт и 100 мВт соответственно). Частоты Bluetooth: 2,402–2,48 ГГц.

Технология Zigbee была создана для сенсорных сетей. Ее особенностью является способность при малом энергопотреблении поддерживать разные топологии сети – простые, как «точка-точка», «дерево», «звезда», и более сложные, как самоорганизующуюся и самовосстанавливающуюся ячеистую (mesh) топологию с ретрансляцией и маршрутизацией сообщений. Основной областью применения Zigbee являются беспроводные сенсорные сети, а также автоматизация жилья, так называемый «Умный дом», медицинское оборудование, системы мониторинга и управления в промышленности.

Беспроводная сенсорная сеть – распределенная и самоорганизующаяся сеть множества сенсоров и исполнительных устройств, объединенных между собой через радиоканал. Такая сеть покрывает от нескольких метров до нескольких километров.

Технология Zigbee использует диапазоны 868 МГц и 2,4 ГГц.

Сильным источником электромагнитных помех являются оптоволоконные передатчики, поскольку они потребляют большой ток и работают на высоких частотах. Излучаются такие помехи с помощью случайных проводников, образующих дипольную или рамочную антенну. Дипольная антенна – источник преимущественно электрического поля в ее окрестности, рамочная – источник магнитного поля. Вдали от таких источников доминирующего поля нет, есть поперечная электромагнитная волна. Реальные системы образуют множество излучающих антенн, состоящих из проводов, кабелей и различных металлических поверхностей.

Помехи с частотой выше 100 кГц находятся обычно за границей частотного диапазона измерительных систем, однако высокочастотные помехи могут быть нежелательным образом выпрямлены или перенесены в область более низких частот с помощью нелинейных характеристик диодов и транзисторов, расположенных на измерительной плате и внутри микросхем.

Общая сводка поддиапазонов радиоизлучения приведена в таблице 1.

Таблица 1. Параметры различных частотных диапазонов

Обозначение	Частота	Длина волны
Длинные волны (ДВ)	30 кГц - 300 кГц	10000 м - 1000 м
Средние волны (СВ)	300 кГц - 3 МГц	1000 м - 100 м
Короткие волны (КВ)	3 МГц - 30 МГц	100 м - 10 м
Ультракороткие волны (УКВ)	30 МГц - 300 МГц	10 м - 1 м
Дециметровые волны, ультравысокие частоты (УВЧ)	300 МГц - 3 ГГц	100 см - 10 см
Сантиметровые волны, сверхвысокие частоты (СВЧ)	3 ГГц - 30 ГГц	10 см - 1 см
Миллиметровые волны, чрезвычайно высокие частоты (ЧВЧ)	30 ГГц - 300 ГГц	10 мм - 1 мм

3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

3.1. Основные параметры ЭМ полей

ЭМС рассматривает методы, позволяющие минимизировать мешающее воздействие ЭМ полей на электронные приборы. Поэтому методы, применяемые для обеспечения ЭМС, строятся на основе теории ЭМ поля.

ЭМ поле движется в пространстве со скоростью света и влияет на среды, через которые оно проходит, через взаимодействие с электрическими зарядами, находящимися в этих средах.

Для описания ЭМ поля используют следующие функции:

1. Напряженность электрического поля $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$.
2. Индукция электрического поля $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$.
3. Напряженность магнитного поля $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$.
4. Индукция магнитного поля $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$.

ЭМ поле порождается электрическими зарядами – стационарными или движущимися (электрическими токами). Охарактеризовать количественно заряд, находящийся в каком-то объеме пространства, можно с помощью объемной плотности заряда ρ :

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V}.$$

Тогда полный заряд Q в объеме V :

$$Q = \int_V \rho \cdot dV.$$

Между электрическими зарядами возникают силы взаимодействия. Эти силы описываются с помощью закона Кулона (рисунок 17):

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^3} \mathbf{r}_{12} \quad \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2}.$$

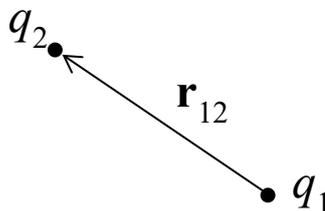


Рис. 17. Иллюстрация к закону Кулона

Выводы из закона Кулона:

а. Заряды разноименной полярности притягиваются, однополярные заряды отталкиваются;

б. Для сил взаимодействия между зарядами можно записать:

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21};$$

Для сил, вызванных электрическими зарядами, действует принцип суперпозиции:

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{21} + \mathbf{F}_{31}.$$

Выражение для равнодействующей силы \mathbf{F} для системы из N стационарных точечных зарядов:

$$\mathbf{F} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^3} = q\mathbf{E}(\mathbf{r}),$$

где электрическое поле стационарных зарядов $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ определяется как

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^3}.$$

Электрический потенциал определяется как

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|}.$$

Потенциальная энергия точечного заряда q_i равна

$$U = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i q_j \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i \varphi(\mathbf{r}_i),$$

где $\varphi(\mathbf{r}_i)$ – потенциал, создаваемый зарядом q_i .

3.2. Магнитные и электрические поля

В физике и технике термин «поле» применяется для описания действия в пространстве ЭМ излучения – электрического поля, появляющегося в пространстве, содержащем электрические заряды, и магнитного поля, сопровождающего электрические токи.

Можно также рассматривать Землю как постоянный магнит, индукция магнитного поля которого находится в пределах 25–65 мкТл.

Также Земля имеет естественное электрическое поле и постоянно отрицательно заряжена по сравнению с проводящим слоем Земли. В хорошую погоду напряженность электрического поля составляет около 150 В/м. При атмосферных разрядах на короткое время возникают высокие значения напряженности электрического поля порядка 1000 В/м.

В дополнение к этим естественным напряженностям полей существуют также искусственные высокочастотные и низкочастотные поля, поля постоянного тока и электромагнитные поля, которые составляют основу всей электротехники, связи, электроники и т.д.

3.3. Электростатическое поле

Если в различных точках пространства имеются электрические заряды q_1 , q_2 и т. д., то от них исходит суммарная сила \mathbf{F} , действующая на электрический

заряд q в пространстве. Вектор электрического поля \mathbf{E} описывает величину и направление действия силы \mathbf{F} на заряд q :

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E}.$$

Так, два электрически заряженных тела с зарядами q_1, q_2 [Кл] на расстоянии r [м] в пространстве притягиваются или отталкиваются друг от друга с силой F [Н] в зависимости от соотношения полярностей (рисунок 18).

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

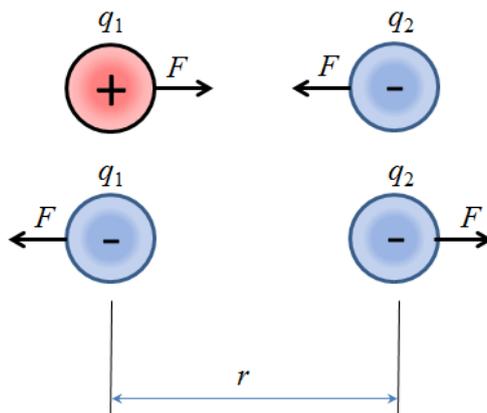


Рис. 18. Два электрически заряженных тела с зарядами q_1, q_2 [Кл] на расстоянии r [м] в пространстве притягиваются или отталкиваются друг от друга с силой F [Н] в зависимости от соотношения полярностей

Описанное здесь соотношение для зарядов q_1, q_2 применимо ко всем парным комбинациям зарядов, которые присутствуют в конкретном пространстве. Таким образом, каждый отдельный заряд взаимодействует с любым другим зарядом. Понятие *электрическое поле* иллюстрирует отношения, связанные с силами взаимодействия для большого числа зарядов q в пространстве. Для каждой точки пространства описывается действие силы F , вызванной взаимодействием сил, исходящих от большого числа других зарядов (рисунок 19).

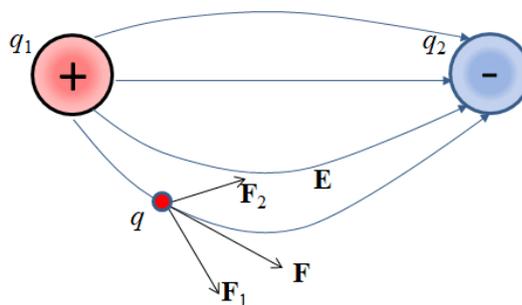


Рис. 19. Для каждой точки пространства описывается действие силы F , вызванной взаимодействием сил, исходящих от большого числа других зарядов

С помощью силовых линий можно описать определенное таким образом электрическое поле.

3.4. Статическое магнитное поле

В принципе, к магнитному полю применимы те же определения, что и к электрическому полю, за исключением того, что речь идет о силовом воздействии, вызываемом магнетизмом. Но существенным отличием магнитного поля от электрического является то, что силовые линии магнитного поля не имеют ни начала, ни конца; они автономны. Магнитное поле возникает вблизи каждого проводника с током. В случае одного проводника силовые линии образуют концентрические окружности вокруг проводника (рисунок 20). Это можно увидеть с помощью стрелки компаса в магнитном поле катушки индуктивности.

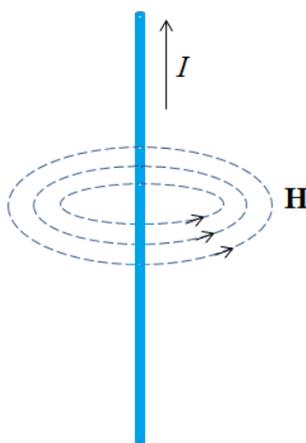


Рис. 20. В случае одного проводника силовые линии образуют концентрические окружности вокруг проводника

Плотность магнитного потока, или магнитную индукцию, можно представить как количество силовых линий магнитного поля, которые пересекают по нормали площадку 1 м^2 . Связь между магнитной индукцией B и напряженностью магнитного поля H определяется магнитной проницаемостью:

$$B = \mu\mu_0 H.$$

Здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Дж}/(\text{А}^2 \cdot \text{м})$ – магнитная проницаемость вакуума – универсальная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость, характеризующая магнитные свойства среды. Размерность магнитной индукции B [Тл] = [В·с/м²]. Размерность напряженности магнитного поля H равна [А/м]. Если такой же ток идет в обратном направлении через второй, находящийся вблизи от первого, проводник, то концентрические силовые линии в значительной степени компенсируют друг друга.

3.5. Переменное электрическое поле – емкостные токи

В переменном поле концентрация зарядов в проводнике меняется с частотой изменения поля. Если в цепи имеется емкость, то ее влияние на

протекающий через нее переменный ток может оказаться существенным. Если реактивное сопротивление $x_c = j\omega C$, определяемое емкостью C и угловой частотой ω , внутри замкнутой цепи велико по сравнению с другими сопротивлениями в цепи, то и влияние этого сопротивления на ток в цепи также будет велико.

Ниже будет показано, что возникновение паразитных емкостей приводит к возникновению помех.

Если человек находится в районе высоковольтных линий, то электрическое поле в районе высоковольтной воздушной линии наводит электрический заряд на поверхности заземленного тела человека (рисунок 21). Возникает электрическая емкость, одной обкладкой которой является высоковольтный провод, а другой – земля и поверхность тела человека.

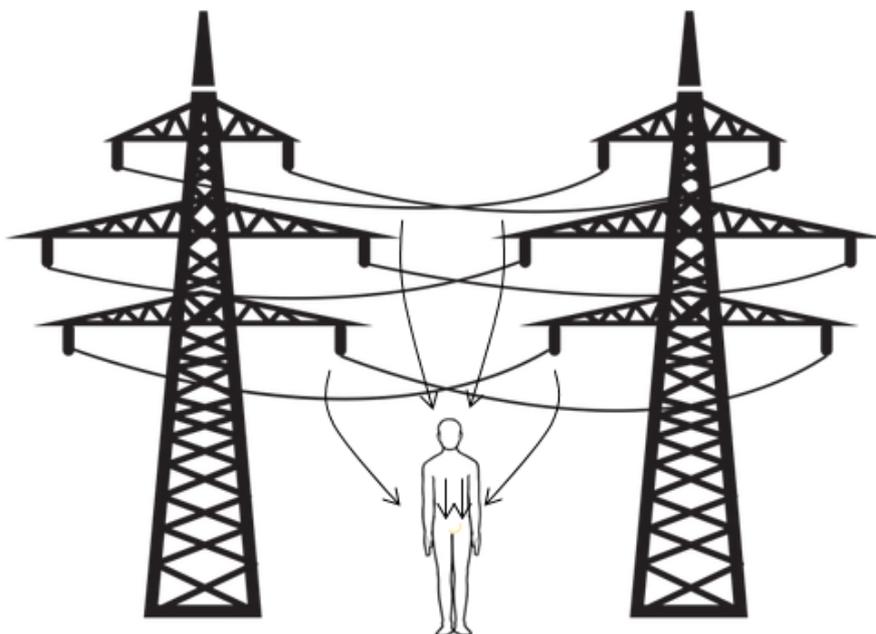


Рис. 21. Если человек находится в районе высоковольтных линий, то электрическое поле в районе высоковольтной воздушной линии наводит электрический заряд на поверхности заземленного тела человека

В переменном поле через тело протекает переменный ток I . Электрочувствительные люди чутко реагируют на это воздействие.

Подводя итог, можно сказать, что если между двумя электродами имеется переменное электрическое напряжение, то между двумя электродами создается переменное электрическое поле, которое изменяется в одном и том же ритме. Это также происходит, когда ток не течет по линии. Сила электрического поля зависит от электрического напряжения, существующего между проводами, переключателями и т. д., используемыми для подачи питания, и заземлением.

Напряжение U_{12} между точками 1 и 2 при движении с покрытием площадки S равно

$$U_{12} = \int_1^2 EdS,$$

где E – напряженность электрического поля. Для постоянного пути d $U_{12}=E \cdot d$. E [В/м]. Напряженность падает с ростом расстояния.

Напряженность электрического поля E определяется через силу F , действующую в электрическом поле на единичный заряд q :

$$E = \frac{F}{q}, \text{ [В/м]}.$$

Напряженность электрического поля увеличивается с уровнем напряжения. Напряженность электрического поля присутствует и тогда, когда отсутствует ток, но есть напряжение. Высокочастотные переменные поля генерируются, например, мобильным телефоном.

Если металлическая заземленная оболочка размещена вокруг проводника под напряжением (рисунок 22), электрическое поле существует только между проводником и заземленной оболочкой (принцип экранирования).

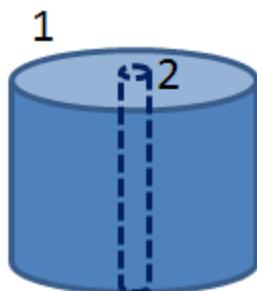


Рис. 22. Оболочка 1 размещена вокруг проводника 2 под напряжением, электрическое поле существует только между проводником и заземленной оболочкой

По этому принципу работает так называемая «Клетка Фарадея» Она состоит из электропроводящего материала, который обычно заземлен. Внутренняя часть оболочки остается свободной от полей или зарядов. Клетка Фарадея получила известность прежде всего своим защитным эффектом. Она считается наиболее проверенным средством защиты от электрических полей, но не работает против магнитных полей.

3.6. Переменное магнитное поле

Электрический ток создает вокруг себя магнитное поле. Сила, создающая магнитное поле, называется напряженностью магнитного поля H . Ток I [А], радиус r [м], напряженность магнитного поля [А/м]. Существующее взаимодействие между током и магнитным полем используется для различных приложений. Например, электрическая дуга может отклоняться магнитным полем (магнитное гашение искры). Отклоняющее устройство в электронном кинескопе направляет электронный пучок на поверхность экрана (магнитное отклонение). Если проводник с током перемещается в магнитном поле (рисунок 23), то в этом проводнике индуцируется напряжение

$$u = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad u = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad u = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad u = B \cdot l \cdot v$$

где N – число витков (на рисунке 23 $N=1$); Φ – магнитный поток [$\text{В}\cdot\text{с}=\text{Вб}$];
 L – индуктивность, Гн; B – магнитная индукция, Тл,

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} dS$$

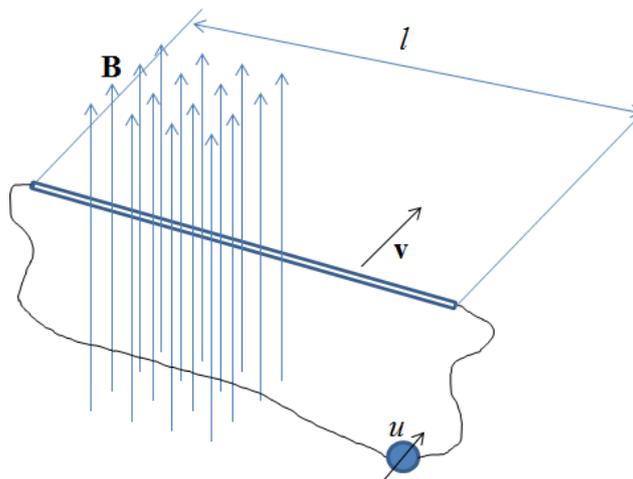


Рис. 23. Если проводник с током перемещается в магнитном поле, то в этом проводнике индуцируется напряжение

Если ток подается не на один провод, а на катушку, катушка ведет себя подобно стержневому постоянному магниту: на концах возникают силовые линии. По этому принципу работают, например, магнитные головки дисковых накопителей. Другие применения, например, удерживающие магниты от дверей или грузоподъемные магниты, также используют катушку с током – соленоид. Эффект используется в синхронных генераторах или трехфазных генераторах переменного тока, чтобы обеспечить ротор ориентированным магнитным полем. Если катушка намотана на железный стержень (на ферромагнитный материал), то большая часть силовых линий концентрируется в железе.

Из-за переменного тока 50 Гц молекулярные магниты ферромагнитных сердечников постоянно меняют пространственную ориентацию с той же частотой. Это создает внутреннее «трение» и выделение теплоты – потери в сердечнике или потери на гистерезис. Для уменьшения потерь сердечник собирают из отдельных пластин. В организме человека переменным магнитным полем B также индуцируется ток.

В отличие от электрического поля, магнитное поле практически беспрепятственно проникает практически во все предметы, представляющие практический интерес. Эффективной защиты от магнитных полей этого типа практически не существует. Только если тот же самый ток подается в обратном направлении через второй параллельный, расположенный максимально близко к первому, проводник, концентрические силовые линии в значительной степени компенсируют друг друга. Этот принцип используется в технологии *витая пара*.

4. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОМЕХ И ИХ ПОДАВЛЕНИЕ

4.1. Синфазный дроссель

Помеха может распространяться по проводам. Это могут быть сетевые провода, провода от датчиков и провода от блоков питания. Одним из способов подавления такой помехи является так называемый синфазный дроссель. Он представляет собой намотанные встречно на кольцевой сердечник две одинаковые обмотки (рисунок 24). Помеха создает в сердечнике два одинаковых и направленных встречно магнитных потока. В результате на выходе устройства помеха существенно ниже, чем на входе.

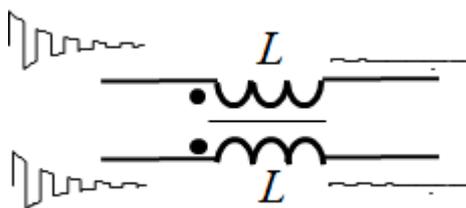


Рис. 24. Синфазный дроссель

Синфазный дроссель позволяет исключить непосредственное, через кондуктивные связи, проникновение помехи в схему. Она используется в цепях питания переменного напряжения, для питания узлов схем постоянным током, в измерительных цепях.

4.2. Электромагнитные помехи на конструкциях

Электромагнитные помехи наводятся на всех проводящих предметах, которые в этом случае играют роль антенн. Мощность наведенной помехи зависит от площади контура, охваченного проводником и его сопротивления.

Рамочная антенна является направленной антенной. Она состоит из одного или нескольких витков провода. Витки лежат в одной плоскости в виде рамки, которая бывает квадратной, круглой или прямоугольной. Эта антенна представляет собой магнитный диполь и в самом простом варианте выглядит, как на рисунке 25.

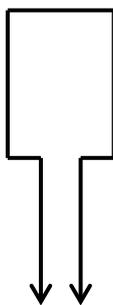


Рис. 25. Рамочная антенна

Такие «рамочные антенны» могут присутствовать, например, на печатных платах, в виде контура из проводника «земля» или других проводников.

Дипольная антенна состоит из двух проводящих стержней (рисунок 26).

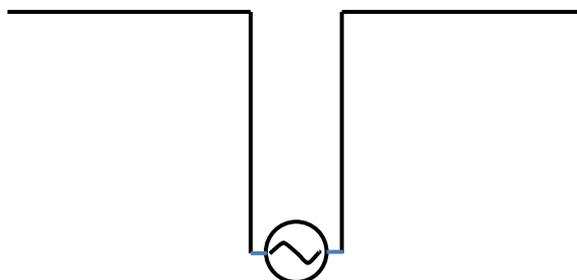


Рис. 26. Дипольная антенна

«Дипольные антенны» также могут образовываться на печатных платах из-за неграмотной разводки печатных проводников.

Помеха, наведенная в антенне кондуктивным путем, может передаваться в сигнальные цепи или цепи заземления, вызывая поток ошибок в цифровых схемах или погрешность передачи сигнала в аналоговых.

Наиболее распространенным приемником помех являются длинные провода: цепи заземления, промышленные сети, кабели, соединяющие датчики и модули аналогового ввода, кабели информационных коммуникаций. Неявными приемниками помех являются металлические конструкции в зданиях: металлические стеллажи, окна с металлической рамой, трубы водоснабжения и отопления здания, защитное контурное заземление здания.

Основным методом борьбы с наводками является уменьшение площади контура, принимающего помеху, и применение дифференциального способа передачи сигнала в сочетании с витыми парами проводов.

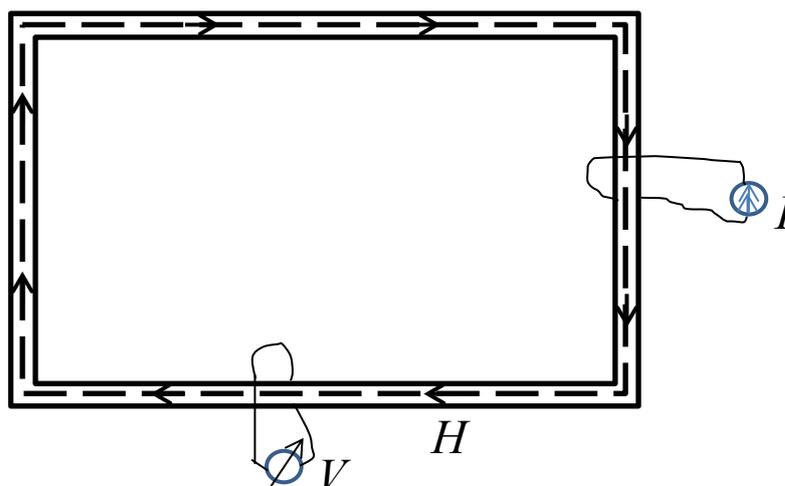


Рис. 27. Труба каркаса стола как нежелательный магнитопровод

Однако даже в контуре с маленькой площадью может наводиться большая помеха. Пусть работа по настройке электронной схемы выполняется за столом, который является частью стеллажа из стальных труб. Если трубу случайно обвил

сетевой провод (источник тока I , рисунок 27), она будет функционировать как магнитопровод в трансформаторе, через который наводится магнитное поле помехи H . Если, например, трубу обвил провод от источника питания испытуемой схемы, то на него этим полем наведется напряжение V .

На рисунке 28 показано, как через арматуру здания помеха может передаваться на металлическую деталь стеллажа.

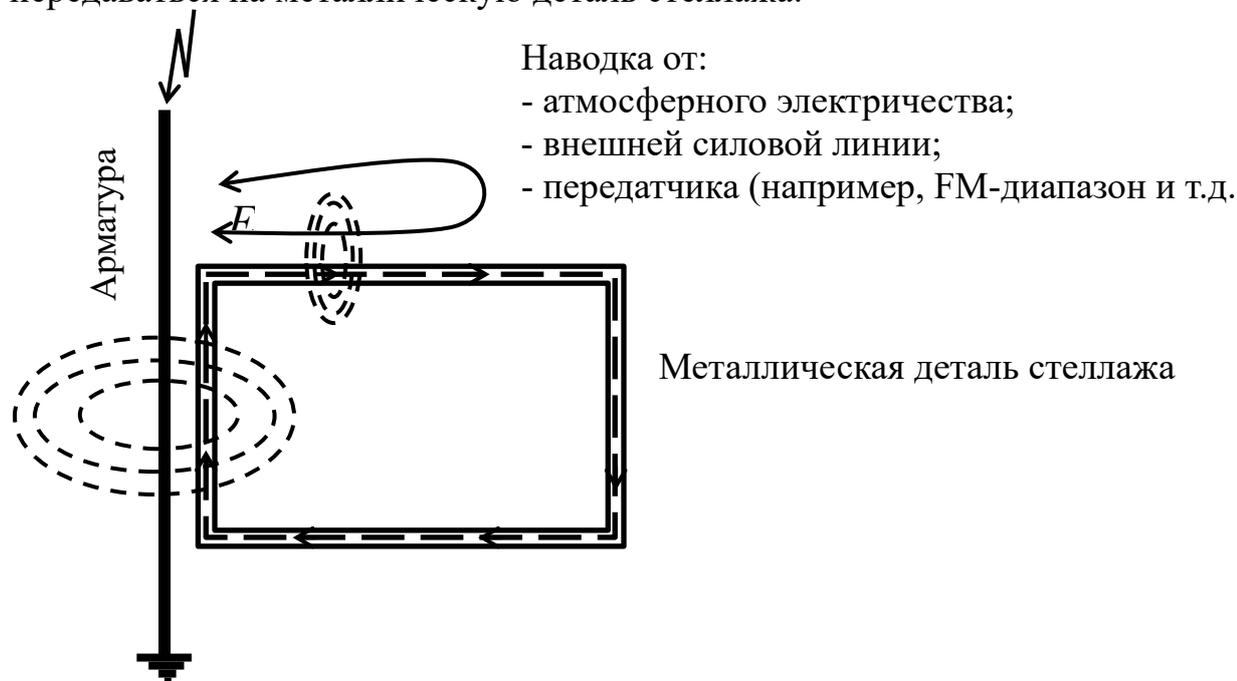


Рис. 28. Попадание помехи через арматуру здания на металлическую деталь стеллажа

4.3. Заземление, общая точка схемы

Контуры заземления могут стать источником помех. Этому особенно способствует удаление на большое расстояние друг от друга несколько точек заземления, с подключением к заземлению источника переменного и аналоговых цепей сигнала низкого уровня. На рисунке 29 показано заземление в двух разных точках. Эти разделенные расстоянием точки заземления имеют разные потенциалы, что приводит к появлению напряжения помехи между ними.

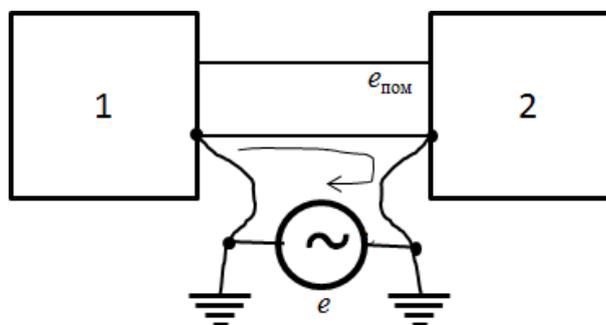


Рис. 29. Заземление в двух разных точках. Стрелкой показан ток в контуре заземления

Такое заземление имеет существенные недостатки:

- разница потенциалов e между двумя разделенными точками заземления становится источником напряжения помехи $e_{\text{пом}}$ на входе устройства 2 (рисунок 29);
- магнитные поля могут индуцировать паразитное напряжение помехи в контуре, образованном сигнальными проводниками и землей (рисунок 29);
- ток, порождаемый полезным сигналом, может возвращаться к источнику несколькими путями и может проходить через заземляющее соединение, а не по обратному сигнальному проводнику.

Важно не столько наличие или отсутствие помехи, сколько величина напряжения, вызванного помехой, по сравнению с уровнем сигнала. Отношение сигнал/помеха может оказаться таким, что повлияет на работу схемы.

Помехи действуют на контур заземления в основном на низких частотах, ниже 100 кГц, и особо сильное влияние они оказывают на аналоговые схемы, на измерительные системы с сигналами низкого уровня, как например, от термопар. На высоких частотах, выше 100 кГц, или в цифровых логических системах требования к контуру заземления не столь критичны.

Избежать возникновения помех в контурах заземления можно, применив заземление в одной точке. Но эта мера полезна только на низких частотах и усугубляет ситуацию при использовании на высоких частотах. Также необходимо минимизировать сопротивление земли и использовать симметричную (дифференциальную) схему на входе. Чтобы разорвать контур заземления (рисунок 30), можно использовать развязывающие схемы из трансформаторов, оптическую развязку, или специальные, синфазные дроссели.

Рисунок 30 показывает цепи между устройствами 1 и 2, разорванные с помощью гальванической развязки, трансформатора. Напряжение помехи действует между первичной и вторичной обмотками трансформатора, через паразитную емкость между ними, а не на входе измерительной цепи.

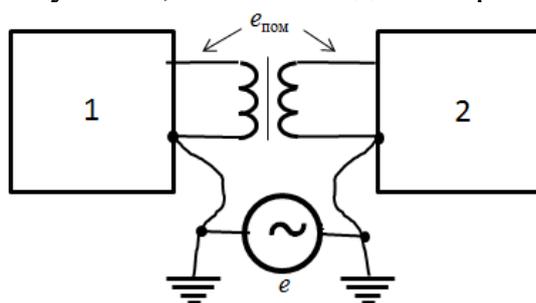


Рис. 30. Гальваническая развязка между устройствами 1 и 2 с помощью трансформатора

4.4. Силовые устройства (шкафы, мощные потребители)

Проводник «масса», или «земля», должен быть электрически нейтрален. В идеальном случае земляная шина не должна обладать электрическим потенциалом, и поэтому связь проводника «масса», который обычно является

одним из выводов источника питания, и земляной шины должна быть желательной. Всегда имеются паразитные емкости в источнике питания и относительно большие емкости между сигнальными линиями и корпусом или землей, что приводит к появлению помех. На рисунке 31 показан принцип заземления электронных модулей в шкафах.

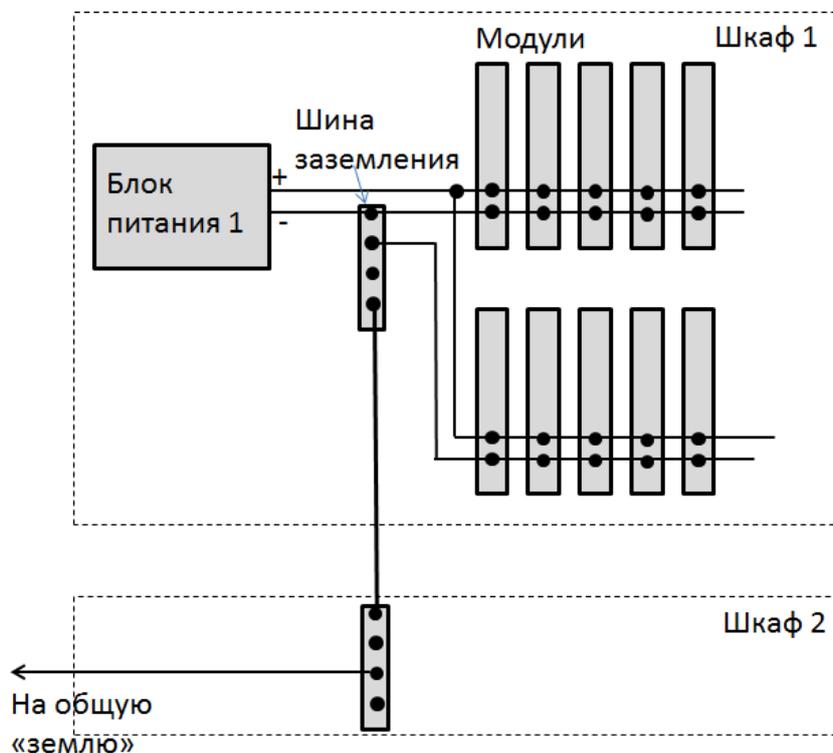


Рис. 31. Принцип заземления электронных модулей в шкафах

Здесь нужно иметь в виду следующее:

- в каждом шкафу нужна шина заземления;
- земляные проводники подсоединяются так, чтобы не формировать контуров по проводам заземления;
- провода заземления должны иметь большое сечение и быть по возможности короткими (тогда они имеют низкое сопротивление и малую индуктивность);
- совместная точка заземления (на рисунке стрелка «на общую землю») должна подключаться к земляной шине с низким сопротивлением.

Ничего другого к этому заземлению не должно быть подключено. Идея заземления заключается в создании эквипотенциального проводника, воздействие электромагнитных помех на который минимально. Но такой эквипотенциальный проводник может быть реализован лишь в ограниченной области пространства. Как правило, не имеется общей земляной шины для нескольких зданий. Также следует иметь в виду, что два разных контура заземления могут иметь разные потенциалы, что может привести к появлению помех.

При проводке внутри шкафа необходимо разделять в пространстве входные (управляющие) и выходные (силовые) кабели (рисунок 32). Задняя панель с внутренней шиной станции для электроники с хранимой программой всегда должна быть экранирована и/или расположена на расстоянии от сигнальных линий.

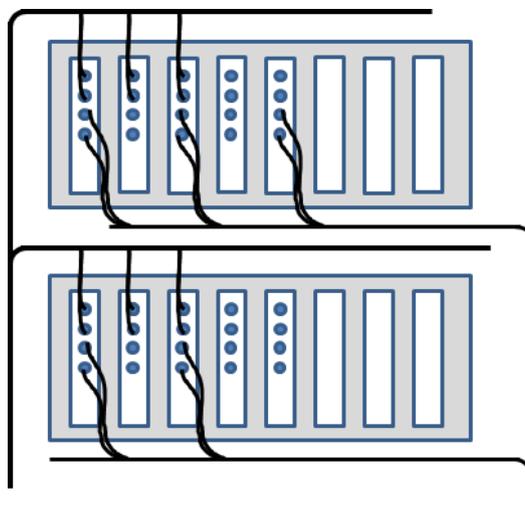


Рис. 32. Проводка внутри шкафа

Заземленные стальные корпуса шкафов позволяют уменьшить как взаимное влияние электронных модулей, так и внешнее влияние. В любом случае должна быть предусмотрена экранирующая поверхность, соединенная с землей для предотвращения взаимных помех (как на рисунке 31).

Металлические корпуса шкафов электрически связаны друг с другом и подключаются последовательно к местному земляному проводнику. Следует избегать протекания токов через корпуса. При электромонтаже внутри шкафа необходимо обратить внимание на пространственное разделение между выходными и входными линиями, что достигается отдельными кабельными каналами или жгутами и/или пространственно разнесенными соединительными разъёмными элементами.

4.5. Гальваническая развязка

Для цифровых или импульсных входов используют гальваническую развязку, например, с помощью оптронов для развязки контуров заземления (рисунок 33).

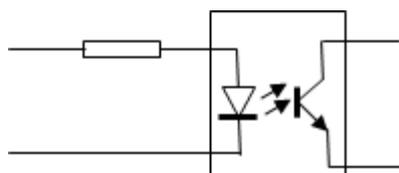


Рис. 33. Гальваническая развязка отдельного цифрового входа с помощью оптрона

Гальваническая развязка может быть осуществлена после преобразования измеряемой величины (напряжения) в частоту, которая через оптопару передается на вход преобразователя частоты в цифровой код (рисунок 34).

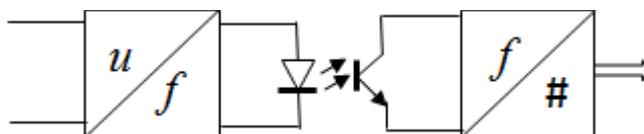


Рис. 34. Промежуточное преобразование измеряемой величины u в частоту f с последующим преобразованием после оптической развязки в цифровой код

4.6. Электромагнитная совместимость и печатные платы

Маршрутизация дорожек на печатной плате в значительной степени влияет на характеристики электромагнитной совместимости печатной платы. Кабели для соединения печатной платы с другими печатными платами, приборами, источниками питания, подключением к сети переменного тока, также сильно влияют на электромагнитную совместимость печатной платы [11]. Чтобы получить печатную плату, на которой схемы функционируют должным образом, маршрутизация трасс, размещение компонентов/разъемов и развязка, используемая с определенными ИС, должны быть оптимизированы в соответствии с определенными ограничениями. Чтобы печатная плата в возможно меньшей степени была подвержена действию помех, необходимо помнить о следующем [10]:

1. Выбрать необходимый формат печатной платы (одно-, двух- или многослойные).

2. Прямая и обратная линии сигнальных проводников должны располагаться близко друг к другу, и нужно стремиться, по возможности, минимизировать их длину.

3. Обеспечить правильную развязку для каждой микросхемы или группы ИС: отдельная аналоговая и цифровая земля, развязки по питанию, дополнительные емкости в месте подсоединения проводников питания к микросхеме.

4. Избегать появления петель, особенно петель по земле, и избегать разрывов в земляных проводниках и трассировки в таких разрывах сигнальных проводов.

4.7. Паразитные связи на печатных платах

4.7.1. Паразитная гальваническая связь

На рисунке 35 показана схема, иллюстрирующая появление паразитной гальванической связи, когда две цепи имеют общее сопротивление $R_{п}$, в виде

проводника на печатной плате. По этому проводнику с сопротивлением R_{Π} течет ток I_1 от источника e_1 и ток I_2 от источника e_2 . Если R_1 и R_2 представляют собой входные сопротивления элементов последующих цепей, то на каждом из них появятся падения напряжения от смеси сигналов от источников e_1 и e_2 . Примером такой связи может быть, например источник питания.

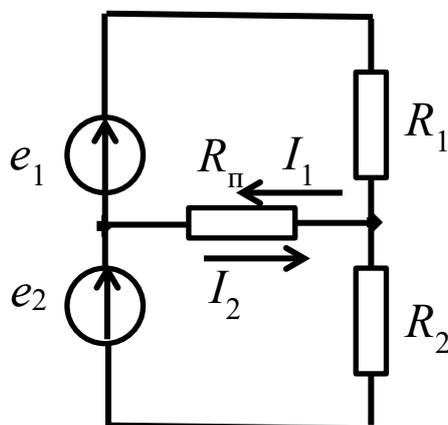


Рис. 34. Паразитная гальваническая связь: R_{Π} – сопротивление печатного проводника, общего для двух источников сигнала, e_1 и e_2 . I_1 и I_2 – токи от этих источников, протекающие по общему проводнику

На рисунке 36 показана связь входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ на устройстве 2 с выходным напряжением $U_{\text{ВЫХ}}$ устройства 1 из-за наличия тока в общем проводнике (земля) с сопротивлением R_{Π} .

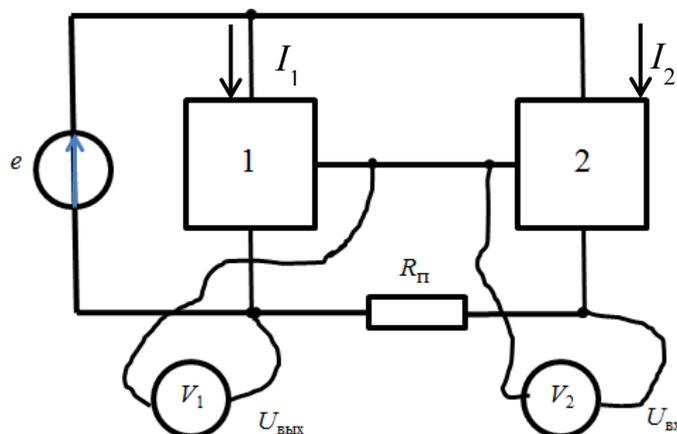


Рис. 37. Несмотря на наличие связи между выходом компонента 1 ($U_{\text{ВЫХ}}$) и входом компонента 2 ($U_{\text{ВХ}}$), вольтметры покажут разные напряжения из-за наличия паразитного сопротивления R_{Π} общего проводника (земля)

Несмотря на наличие связи между выходом компонента 1 ($U_{\text{ВЫХ}}$) и входом компонента 2 ($U_{\text{ВХ}}$), вольтметры покажут разные напряжения из-за наличия паразитного сопротивления R_{Π} общего проводника (земля). Измеренное, как показано на рисунке 36, вольтметром V_2 напряжение $U_{\text{ВХ}}$ равно

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВЫХ}} - I_2 \cdot R_{\Pi}.$$

Аналогичным образом влияет на схему наличие общего провода по питанию (рисунок 37). При включении нагрузки у компонента схемы 2 повышается нулевой потенциал и выходной сигнал.

При переключении нагрузок из-за функционирования компонентов 1 и 2, происходит перераспределение напряжения питания между ними из-за изменения токов I_1 и I_2 . Другими словами, работа компонентов 1 и 2 приведет к нестабильному питанию на них.

Контур заземления также вызывает проблемы с ЭМС. На рисунке 37 показан пример гальванической цепи заземления через многократное заземление, в котором различные потенциалы двух точек заземления представляют собой напряжение помех. Поскольку обе сигнальные линии имеют сопротивления, не равные нулю, в верхней ветви также течет ток помехи, который искажает входной сигнал.

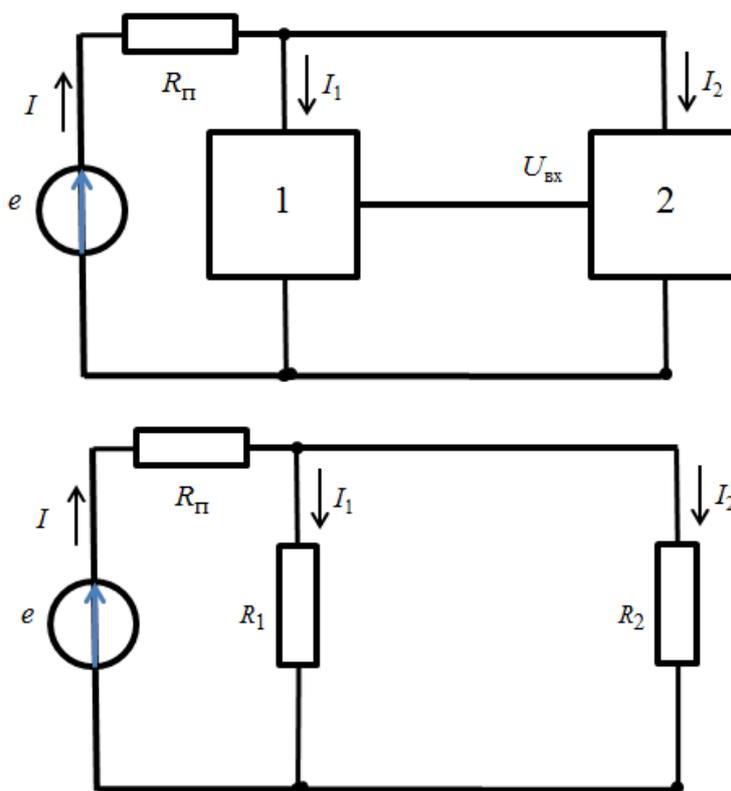


Рис. 37. Влияние общего проводника по цепи питания R_{Π} :

$$I = I_1 + I_2; \quad e = I \cdot \left(R_{\Pi} + \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} \right).$$

Влияние контура заземления (многократное заземление, рисунок 38), при условии, что $R_{\text{вх}} \gg R_{\text{линии}}$, приводит к тому, что на входе приемника сигнала (2) действует напряжение $U_{\text{вх}} = e_{\text{и}} + U_{\text{помехи}}$.

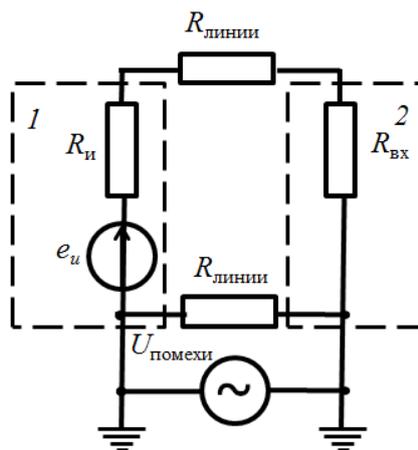


Рис. 38. Влияние контура заземления (многократное заземление) на помеху.

1 - источник сигнала. 2 - приемник сигнала.

Из-за разницы потенциалов в землях возникает паразитное напряжение помехи $U_{\text{помехи}}$

4.7.2. Паразитная емкостная связь

Помеха может также попадать в схему, если вблизи прибора или платы с компонентами проходит электрический провод. Это может произойти из-за появления паразитной емкости между этим проводом и проводом питания компонентов в приборе или на плате.

Сигнальная линия расположена в емкостном делителе напряжения между линией помехи и землей. Здесь возникают более высокие частоты помехи, так как для них малые емкости связи (расстояние, площадь) представляют собой малые емкостные сопротивления (рисунок 39).

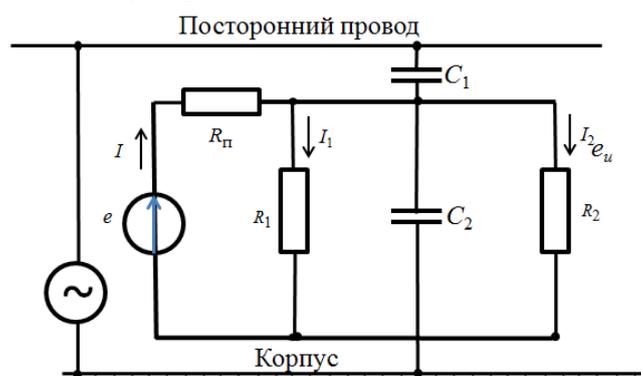


Рис. 39. Паразитная емкостная связь. C_1 и C_2 – паразитные емкости

4.7.3. Паразитная индуктивная связь

В случае магнитной связи рассматривается связь двух систем посредством магнитных полей. Аналогично емкостному влиянию, эффекты индуктивной связи обычно могут возникать, когда размеры контура проводника малы по сравнению примерно с четвертью длины волны возбуждающего магнитного поля, т. е. ниже

$\lambda/4$. Здесь также индуктивная связь, которая особенно актуальна на расстояниях, значительно меньших длины волны, уменьшается с увеличением расстояния. Однако, если длина контура проводника больше четверти длины волны, уже проявляются эффекты интерференции волн. В неблагоприятных случаях такие контуры могут действовать даже как линейные резонансные контуры. В таких условиях напряжение помехи может быть кратно напряжению возбуждения. На рисунке 40 показано простое расположение двух индуктивно связанных цепей и эквивалентная схема. При быстром изменении тока $\Delta i_1/\Delta t$ во времени в цепи 1, например, из-за процесса переключения и, следовательно, изменения магнитного поля во времени, в цепи 2 индуцируется напряжение помехи:

$$e_{\text{помехи}} = -M \frac{di_1}{dt}$$

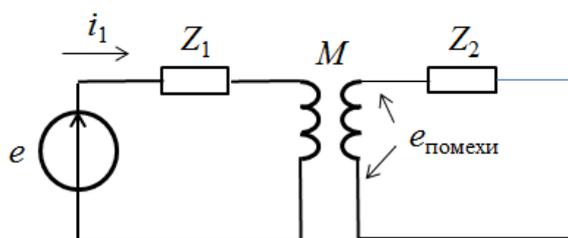


Рис. 40. Наведение помехи одним контуром с источником ЭДС, на другой:
 M – взаимоиנדукция между контурами.
 Z1 и Z2 - эквивалентные комплексные сопротивления цепей

Другими словами, сигнальная цепь может действовать как обмотка трансформатора, другой его обмоткой является цепь помехи. На рисунке 41 показан пример. В случае больших быстрых изменений тока могут возникать магнитные поля, которые вызывают ток помехи в сигнальной цепи, накладывающийся на полезный ток сигнала.

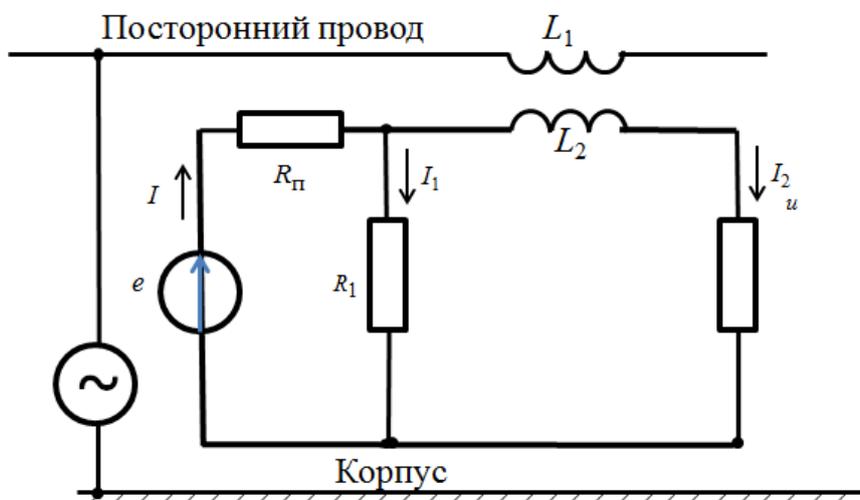


Рис. 41. Паразитная индуктивная связь. L1 и L2 – паразитные индуктивности проводников

4.7.4. Паразитная связь через электромагнитные волны

Связь двух систем с помощью ЭМ волн возникает, если они имеют размер порядка длины волны λ . С одной стороны, на линиях существуют стоячие ЭМ волны и связанная с ними комбинированная емкостно-индуктивная связь. С другой стороны, ЭМ волны могут излучаться в помещение, а также приниматься непреднамеренно.

Электромагнитная связь между проводниками. Если геометрические размеры цепи близки к половине длины волны $\lambda/2$ наибольшей частоты спектра, необходимо учитывать зависящее от местоположения распределение тока и напряжения в линии. На рисунке 42 показана модель двух параллельных линий с общим обратным проводником («земля»). Переменное магнитное поле $H(x,t)$, связанное с линейным током контура 1 активного проводника (полезный сигнал), проникает в соседний контур 2 пассивного проводника и индуцирует в нем напряжение помех. Кроме того, из-за разности потенциалов между линиями возникает переменное электрическое поле $E(x,t)$, которое возбуждает интерференционный ток на пассивной линии (на линии контура 2).

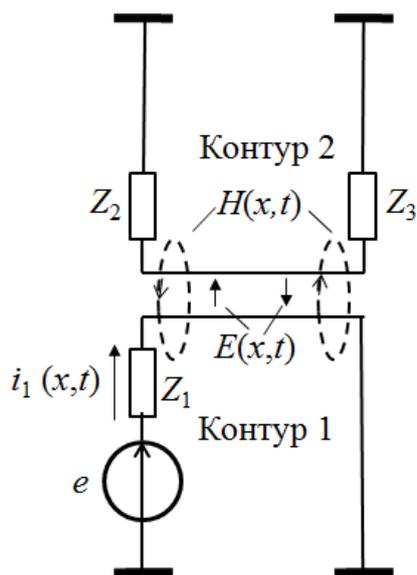


Рис. 42. Модель двух параллельных линий с общим обратным проводником («земля»)

При численном расчете распределений токов и напряжений проводник разбивают на какие-то малые части и выполняют расчеты с дискретными составляющими. Их задают как единицы на метр длины проводника, например погонная емкость проводника, C' [Ф/м], или погонную индуктивность L' [Гн/м]. Если теперь составить уравнения для токовых узлов и цепей напряжения по правилам Кирхгофа и решить систему уравнений для тока и напряжения, то получится волновое уравнение в общем виде. Отсюда можно получить переменную, характеризующую проводящую линию – ее волновое сопротивление:

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

При этих условиях емкостную и индуктивную связь нельзя рассматривать отдельно друг от друга. В связанных таким образом проводниках имеется влияние через электромагнитные волны.

Связь через электромагнитное излучение. Такое воздействие осуществляется через все конструкции, излучающие электромагнитные волны. Это могут быть как искусственные источники, такие как передатчики, так и естественные, например, грозовые разряды или космическое излучение. Связь через электромагнитное излучения возникает при длине проводника равной, или превышающей половину длины волны рассматриваемого излучения λ . Поле электромагнитного излучения состоит из электрической, E , и магнитной, H , составляющих. Различают ближнюю и дальнюю зоны поля.

В ближней зоне расстояние r до источника $r \ll \lambda/2\pi$. В этой зоне составляющая H преобладает, когда ток источника I очень велик, а напряжение U очень мало. Такая ситуация возникает в передающем диполе $\lambda/2$ или у рамочной антенны. Составляющая E преобладает, когда ток I очень мал, а напряжение U очень велико. По отношению к передающему диполу эта точка соответствует концам диполя.

Зона дальнего поля находится на расстоянии $r \gg \lambda/2\pi$. Поля E и H находятся в фазе, и их амплитуды связаны через характеристический импеданс поля. Его величина в вакууме:

$$Z_0 = \frac{E_0}{H_0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \text{ Ом}$$

Напряжение помех, создаваемое в приемнике помех электромагнитным излучением, зависит от качества «приемной антенны». В качестве таких «антенн» могут выступать проводящие дорожки на печатных платах или проводка в корпусах. Напряжение помех зависит от длины линии, выравнивания по полю и связи проводников с компонентами поля.

4.7.5. Синфазная и противофазная помехи

В зависимости от того, куда приложена помеха и как формируется сигнальная цепь помех, следует различать синфазную и противофазную помехи. В цепи с помехой идет речь о том, симметрична она или несимметрична, действует относительно земли, или же изолирована от земли.

О противофазной помехе (рисунок 43) говорят тогда, когда помеха ($i_{\text{пом}}$) в двух проводниках цепи помехи действует друг против друга, т.е. накладывается на полезный сигнал и искажает его. В модели источник помех $U_{\text{пом}}$ в сигнальной цепи соединен последовательно с источником сигнала $U_{\text{сигн}}$.

О синфазной помехе можно говорить, если помеха в двух проводниках сигнальной цепи с помехой действует в одном направлении (рисунок 44). Напряжение помехи влияет на потенциал всей сигнальной цепи относительно земли. Если для сигнала схема симметрична (равные сопротивления сигнальных линий, сбалансированный вход), то ток помехи не возникнет.

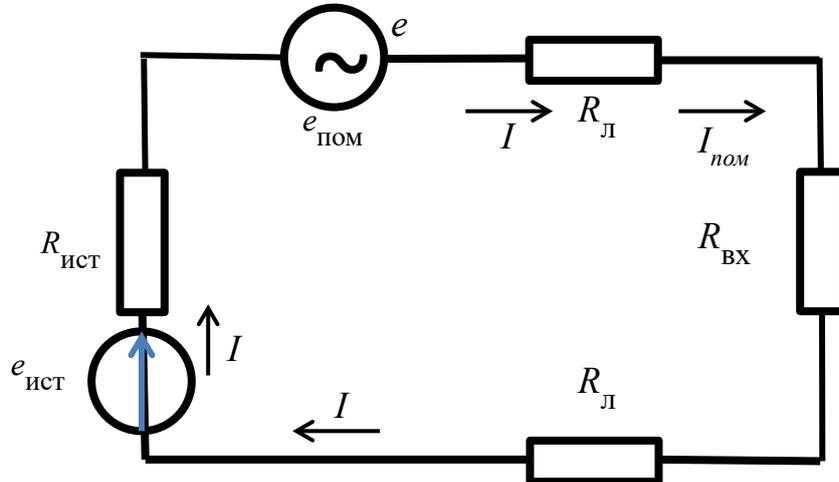


Рис. 43. Противофазная помеха ($e_{пом}$). В двух проводниках цепи с сопротивлениями R_p ток, наводимый помехой направлен друг против друга, т.е. накладывается на полезный сигнал. Источник помех $e_{пом}$ в сигнальной цепи соединен последовательно с источником полезного сигнала $e_{ист}$

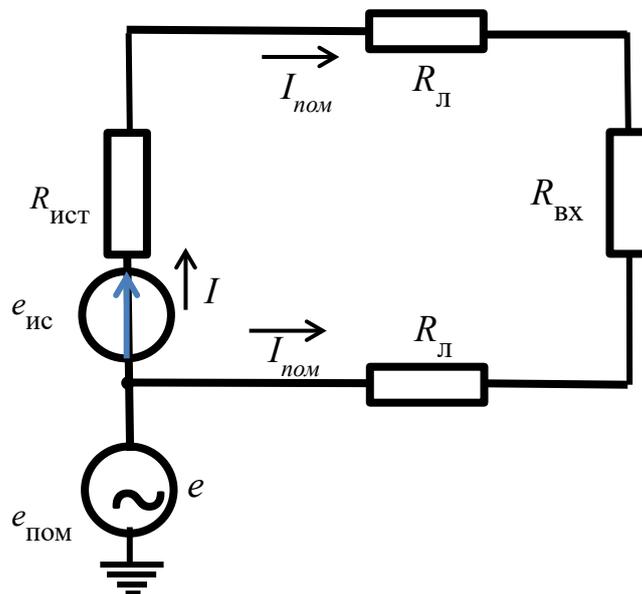


Рис. 44. Синфазная помеха. Помеха в двух сигнальных проводниках действует в одном направлении

Напряжение помехи действует на потенциал сигнальной цепи относительно земли. Если для сигнала схема симметрична (одинаковые сопротивления линии, сбалансированный вход), то токи, возбуждаемые помехой в проводах, компенсируют друг друга.

5. ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ

5.1. Особенности разводки печатных плат

Для обеспечения электромагнитной совместимости печатной платы имеет значение размещение компонентов на плате, запретные зоны на плате, трассировка (размещение проводников), количество слоев на плате, порядок слоев и расстояние между слоями, Компоненты должны быть сгруппированы в логические функциональные блоки. Такими блоками могут быть:

- высокоскоростная логика и таймеры;
- память;
- средне- и низкоскоростная логика;
- видео;
- аналоговые схемы;
- интерфейсы ввода/вывода;
- разъемы ввода-вывода и фильтры синфазных помех

На правильно разведенной плате высокоскоростная логика, а также память не должны располагаться рядом с областью ввода/вывода.

Кварцевый или высокочастотный генератор следует располагать рядом с интегральными схемами (ИС), для которых он предназначен, и вдали от области ввода-вывода на плате.

Устройства ввода-вывода должны быть расположены близко к разъемам, а микросхемы для видеосигналов и низкочастотные аналоговые цепи должны иметь доступ к области ввода-вывода без необходимости пересечения высокочастотных цифровых секций платы. Правильное расположение минимизирует длину проводников и паразитные связи, повысит качество сигнала, сводит к минимуму и снижает электромагнитное излучение печатной платы и восприимчивость к нему.

Большая часть проблем с функционированием печатных плат вызвана расположением элементов на плате. Наибольшие из них связаны с высокочастотными цифровыми схемами с периодическим сигналом с формой, близкой к прямоугольной, такими как таймеры и интерфейсные схемы, контроллеры. Сигналы от них содержат высокочастотные гармоники большой амплитуды.

Излучение, вызванное сигналом, связано с его высокочастотным спектральным составом. Спектральный состав или скорость нарастания сигнала пропорциональны следующим факторам:

- основной частоте f_0 сигнала;
- обратному значению времени нарастания или спада сигнала (времени отклика, t_0);
- величине переходного тока при переключении логического вентиля, $I_{\text{вых}}$.

Скорость нарастания/спада сигнала можно приближенно оценить как $(f_0 \cdot I_{\text{ВЫХ}})/t_0$. Повторяющиеся высокочастотные сигналы с большими токами и быстрым временем нарастания/спада будут иметь большой спектральный состав. Следовательно, скорость сигнала следует учитывать для всех критических сигналов.

Рисунок 45 [11] показывает статические значения для диапазонов сигналов «1» и «0» в ТТЛ-уровнях.

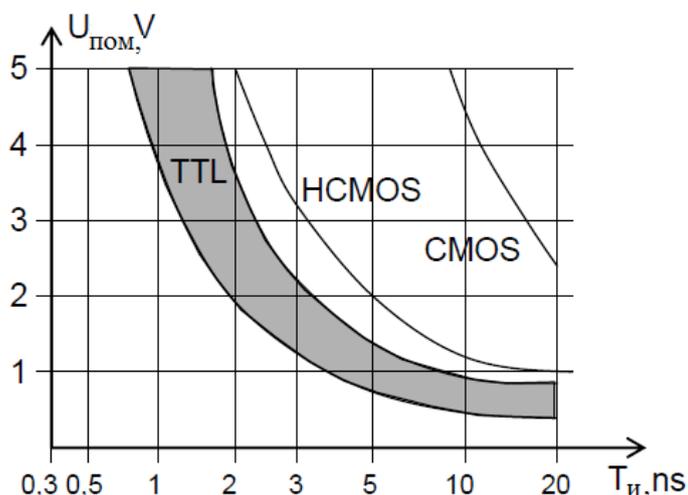


Рис. 45. Статические значения для диапазонов сигналов «1» и «0» в ТТЛ-уровнях. CMOS - Complementary metal-oxide-semiconductor, т.е. КМОП. HCMOS - high-speed CMOS, т.е. высокоскоростной КМОП

Между ними лежит неопределенная область (заштрихована серым), потому что фактический порог переключения зависит от допусков и температуры. Также из рисунка видно, что импульс помехи может генерировать только сигнал «1» с временной областью напряжения, которая, по меньшей мере, находится в этой неопределенной области. Кроме того, импульс должен иметь достаточную длительность, так как схемам требуется какое-то время для отклика, но это время падает с увеличением напряжения. При напряжении помехи 3 В, например, импульс должен составлять не менее 1,5 нс.

Использование SMD (Surface Mount Device), т.е. емкости по питанию на каждый корпус цифровой микросхемы (рисунок 46), позволяет отсечь помехи, распространяющиеся по шинам питания.

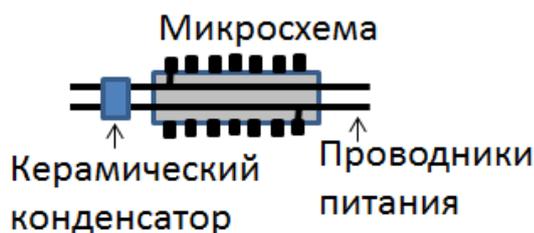


Рис. 46. SMD-емкость по питанию

В отличие от старых деталей с длинными ножками, которые вставлялись в дырочки в плате (DIP-монтаж), SMD-конденсаторы выглядят как маленькие

«кирпичики» или «таблетки», которые припаиваются прямо на медные дорожки (площадки) на поверхности платы. Из-за отсутствия длинных ножек у них очень низкая собственная индуктивность. Это позволяет им мгновенно отдавать ток микросхеме и эффективно «гасить» высокочастотные помехи по питанию, с которыми обычные конденсаторы справляются хуже.

Для снижения емкости между параллельными проводниками целесообразно размещать их по возможности дальше друг от друга (рисунок 47).



Рис. 47. Для снижения емкости между параллельными проводниками нужно размещать их по возможности дальше друг от друга

Для снижения емкости между параллельными проводниками между ними размещают заземленный с двух сторон экранирующий проводник (рисунок 48).



Рис. 48. Для снижения емкости между параллельными проводниками нужно размещать между ними заземленный с двух сторон экранирующий проводник

Для снижения емкости между проводниками на многослойной плате на разных слоях проводники должны проходить перпендикулярно друг другу (рисунок 49).

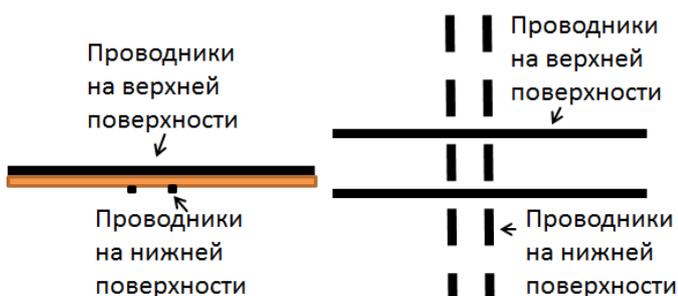


Рис. 49. Для снижения емкости между проводниками на многослойной плате на разных слоях проводники должны проходить перпендикулярно друг другу

Проводники со слабым сигналом следует окружать «земляной» заливкой (рисунок 50).



Рис. 50. Проводники со слабым сигналом нужно окружать «земляной» заливкой

5.2. Входные цепи

Цифровые входы можно защитить от импульсных помех, используя на входах фильтры нижних частот. Но это возможно только в случае, если не требуется высокое временное разрешение. Также на цифровых входах для развязки от земляной шины используют гальваническую развязку, например, с помощью оптронов или трансформаторов (рисунок 30, рисунок 33). Если существует риск перенапряжений, можно использовать искровые разрядники.

Аналоговые входы должны быть симметричными для защиты от синфазных помех. На рисунке 51 приведен пример такой схемы – дифференциальный усилитель. Если на входы этой схемы поступает один и тот же сигнал, напряжение на выходе $V_{\text{ВЫХ}}=0$. Если этот сигнал – помеха, то она будет подавлена.

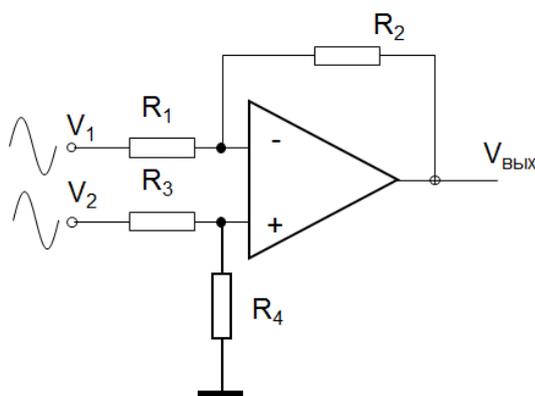


Рис. 51. Дифференциальный усилитель

При работе с сигналами низкого уровня также применяют гальваническую развязку (рисунок 34), так как в этом случае напряжение помех может достигать величины измеряемого напряжения.

5.3. Особенности работы с МОП- и БТИЗ-транзисторами [9]

На рисунке 52 представлены условные обозначения МОП (металл-окисел-полупроводник) и БТИЗ (биполярный транзистор с изолированным затвором) транзисторов.

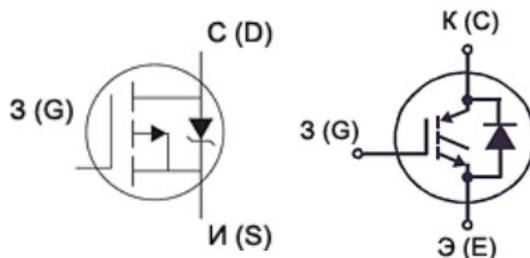


Рис. 52. Условные обозначения МОП (слева) и БТИЗ (справа) транзисторов

Главным преимуществом МОП-транзистора является высокое входное сопротивление (свыше $4 \cdot 10^9$ Ом). Между затвором и подложкой МОП-

транзистора существует электрическая емкость, конденсатор, который может быть пробит напряжением около 20 В. Диэлектриком конденсатора является изоляция из SiO₂ между затвором и подложкой. Разрушение МОП-транзистора происходит при пробое изоляции. При этом появляется отверстие в изоляции – транзистор выходит из строя.

Типичную картину разрушения МОП-транзистора можно увидеть на рисунке 53. Условия были созданы моделью человеческого тела, заряженного до 700 В, с разрядом на затвор. Это фото было сделано с увеличением в 5000 раз с помощью сканирующего электронного микроскопа после снятия верхнего слоя кристалла до поликремния.

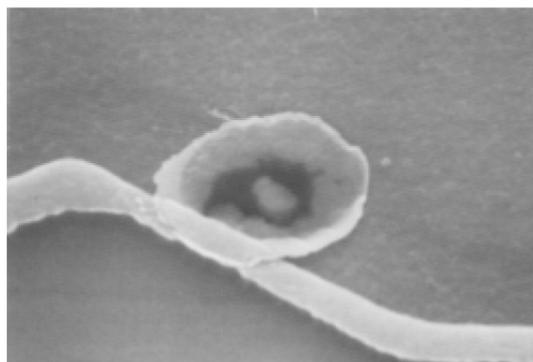


Рис. 53. Отверстие от пробоя диэлектрика в МОП-транзисторе [9]

Из-за того, что затвор (входной электрод) и подложку разделяет слой диэлектрика, эти приборы чувствительны к статическому электричеству, которое при превышении какого-то порога приводит к пробое диэлектрика и выходу транзистора из строя. Для исключения этого производитель предлагает [9]:

- хранить и перевозить МОП-транзисторы нужно в закрытых проводящих контейнерах;
- вынимать МОП-транзисторы из контейнеров можно только на заземленных рабочих местах;
- у работающих с МОП-транзисторами верхняя одежда не должна накапливать статическое электричество, и им необходимо быть заземленным;
- полы и рабочие столы должны иметь заземленное и не накапливающее статическое электричество покрытие;
- при работе следует избегать изолирующих материалов любого вида;
- антистатический материал должен использоваться только один раз;
- при монтаже МОП-транзисторов нужно использовать заземленный паяльник.
- работоспособность схемы с МОП-транзисторами должна проверяться только при обеспечении контроля статического электричества. Статическое электричество появляется по разным причинам: из-за электризации трением, в том числе одежды; электрической индукцией, которая может быть вызвана расположенным вблизи от несущего электрический заряд тела.

6. ЭКРАНИРОВАНИЕ

Одним из эффективных путей подавления помехи является экранирование. Для того, чтобы в полной мере воспользоваться возможностями экранирования, необходимо соблюдать некоторые правила конструктивного исполнения экранов.

6.1. Защитный экран

На рисунке 54 представлена блок-схема измерительного модуля. Следует обратить внимание на то, что в блоке питания применено два последовательно соединенных трансформатора. Так как между первичной и вторичной обмотками каждого из них существует паразитная емкость, $C_{\text{пар}}$, то их последовательное соединение дает суммарную емкость меньше наименьшей из них.

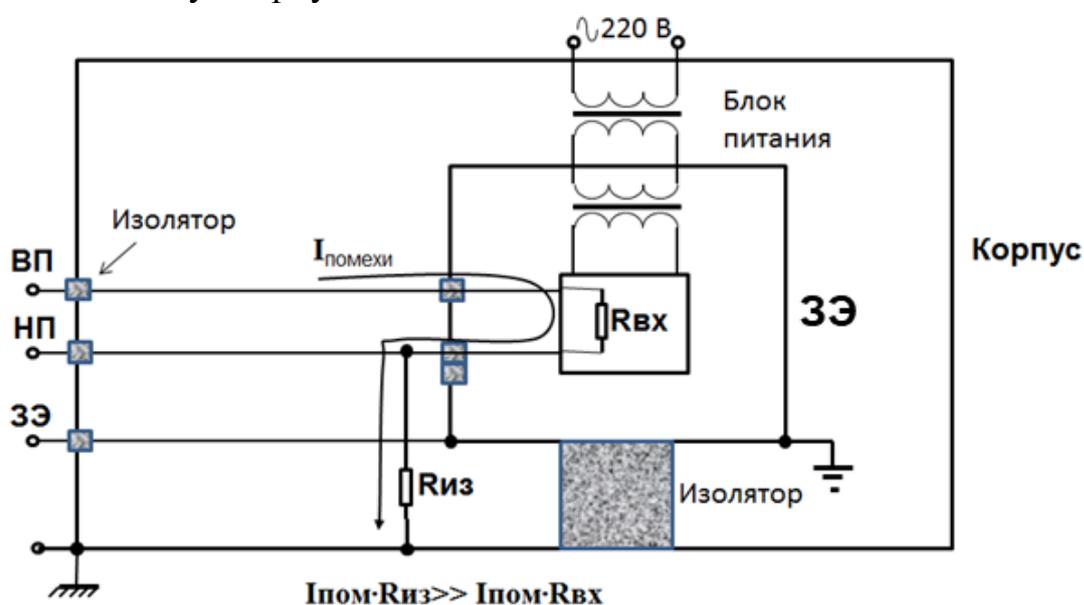


Рис. 54. Гальваническая развязка и конструктивные особенности измерительного модуля.

Входы, на которые подается измеряемый сигнал: ВП - высокопотенциальный, НП - низкопотенциальный. ЗЭ - защитный экран. $R_{\text{вх}}$ - входное сопротивление модуля, $R_{\text{из}}$ - сопротивление изоляции. $I_{\text{помехи}}$ - ток помехи

Ток помехи, последовательно протекая по входному сопротивлению $R_{\text{вх}}$ и по сопротивлению изоляции, $R_{\text{из}}$, создаст падения напряжения на каждом из этих сопротивлений. Если $R_{\text{из}} \gg R_{\text{вх}}$, то большая часть падения напряжения помехи придется на сопротивление изоляции, $R_{\text{из}}$ и на вход модуля попадет ее ничтожная часть. Помеха окажется приложенной к изолятору, а не к входу модуля.

В блоке питания применены два последовательно соединенных одинаковых трансформатора, которые имеют приблизительно равные значения паразитных емкостей между обмотками. Тогда общая паразитная емкость оказывается вдвое меньше, чем у одного трансформатора (рисунок 55).

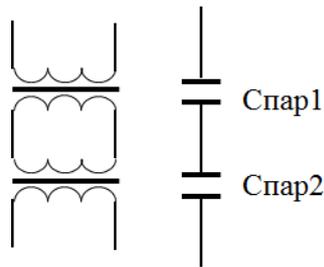


Рис. 55. Представление трансформаторов как паразитных емкостей $C_{\text{спар}}$.
 Если $C_{\text{спар1}} = C_{\text{спар2}} = C_{\text{спар}}$, то их последовательное соединение дает емкость $C_{\text{спар}}/2$.
 Таким образом, уменьшается влияние паразитных емкостей

6.2. Экранирование входных проводов. Особенности заземления экранной оплетки входных проводов

Правильное выполнения заземления экранирующей оплетки входных проводов позволяет резко снизить влияние помехи. Неправильное – усилит ее влияние. При неправильном заземлении экрана появляется паразитная ЭДС помехи e_n между двумя «землями», находящимися под разными потенциалами (рисунок 56). По экрану течет ток помехи от «земли» с более высоким потенциалом, к «земле» с более низким потенциалом. Этот ток наводит паразитную ЭДС на входе измерительной схемы, которая может в сотни раз превысить входной сигнал.

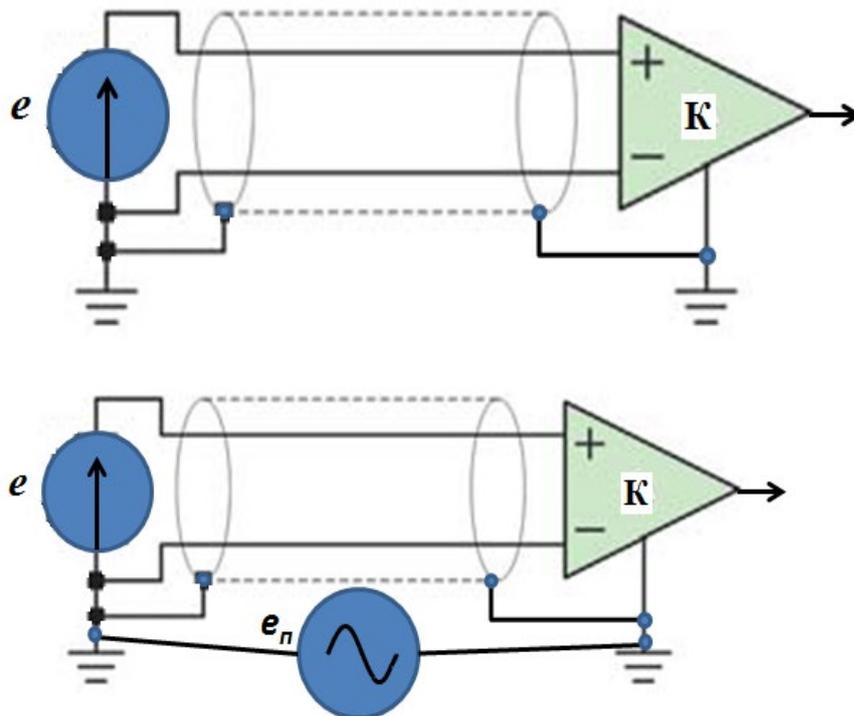


Рис. 56. Неправильное заземление экрана. Появляется паразитная ЭДС помехи e_n между двумя «землями», находящимися под разными потенциалами

При правильном заземлении экран соединяется с «землей» только в одной точке, там же, где заземляется источник сигнала (датчик). Ток по экранной оплетке не течет, она находится под нулевым потенциалом и входные провода надежно защищены от влияния внешних электромагнитных полей (рисунок 57).

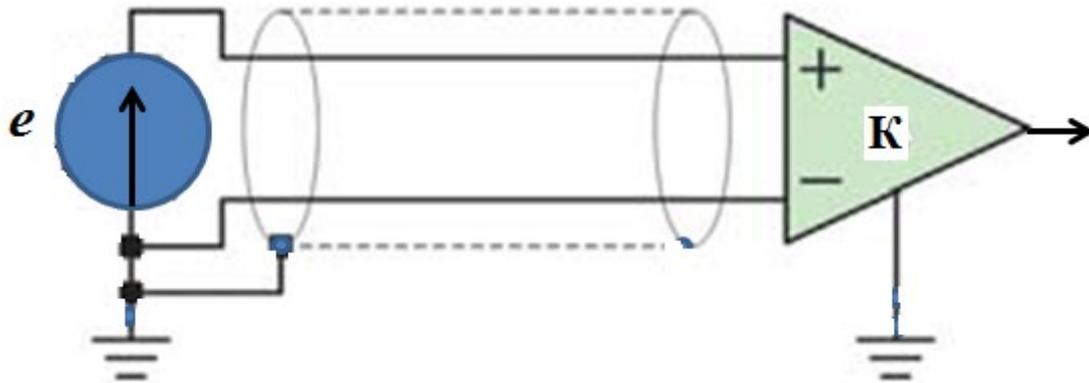


Рис. 57. Правильное заземление экрана. Соединяется с «землей» только в одной точке, у источника сигнала – датчика

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распространенность электромагнитного излучения, обусловленная как естественными причинами, так и деятельностью человека, привела к тому, что пришлось принимать меры для защиты техносферы от этого излучения, принимать стандарты, регламентирующие электромагнитную совместимость (ЭМС).

Рассмотренные в пособии вопросы охватывают фундаментальный пласт знаний, необходимый для понимания электромагнитной обстановки в современных технических системах. Проанализирована физическая природа электромагнитных полей— естественных и искусственных, так и конкретные механизмы возникновения помех в электронных цепях.

Ключевым выводом является то, что электромагнитная совместимость не может рассматриваться как вторичный фактор. Будь то широкополосные помехи от полупроводниковых ключей, синусоидальные наводки от сети 50 Гц или емкостные токи, возникающие вблизи ЛЭП — каждое из этих явлений способно нарушить работоспособность устройства, если оно не было учтено на этапе проектирования. Особенное значение ЭМС имеет в измерительных системах и устройствах, так как сигнал помехи, наведенной посторонним электромагнитным излучением, может в сотни и тысячи раз превышать собственно измеряемый сигнал. В этом учебном пособии рассмотрены меры, позволяющие существенно уменьшить влияние помехи.

Подводя итог, следует выделить три критических аспекта успешного обеспечения ЭМС:

1. Понимание физики процесса: умение отличать кондуктивные помехи от излучаемых, а синфазные (общего вида) — от дифференциальных (нормального вида).

2. Математический и инструментальный анализ: использование преобразования Фурье для анализа спектра и расчет реактивных сопротивлений паразитных емкостей.

3. Комплексная защита: сочетание схемных решений (фильтрация, АЦП), конструктивных мер (экранирование) и программных алгоритмов обработки сигналов.

Понимание принципов ЭМС на этапе проектирования и владение методами оценки коэффициентов ослабления помех и знание норм промышленной эмиссии позволяют не просто констатировать наличие проблемы, а численно обосновывать эффективность применяемых мер защиты.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Природные помехи

1. Какие специальные стандарты по электромагнитной совместимости используются в настоящее время?
2. Какова роль этих стандартов?
3. В чем выражается влияние помех естественного происхождения, в частности от Солнца?
4. Что такое «помеха»?
5. В чем разница между детерминированной и случайной помехой?
6. В чем разница между индустриальной и природной помехой?
7. В чем проявляется влияние магнитных бурь на линии электропередачи?
8. В чем проявляется опасность атмосферного электричества и молний для электронной аппаратуры?
9. Какое влияние атмосферного электричества на МОП-структуры и методы защиты от пробоя диэлектрического слоя?
10. В чем выражается влияние помех от атмосферного электричества и молний?
11. Какие существуют природные помехи?
12. Приведите примеры специальной защиты от природных помех?
13. Приведите 3–4 примера технических устройств или процессов, которые вызывают промышленные помехи?
14. Что они собой представляют детерминированные помехи с точки зрения физики сигнала?
15. В чем заключается природа возникновения случайных (флуктуационных) помех? Приведите пример ситуации, когда формируется случайная помеха.
16. Что является наиболее распространенным источником атмосферных помех в природе?

2. Техногенные помехи

1. Виды и типы техногенных помех, что является причинами их появления?
2. Что такое коэффициент ослабления помехи?
3. Какие электронные компоненты и устройства являются основными источниками широкополосных помех?
4. Чем именно (какими процессами) вызываются широкополосные помехи в микроконтроллерах и логических схемах?
5. Какова наиболее распространенная частота синусоидальной помехи и каков ее основной источник?
6. На что разделяются помехи по характеру воздействия на измерительный сигнал?
7. Для чего при проектировании и анализе электронных устройств используется коэффициент ослабления помехи?

8. Какое значение коэффициента ослабления помехи указывают в характеристиках приборов общего вида на постоянном токе или переменном токе?
9. Перечислите чувствительность к помехам различных устройств и электронных компонентов?
10. Классификация помех по характеру воздействия
11. Что такое помеха нормального вида?
12. Что такое помеха общего вида?
13. Охарактеризуйте коэффициент ослабления помехи?
14. По каким причинам возникает электромагнитная связь между источником и приёмником помех?
15. В чем разница между широкополосной и синусоидальной помехой?
16. Помехи с частотой сети (50 Гц) и борьба с ними?
17. Причины появления электростатического электричества и порожденной им помехи?
18. Высокочастотные помехи (мобильная связь, радио и телевизионных передатчики), их влияние на электронную аппаратуру?

3. Основы теории электромагнитного поля

1. Какие поля являются причиной появления помех?
2. Какие функции используют для описания ЭМ поля?
3. В каких пределах варьируется индукция магнитного поля Земли?
4. До каких значений может кратковременно возрасти напряженность электрического поля во время атмосферных разрядов?
5. Какое существенное отличие магнитного от электрического поля?
6. Как ведет себя концентрация зарядов в проводнике при воздействии на него переменного электрического поля?
7. Запишите формулу напряженности электрического поля?
8. Приведите примеры взаимодействия между током и магнитным полем для различных приложений?
9. Существует ли эффективная защита от магнитных полей?
10. В чем заключается теория электромагнитного поля и методы, применяемые для обеспечения электромагнитной совместимости?
11. Что такое электромагнитное поле и как оно неконтролируемо влияет на электронную аппаратуру?
12. В чем разница между статическим и переменным полями?
13. Что такое клетка Фарадея и в чем ее защитный эффект?

4. Распространение помех и их подавление

1. Какие ошибки в конструкции прибора могут стать причиной появления помех и какие существуют способы их избежать или редуцировать?
2. В чем разница между заземлением и гальванической развязкой?
3. Для чего предназначен синфазный дроссель?

4. От чего зависит мощность наведенной помехи?
5. Назовите наиболее распространенные приемники помех?
6. Перечислите основные методы борьбы с наводками?
7. Какие существенные недостатки имеет заземление в двух разных точках?
8. Как можно избежать возникновения помех в контурах заземления?
9. В основном на каких частотах действуют помехи на контур заземления?
10. В чем заключается принцип заземления электронных модулей в шкафах?
11. Что позволяют уменьшить заземленные стальные корпуса шкафов?
12. Для чего используется гальваническая развязка?
13. Какие условия необходимо соблюдать, чтобы печатная плата в возможно меньшей степени была подвержена действию помех?
14. Какие проблемы с ЭМС вызывают контуры заземления?
15. Что может появиться между электрическим проводом и проводом питания компонентов в приборе?
16. Какие эффекты могут возникать, когда размеры контура проводника малы по сравнению примерно с четвертью длины волны возбуждающего магнитного поля?
17. Когда возникает связь через электромагнитное излучения?
18. В зависимости от чего следует различать синфазную и противофазную помехи?
19. Что такое «синфазный дроссель»?
20. Как минимизировать электромагнитные помехи на конструкциях?
21. В чем причина уменьшения площади контура, принимающего помеху?
22. Как попадают помехи через арматуру здания на металлическую деталь стеллажа?
23. Какие требования предъявляются к контуру заземления?
24. Почему особо сильное влияние помехи оказывают на аналоговые схемы и на измерительные системы с сигналами низкого уровня?
25. Как помеха распространяется по паразитным цепям?
26. Какие особенности размещения арматуры в шкафах?
27. Как выполняется заземление шкафов с аппаратурой?
28. Назовите особенности ввода сигнальных и силовых кабелей в шкафы?
29. Как применяются гальванической развязки?

5. Особенности размещения электронных компонентов на печатной плате

1. Как можно избежать взаимного влияния элементов на печатной плате?
2. Какие меры надо принимать для недопущения выхода из строя МОП и БТИЗ – транзисторов при их монтаже на плате?
3. Что имеет значение для обеспечения электромагнитной совместимости печатной платы?
4. В какие логические функциональные блоки должны быть сгруппированы компоненты печатной платы?

5. Для чего необходимо размещать параллельные проводники по возможности дальше друг от друга?
6. Где размещают экранирующий проводник у параллельных проводников?
7. Для чего используют фильтры нижних частот?
8. Перечислите особенности работы с МОП- и БТИЗ-транзисторами?
9. Перечислите особенности разводки печатных плат для минимизации воздействия помех?
10. Опишите паразитные связи в печатных платах (емкостная, гальваническая и индуктивная связь)?
11. Почему возникают электромагнитной связи между проводниками?
12. Что такое синфазная и противофазная помехи?
13. Как предохраняют МОП и БТИЗ – транзисторы от пробоя?

6. Экранирование

1. Какие требования предъявляются к защитным экранам?
2. Каким образом симметричный аналоговый вход помогает подавить помеху?
3. Как правильно выполнять заземление оплетки входного кабеля?
4. В какой точке при заземлении экран соединяется с «землей»?
5. К чему приводит правильное выполнения заземления экранирующей оплетки входных проводов?
6. Для чего используют защитный экран?
7. В чем причина применения развязки на двух трансформаторах?
8. Как правильно заземлить экранную оплетку входных проводов?

ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка энергии солнечного излучения. [Электронный источник] <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/techirrad.htm> (дата обращения: 10.01.2026).
2. Салихов З.С. и др. Система контроля космической погоды для оценки технологических рисков на территории полуострова Ямал. Наука и техника в газовой промышленности, №4(44), 2010, стр. 39–47.
3. Vijayaraghavan G., Brown M., Barnes M. Practical grounding, bonding, shielding, and surge protection. Elsevier, Newnes, 2004. P. 237.
4. СО 153–34.21.122–2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. — М.: Изд-во МЭИ, 2004. — 57 с.
5. ГОСТ Р МЭК 62305-4-2016. Защита от молнии. Часть 4. Защита электрических и электронных систем внутри зданий и сооружений. [Электронный источник] <https://meganorm.ru/Index/63/63770.htm> (дата обращения: 10.01.2026).
6. ГОСТ Р МЭК 62305-4-2016 Защита от молнии. Часть 4. Защита электрических и электронных систем внутри зданий и сооружений. [Электронный источник] <https://docs.cntd.ru/document/1200140759/titles/7DS0KC> (дата обращения: 10.01.2026).
7. ГОСТ Р 59789–2021 (МЭК 62305–3:2010). Молниезащита. Часть 3. Защита зданий и сооружений от повреждений и защита людей и животных от электротравматизма.
8. [Электронный источник] <https://www.renesas.com/en/document/gde/intersil-part-code-nomenclature-guide> (дата обращения: 10.01.2026).
9. PASQUALE ARPAIA. Electronics for Measurement Systems. The CERN Accelerator School "Magnets" 16 - 25 June, 2009 Bruges, Belgium. [Электронный источник] <https://cas.web.cern.ch/sites/default/files/lectures/bruges-2009/arpaia.pdf> (дата обращения: 10.01.2026).
10. Coenen M. J. An evaluation method to characterize the EMC performance of PCBs containing ICs. — Eindhoven: Philips Components, report ESG 8801, 1988.
11. Kleiner E. Automatisierungssysteme: Elektro-Magnetische Verträglichkeit. — Mannheim: Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW), 2009. — 144 P.

Геннадий Николаевич Лукьянов

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А