

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

1.1. Электромагнитная совместимость. Электромагнитные влияния

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

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

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

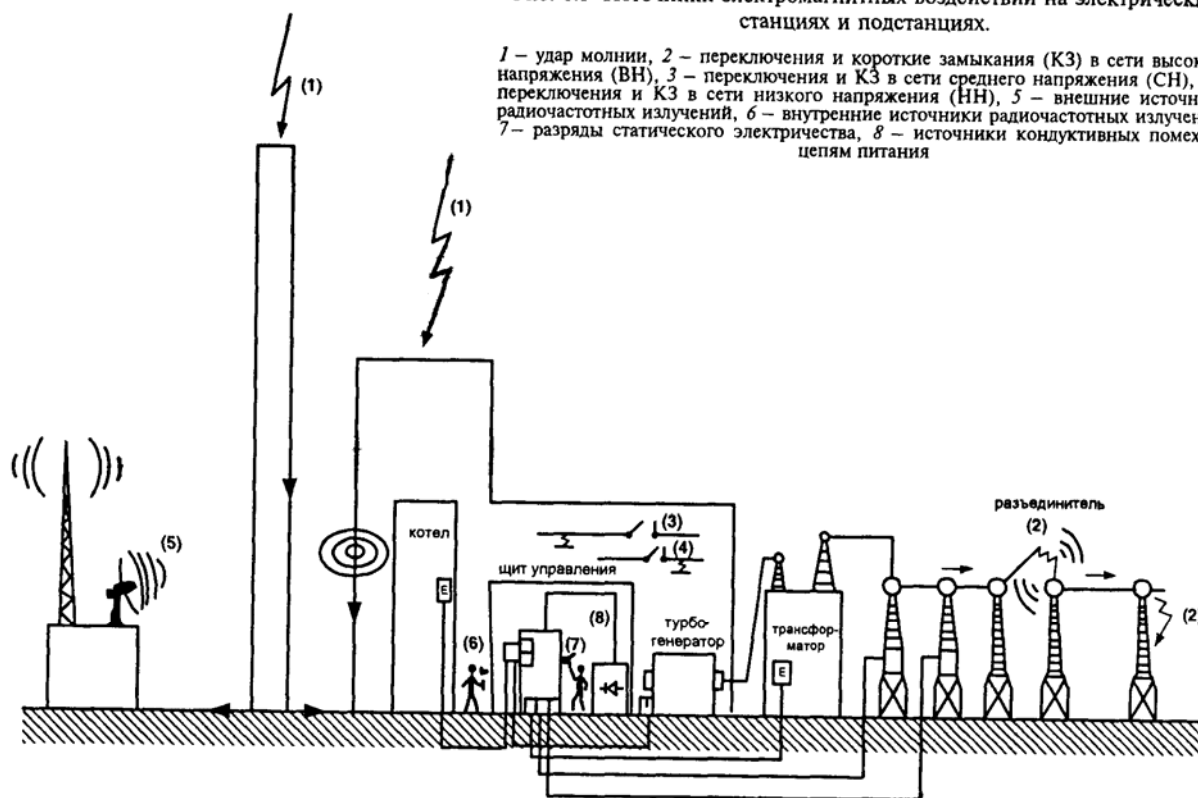
- Переходные процессы в цепях высокого напряжения при коммутациях силовыми выключателями и разъединителями;
- Переходные процессы в цепях высокого напряжения при коротких замыканиях, срабатывании разрядников или ограничителей перенапряжений;
- Электрические и магнитные поля промышленной частоты, создаваемые силовым оборудованием станций и подстанций;

- Переходные процессы в заземляющих устройствах подстанций, обусловленные токами КЗ промышленной частоты и токами молний;
- Быстрые переходные процессы при коммутациях в индуктивных цепях низкого напряжения;
- Переходные процессы в цепях различных классов напряжения при ударах молнии непосредственно в объект или вблизи него;
- Разряды статического электричества;
- Электромагнитные возмущения в цепях оперативного тока.

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

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

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



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

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

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

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

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

Таблица 1.1.

№ п.п.	Событие	Последствия	Причины
<i>Коммутации в первичных цепях</i>			
1.	Коммутация разъединителем на ПС с элегазовым РУ	Ложная работа РЗА. Отключилась линия 110 кВ	Неисправно ЗУ. Высокий уровень импульсных помех
2.	Коммутация выключателем 10 кВ на ПС с закрытым РУ	Ложная работа РЗА. Отключилась линия 110 кВ	Импульсные помехи в сети постоянного тока более 2 кВ
3.	Коммутация разъединителем на ПС с элегазовым РУ	Повреждение электронного реле	Высокий уровень импульсных помех. Низкая помехоустойчивость реле
4.	Коммутация разъединителем на ПС с элегазовым РУ	Сбой в работе автоматики контроля плотности элегаза. Заблокировано управление выключателями 110 кВ	Низкая помехоустойчивость аппаратуры
5.	Коммутация выключателем 110 кВ на ПС с открытым РУ	Ложное отключение выключателя 220 кВ	Импульсные помехи в цепях оперативного тока
<i>Короткие замыкания на землю в цепях высокого напряжения</i>			
6а	КЗ на землю на шинах 110 кВ ПС с открытым РУ	Повреждение аппаратуры РЗА, коммутационных аппаратов в сети постоянного тока. Отключились 6 линий 110 кВ	Неисправно ЗУ.
6б	Ближнее КЗ на землю ПС с открытым РУ	Возгорание кабелей в кабельном канале	Перекрытие с ЗУ на цепи постоянного тока
7.	КЗ на шинах 110 кВ ПС с открытым РУ	Ложная работа Отключилась линия 500кВ	Неисправно ЗУ.
8.	КЗ на шинах ПС с закрытым РУ	Ложная работа РЗА. Отключилась линия 110 кВ	Неисправно ЗУ.
9.	КЗ на шинах ОРУ-110кВ открытой ПС с открытым РУ	Ложно отключается блок генераторов на ТЭЦ	Неисправно ЗУ.

<i>Удары молнии в территорию подстанции</i>			
10.	Удар молнии в молниеприемник на ОРУ ПС	Повреждение устройств системы автоматического управления. Загорелось реле на распределительном щите	Неправильно выполнена молниезащита
11.	Удар молнии в молниеприемник ОРУ ПС	Отключение 8 выключателей на РУ 110 кВ, 2 на РУ 220 кВ	Неправильно выполнена молниезащита
<i>Стационарные режимы</i>			
12.	Нормальный режим на ТЭЦ	Ложно работает микропроцессорная защита генератора. Отключился блок генератора	Помехи в цепях дискретных сигналов. Неэкранированный кабель

1.2. Уровень помех. Помехоподавление.

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

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

1.2.1. Логарифмические относительные характеристики. Уровни помех.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Но по определению $P_{\text{дБ}} = 10 \lg(P_x / P_0) = 20 \lg(10^{\frac{u_{\text{дБ}} + i_{\text{дБ}}}{20}}) = (u_{\text{дБ}} + i_{\text{дБ}}) / 2$.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.2.2. Степень передачи. Помехоподавление

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

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

1.3. Основные типы и возможные диапазоны значений электромагнитных помех

1.3.1. Узкополосные и широкополосные процессы

Помехи, создаваемые источниками (напряжения, токи, электрические и магнитные поля), могут возникать как в виде периодически повторяющихся, так и случайно распределенных во времени величин. В обоих случаях речь

может идти как об узкополосных, так и о широкополосных процессах. Процесс называется **узкополосным**, когда энергия спектра сосредоточена в основном в относительно узкой полосе частот около некоторой фиксированной частоты ω_0 или **широкополосным**, если указанное условие не выполняется

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

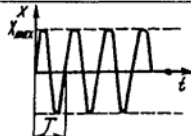
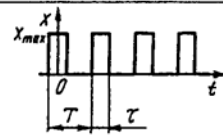
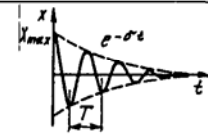
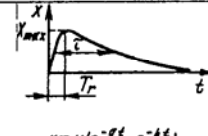
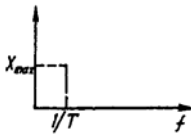
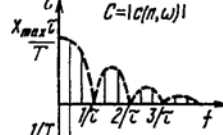
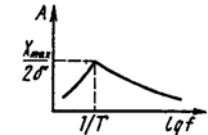
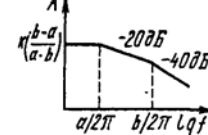
Периодические помехи		Непериодические, случайные помехи	
Узкополосные	Широкополосные	Узкополосные	Широкополосные
Временная область, изменение помех во времени			
 $x = X_{max} \sin \omega_0 t$ $\omega_0 = 2\pi/T$	 $x = \frac{X_{max}\tau}{T} \sum_{n=1}^{\infty} c(n, \omega) \cos(n\omega t)$ $\omega_0 = 2\pi/T$	 $x = X_{max} e^{-\sigma t} \cos \omega_0 t$ $\omega_0 = 2\pi/T$	 $x = K(a^{-\sigma t} - e^{-bt})$ $K = f_1(X_{max}, T_r, \tau)$ $a = f_2(T_r, \tau)$ $b = f_3(T_r, \tau)$
Частотная область, амплитудные спектры			
	 $C = c(n, \omega) $		
С — амплитудный спектр		А — спектр амплитудной плотности	

Рис. 1.2. Систематизация разновидностей электромагнитных помех

На данном рисунке приведены следующие типы помех:

- синусоидальная, постоянно действующая периодическая помеха частотой 50 Гц, проникающая из системы питания или высокочастотная несущая волна. Данная помеха имеет спектральную плотность, представляемую двумя линиями вида $Y(\omega) = X_{max} (\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0))$ и представляет собой узкополосный процесс;

- последовательность прямоугольных (например, тактовых) импульсов. Данная бесконечная последовательность может быть представлена в форме ряде Фурье и является примером широкополосного процесса с дискретным спектром.

- периодические затухающие однократные импульсы, случайно возникающие, например, в системе электроснабжения. и представляющие собой узкополосный процесс;

- одиночные импульсы, образованные двумя экспонентами (например, разряды атмосферного и статического электричества) и представляющие собой широкополосный процесс.

1.3.2. Противофазные и синфазные помехи

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

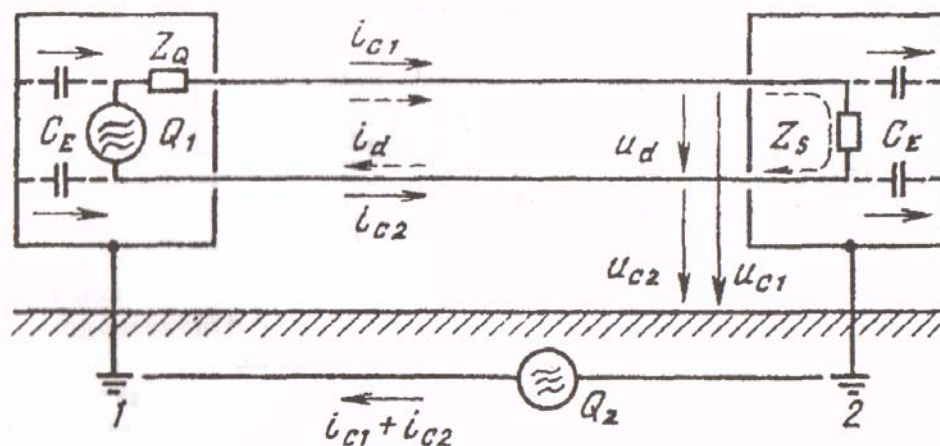


Рис. 1.3. Помехи, связанные с передачей сигналов по линии

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

Противофазные напряжения помех (поперечные, симметричные) возникают между проводами двухпроводной линии (u_d на рис. 1.3.). Противофазные помехи возникают через гальванические или полевые связи или преобразуются из синфазных помех в системах, несимметричных относительно земли. Конкретные примеры возникновения противофазных помех рассматриваются в последующих разделах.

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

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

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

1.4. Земля и масса

Другими важными понятиями ЭМС являются понятия: земля и масса. С понятием "заземление" инженеры, работающие с сильноточными устройствами, связывают, как правило, вопросы техники безопасности и грозозащиты, например устранение недопустимо высоких напряжений прикосновения. Инженеры же, работающие в области электроники, - скорее электромагнитную совместимость их схем, например устранение контуров заземления, влияние частоты 50 Гц, обращение с экранами кабелей и т. д.

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

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

Понятие «земля» поясняет рис. 1.4. :

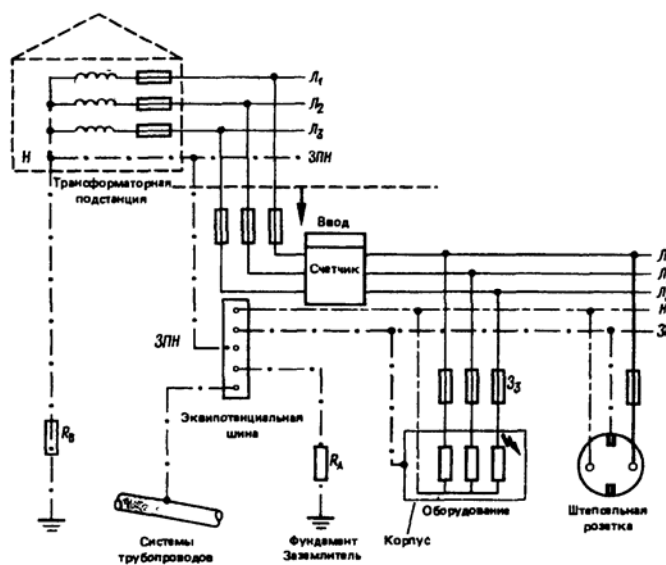


Рис. 1.4. Заземление в низковольтной сети.

Здесь:

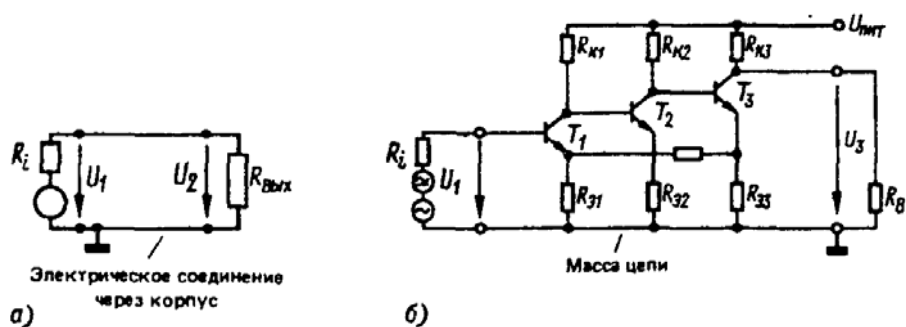
- L_1, L_2, L_3 – фазные провода сети;
- $ЗПН$ – защитный провод нейтрали;
- $ЗП$ – защитный провод;
- N – нейтральный провод;
- Z_3 – защитный автомат;
- R_A, R_B – сопротивление заземлителя потребителя и подстанции;

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

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

Понятие «масса» поясняет рис. 1.5.. Под массой в схемотехнике понимают общую систему опорного потенциала, по отношению к которой измеряются узловые напряжения цепи (шина, провод опорного потенциала, корпус, нулевая точка). В простой цепи это просто обратный провод, в электронной схеме - общий обратный провод для всех электрических контуров (рис. 1.5. а, б). Масса может, но не должна иметь потенциал земли. Однако, как

правило, она в одном месте непременно соединена с защитным проводом и тем самым заземлена. Масса выполняет те же функции, что и нейтральный



провод. Прежде всего, на работу схемы не оказывает влияния заземление массы. Однако если занимающая достаточно обширное пространство масса заземлена в нескольких местах, возникает контур заземления (см. рис. 1.3). Тогда при различных потенциалах точек заземления могут протекать уравнительные токи, а на полных сопротивлениях массы возникать падения напряжения, которые накладываются на напряжения, действующие вдоль отдельных контуров цепи и являются противофазными помехами. При высоких частотах это даже не требует гальванического заземления, так как при наличии печатных плат с навесным монтажом и плоской массой контуры заземления могут образовываться благодаря их емкостям относительно массы.

1.5. Способы описания и основные параметры помех

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

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

Для непериодических помех важнейшими параметрами являются следующие:

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

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

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

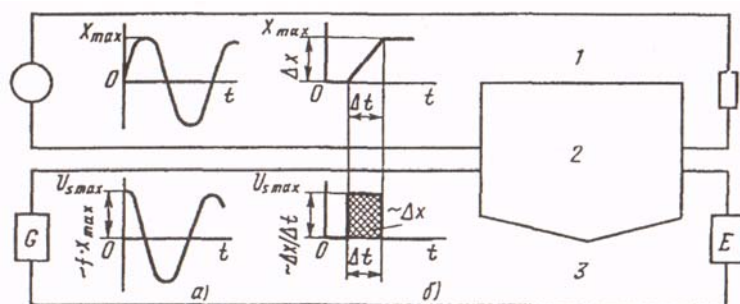


Рис. 1.4. Пояснение параметров периодических (а) и непериодических переходных (б) помех: E – приемник сигналов; G – источник сигналов; x – помеха (напряжение или ток); u_s – напряжение помехи, обусловленное связью; 1 – влияющий контур; 2 – гальваническая, емкостная или индуктивная связь; 3 – контур, подверженный влиянию/

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

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

1.5.1. Описание электромагнитных влияний в частотной и временной областях

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

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

Синусоидальные или косинусоидальные помехи (гармонические процессы) могут быть представлены как во временной, так и в частотной областях непосредственно (рис. 1.4.). В частотной области помеха характеризуется угловой частотой ω и частотой колебаний $f = \omega / 2\pi$.

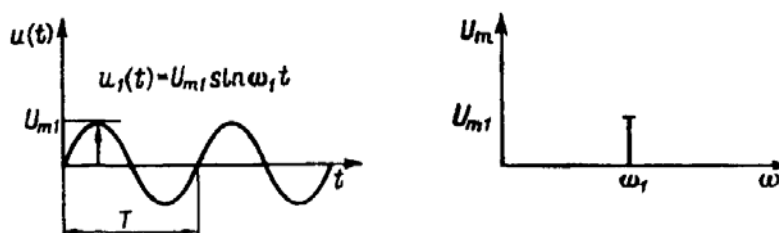


Рис 1.4. Представление синусоидальной помехи во временной и частотной областях

Несинусоидальные периодические функции - например, пилообразной или прямоугольной формы импульсы напряжения или тока выпрямителей которые, в некоторых случаях, возможно описать аналитически, - могут быть представлены в частотной области как бесконечная сумма синусоидальных и косинусоидальных колебаний, т. е. рядом Фурье. Например, можно представить себе несимметричное напряжение прямоугольной формы

возникшим как наложение основного колебания u основной частоты $f_1 = 1/T$ и бесконечно многих гармонических колебаний u_n с частотами $n f_1$. Зависимость амплитуды отдельных колебаний от частоты представляет собой дискретный линейчатый спектр (рис. 1.5.) Наименьшая встречающаяся в линейчатом спектре частота — основная частота.

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

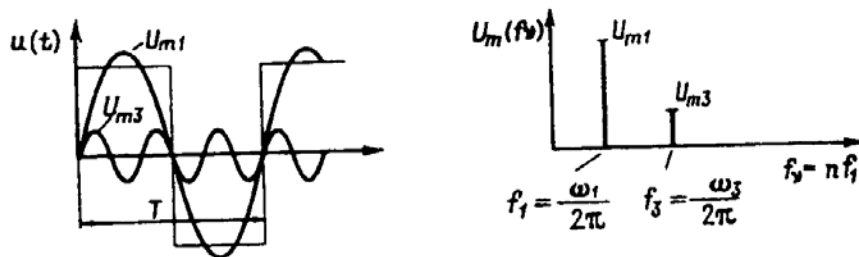


Рис 1.5. Периодическая несинусоидальная функция

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

Нормальная:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \cos(n\omega_1 t + \varphi_n),$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(n\omega_1 t) dt, \quad B_n = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(n\omega_1 t) dt, \quad U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt.$$

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

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

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

(1.1.)

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

Комплексная.

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

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

(1.2.)

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

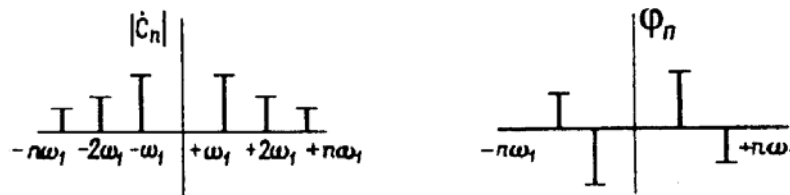


Рис 1.6. Амплитудный и фазовый спектры комплексного ряда Фурье

Так как функция $u(t)$ будучи представленная комплексным рядом Фурье (1.2.) остается действительной, то в правой части вводятся отрицательные частоты (чтобы мнимые части сократились). Учет отрицательных частот приводит к двустороннему спектру (Рис. 1.6.). Идентичные вещественные части обоих слагаемых в (1.2.) за знаком суммы (для положительных и отрицательных частот $\pm n\omega_1$) образуют физически измеримую амплитуду U_n , причем

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

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

В заключение на рис. 1.7. показаны импульсы прямоугольной формы двух периодически изменяющихся напряжений одной и той же основной частоты, однако различной скважности, и относящиеся к ним линейчатые спектры. Из вышесказанного можно установить следующее: наименьшая частота f_1 является основной частотой. Ее значение связано со значением периода T : $f_1 = 1/T$

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

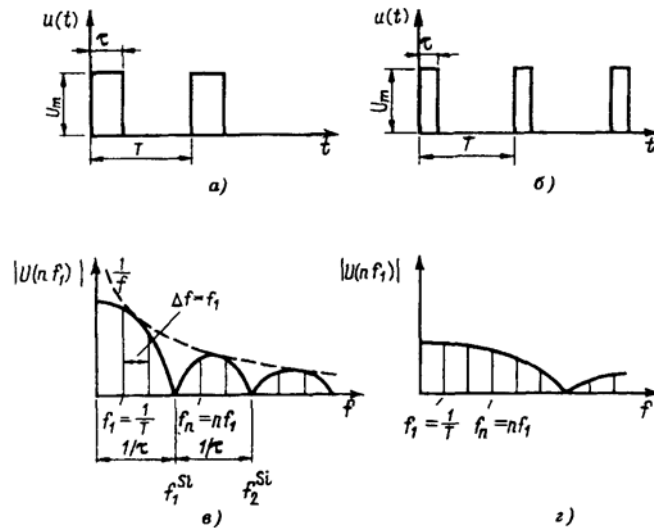


Рис. 1.7. Линейчатые спектры двух периодических последовательностей прямоугольных импульсов напряжений с личной скважностью (1:2). Огибающая спектральных амплитуд (сплошная кривая) – функция $Si(x)$, огибающая функции $Si(x)$ (пунктирная кривая) – функция $1/f$

Ряд Фурье для последовательности прямоугольных импульсов имеет вид:

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

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

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

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

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

Другие нулевые значения следуют с интервалом $nf_1^{Si=0}$. На практике нулевые значения появляются не столь явно выраженными, как на рис. 1.7, так как из-за неизбежных асимметрий (например, экспоненциальных нарастаний и спада прямоугольных импульсов) они сглаживаются.

Постоянный коэффициент при функции $Si(x)$ равный $2U_m\tau/T$ при неизменном периоде пропорционален площади импульса $U_m\tau$. Таким образом, высокие узкие импульсы при низких частотах могут иметь такой же

спектр, как низкие широкие. Поэтому в вышеприведенном примере спектральные амплитуды из-за меньшей на 50% площади импульсов имеют только половинное значение.

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

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

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

Ряд Фурье допускает представление в частотной области только периодических функций времени. Однако часто имеют дело с непериодическими функциями, характерными, например, для коммутационных процессов, молнии или разрядов статического электричества и т. д.

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

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

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

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

Можно также записать

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

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

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

где $\dot{X}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t)e^{-j\omega t} dt$ - представляет собой преобразование Фурье функции $u(t)$ называемое спектральной плотностью $u(t)$; $|\dot{X}(\omega)|$ носит название плотности распределения амплитуд. Для непериодической функции $u(t)$ обратное преобразование Фурье имеет вид:

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

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

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

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

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

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

иначе говоря, спектральную плотность.

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

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

1.5.4. Возможные диапазоны значений электромагнитных помех

Параметры помех, в зависимости от электромагнитной обстановки на энергообъекте могут изменяться в очень широком диапазоне. Возможные

диапазоны значений параметров электромагнитных помех приведены в табл. 1.2.

Возможные диапазоны значений параметров помех

Таблица 1.2.

Параметр	Обозначение	Значение
Частота, Гц	f	$0-10^{10}$
Максимальное значение напряжения, В	U_{max}	$10^{-6}-10^6$
Скорость изменения напряжения, В/с	du/dt	$0-10^{12}$
Напряженность электрического поля, В/м	E	$0-10^5$
Максимальное значение тока, А	I_{max}	$10^{-9}-10^5$
Скорость изменения тока, А/с	di/dt	$0-10^{11}$
Напряженность магнитного поля, А/м	H	$10^{-6}-10^8$
Время нарастания импульса, с	T_r	$10^{-9}-10^{-2}$
Длительность импульса, с	τ	$10^{-8}-10$
Энергия импульса, Дж	W	$10^{-9}-10^7$

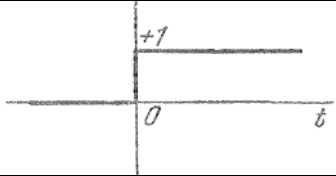
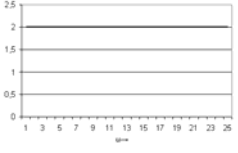
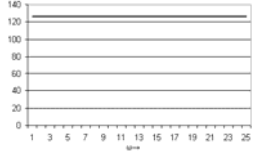
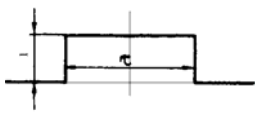
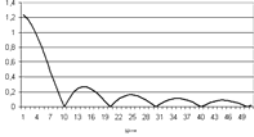
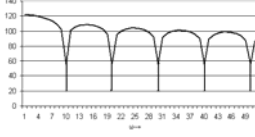

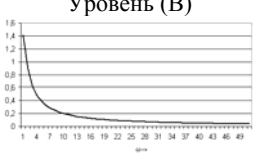
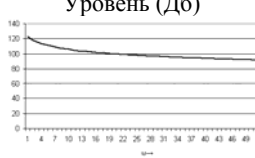
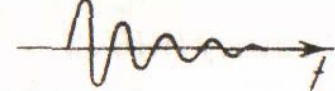
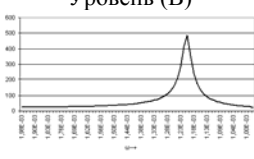
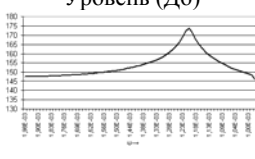
1.5.5. Спектры некоторых периодических и импульсных процессов

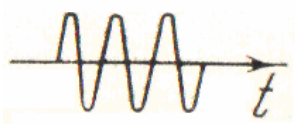
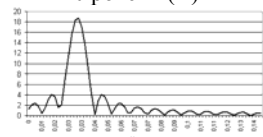
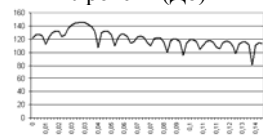
В таблице 1.3. приведены «физические» спектральные плотности $2|\dot{X}(\omega)|$ некоторых импульсных процессов. В этой же таблице приведены графики «физических» спектральных плотностей в линейной и логарифмической системе координат.

Спектры некоторых импульсных процессов

Таблица 1.3.

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

		
<p>2.</p>	<p>Единичная импульсная функция</p> $\delta(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \infty & t = 0 \\ 0 & t > 0 \end{cases}$ $\int_{0_-}^{0_+} \delta(t) dt = 1$	$\dot{X}(\omega) = 1,$ <p>Уровень (В)</p>  $2 \dot{X}(\omega) = 2$ <p>Уровень (Дб)</p> 
<p>3.</p>	<p>Прямоугольный импульс</p> $u(t) = h(\sigma(t + \tau/2) - \sigma(t - \tau/2))$  <p>$h = 1;$ $\tau = 0,628$</p>	$\dot{X}(\omega) = 2h \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega}$ $2 \dot{X}(\omega) = 4h \left \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega} \right $ <p>Уровень (В)</p>  <p>Уровень (Дб)</p> 
<p>4.</p>	<p>Экспоненциальный импульс</p> $u(t) = e^{\beta t} \sigma(t)$ <p>$\beta = -1$</p> 	$\dot{X}(\omega) = \frac{1}{\beta + j\omega}$ $2 \dot{X}(\omega) = 2\sqrt{\frac{1}{\beta^2 + \omega^2}}$ <p>Уровень (В)</p>  <p>Уровень (Дб)</p> 
<p>5.</p>	<p>Затухающая синусоида</p> $u(t) = e^{-\alpha t} \sin(\omega_1 t) \sigma(t)$ <p>$\alpha = 0,04; \omega_1 = 0,0314.$</p> 	$\dot{X}(\omega) = \frac{\omega_1}{\alpha^2 - \omega^2 + \omega_1^2 + 2j\alpha\omega}$ $2 \dot{X}(\omega) = 2\omega_1 \sqrt{\frac{1}{(\alpha^2 - \omega^2 + \omega_1^2)^2 + 4\alpha^2\omega^2}}$ <p>Уровень (В)</p>  <p>Уровень (Дб)</p> 

6.	<p>Импульс в форме отрезка синусоиды, состоящего из целого числа периодов n</p> $u(t) = (\sigma(t + nT/2) - \sigma(t - nT/2)) \sin \omega_0 t$ <p>$n = 3; \quad \omega_0 = 0,0314$</p> 	$\dot{X}(\omega) = (-1)^n \frac{2j\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin n\pi \frac{\omega}{\omega_0}$ $2 \dot{X}(\omega) = 2 \left (-1)^n \frac{2j\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin n\pi \frac{\omega}{\omega_0} \right $ <p>Уровень (В)</p>  <p>Уровень (Дб)</p> 
----	--	---

1.5.6. Учет путей передачи и приемников электромагнитных помех.

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

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

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

системы $y(t)$ связано с процессом на входе системы $x(t)$ следующим соотношением:

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

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

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

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

Где $u = t - \tau$.

Импульсная переходная функция линейной системы с постоянными параметрами связана с передаточной функцией обратными преобразованиями Фурье:

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

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

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

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

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

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

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

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

Поэтому, если перемножить спектральную плотность процесса на выходе источника помехи (и соответственно на входе канала передачи помехи) $\dot{X}_1(\omega)$ с передаточной функцией канала передачи помехи $\dot{k}_{cs}(\omega)$, и далее с передаточной функцией приемника, подверженного помехе $\dot{k}_{np}(\omega)$, то получим спектральную плотность помехи в приемнике $\dot{X}_2(\omega)$:

$$\dot{X}_2(\omega) = \dot{X}_1(\omega) \dot{k}_{cs}(\omega) \dot{k}_{np}(\omega)$$

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

2. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

Источники электромагнитных влияний могут быть естественного или искусственного происхождения.

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

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

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

В то время как соблюдение электромагнитной совместимости функциональных источников оказывается сравнительно простым (их природа как передатчиков чаще всего очевидна с самого начала), то выявление нефункциональных источников оказывается сложной задачей. Их существование проявляется чаще всего в процессе поиска причины неожиданного аварийного поведения приемной системы. Поэтому

идентификация нефункциональных источников помех является важной задачей при обеспечении ЭМС. Только когда установлены источники помех и их механизмы связи, обеспечение электромагнитной совместимости оказывается сравнительно простым.

2.1. Классификация источников помех

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

Дадим количественные оценки данного определения. Введем понятие энергетического спектра импульсного или периодического процесса.

Для импульсного процесса энергетический спектр определяется формулой:

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

где T – длительность импульса.

Для периодического процесса

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

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

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

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

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

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

Источники узкополосных помех являются искусственно созданными человеком. Это, например радиопередатчики, которые на предоставленных им частотах излучают больше мощности, чем допустимо, любительские радиопередатчики, устройства, излучающие высшие гармоники, возникающие вследствие нелинейности элементов передатчиков,

медицинские и промышленные высокочастотные генераторы или просто электросеть частотой 50 Гц. Такие источники характеризуются амплитудой или действующим значением помехи при соответствующей частоте (линейчатый спектр).

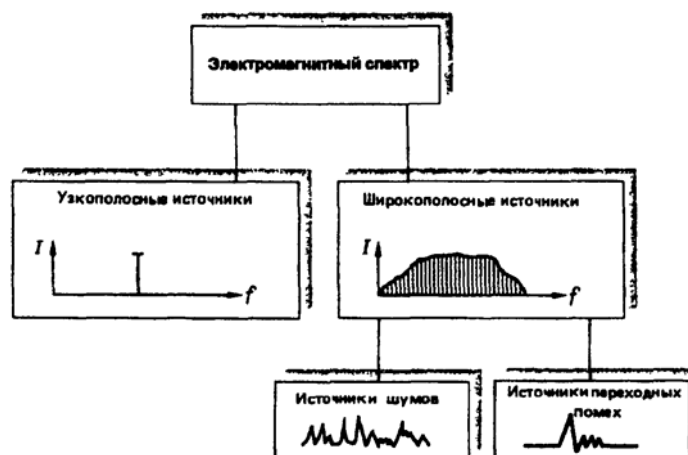


Рис. 2.1. Разделение передатчиков электромагнитной энергии на узкополосные и широкополосные источники

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

Источники широкополосных помех целесообразно подразделить также на источники шумовых и переходных помех. Шумовые помехи состоят из многих, вплотную соседствующих или перекрывающихся импульсов различной амплитуды, которые нельзя разделить. Переходные помехи четко отличимы одна от другой и обладают сравнительно малой степенью повторяемости, проявляются в виде импульсов. Помехи могут быть распределены статистически, например, при короне на воздушной линии, быть периодическими, например в цепях фазовой отсечки тиристорных устройств или непериодическими, например при выключении катушек реле. Классическая электромагнитная совместимость, главной целью которой был контроль радиопомех, и современная интерпретация электромагнитной совместимости существенно различаются. Согласно первой, вполне могут быть допущены отдельные переходные импульсные помехи, т. е. одноразовые или редко повторяющиеся помехи в виде импульсов, в то время как при определенных обстоятельствах однократный импульс помехи в устройствах управления электростанцией может привести к дорогостоящим

простоям, а в авиационных и космических устройствах - к тяжелым последствиям.

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

2.2. Источники узкополосных помех

2.2.1. Передатчики связи

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

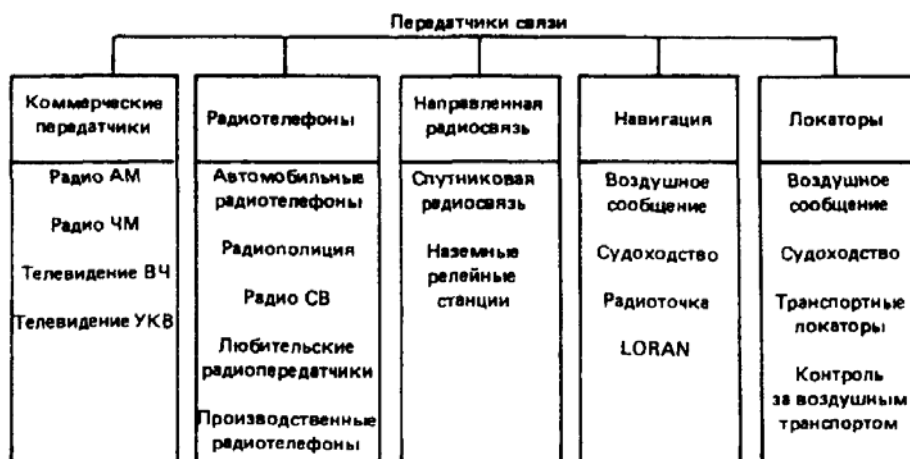


Рис. 2.2. Классификация передатчиков связи

Разрешенные мощности передач на соответствующих частотах установлены в зависимости от регионального положения, времени и направленности передач в согласии с Международным телекоммуникационным союзом (ITU) и добровольно подчиняющимися ему национальными учреждениями для распределения спектра среди

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

2.2.2. Генераторы высокой частоты

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

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

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

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

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

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

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

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

Супергетеродинные приемники смешивают частоту входного высокочастотного напряжения с частотой гетеродина в так называемую промежуточную частоту, поступающую в усилители промежуточной частоты, и излучают как установленную частоту гетеродина, так и постоянную промежуточную частоту вместе с высшими гармониками. Промежуточная частота радиовещания составляет при амплитудной модуляции (АМ) 455 кГц, при частотной модуляции (ЧМ) 10,7 МГц. У приемников телевизионного вещания промежуточная частота звукового сопровождения составляет 5,5 МГц (ФРГ), 6,5 МГц (Восточная Европа) или 4,5 МГц (США), промежуточная частота изображения - 38,9 МГц, их средняя частота 36,5 МГц. Приборы изображения (телевизионные приемники, терминалы вычислительных машин, осциллографы) создают помехи благодаря наличию в них генераторов развертки, используемых для построения изображения. Частота строк составляет 15,75 кГц у простых и примерно 35 кГц и даже 65 кГц у профессиональных мониторов. У

высокочастотных осциллографов частота генератора отклоняющего напряжения может достигать 1 МГц.

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

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

2.2.4. Влияние на сеть

Под влиянием на сеть понимают появление высших гармонических составляющих напряжения и его колебания в сетях электроснабжения за счет электрического оборудования с нелинейной или меняющейся по времени вольтамперной характеристикой. Так, трансформаторы и двигатели с высокой индуктивной нагрузкой, управляемые при помощи электронных регуляторов приводы, вентильные преобразователи тока для электролиза, газоразрядные лампы, телевизионные приемники даже при синусоидальном напряжении сети вызывают несинусоидальные токи, которые вдоль их пути к электрооборудованию создают на полных сопротивлениях сети несинусоидальные падения напряжения. Падения напряжения, создаваемые токами потребителей, ведут к искажению синусоидальной формы напряжения сети с частотой 50 Гц и к появлению гармоник. Субгармоники, вызванные дуговыми электропечами и электросварочными аппаратами, достигают миллигерцевого диапазона и ведут к периодическим и непериодическим колебаниям напряжения. Как высшие гармоники, так и колебания напряжения могут привести к повреждению технических сооружений, электрическим и термическим перегрузкам конденсаторов и двигателей, к ошибочному функционированию устройств измерения, управления и регулирования, а также систем обработки данных, управления, линий передачи данных, приемников кругового обзора, устройств связи. При колебаниях напряжения возникает также физиологическое воздействие на человека, когда колебания яркости осветительных устройств (мерцания или фликер) воспринимаемые глазом, вызывают нежелательные воздействия на мозг. В то время как вентильный преобразователь тока, как правило,

вызывает только гармоники кратные основной частоте, порядок которых для выпрямителя можно вычислить, например, согласно $k = np \pm 1$, где p - т.н. пульсность преобразователя, а n - числа натурального ряда ($n=1,2,3,\dots$) преобразователи частоты и переходные процессы вызывают помехи с любыми частотами. Наконец, к влиянию сети относят также асимметрию, вызванную включенными между фазами однофазными потребителями, например сварочными машинами или дуговыми электропечами.

2.2.5. Влияние линий электроснабжения

В густонаселенных областях воздушные линии электропередачи высокого напряжения с частотами 50 Гц и 16,66 Гц и линии связи телеуправления газопроводами и нефтепроводами часто располагаются параллельно друг другу на протяженных участках. Вследствие омической, индуктивной и емкостной связей возникают нежелательные влияния на линии связи и линии передачи данных, а также на устройства катодной защиты от коррозии трубопроводов. Кроме этого, недопустимо высокие напряжения прикосновения могут представлять угрозу для людей. Влияния сети разделяются на долговременные, кратковременные и импульсные. К источникам долговременного влияния относят рабочие токи при нормальной работе, токи заземления в сетях со скомпенсированной нейтралью, а также в проводах, находящихся под высоким напряжением и обладающих большой емкостью относительно земли. Источниками кратковременных влияний являются токи коротких замыканий и токи замыкания двух фаз на землю длительностью в несколько десятых секунды. Наконец, импульсные влияния возникают в результате перенапряжений при переключениях. Если раньше проблемы влияния решались исключительно мерами со стороны линии электропередачи, например путем симметричного расположения проводов трехфазной линии в виде равностороннего треугольника (суммарная напряженность поля примерно равна нулю), скручиванием несимметрично расположенных проводов, резонансным заземлением нейтрали (малые токи замыкания фаз на землю), то в 50-е годы было установлено заземление нейтрали сетей напряжением 220 кВ и появившихся в это время сетей 380 кВ. Влияние линий сильного тока является классической областью ЭМС.

2.3. Источники широкополосных импульсных помех

2.3.1. Исходный уровень помех в городах

Вследствие высокой плотности населения и движения транспорта в городах имеет место значительный исходный уровень широкополосных помех, который возникает от систем зажигания автомашин, городских транспортных магистралей, домдшных приборов, газоразрядных ламп, местных генераторов, приборов цифровой техники. Измеренные в прошлом в

разных городах исходные уровни помех имеют различный характер, который зависит от географического положения города и времени года. В национальных стандартах приведены уровни помех, различающиеся на 20—40 дБ в зависимости от вида транспорта (метро, трамвай на постоянном или переменном токе), а также от уровня общей плотности движения (включая воздушные сообщения).

Подробнее рассмотрим некоторые типичные источники широкополосных помех.

2.3.2. Автомобильные устройства зажигания

При прерывании первичного тока $i_1(t)$ в катушке зажигания возникает изменение тока $di_1(t)/dt$. Связанное с этим изменение магнитного потока $d\Phi_1(t)/dt$ индуцирует во вторичной обмотке катушки зажигания высокое напряжение $u_2(t)$ (рис.2.4).

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

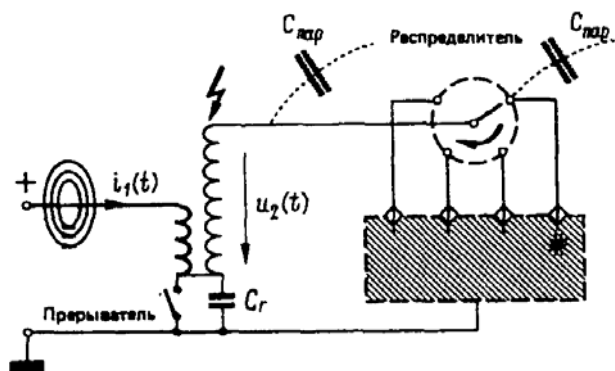


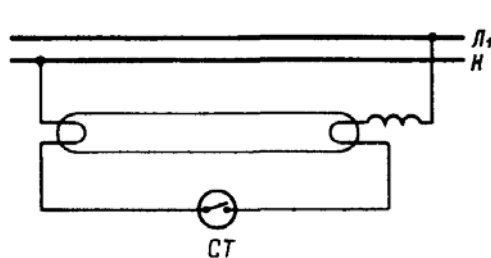
Рис. 2.4. Возбуждение импульса высокого напряжения в автомобильных устройствах зажигания: C_r - искрогасительный конденсатор для защиты контактов прерывателя; $C_{нар}$ - паразитные емкости.

При разрыве тока распределителем в цепях зажигания в результате разряда емкости вторичной обмотки вновь возникают быстрые изменения напряжения и тока, которые за счет индукции и взаимного влияния вызывают помехи. В зависимости от того, соединены ли соседние системы

петлей или звездой и являются ли они высокоомными или низкоомными, влияние имеет емкостный или индуктивный характер. Типичные плотности амплитуд помех по напряженности электрического поля вблизи городских улиц лежат между -20 и $+20$ дБ мкВ/м/кГц. Частоты помех достигают гигагерцового диапазона.

2.3.3. Газоразрядные лампы

Люминесцентные лампы низкого напряжения, встречающиеся в домашнем хозяйстве, офисах, универсамах, могут являться источниками



помех (рис. 2.5).

Рис. 2.5. Низковольтная люминесцентная лампа с катушкой индуктивности ограничения тока и стартером тлеющего разряда СТ

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

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

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

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

2.3.4. Коллекторные двигатели

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

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

2.3.5. Воздушные линии высокого напряжения

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

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

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

2.4. Источники широкополосных переходных помех

2.4.1. Разряды статического электричества

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

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

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

Накопленная энергия в зависимости от емкости заряженного тела, равной 50 - 1500 пФ (емкость человека — 150 пФ) может составлять несколько десятых долей джоуля. Само по себе существование разрядов статического электричества редко создает проблемы ЭМС, например при разрядке лимбов измерительных приборов, экранов телевизоров и т. д. Проблемы возникают при быстром импульсном разряде между заряженными

телами, во время которого появляются импульсы тока с временем нарастания в наносекундном или субнаносекундном диапазоне. Не быстрые изменения напряжений, а импульсные разрядные токи и связанные с ними изменяющиеся во времени магнитные поля ведут, как правило, к нежелательным электромагнитным влияниям.

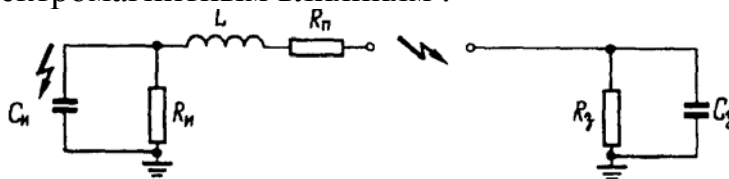


Рис 2.6. Схема замещения цепи разряда заряженного тела человека или заряженного проводящего предмета.

C_u , R_u - эквивалентные параметры замещения статически заряженного тела, R_n - последовательное сопротивление, C_3 , R_3 - емкость и сопротивление по отношению к земле объекта, через который происходит разряд или перезаряд

Во многих случаях феномен разрядов статического электричества можно с хорошим приближением смоделировать при помощи сравнительно простой схемы замещения (рис. 2.6). Сопротивление R_n в зависимости от источника помех имеет примерные значения: для человека 1 кОм, для малой мебели от 10 до 50 Ом. Если рассматривать разряд непосредственно у земли ($R_3 \rightarrow 0$, $C_3 \rightarrow \infty$) и принять индуктивность цепи разряда 1 мкГн/м, то в первом случае $R_n \gg \omega L$, т. е. разряд затухает аperiodически с постоянной времени $T = C_u R_n$. Во втором случае $R_n \ll \omega L$, т. е. имеет место колебательный разряд с частотой $f = 1/2\pi\sqrt{LC_u}$ (рис. 2.7).

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

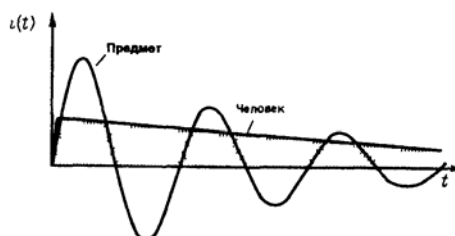


Рис. 2.7. Кривая изменения тока при разряде тела человека или проводящего предмета (например, малогабаритной мебели)

Параметры тока и наблюдаемое изменение его во времени колеблются в широких границах. При разряде с тела человека разряд различается в зависимости от того, исходит ли искра с кончика пальца, с большой площади тела или от инструмента (гаечный ключ), который находится в руке и т.д. Искра обладает сильно нелинейными свойствами. При слабом заряде, т.е. при потенциалах тела человека ниже примерно 8 кВ, а для проводящих предметов ниже примерно 3 кВ, искра при определенных обстоятельствах, вследствие недостаточного получения дополнительных зарядов из соседних с ней областей прерывается на короткое время и вновь зажигается, когда потенциал зоны разряда (например, кончик пальца) в результате дополнительного притока зарядов вновь поднимется. Формы кривых тока имеют в этом случае сложный вид, особенно фронт импульса. Для описания этих вариантов сосредоточенные компоненты простой схемы замещения согласно рис. 2.6 заменяются распределенными параметрами, и переходные процессы описываются теорией длинных электрических линий.

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

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

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

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

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

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

2.4.2. Коммутация тока в индуктивных цепях

Отключаемые катушки индуктивности представляют собой чаще всего встречающиеся источники переходных помех в промышленных установках или в аппаратуре управления. Примером являются бесчисленные релейные катушки и катушки контакторов в устройствах автоматического управления и исполнительных органов, (например, приводы электромагнитных клапанов), а также все обмотки электрических машин и трансформаторов. При отключении возникают высокие переходные перенапряжения, которые могут приводить к повторному включению коммутируемого участка, к пробое изоляции катушки, а также к электромагнитным влияниям на соседние компоненты и коммутируемые цепи. Механизм возникновения

помех всегда один и тот же, однако следует различать выключение и включение контуров тока с индуктивной нагрузкой. При отключении индуктивной цепи с током расходящиеся контакты вызывают изменение тока - di/dt . С этим связано изменение потока $-d\Phi/dt$, которое в результате самоиндукции индуктирует напряжение в цепи тока. Это напряжение в основном приложено к размыкающимся контактам и поддерживает коммутационную дугу. В цепях переменного тока дуга гаснет незадолго до прохождения тока через ноль и вновь не зажигается, если электрическая прочность контактного промежутка возрастает быстрее, чем напряжение между контактами. В цепях постоянного тока ток обрывается только тогда, когда контакты настолько удалены друг от друга, что необходимое напряжение горения дуги превышает фактически имеющееся напряжение.

Наибольшее влияние возникает в результате обрыва тока, когда распад дуги и быстрое нарастание напряжения на промежутке при разведенных контактах заставляет ток падать до нуля с большой крутизной di/dt . Возникающие в результате этого ЭДС самоиндукции достигают даже у контактов низкого напряжения нескольких киловольт. Использование этого явления имеет место в автомобильных устройствах зажигания с прерывателями, в классических искровых индукторах, а также в индуктивных накопителях энергии, используемых в мощной импульсной электроэнергетике.

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

Важно понимать, что создает помехи не искра как таковая, как иногда неверно интерпретируется, а ее исчезновение (обрыв тока) или ее возникновение (электрический пробой с гашением дуги или повторными зажиганиями). Чрезвычайно короткое время, необходимое для образования пробоя между контактами и для гашения дуги, объясняет высокие наблюдаемые крутые фронты изменения тока. У полупроводниковых выключателей в силовоточной электронике крутизна, как правило, меньше, однако появление высоких напряжений происходит качественно таким же образом. Уровень действующих напряжений устанавливается в зависимости от паразитной емкости катушки (рис.2.8).

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

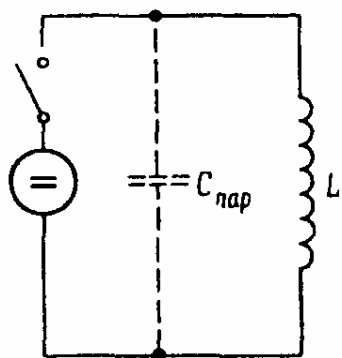


Рис. 2.8. К приближенному определению максимального значения напряжения самоиндукции с учетом емкости катушки индуктивности

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

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

Само собой разумеется, при этом речь идет только о приблизительной оценке, которая, однако, является достаточно надежной. На практике максимально достижимое перенапряжение отключения существенно зависит от гасящих свойств

выключателя (коммутационная среда, газ или вакуум, наличие нескольких последовательно включенных контактов и т. д.). Чем больше требуемое напряжение горения, тем раньше обрывается ток и тем больше скорость изменения тока di/dt . Перенапряжения в коммутируемых индуктивных цепях являются наиболее частыми причинами помех в электронных устройствах управления.

2.4.3. Переходные процессы в сетях низкого напряжения

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

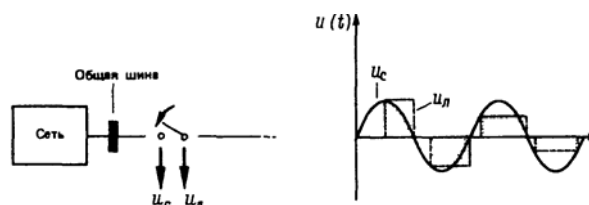
ство энергии в помехе колеблются в широких пределах. При заданном сопротивлении энергия рассчитывается как

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

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

2.4.4. Переходные процессы в сетях высокого напряжения

В распределительных устройствах при замыкании и размыкании разъединителей возникают многочисленные повторные зажигания, которые могут вызвать во вторичных устройствах перенапряжения до 20 кВ. Они могут приводить к ложному срабатыванию защиты сети или даже к повреждению вторичных устройств. На примере подключения короткого обесточенного участка линии к находящейся под напряжением сборной шине можно наглядно объяснить причину возникновения перенапряжений (рис. 2.9). Если напряжение пробоя сближающихся контактов становится меньше максимального значения переменного напряжения, происходит первый пробой, во время которого подключаемый участок линии приобретает потенциал шины. Если ток уменьшился до значений, которыми можно пренебречь, дуга обрывается. Так как изолированный участок линии сохраня-



ет свой потенциал, второй пробой происходит, если мгновенное значение переменного напряжения общей шины вновь отличается от значения потенциала отсоединенного участка линии на значение напряжения пробоя ставшего за это время меньшего промежутка между контактами. Этот процесс неоднократно повторяется до тех пор, пока контакты не будут касаться друг друга (рис. 2.9).

Рис. 2.9. Возникновение перенапряжения при включении короткой ненагруженной линии (идеальный случай)

Быстрые положительные и отрицательные изменения потенциала подключаемого участка линии вызывают токи смещения через паразитные емкости относительно соседних проводов $i = C_{\text{пар}} dU / dt$ максимальные значения которых из-за большой крутизны изменения напряжения могут принимать большие значения. Обусловленные током заряда линии и током смещения магнитные поля индуктируют в соседних контурах напряжения помех. Изображенная на рис. 2.9 форма напряжения действительна только для "электрически коротких" участков линии, время пробега волны по которыми мало по сравнению с временем развития пробоя (от нескольких десятков до сотен наносекунд в зависимости от расстояния между контактами). Даже в этом случае зарядка и перезарядка протекают не так гладко, как изображено на рис. 2.9, а подобно колебательному переходному процессу. Токи утечки могут вызвать снижения напряжения на линии (на рис. 2.9 это снижение не показано). Если время пробега волны в отключенной линии больше, чем время развития повторных зажиганий, то при каждом пробое возникают волны напряжения и тока, которые в конце линии отражаются и делают более сложным изменение напряжения, чем показанное на рис. 2.9. Распространяющиеся вдоль отключенного провода волны наводят в параллельно проходящих проводах напряжения и токи помех.

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

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

Для доказательства прочности изоляции электроэнергетического оборудования высокого напряжения при воздействии внутренних и внешних перенапряжений создаются грозовые и коммутационные испытательные импульсы с длительностью фронта порядка микро- и миллисекунд и с амплитудными значениями в несколько мегавольт. Импульсные напряжения амплитудной десятки мегавольт с временем нарастания несколько наносекунд и импульсными токами мегаамперного диапазона ис-

пользуются в электрофизических установках для исследований управляемых термоядерных реакций. Из-за высокого уровня помех (120 дБ и более) получение измерительных сигналов низкого напряжения при проведении испытаний изоляции и электрофизических экспериментов при помощи осциллографа и быстродействующего самопишущего прибора оказывается очень сложным. Однако такие измерения относятся к техническим будням исследовательских лабораторий высокого напряжения. Работа в условиях сильных помех привела уже очень давно к тонкому пониманию проблем ЭМС и поэтому именно инженеры и техники высоких напряжений повсеместно занимаются вопросами ЭМС, в частности электромагнитными импульсами ядерных взрывов, разрядами статического электричества, внутренней грозозащитой.

2.4.6. Электромагнитный импульс молнии

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

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

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

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

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

2.4.7. Электромагнитный импульс ядерного взрыва

Мгновенное освобождение ядерной энергии при ядерном взрыве сопровождается интенсивным импульсом излучения γ -квантов (высокоэнергетическое рентгеновское излучение с энергией порядка МэВ, которое распространяется по всем направлениям со скоростью света). При взрыве на большой высоте над поверхностью Земли (например, 400 км) эти кванты в слоях атмосферы вследствие эффекта Комптона освобождают электроны, большая часть которых сохраняет первоначальное направление движения γ -кванта и на своем дальнейшем пути к Земле за счет ударной ионизации образуют многочисленные вторичные электроны. Летящие к Земле электроны создают вместе с малоподвижными положительными ионами воздуха электрический диполь. За счет отклонения электронов в магнитном поле Земли создается магнитный диполь. Изменяющиеся во времени и в пространстве распределение заряда и тока обуславливает изменяющееся электромагнитное поле, называемое электромагнитным импульсом ядерного взрыва. Согласно доступной литературе, этот импульс имеет вид, близкий к двойной экспоненте (качественно аналогичный нормированному грозовому импульсу) с длительностью фронта примерно 5 нс и временем спада примерно 200 нс (рис. 2.11).

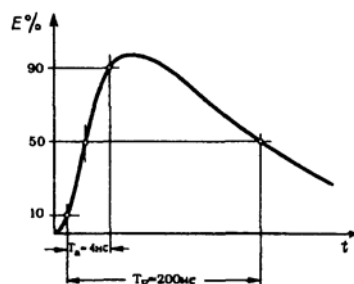


Рис. 2.11. Временная характеристика напряженности электрического поля ядерного электромагнитного импульса

Максимальное нормированное значение напряженности электрического поля равно 50 кВ/м. В дальнем поле максимальное значение напряженности внешнего магнитного поля рассчитывается по формуле $H_{max} = E_{max}/377$ и равно 133 А/м.

Аналогичные эффекты возникают при взрывах вблизи Земли, поэтому различают высотные и поверхностные электромагнитные импульсы. При взрыве у поверхности Земли доминируют термические и механические эффекты. Кроме того, имеется магнитодинамический электромагнитный

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

2.5. Классы окружающей среды

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

2.5.1. классификация окружающей среды по помехам, связанным с проводами

Класс 1 (очень низкий уровень помех):

- коммутационные перенапряжения в цепях управления подавлены соответствующими цепями;
- линии сильного тока и линии управления проложены отдельно от частей установок более высокого класса;
- линии электропитания на обоих концах снабжены заземленными экранами и сетевыми фильтрами;
- наличие люминесцентных ламп.

Пример: помещение для вычислительной техники.

Класс 2 (низкий уровень помех):

- коммутационные перенапряжения при отключениях реле частично ограничены, контакторы отсутствуют;
- линии сильного тока и линии управления проложены отдельно от частей установок более высокого класса;
- раздельная прокладка неэкранированных линий питания и линий управления, сигнальных линий;
- наличие люминесцентных ламп.

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

Класс 3 (уровень промышленных помех):

-релейные катушки не снабжены ограничительными цепями, нет контакторов;

-необязательное разделение линий сильного тока и линий управления от частей установок с более высоким уровнем помех;

-линии питания проложены отдельно от линий управления, сигнальных и телефонных линий;

-необязательное отделение линий управления, сигнальных и телефонных линий друг от друга;

-может использоваться общая система заземления.

Пример: щиты управления электростанций и промышленных объектов.

Класс 4 (высокий уровень промышленных помех):

- реле и контакторы, не снабженные ограничительными цепями;

-необязательное отделение проводов от частей установок с различным уровнем помех;

-совместная прокладка линий управления, сигнальных и телефонных линий; использование многожильных кабелей для линий управления и сигнальных линий.

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

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

2.5.2. Классификация окружающей среды по помехам, вызванным электромагнитным излучением

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

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

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

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

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

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

3. МЕХАНИЗМЫ ПОЯВЛЕНИЯ ПОМЕХ И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ИХ СНИЖЕНИЮ

3.1. Обзор

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

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

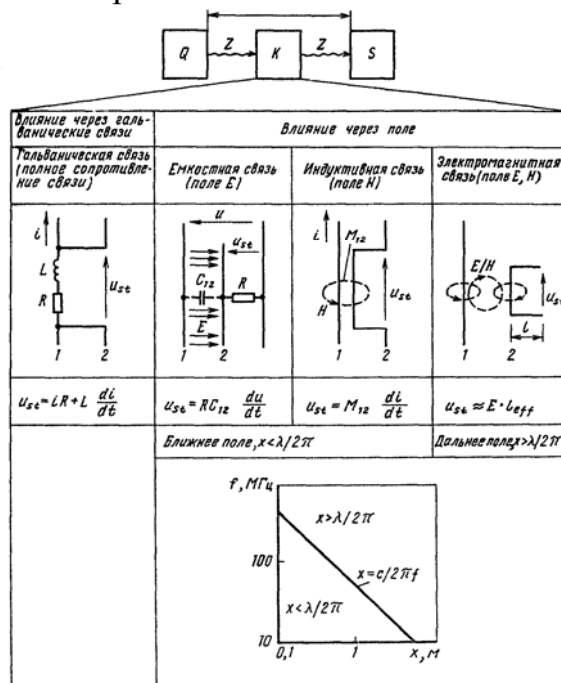


Рис. 3.1. Механизмы связи между контурами:

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

3.2. Гальваническое влияние

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

4. 2.1. Гальваническое влияние через цепи питания и сигнальные контуры

В качестве примера на рис. 4.2,а показана схема питания постоянным напряжением логических модулей $B_1 - B_n$, в которой изменение тока одного модуля (di/dt) генерирует напряжение помехи u_{st} из-за падения напряжения на R и L , накладывающегося на напряжение питания и, а на рис. 4.2, б - аналоговая схема, в которой при подключении нагрузки R_L возникает напряжение помехи на полном сопротивлении общего для двух сигнальных контуров участка системы опорного потенциала. Это напряжение накладывается непосредственно на входное напряжение операционного усилителя $OV1$ и тем самым искажает входной сигнал второго усилителя $OV2$.

Упрощенно в обоих случаях напряжение помехи

$$u_{st} = R\Delta i + L\Delta i / \Delta t .$$

(3.1.)

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

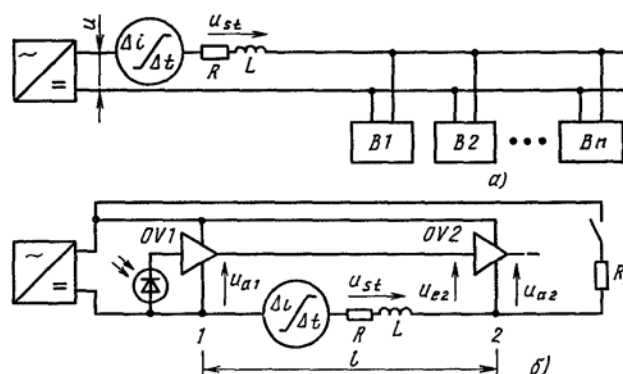


Рис. 3.2. Примеры гальванических связей в цепях электропитания (а) и сигнальных контурах (б)

для схемы на рис. 4.2, б напряжение между точками 1 и 2 при длине провода 10 см, погонной индуктивности 5 мкГн/м, сопротивлении 1 мОм, токе $\Delta i = 1$ А и времени $\Delta t = 1100$ нс напряжение помехи составит:

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

(3.2.)

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

$$R = l / \gamma F,$$

(3.3.)

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

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

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

$$u_{stL} = L \Delta i / \Delta t.$$

(3.4.)

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

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

(3.5.)

а линии с плоскими расположенными близко друг к другу проводниками прямоугольного сечения (рис. 4.5,6) (полагая $d \ll b$ и $d \ll a$, что часто приемлемо на практике) - по выражению

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

(3.6.)

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

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

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

гальваническая развязка, т.е. устранение совместных проводящих соединений между различными контурами, или же гальваническое разделение контуров таким образом, чтобы ток наиболее мощного контура или ток фильтра не протекал по слабому контуру. Это осуществляется отказом от общих обратных проводников в цепях передачи сигналов (рис. 3.8, а), от использования проводов заземления, корпусов приборов, машин и технологических устройств в качестве проводов сигнальных цепей. Систему опорного потенциала, если это требуется, необходимо присоединять лишь к точкам заземления или к корпусу прибора. Системы опорных потенциалов аналоговых модулей (В1-В4 на рис. 4.8, б) и системы питания компонентов

К1-К3 устройств автоматизации (рис. 3.8, е) следует соединять звездой. Целесообразно отдельно питать мощные электрические и аналоговые, дискретные функциональные элементы в целях устранения влияния внутреннего сопротивления питающей сети (рис. 3.8, з);

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

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

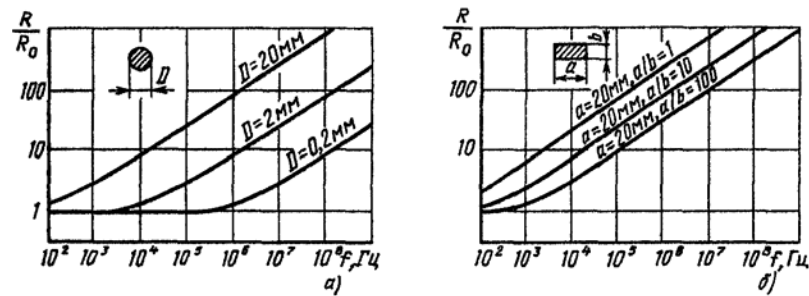


Рис. 3.3. Влияние проникновения тока на сопротивление проводов круглого (а) и прямоугольного (б) сечений.

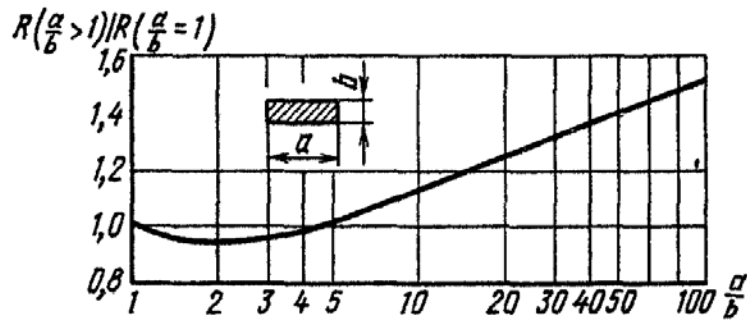


Рис. 3.4. Зависимость относительного сопротивления $\frac{R(a/b > 1)}{R(a/b = 1)}$ проводника прямоугольного сечения от отношения его сторон a/b при постоянстве сечения $a \times b$

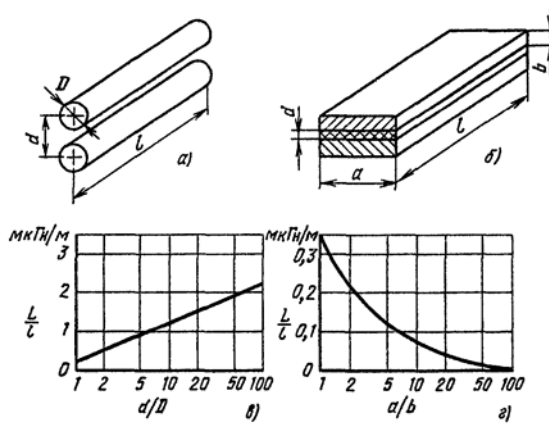


Рис. 3.5. Зависимости погонных индуктивностей (ν , ϵ) от соотношений размеров линий с проводами круглого (a) и прямоугольного (b) сечений

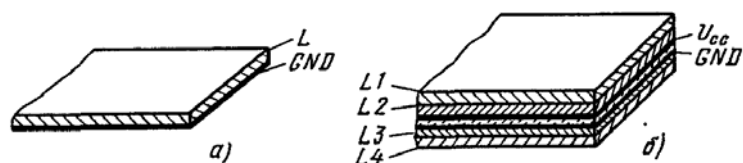


Рис. 3.6. Многослойные платы с плоскими шинами системы опорного потенциала GND (a) и шинами электропитания GND и U_{CC} (b):
 L - поверхности печатных плат

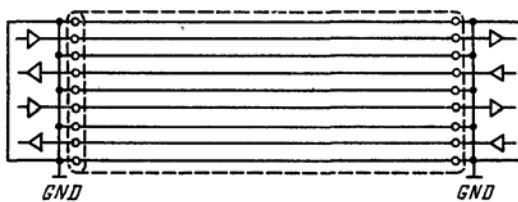
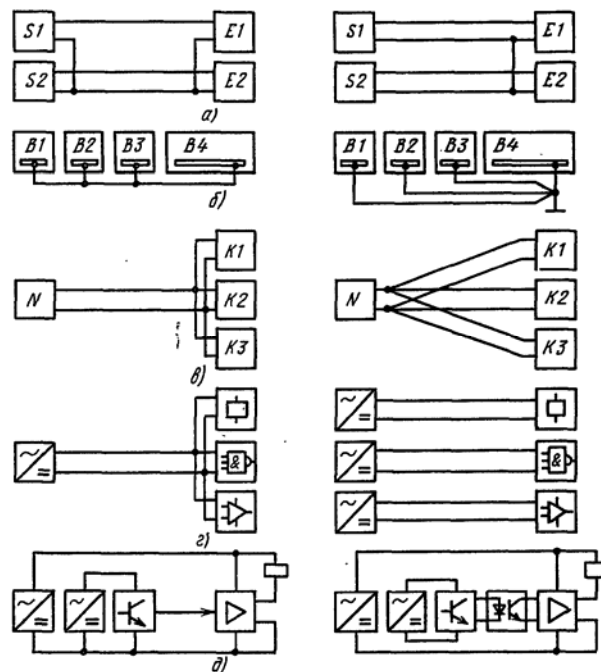


Рис. 3.7. Плоский кабель с распределенными по ширине проводами системы опорного потенциала GND



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

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

3.2.2. Гальваническое влияние по контурам заземления

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

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

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

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

Мероприятия по снижению влияния по цепям заземления заключаются в снижении разности потенциалов U_{12} за счет уменьшения сопротивления между точками 1 и 2 (рис. 3.9.). Это достигается, например, выполнением пола в виде проводящей эквипотенциальной поверхности F (рис. 3.10, а), соединением приборов массивными проводниками PA (рис. 3.10,б) или же экранированием сигнальных линий с заземлением экранов

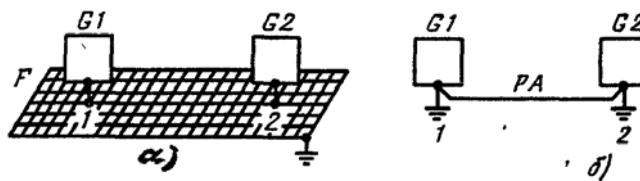
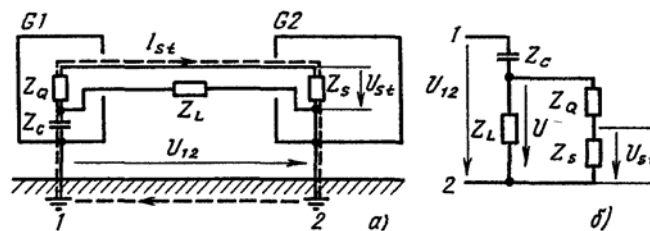


Рис. 3.10. Снижение гальванического влияния при помощи заземленной плоскости (а) или массивного проводника PA, соединяющего точки заземлений при-1ов G1 и G2 (б)



3.11. Гальваническое влияние через разомкнутую петлю заземлений:

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

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

$$U_{st} \approx U_{12} \frac{Z_S}{Z_S + Z_Q} \frac{Z_L}{Z_L + Z_C}$$

При $f = 0$; $Z_c = \infty$ и $U_{st} = 0$, а при $f \rightarrow \infty$; $Z_c \rightarrow 0$ и $U_{st} = U_{12} Z_S / (Z_S + Z_Q)$. Это означает, что эффективная защита возможна лишь

при постоянном напряжении и низких частотах. При высоких частотах петля заземления практически замкнута, ситуация может быть такой же, какая показана на рис. 3.9. Другие возможности снижения тока I_{st} приведены и прокомментированы в табл. 3.1.

3.3. Емкостное влияние

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

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

3.3.1. Гальванически разделенные контуры

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

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

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

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

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

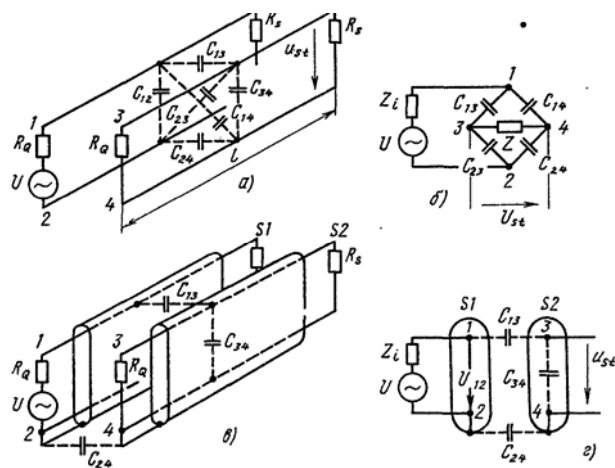


Рис. 3.12. Емкостное влияние между гальванически разделенными контурами: а - модель влияния; б - схема замещения; в - модель влияния при экранировании обоих контуров; г - схема замещения при наличии экранов

В ненагруженном состоянии для контура, испытывающего влияние (рис. 3.12, з) можно записать:

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

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

3.3.2. Контуры с общим проводом системы опорного потенциала

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

На рис. 3.13, б приведена соответствующая схема замещения. Принимая $R_s \gg R_0$, записываем напряжение помехи в операторной форме:

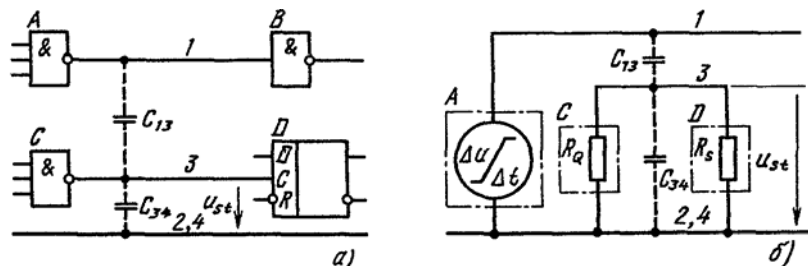


Рис. 4.13. Емкостное влияние контуров с общим проводом системы опорного потенциала 2, 4:

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

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

Решение этого уравнения имеет вид

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

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

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

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

Емкость связи C_{13} , входящая в уравнения (3.11) - (3.13), определяется

геометрическими размерами и топологией проводников. В простейшем случае проводники диаметром *D* и длиной *l*, расположенные параллельно друг другу на расстоянии *d* (рис. 3.15), имеют емкость связи

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

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

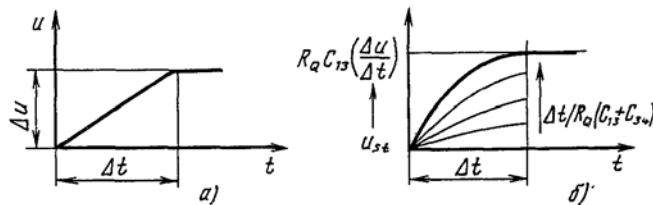


Рис. 3.14. Выходной сигнал элемента *A* на рис. 3.13, *a* (*a*) и сигнал помехи u_{st} в интервале времени $0 \leq t \leq \Delta t$ (*б*)

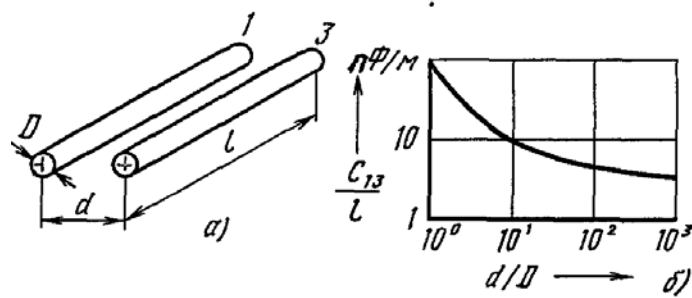


Рис. 3.15. Параллельно проложенные цилиндрические проводки (а) и зависимость погонной индуктивности C_{13}/l от отношения d/D (б)

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

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

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

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

- выполнение предельно низкоомными токовых контуров, подверженных влиянию;

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

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

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

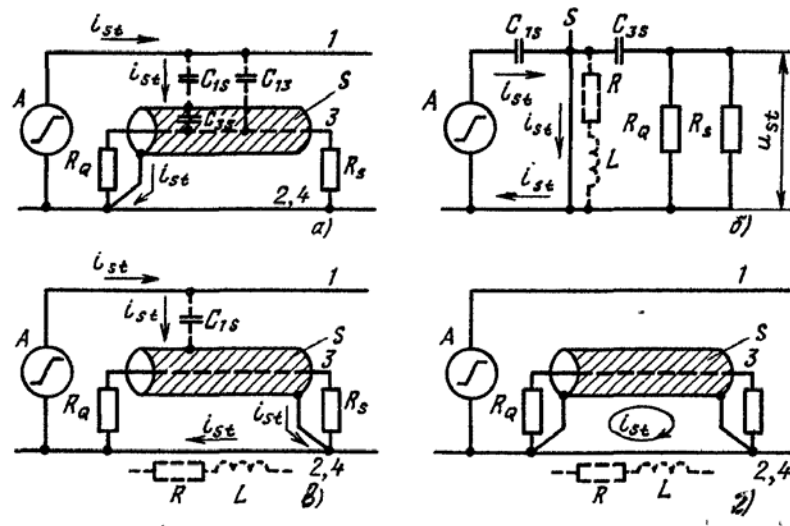


Рис. 3.16. Экранирование линии:

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

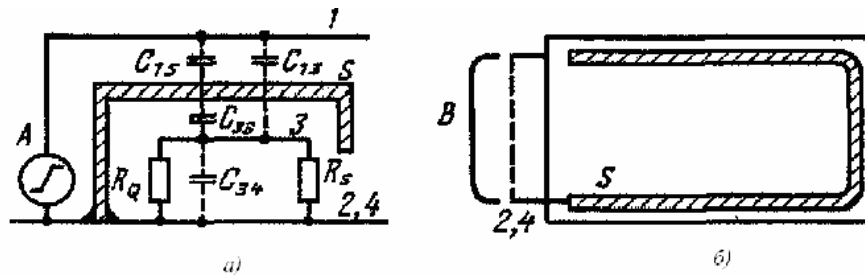


Рис. 3.17. Экранирующие дорожки на печатных платах:

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

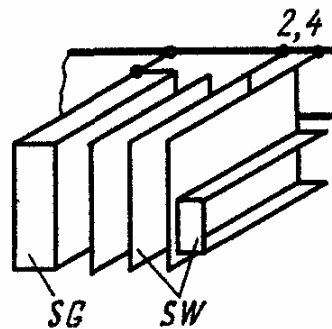


Рис. 3.18. Экранирование функциональных блоков печатных плат перегородками *SW* или функциональных модулей коробками *SG*:

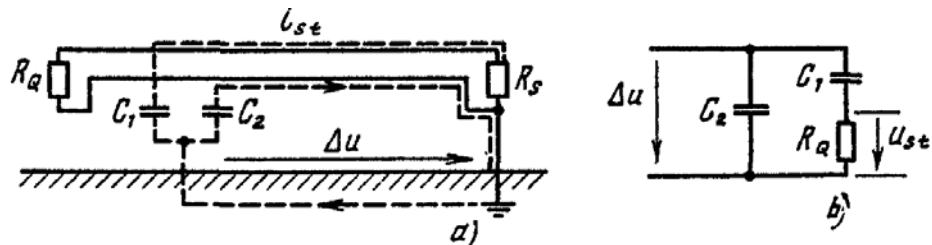
2, 4 —пластина опорного потенциала

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

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

3.3.3. Токовые контуры с большой емкостью относительно земли

В длинных заземленных с одной стороны сигнальных линиях при



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

Рис. 3.19. Односторонне заземленная линия с большими емкостями на землю C_1 и C_2 (а) и ее схема замещения при $R_s \gg R_0$ (б)

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

$$U_{st} = \Delta U / \sqrt{1 + 1/(2\pi f C_1 R_0)^2} \quad (3.15)$$

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

Средства борьбы с помехами сводятся к:

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

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

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

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

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

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

Хорошие результаты снижения напряжения помехи могут дать:

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

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

- применение для передачи сигналов световодов (рис. 4.20, и). Этот способ практически устраняет влияние емкости C_{st} .

3.3.4. Емкостное влияние молнии

Если молния ударяет непосредственно в землю или находясь вблизи проводящие предметы (молниеприемники, осветительные мачты, металлические фасады и т.п.), то канал молнии В (рис. 4.21) кратковременно приобретает

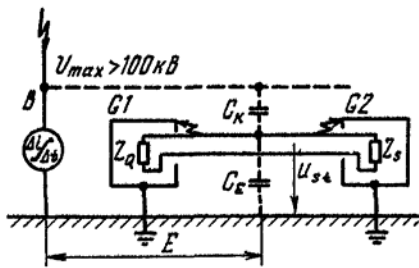
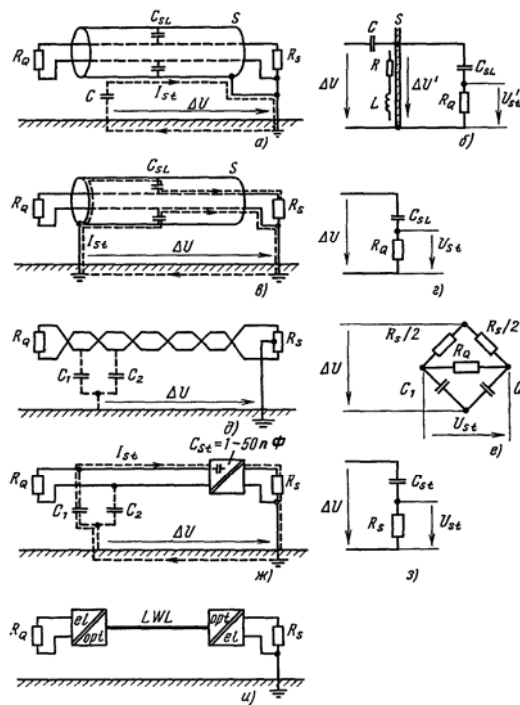


Рис. 4.21. Емкостное влияние молнии на линию:
B — канал разряда молнии; *G1*, *G2* -приборы; *Ck*,
Cs—емкости связи относительно земли



3.20. Способы защиты контуров с большими емкостями относительно земли

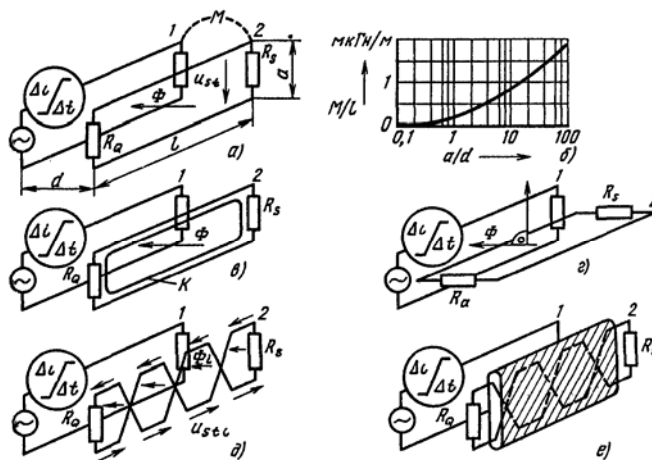


Рис. 3.22. Индуктивное влияние между промышленными токовыми контурами: а - принципиальная схема двух токовых контуров I и 2 с расстоянием d ними; б - погонная взаимная индуктивность M/l в зависимости от a/d ; в-е меры по снижению влияния (пояснения см. в тексте)

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

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

Если нет устройств, защищающих от перенапряжений, то входная изоляция приборов G_1 и G_2 будет повреждена, а в лучшем случае (слабая интенсивность молнии, большое расстояние до места удара, дающее малое значение C_K) возникает интенсивная помеха. Эффективная защита может быть обеспечена экранированием сигнальной линии

3.4. Индуктивное влияние

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Где l и a - длина и ширина контура соответственно.

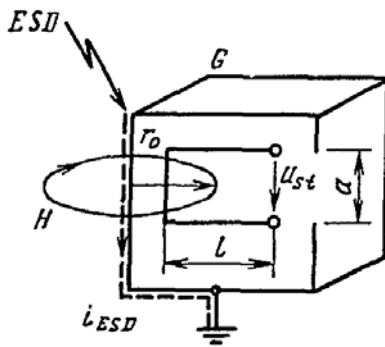


Рис. 3.23. Индуктивное влияние разряда статического электричества ESD на петлю l , а внутри прибора G

При выводе (4.20) использованы элементарные соотношения:
 $u_{st} = a l \Delta B / \Delta t$, $B = \mu_0 H$, и $H = i / 2\pi r_0$

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

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

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

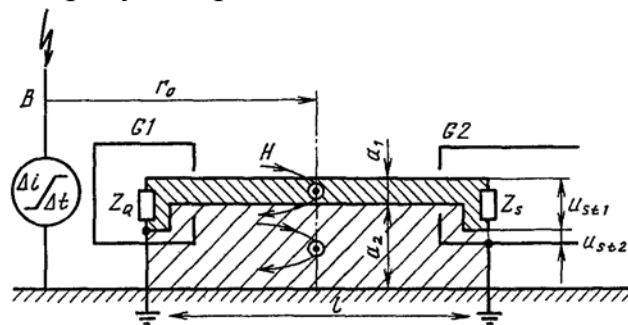


Рис. 3.24. Индуктивное влияние тока молнии на электрические контуры в устройстве автоматизации:

B - канал молнии; G_1, G_2 - приборы устройства

Рисунок 3.25 дает представление о петле в здании G , образованной сетью питания и линией передачи данных. При $r_0 = 11$ м, $a = 15$ м, $l = 10$ м и $\Delta i / \Delta t = 200$ кА/мкс индуцированное в петле напряжение согласно (3.20) достигает 540 кВ. При отсутствии средств защиты включенные в обе сети компьютеры, несомненно, будут выведены из строя.

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

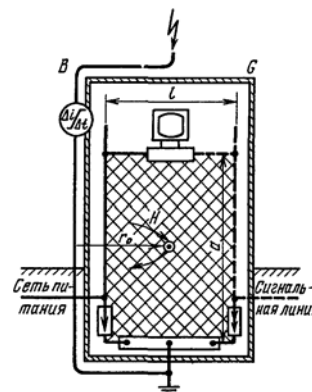
- снижение до возможных пределов взаимной индуктивности L_{12} , т.е. уменьшение l за счет сокращения длины проводников, увеличение расстояния между сетевыми и информационными проводами, уменьшение площади контура, подвергающегося воздействию;

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

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

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

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



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

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

3.5. Воздействие электромагнитного излучения

Причиной воздействия излучения являются электромагнитные волны, излучаемые токовым контуром и распространяющиеся в окружающем

пространстве со скоростью света $c = 300000$ км/с (см. рис. 3.26, а). Между длиной волны λ и частотой f существует известная связь:

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

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

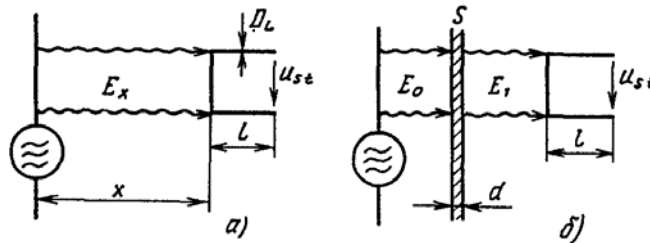


Рис. 3.26. Электромагнитное влияние на контур длиной l без экрана (а) и с экраном S толщиной d (б)

мощностью P может быть определена из соотношения

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

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

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

l_{eff} - эффективная длина антенны.

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

Защитой от электромагнитного поля, как для ослабления излучения, так и для уменьшения проникновения, служат экранирующие стенки, устанавливаемые между источником и приемником (рис. 3.26, б). Такой стенкой напряженность падающего поля уменьшается от значения E_0 до значения E_1 . Это обусловлено, с одной стороны, поглощением энергии поля в материале экрана, а с другой - отражением падающей волны. Затухание зависит от толщины экрана, электропроводности и магнитной проницаемости материала, частоты излучения.

4. ПАССИВНЫЕ ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ И ЗАЩИТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

4.1. Обзор

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

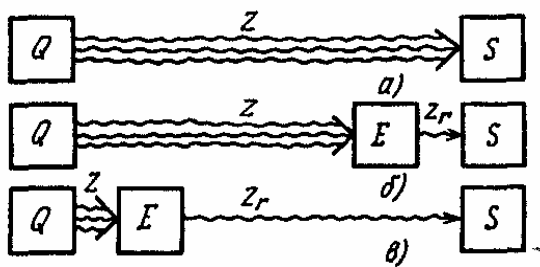


Рис. 4.1. Взаимные расположения источника помех Q , приемника S и защитного компонента E :

a - защита отсутствует; b - защита приемника; v — подавление помехи x у источника

4.2. Фильтры

4.2.1. Принцип действия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

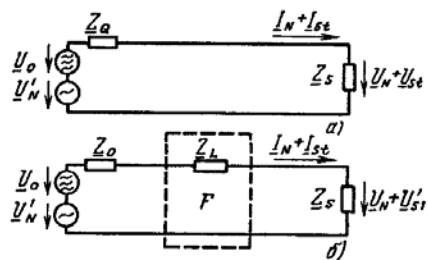


Рис. 4.2. Цепь без фильтра (а) и с фильтром (б)

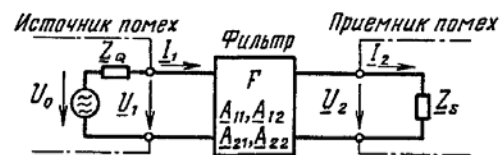


Рис. 4.3. Токовый контур с фильтром

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

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

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

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

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

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

Далее (рис. 4.3) можно записать:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_1 + \dot{Z}_0 \dot{I}_1; \tag{4.7}$$

$$\dot{U}_2 = \dot{Z}_s \dot{I}_2. \tag{4.8}$$

Напряжение на входе приемника без фильтра определяется как

$$\dot{U}_{20} = \dot{U}_0 \frac{\dot{Z}_s}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_s}. \tag{4.9}$$

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

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

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

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

Параметры четырехполюсников простейших схем фильтров

Таблица 4.1.

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

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

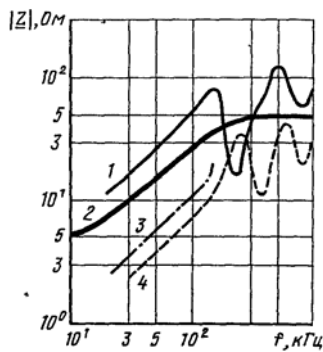


Рис. 4.4. Кажущееся сопротивление электроэнергетических сетей:

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

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

Паспортные данные о коэффициенте затухания $a_e(f)$ можно использовать лишь при конкретных обстоятельствах, а именно в качестве показателя качества при изготовлении фильтра или как характеристику при сравнении фильтров одинаковой конструкции, поставляемых различными изготовителями, также при анализе фильтрового действия в сопоставимых схемах.

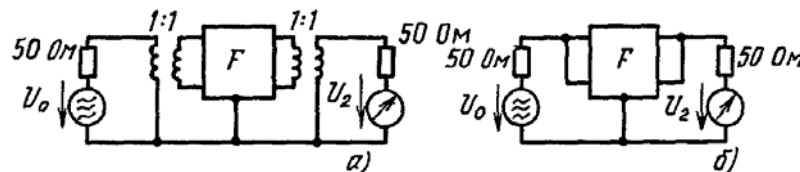


Рис. 4.5. Схемы для измерений симметричного (а) и асимметричного коэффициентов затуханий (б) a_e фильтров:

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

Рекомендации по выбору структуры фильтра

Таблица 4.2

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

Во всех остальных случаях фактическая эффективность фильтра определяется лишь экспериментально в соответствии с (4.10) или же расчетным путем согласно (4.11), если точно известно соотношение полных сопротивлений \dot{Z}_O и \dot{Z}_S .

Если значения \dot{Z}_O и \dot{Z}_S известны приблизительно, выбор подходящей фильтровой структуры может производиться с использованием данных табл. 4.2.

5.2.2. Фильтровые элементы

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

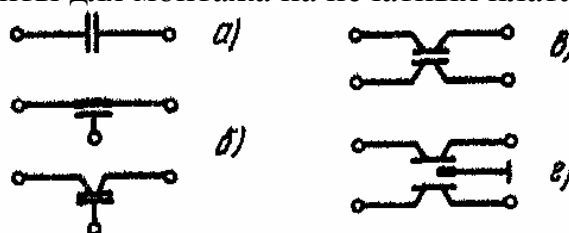


Рис. 4.6. Примеры выполнения помехозащитных конденсаторов:

а - конденсатор с двумя выводами; б - конденсатор-ввод с тремя выводами; в - конденсатор-четыреполюсник; г - многоэлементный конденсатор

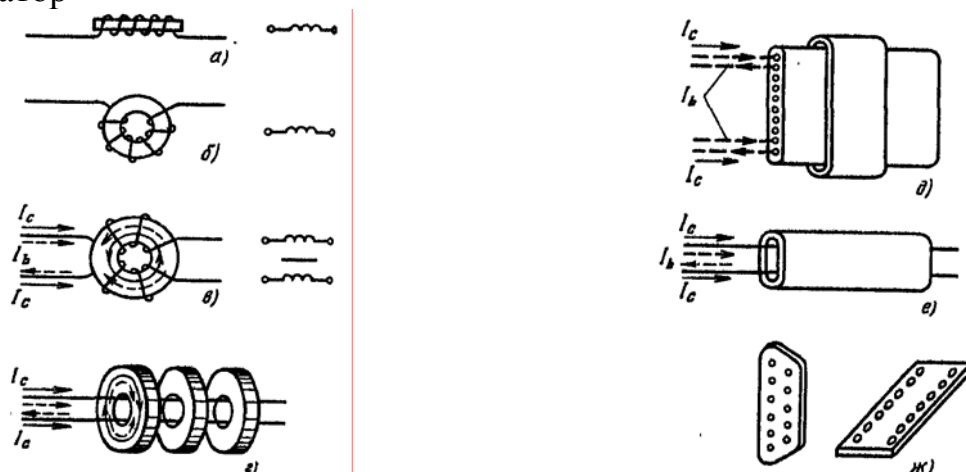


Рис. 4.7. Примеры выполнения помехозащитных катушек с рабочим током I_b , и синфазным током помехи I_c :

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

Двухполюсные конденсаторы (рис. 4.6, а) в зависимости от соединения их в токовую цепь (между прямым и обратным проводами или же между проводом и землей) пригодны для защиты как от синфазных, так и от противофазных помех (рис. 4.8, б). Конденсаторы-вводы (рис. 4.6, б) при соединении с корпусом служат для защиты только от синфазных помех (рис. 5.8, б). Конденсаторы-четыреполюсники (рис. 5.6, в) защищают от противофазных помех (рис. 5.8, в), а многосекционные конденсаторы (рис. 5.6, г) - как от противофазных, так и синфазных помех (рис. 5.8, г).

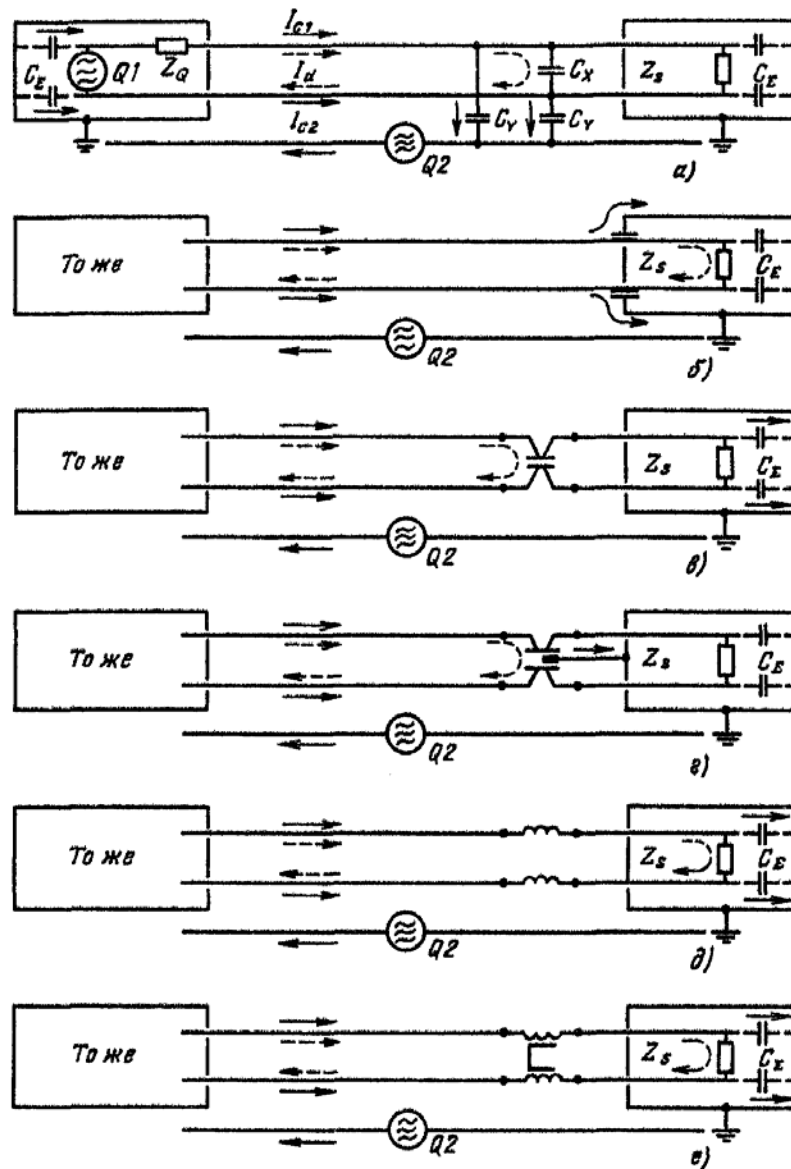


Рис. 5.8. Защита катушками индуктивности и конденсаторами от синфазных противофазных токов помех (пояснения см. в тексте):

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

Защитные катушки индуктивности представляют собой катушки с возможно малыми емкостью и активным сопротивлением обмотки. Они имеют замкнутые или разомкнутые сердечники (стержни, кольца из ферромагнитного материала - трансформаторной стали, металлооксидной керамики, прессованного порошка из карбонильного железа). Катушки индуктивности со стержневым или простым кольцевым сердечником (рис. 4.7, а, б) демпфируют как синфазные, так и противофазные сигналы (рис. 5.8, д).

Так как в катушках индуктивности с сердечниками магнитная цепь не замкнута, то их магнитная проницаемость и индуктивность практически не

зависят от рабочего тока. Впрочем, при больших токах габаритные размеры таких катушек индуктивности велики. Меньшие размеры имеют катушки индуктивности со скомпенсированным магнитным полем или током (рис. 4.7, в), в которых магнитное поле, создаваемое рабочим током I_b , компенсируется благодаря встречному включению обмоток. Такие катушки индуктивности демпфируют лишь синфазные токи I_c (рис. 5.8, е). Это же относится к ферритовым кольцам (рис. 4.7, з), одеваемым на провода или на плоские жгуты (рис. 5.7, д), к линиям с усиленным затуханием (рис. 5.7, е), имеющим, в частности, при частотах $f > 1$ МГц хорошие показатели затухания, к ферритовым пластинам со многими отверстиями (рис. 5.7, ж), применяемым в разъемах и внутренних соединениях.

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

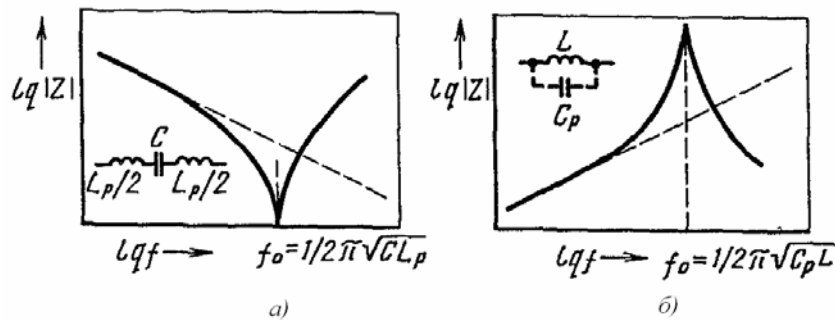
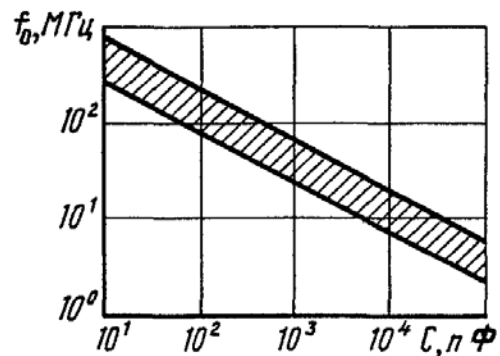


Рис. 4.9. Частотные зависимости кажущихся сопротивлений конденсатора (а) и катушки индуктивности (б)

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



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

Для конденсаторов (рис. 4.9, а) кажущееся сопротивление

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

Идеальная характеристика при отсутствии L_p рассчитывается как

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

Реальная характеристика с учетом L_p :

$$(4.14) \quad \text{реальная характеристика с учетом } C,$$

где $f_0 = 1/2\pi\sqrt{CL_p}$.

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

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

идеальная характеристика при отсутствии C_p

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

реальная характеристика с учетом C_p

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

Здесь $f_0 = 1/2\pi\sqrt{C_p L}$.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Отсюда можно сделать два вывода:

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

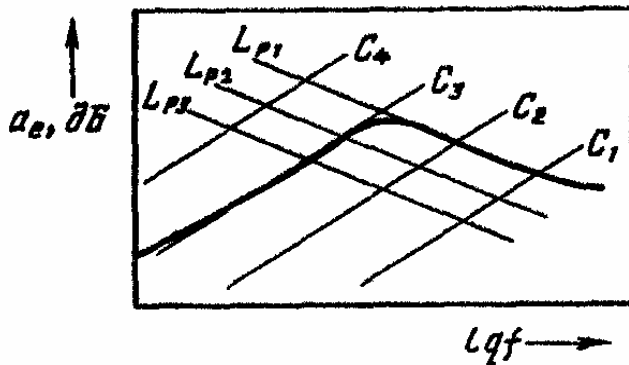


Рис. 4.11. Коэффициент затухания a_e фильтра, состоящего из реальных конденсаторов, в зависимости от частоты f :

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

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

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

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

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

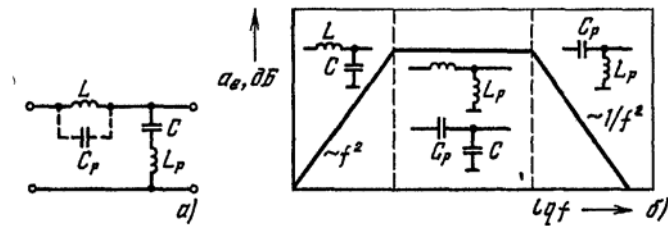
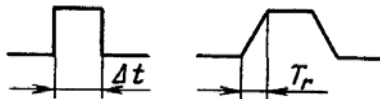


Рис. 4.12. Коэффициент затухания a_e фильтра LC :

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

Рис. 4.13. Формы импульсов



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

4.2.3. Сетевые фильтры

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

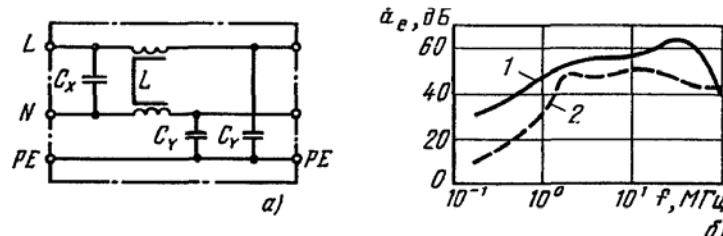
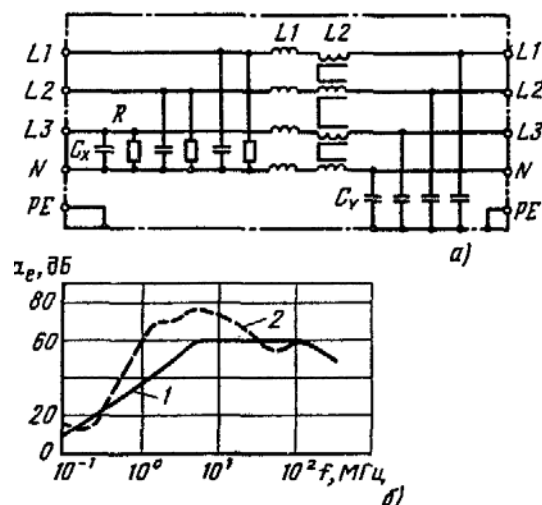


Рис. 4.14. Пример сетевого фильтра на 250 В, 1А:

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

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

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



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

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

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

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

4.3. Ограничители перенапряжений

4.3.1. Принцип действия

Ограничители перенапряжений - специальные элементы, защитные схемы и приборы - служат для снижения перенапряжений в электроэнергетических и информационно-электронных системах, вызванных молнией, разрядами статического электричества коммутационными процессами или другими причинами. Для обеспечения электромагнитной

совместимости они выполняют защитные функции с целью предотвратить, в первую очередь, выход из строя электрических и электронных средств и вызванные этим нарушения нормального функционирования системы.

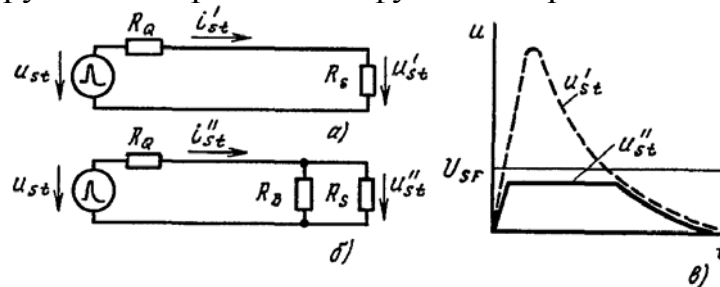


Рис. 4.20. Ограничение перенапряжений при помощи нелинейного сопротивления R_B :

a - схема без защиты; *б* - схема с защитой; *в* - изменение напряжений во времени; U_{SF} — импульсная прочность входной цепи

Принцип действия ограничителей базируется на использовании резисторов R_B , обладающих нелинейной вольт-амперной характеристикой (рис. 4.20). В конкретных случаях она выбирается такой, чтобы в допустимых пределах изменения рабочего напряжения имело место очень большое сопротивление, а при превышении заданного напряжения - очень малое. Вместе с сопротивлением источника помехи ограничитель образует схему нелинейного делителя напряжения (рис. 4.20, б), который и снижает переходное перенапряжение до допустимого значения

$$U_{st}'' = U_{st} - i_{st}'' R_Q, \quad (4.22)$$

не превышающего импульсную электрическую прочность защищаемого элемента (рис. 4.20, в).

4.3.2. Защитные элементы

Для ограничения перенапряжений используются защитные разрядные промежутки, варисторы и лавинные диоды. Соответственно физические принципы действия этих устройств различны. Поэтому такие характеристики защитных элементов, как напряжение и время срабатывания, уровень ограничения, степень точности ограничения напряжения, допустимая токовая нагрузка, остаточное сопротивление, гасящие свойства и другие, сильно различаются.

Разрядники конструктивно изготавливаются в виде воздушных, газонаполненных устройств или элементов со скользящим разрядом. На практике они выполняют функции грубой защиты. Газонаполненный разрядник представляет собой два электрода с фиксированным расстоянием между ними, помещенными в герметичный керамический или стеклянный корпус, заполненный инертным газом. Защищаемую систему такой разрядник нагружает слабо, так как сопротивление изоляции между

электродами составляет более 10^{10} Ом, а емкость - менее 10 пФ. Если воздействующее напряжение превышает напряжение пробоя U_Z , то происходит разряд между электродами, при этом сопротивление разрядника понижается приблизительно на 10 порядков. Напряжение на разряднике понижается до значения U_G , обусловленного тлеющим разрядом, или же, если это допускает соотношение сопротивлений цепи, до значения дугового напряжения U_B (рис. 4.21).

Напряжение пробоя U_Z газонаполненного разрядника зависит от изменения воздействующего напряжения du/dt (рис. 4.22). При $du/dt = 100$ В/с определяется статическое U_{Zs} , а при $du/dt = 1$ кВ/мкс - динамическое напряжение U_{Zd} пробоя разрядника (600-700 В). Типичное изменение напряжения на разряднике во времени приведено на рис. 4.23. При очень коротких импульсах напряжения (менее 30 нс) газонаполненный разрядник не срабатывает.

Газонаполненные разрядники надежно пропускают стандартные токи (8/20 мкс) амплитудой до нескольких десятков килоампер, однако они способны самостоятельно гасить токи, не превышающие 1 А. Поэтому их применение в цепях электроснабжения требует последовательного включения защитного устройства, способного отключить возможный сопровождающий ток.

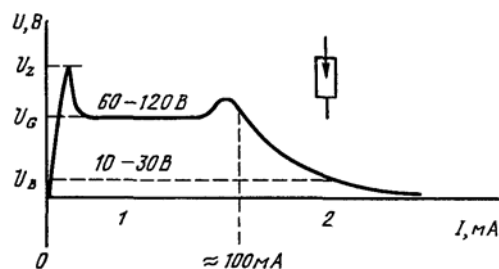


Рис. 4.21. Вольт-амперная характеристика газонаполненного разрядника с ориентировочными значениями напряжений тлеющего (U_G) и дугового (U_B) разрядов: U_Z - напряжение зажигания (см. рис. 4.22);

1 - область начальных и тлеющих разрядов; 2 - область дуговых разрядов

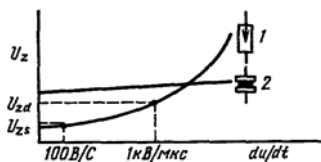


Рис. 4.22. Характеристики зажигания газонаполненного разрядника (1) и разрядника со скользящим разрядом (2):

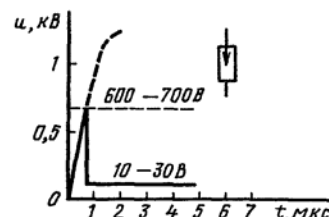


Рис. 4.23. Типичная характеристика зажигания газонаполненного разрядника

U_{Zs} — статическое напряжение срабатывания; U_{Zd} — динамическое напряжение срабатывания

Воздушные защитные промежутки образуются электродами, находящимися в окружающем воздухе. Их разрядные и рабочие характеристики близки к характеристикам газонаполненных разрядников. Так как они не способны обрывать сопровождающие токи, то их применение в качестве ограничительных элементов в цепях электроснабжения возможно лишь в комбинации с предохранителями или варисторами, выполняющими функции дугогашения.

Находят также применение и закрытые воздушные (так называемые разделительные) промежутки в местах сближения грозозащитных устройств с другими заземленными частями устройства или металлическими конструкциями, которые по условиям коррозионной стойкости не должны быть гальванически долго соединены друг с другом. При грозовых воздействиях защитные промежутки устанавливаются там, где должны происходить пробой, тем самым устраняются неконтролируемые перекрытия и гарантируется выравнивание потенциалов в течение грозового разряда частей устройства, отделенных друг от друга в нормальном режиме.

Разрядники со *скользящим разрядом* содержат между электродами изоляционный материал. Вольт-секундные характеристики таких разрядников более пологие, чем газонаполненных (рис. 4.22). Поэтому независимо от крутизны импульс перенапряжения ограничивается до значения 2-3 кВ. Такие разрядники способны самостоятельно обрывать сопровождающие токи, и поэтому они более подходят для грубой защиты в цепях электропитания.

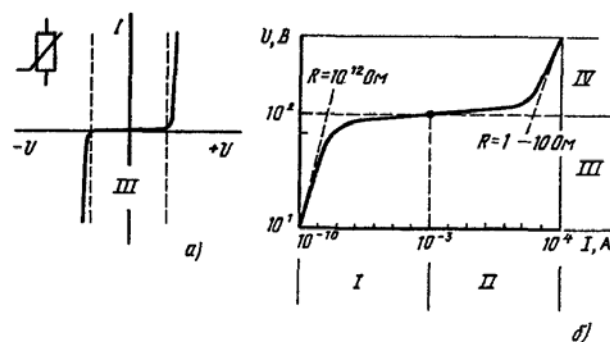


Рис. 4.24. Типичные вольт-амперные характеристики варисторов в линейных (а) и логарифмических (б) координатах:

I - область токов утечек; *II* - область импульсных токов; *III* - диапазон рабочих напряжений; *IV* - область перенапряжений

Вариаторы (Variable Resistors) представляют собой элементы с симметричной вольт-амперной характеристикой (рис. 4.24). При $I > 0$ она выражается в виде

$$I = KU^\alpha, \quad (5.23)$$

где K - постоянная, зависящая от размеров резистора; α - показатель, зависящий от материала.

Для применяемых в настоящее время металлооксидных варисторов на базе оксида цинка значение α находится в пределах от 25 до 40.

Эффект ограничения напряжения основан на том, что при превышении рабочего напряжения, рассчитанного по (4.23), сопротивление

$$R = 1 / KU^{\alpha-1} \quad (5.24)$$

уменьшается на много порядков (рис. 4.24, б).

Защитный уровень варисторов в зависимости от их исполнения может лежать как в диапазоне низких, так и высоких напряжений, причем они способны поглотить значительную энергию. Их время срабатывания сравнительно мало и составляет десятки наносекунд. Оно определяется индуктивностью токопроводов. Собственная емкость варисторов велика (0,4-40 нФ), и поэтому их применение для ограничения перенапряжений в высокочастотных системах исключено. Конструктивно варисторы выполняются в виде шайб, блоков, также втулок для разъемных соединений. На практике варисторы используют преимущественно для грубой защиты.

При часто повторяющихся перенапряжениях варистор нагревается и сопровождающий ток возрастает. Этот эффект можно использовать для контроля функциональных способностей варистора.

Кремниевые лавинные диоды обладают свойством не повреждаться при воздействии напряжения, превышающего граничные, при котором они находятся в закрытом состоянии. Их разновидность - так называемые Z -диоды (стабилитроны) (напряжением U_Z - 3 ÷ 200 В (рис. 4.25) давно используются в электронных схемах для стабилизации напряжения и защиты от перенапряжений. Разработаны и специальные лавинные диоды, предназначенные для ограничения переходных перенапряжений, отличающиеся от обычных Z -диодов более высокой пропускной способностью по току, малым временем запаздывания (пикосекунды), большой поглощаемой энергией. Такие диоды выпускаются под названием ограничителей перенапряжений, супрессдиодов (ограничительных стабилитронов) транзильдиодов или ТА Z -диодов (ТА Z - от Transient Absorbing Zener).

На рис. 4.26 приведена характеристика ограничительной стабилитрона. Она аналогична характеристике Z -диода. Напряжение U_R - максимальное напряжение, при котором диод еще закрыт; U_B - напряжение начала ограничения, при котором ток $I = 1$ мА; U_C - напряжение ограничения для импульса тока I_{pp} (8/20 мкс).

Достижимые уровни ограничения напряжения лежат в диапазоне 6-440 В. Защитные стабилитроны выпускаются также в виде биполярных элементов (рис. 4.27). Для них $U_R = \pm 6$ В; $U_B = \pm 6,5$ В; $U_C = \pm 12$ В при токе $I_{pp} = 40$ А (8/20 мкс).

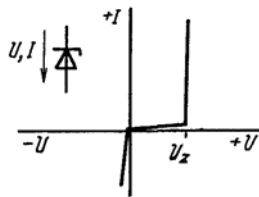


Рис. 4.25. Вольт-амперная характеристика 2-диоода с напряжением $U_g = 3 + 200$ В

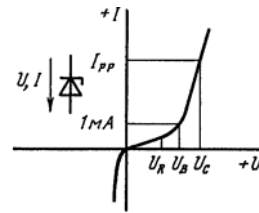


Рис. 4.26. Вольт-амперная характеристика стабилитрона и его важнейшие параметры

4.4. Экранирование

4.4.1. Принцип действия экранов

Экранирование служит для ослабления электрических, магнитных и электромагнитных полей, а именно для того, чтобы исключить проникновение и воздействие таких полей на элементы, блоки, приборы, кабели, помещения и здания, а также для того, чтобы подавить исходящие из электрических и электронных промышленных средств и устройств помехи, обусловленные полями. Экран устанавливается между источником и приемником помех и снижает напряженности E_0 , H_0 воздействующего поля до значений E_1 , H_1 за экраном (рис. 4.34). Физически экранирование объясняется наведением на поверхности экрана заряда или индуктированием в нем тока, поле которых накладывается на воздействующее, ослабляя его. Тем самым как бы удаляется чувствительный приемник помехи от источника.

На эффективность экранирования оказывают существенное влияние частота поля, электропроводность и магнитная проницаемость материала экрана, конфигурация и размеры экрана.

Для уточнения этих общих положений будем исходить из того, что экранирование осуществляется частично поглощением энергии поля материалом экрана (коэффициент затухания a_{SA} обусловленный поглощением), а частично - отражением падающей волны (коэффициент затухания a_{SR} , обусловленный отражением).

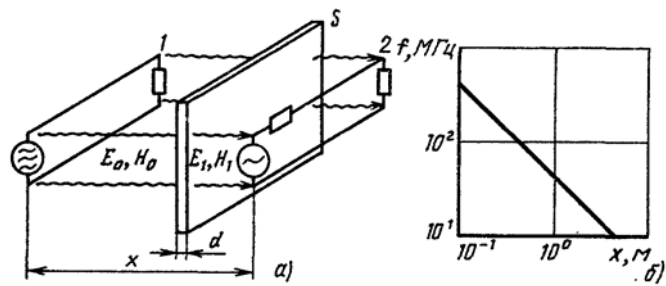


Рис. 4.34. Экранирование токовых контуров от внешних электрических и магнитных полей:

a - принципиальное расположение контуров 1, 2 и экрана *S*; *б* - граница между условиями ближнего (нижняя левая часть) и дальнего (верхняя правая часть) полей

Результирующий коэффициент затухания, дБ, можно определить как

$$a_S = 20 \lg(E_0 / E_1) \quad (4.25)$$

Или же

$$a_S = 20 \lg(H_0 / H_1) \quad (4.26)$$

Т.е. a_S состоит из двух компонентов:

$$a_S = a_{SA} + a_{SR}. \quad (4.27)$$

При этом не учитываются многократные отражения от стенок экрана и помещения.

Для установления существенных взаимосвязей между этими коэффициентами затухания и характеристиками магнитного поля, а также размерами экрана и свойствами его материала удобно воспользоваться понятием полных сопротивлений по аналогии с распространением волн в электрически длинной двухпроводной линии.

В зависимости от расстояния x приемника помехи от источника (рис. 4.34, *a*) и частоты f в ближней или дальней областях (рис. 4.34, *б*) для определения коэффициентов затухания a_{SA} и a_{SR} , дБ, пригодны следующие выражения:

для магнитного поля в ближней зоне ($x < c/2\pi f$) коэффициент отражения

$$a_{SR} = [15 - 10 \lg(\mu_r / \sigma_r) + 20 \lg(x / x_0)] + 10 \lg(f / f_0); \quad (4.28)$$

для электрического поля в этой зоне ($x < c / 2 \pi f$)

$$a_{SR} = [202 - 10 \lg(\mu_r / \sigma_r) - 20 \lg(x / x_0)] - 30 \lg(f / f_0); \quad (4.29)$$

для электрического поля в дальней' зоне ($x > c / 2 \pi f$),

$$a_{SR} = [168 - 10 \lg(\mu_r / \sigma_r) - 20 \lg(x / x_0)] - 10 \lg(f / f_0), \quad (4.30)$$

а коэффициент поглощения как для ближней, так и дальней зон

$$a_{SA} = [(0,1314 d / d_0) \sqrt{\mu_r \sigma_r}] \sqrt{f / f_0}, \quad (4.31)$$

где μ_r , σ_r - относительная магнитная проницаемость материала, его электропроводность, отнесенная к электропроводности меди ($\sigma_{Cu} = 5,8 \cdot 10^7$ См/м); $f_0 = 1$ Гц - базовая частота; d - толщина экрана, отнесенная к $d_0 = 1$ мм; $x_0 = 1$ м.

Кроме того, выражения, заключенные в квадратные скобки формул (4.28)-(4.31), характеризуют влияние свойств материала экрана и его толщины на коэффициент затухания, и при $f = 1$ Гц ординаты функций (4.28)-(4.31) представляют собой значения a_{SR} и a_{SA} .

Зависимость результирующего коэффициента a_S от частоты при наличии магнитного поля для ближней зоны представлена на рис. 4.35. Эта зависимость получается суммированием a_{SR} и a_{SA} в соответствии с (4.27).

Зависимости a_{SA} , a_{SR} и a_S от частоты для дальнейшей зоны в соответствии с (4.30) и (4.31) и для ближней зоны в соответствии с (4.30) и (4.31) представлены на рис. 4.36.

Следует подчеркнуть, что спад коэффициента a_{SR} согласно (5.29) для ближней зоны происходит не на 10, как в остальных случаях, а на 30 дБ при увеличении частоты на порядок.

Эффективность экранирующих устройств ориентировочно может быть оценена следующим образом. Если a_S не выше 10 дБ, то экранирование, как правило, недостаточно. При $10 < a_S < 30$ дБ удовлетворяются минимальные требования по экранированию.

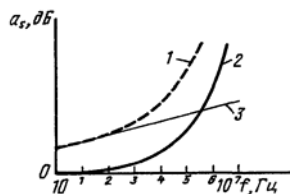


Рис. 4.35. Принципиальные зависимости коэффициентов: $a_S = a_{SA} + a_{SR}$ (1), a_{SA} (2) и a_{SR} (3) от частоты f для магнитного поля в ближней зоне

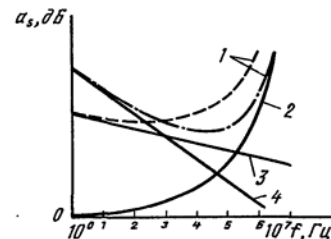


Рис. 4.36. Принципиальные зависимости коэффициентов затухания от частоты для электромагнитного поля в дальней зоне и для электрического в ближней зоне:

$$1 - a_S = a_{SA} + a_{SR}; 2 - a_{SA}; 3 - a_{SR}$$

для электромагнитного поля в дальней зоне (4.30); 4 - a_{SR} для электрического поля в ближней зоне (4.29)

Для многих случаев достаточно, если $30 < a_S < 60$ дБ. Если $60 < a_S < 90$ дБ, то имеет место хорошее экранирование, а при $90 < a_S < 120$ дБ можно говорить о предельно хорошем экранировании.

Принципиально следует иметь в виду, что эффективность экранирования зависит от наличия дефектов и отверстий в стенке экрана (трещин, дверных, вентиляционных и оконных проемов, кабельных вводов и отверстий для элементов обслуживания и сигнализации), а также то, что внутри экранированных объемов могут возникать резонансные эффекты, так как любой корпус прибора с проводящими стенками можно рассматривать как объемный резонатор.

4.2. Материалы для изготовления экранов

Для экранирования используют как немагнитные металлы, чаще всего медь, так и ферромагнитные материалы. Экранирующее действие известных немагнитных материалов ($\mu_r = 1$, $\sigma_r = 0,6 \div 1$) происходит из-за магнитных полей, созданных вихревыми токами. При этом постоянное магнитное поле совсем не экранируется, а низкочастотное переменное ослабляется незначительно. Это видно также из (4.28) и рис. 4.35. Напротив, электрические поля такими экранами демпфируются очень хорошо [см. (4.29), (4.30) и рис. 4.36].

Экраны из ферромагнитных материалов ($\mu_r \gg 1$, $\sigma_r < 1$) ослабляют электрические поля в области низких частот хуже, чем экраны из немагнитных, однако, в отличие от последних, они оказывают определенное ослабление постоянных магнитных полей. С повышением частоты демпфирующее действие в отношении электрических и магнитных полей возрастает, что следует из (4.31) и рис. 4.35 и 4.36.

Имеются различные экранирующие материалы и устройства, поставляемые в различных формах, в зависимости от решаемых задач. Это:

- прикрепляемые болтами пластины и привариваемые тонкие стальные и медные листы для изготовления экранированных корпусов и для покрытия стен помещений;

- тонкая легкоразрезаемая и деформируемая фольга из мягкомагнитных сплавов с высокой магнитной проницаемостью для изготовления образцов и серийных приборов;

- металлические ленты и оплетки для кабелей;

- металлические плетеные шланги для дополнительного экранирования кабелей и кабельных жгутов;

- металлические сотовые структуры для воздухопроницаемых экранирующих элементов (например, для экранированных кабин);

- металлические сетки, проводящая прозрачная фольга и стекла с напыленным металлом для окон при комплексном высокочастотном экранировании;

- наносимые на пластмассовые корпуса распылением серебряные, никелевые или медные покрытия;

-пластмассовые комбинированные материалы с проводящими добавками (металлическим порошком, нитями, например, из углерода и т.п.) для изготовления экранированных корпусов;

-тканые материалы со вплетенными нитями из нержавеющей стали для высокочастотной экранирующей одежды (коэффициент затухания достигает 30 дБ в области частот от 100 кГц до 40 ГГц).

Здания, массивные строительные сооружения без особых мер защиты ослабляют внешние поля на 6-10 дБ, железобетонные со сваренной стальной арматурой - до 25-30 дБ.

Для обеспечения экранирующих свойств корпусов, кабин и помещений часто неизбежные вводы, щели, стыки стен, дверные проемы и другие элементы, прозрачные для высокочастотного излучения, уплотняются. Соответствующие уплотнения должны гарантировать непрерывность вихревых токов, индуцированных полем. Поэтому они должны быть изготовлены из хорошо проводящих и механически формируемых материалов, достаточно устойчивых к функционально обусловленным воздействиям и окружающим условиям, обладать по возможности малым контактным сопротивлением с соприкасающимися металлическими конструктивными элементами.

Находят применение и другие уплотняющие материалы и изделия :

-эластомеры с добавками, обеспечивающими достаточную электропроводность, на основе силанового каучука в виде пластин, кольцевых шнуров, трубок. В качестве наполнителей используют углерод, никелевые или серебряные частицы, посеребренный медный, никелевый или стеклянный порошок, посеребренную алюминиевую пудру; полностью металлические плетеные изделия в форме чулка, круглых или прямоугольных прокладок, двойных прокладок с эластомерным сердечником или без него для уплотнения, например, прикрепляемых болтами крышек, стенок корпуса;

-проволочные оплетки, пропитанные эластомером, например, уплотнений электрических соединений;

-пластины из силиконового каучука, содержащие перпендикулярно расположенные к поверхности металлические нити;

-пружинящие устройства из бериллиевой бронзы для уплотнения дверей;

-проводящие технологические добавки для улучшения переработки пластмассы и клея.

4.2.1. Экранирование приборов и помещений

Металлические корпуса электронных устройств обеспечивает определенную защиту от проникновения из окружающего пространства в него электромагнитных помех. Однако неизбежные разрезы, швы, отверстия

для кабелей и вентиляции сильно снижают их экранирующее воздействие. В корпусах, удовлетворяющих требованиям электромагнитной совместимости, этот недостаток должен быть устранен. Соответствующие конструкции обеспечивают сплошное гальваническое соединение всех стенок прибора, с применением подходящих уплотнений, например проволочных плетеных прокладок. Приборные шкафы имеют непрерывные коррозионно-стойкие контактные поверхности, с которыми по всему периметру дверей соприкасаются пружинные контакты из бериллиевой бронзы, причем специальная система обеспечивает одинаковую силу прижатия пружин по всему периметру двери. Отвод тепла из шкафов осуществляется через отверстия или через жалюзи в стенках. Электрические соединения с внешними устройствами осуществляются исключительно при помощи разъемов. Иным образом внутрь шкафа нельзя вводить кабели. При этом коэффициент затухания достигает 40-100 дБ в диапазоне частот от 30 МГц до 1 ГГц.

Эффективное экранирование электронных приборов с пластмассовыми корпусами (компьютеров, радиопереговорных устройств, измерительных приборов, мониторов и др.) достигается применением металлических нитей в связующем материале или металлизацией поверхности корпуса.

Обеспечение электромагнитной совместимости, создание условий измерений и испытаний приборов без помех, как и аспекты обеспечения надежности данных, требуют во многих случаях электромагнитного экранирования помещений. Примерами этого являются:

- испытательные помещения и лаборатории для средств связи, измерений, автоматизации и техники высоких напряжений;

- измерительные помещения для научных исследований и службы метрологии;

- медицинские диагностические и терапевтические кабинеты в больницах;

- вычислительные центры на промышленных предприятиях, в банках и многих других гражданских и военных организациях.

В последнем случае речь идет не только о защите вычислительной техники от помех, но и о том, чтобы ограничить распространение компрометирующего электромагнитного излучения и тем самым исключить возможность подслушивания секретной информации.

Современные экранирующие устройства помещений выполняются по модульному принципу. При этом техническая задача состоит в том, чтобы для всего защищаемого помещения создать однородную проводящую отражающую электромагнитное излучение оболочку. Важнейшими элементами для реализации этого являются:

- экранирующие модули для стен и потолков (стальные листы, стальная и медная фольга для болтового или сварного соединения);

- двери, ворота и тамбуры с высокочастотным уплотнением;

-внутренние и внешние окна помещений с демпфирующими высокочастотными свойствами ;

-сотовые каминные элементы для каналов кондиционирования воздуха;

-полые вводы для световодов;

-электрические фильтры для системы электрообеспечения, линий передачи данных, коммуникаций и управления, предотвращающие как поступление, так и выход помех, обусловленных гальванической связью.

При тщательном выполнении экранирования помещений коэффициент затухания достигает 80-100 дБ в диапазоне гигагерц.

По условиям обеспечения безопасности (защиты от напряжения прикосновения) корпуса приборов и экраны помещений заземляются в определенных точках.

4.2.2. Экраны кабелей

Кабельные экраны предназначены для снижения влияния напряжений помех на кабели и излучений помех кабелями и проводами, а также для того, чтобы обеспечить развязку помехосодержащих и чувствительных к помехам проводов при их прокладке в общих кабельных тросах, каналах или жгутах, если это необходимо по каким-либо внешним условиям.

Как показано в разд. 3, в неэкранированных линиях, сетевых проводах, линиях передачи данных, коммуникационных и измерительных линиях, проводах регулирования и управления из-за электрического поля E может создаваться поперечное (противофазное) напряжение U_q , а под воздействием магнитного поля - продольное (синфазное) напряжение U_l (рис. 4.39, а).

Кабельные экраны из хорошо проводящих материалов (медные или алюминиевые оплетки) позволяют ослабить эти напряжения, однако при этом существенную роль играет заземление экрана. Если экран заземлен только с одной стороны, то снижается поперечное напряжение, вызванное полем E , вследствие байпасного действия экрана ($U'_q < U_q$). На первый взгляд, все равно, заземлен ли экран слева или справа (рис. 4.39, б). При двустороннем заземлении экрана (рис. 4.39, в) возникает замкнутый контур, в котором при изменении магнитного поля H во времени индуцируется ток I . Продольное напряжение при этом уменьшается ($\dot{U}'_l = \dot{Z}_k I < \dot{U}_l$, где \dot{Z}_k - комплексное полное сопротивление связи экранированного кабеля).

Если затухание в одном экране недостаточно, используют два экрана, наложенные друг на друга и изолированные один от другого. При этом вновь возникает вопрос, как заземлить внутренний экран? При двустороннем заземлении (рис. 4.39, г) продольное напряжение,

$$\dot{U}_l = I \frac{\dot{Z}_{Ka} \dot{Z}_{Ki}}{\dot{Z}_{Ka} + \dot{Z}_{Ki} + j\omega L}, \quad (4.32)$$

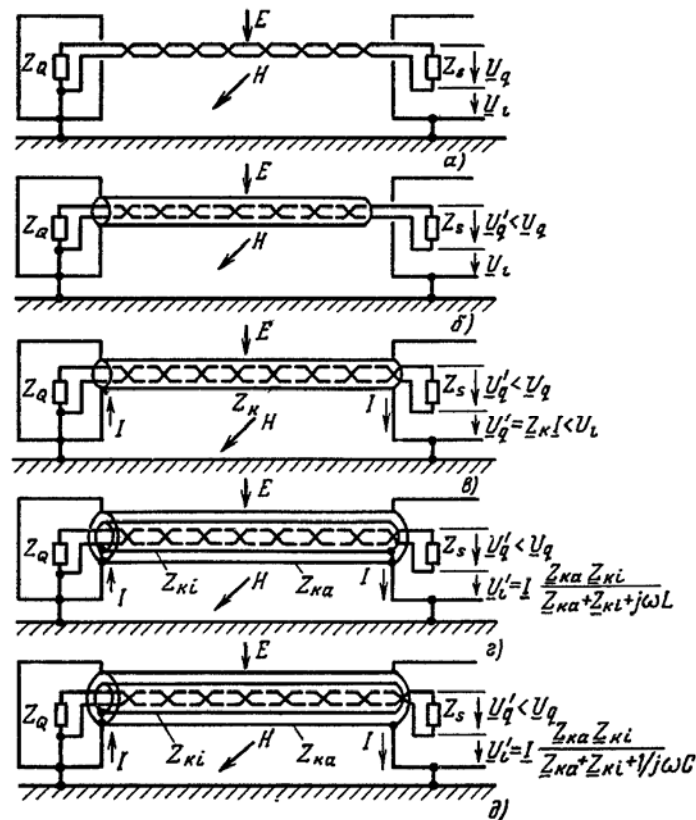


Рис. 4.39. Воздействие экранов кабелей:

a - незранированный кабель; *б* - одностороннее заземление экрана; *в* - двустороннее заземление экрана; *г* - кабель с двойным экраном и двусторонним заземлением внутреннего экрана; *д* - кабель с двойным экраном и односторонним заземлением внутреннего экрана

а при одностороннем заземлении (рис. 4.39, *д*)

$$\dot{U}_l = \dot{I} \frac{\dot{Z}_{Ka} \dot{Z}_{Ki}}{\dot{Z}_{Ka} + \dot{Z}_{Ki} + 1/j\omega L} \quad (4.33)$$

В этих уравнениях L представляет собой индуктивность соединения, а C - емкость между экранами, Z_{Ka} и Z_{Ki} - комплексные полные сопротивления внутреннего и внешнего экранов соответственно.

Сравнение (4.32) и (4.33) позволяет сделать следующие выводы. Двусторонне заземленный внутренний экран при низких частотах не оказывает сильного экранирующего действия, так как практически параллельно соединены лишь Z_{Ka} и Z_{Ki} . Напротив, при высоких частотах ($|j\omega L| \gg |Z_{Ka} + Z_{Ki}|$) имеет место значительно лучшее экранирование, чем при одном экране. При одностороннем заземлении внутреннего экрана картина обратная.

Для того чтобы полностью использовать возможности кабельных экранов, необходимо соблюдать следующие правила:

-обычные экраны и внешние оболочки двойных экранов должны иметь на обоих концах хорошие контакты с корпусами приборов;

-внутренний экран в зависимости от частоты поля помехи следует заземлять с одной стороны или с обеих сторон;

-внешний экран нельзя вводить внутрь прибора или там заземлять, так как при этом могут частично утрачиваться экранирующие свойства корпуса

Отметим, что экранирование кабелей служит и для того, чтобы снизить влияние разности потенциалов между точками заземления корпусов приборов, связанных кабелями. Отсюда вытекают дальнейшие требования по экранированию и прокладке, например силовых кабелей.

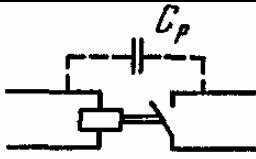
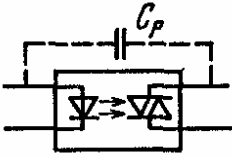
4.5. Разделительные элементы

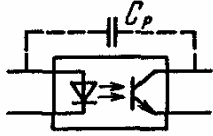
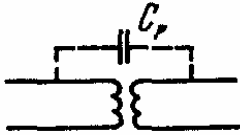
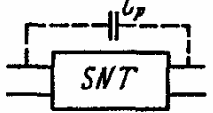
Электронные средства автоматизации, такие, как программное управление, промышленные компьютеры и процессорные системы, содержащие подводящие провода с обширной информацией и отводящие с сигналами управления, подвергаются опасности нарушения функционирования из-за синфазных напряжений помех, возникающих при кабельном соединении элементов. Эффективное средство устранения такой опасности состоит в гальванической развязке внешних и внутренних токовых контуров. Для этого используют разделительные элементы, параметры и обозначения которых приведены в табл. 4.5. При их помощи можно реализовать разности потенциалов в несколько киловольт. Однако эффективность разделения определяется паразитной емкостью C_p элемента.

Рационально выполняя схему, необходимо позаботиться о том, чтобы емкость C_p не возросла до недопустимого значения, например, из-за параллельной прокладки входных и выходных проводников.

Таблица 4.5.

Раз делительные элементы для гальванической развязки

Разделительный элемент	Обозначение на схеме	Емкость связи C_p , пФ	Время задержки, мс
Электромеханическое реле		До 5	0,5-20
Оптическая связь		До 1	10^{-4} -0,5

Твердотельное реле		5-10	8-10
Разделительный трансформатор		10-100	-
Разделительные схемы		До 1000	-

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ НА ОБЪЕКТАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

5.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Методика определения ЭМО предусматривает проведение измерений и расчетов, необходимых для получения данных о максимально возможных уровнях электромагнитных воздействий (электромагнитные поля, наведенные токи и напряжения, кондуктивные электромагнитные помехи, разряды статического электричества и др.) на устройства релейной защиты и технологического управления электроэнергетических объектов при нормальных и аварийных режимах.

При определении ЭМО на действующем энергообъекте необходимо применять сочетание экспериментальных методов (натурные эксперименты и имитация электромагнитных возмущений) и численный анализ.

Для получения достоверных результатов при численном анализе необходимо использовать результаты экспериментов, так как невозможно точно математически смоделировать реальный объект и ошибки могут быть существенные.

С помощью натурных экспериментов на действующем объекте нельзя воспроизвести все возможные режимы, например, короткие замыкания на шинах высокого напряжения или удары молнии. К тому же проведение натурных экспериментов, нарушающих нормальную работу энергообъекта, например, коммутации силовым оборудованием или измерения в цепях устройств релейной защиты, ограничиваются по условиям работы энергообъекта отдельными разовыми экспериментами, как правило, не самыми опасными с точки зрения уровней электромагнитных помех в системах релейной защиты и технологического управления.

Имитация электромагнитных возмущений позволяет существенно расширить возможности по определению уровней электромагнитных помех экспериментальным путем. Однако существуют определенные ограничения и по проведению имитационных испытаний на действующем объекте.

В результате работы должны быть определены максимальные значения воздействий на системы релейной защиты и технологического управления при любом нормальном и аварийном режиме. Требование эксплуатации: системы релейной защиты и технологического управления должны работать правильно при любом нормальном и аварийном режимах. Без численного анализа может быть упущен аварийный режим, при котором помехи будут максимальными и одновременно реальными.

Экспериментальная часть работы в основном проводится на действующем объекте. Методика экспериментов и технические средства (например, имитаторы воздействий и измерительные приборы) должны быть

такими, чтобы не мешать нормальной работе объекта и не повреждать имеющиеся на объекте устройства.

5.2. Основные этапы проведения работ по определению электромагнитной обстановки

Работы по определению ЭМО на энергообъекте включает в себя следующие этапы:

- получение исходных данных об энергообъекте для проведения работ;
- экспериментально-расчетное определение ЭМО на объекте;
- определение соответствия между уровнями помехоустойчивости устройств и ЭМО на объекте.

5.2.1. Исходные данные и состав работ по определению ЭМО на объекте

На действующих объектах исходные данные, необходимые для расчетно-экспериментального определения ЭМО, могут быть получены непосредственно на объекте, а также при анализе проектных решений и техдокументации на устройства релейной защиты и системы технологического управления.

Для того, чтобы определить уровни электромагнитных воздействий на системы релейной защиты и технологического управления при коммутациях, работе разрядников и при коротких замыканиях на шинах высокого напряжения, необходимо знать:

- электрическую схему и взаимное расположение первичных цепей; трассы прокладки кабелей и их марку;
- тип и расположение силового оборудования;
- фирму-изготовитель, назначение и место расположения устройств релейной защиты и системы технологического управления.

Необходимо иметь данные по заземляющему устройству объекта:

- исполнительную схему;
- удельное сопротивление грунта и импульсное сопротивление заземления оборудования, к которому подходят кабели от устройств релейной защиты и системы технологического управления.

Как правило, эти данные могут быть получены лишь экспериментальным путем. Методика диагностики заземляющих устройств энергообъектов представляет самостоятельную задачу. На рис.5.1 показан фрагмент исполнительной схемы заземляющего устройства ОРУ 110 кВ.

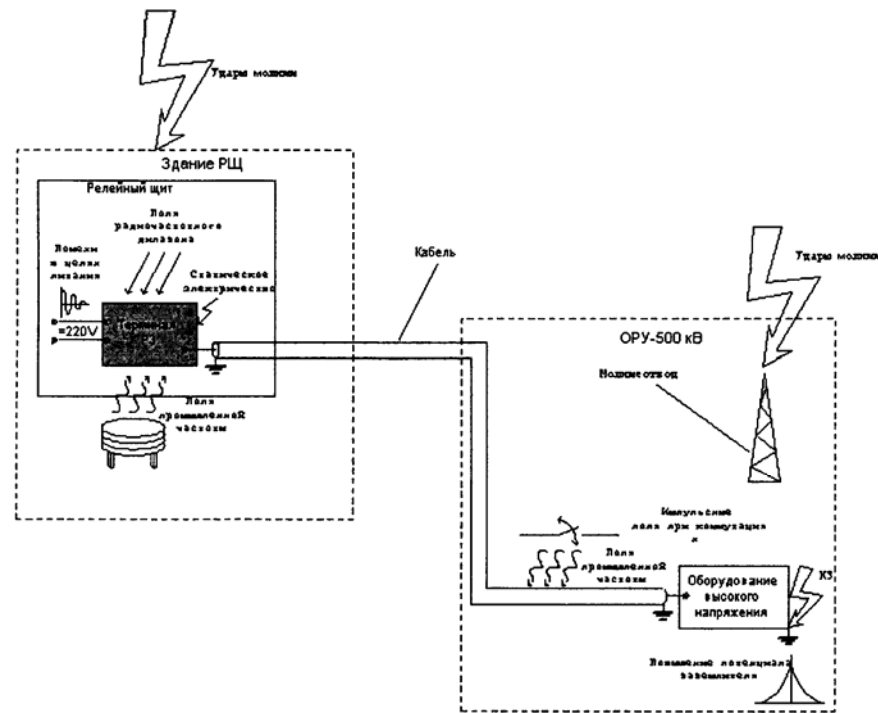


Рис. 5.1. Виды электромагнитных помех, воздействующие на терминалы защит

На исполнительной схеме заземляющего устройства должны быть показаны молниеприемники и схема их заземления, а также трассы прокладки кабелей систем релейной защиты и технологического управления. Для зданий и сооружений необходимо иметь схему токоотводов и заземлителей молниеприемников.

В качестве исходных данных для определения воздействий токов и напряжений промышленной частоты необходимо иметь сведения о токах короткого замыкания на землю (токи $3I_0$). При коротком замыкании на шинах высокого напряжения важно знать не только суммарный ток короткого на землю, но и составляющие этого тока (токи с линий $3I_0$ и токи $3I_0$ от трансформаторов). Например, при коротком замыкании на землю на шинах 500 кВ одной из подстанций суммарный ток $3I_0 = 10300$ А, ток от автотрансформатора 4АТ - $3I_0 = 3100$ А, ток от автотрансформатора 5АТ - 3100 А, ток от линии ВЛ-1 - $3I_0 = 2500$ А, ток от линии ВЛ-2 - $3I_0 = 1500$ А.

Удельное сопротивление грунта определяется, как правило, экспериментально методом вертикального электрического зондирования в виде зависимости удельного сопротивления ρ от глубины h (рис.5.2.).

Обычно результаты измерений приводятся к двухслойной модели, используя методы математической обработки (например, метод наименьших квадратов). Возможно определение удельного сопротивления грунта на основании данных о геоподоснове территории объекта и справочных данных об удельном сопротивлении различных грунтов.

Для определения воздействий электромагнитных полей радиочастотного диапазона необходимо иметь сведения об используемых на данном объекте радиопередающих устройствах (стационарных и переносных).

Анализ возможных уровней электромагнитных воздействий по сети электропитания постоянным и переменным током проводится на основе исполнительной схемы электропитания объекта, данных о типе и месте расположения устройств, включенных в систему электропитания (в особенности, электромеханических устройств) и данных о трассе прокладки и типе соединительных кабельных линий.

На этом этапе составляется рабочая программа проведения экспериментальных работ на энергообъекте.

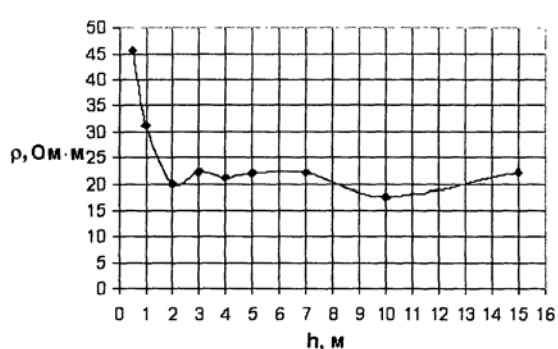


Рис. 5.2. Удельное сопротивление грунта

При проведении непосредственных измерений на объекте определяются напряженности электромагнитных полей радиочастотного диапазона, напряженность поля промышленной частоты при нормальных режимах работы, импульсные помехи в цепях постоянного и переменного тока, качество электропитания постоянным и переменным током устройств релейной защиты и системы технологического управления, характеристики покрытий полов и электрические потенциалы тела человека от заряда статического электричества.

Путем проведения непосредственных измерений на объекте определяются некоторые характеристики первичного оборудования, цепей вторичной коммутации и устройств релейной защиты и системы технологического управления (амплитудно-частотная характеристика высокочастотной составляющей тока шин и кабелей высокого напряжения, емкость на землю оборудования, входные параметры терминалов). Также проводится тестирование расчетов (например, при проведении измерений помех во время коммутаций разъединителями и выключателями).

При имитации электромагнитных возмущений определяются помехи, связанные с ударами молнии, короткими замыканиями, коммутациями в первичных цепях. После измерений производится пересчет полученных значений к реальным воздействиям.

Кроме того, при имитации электромагнитных возмущений определяются некоторые параметры (например, коэффициент экранирования кабелей), которые, как правило, невозможно определить расчетным путем.

Расчеты используются для определения наиболее опасных режимов, для пересчета результатов измерений, полученных с использованием имитаторов электромагнитных воздействий, к реальным воздействиям и для определения оптимальных мероприятий по улучшению ЭМО. При проведении расчетов используются математические модели и специальные программы для ПЭВМ.

5.2.2. Воздействие на кабели систем релейной защиты и технологического управления токов и напряжений промышленной частоты

При однофазном коротком замыкании на землю на шинах ПС ВН потенциал контура заземления энергообъекта распределяется неравномерно. Если потенциал на земле превысит испытательное напряжение кабелей, подходящих к оборудованию, возможно возникновение обратного перекрытия с земли на жилы кабелей. Кроме того, ток однофазного короткого замыкания, распределяясь по заземленным оболочкам, броне и экранам кабелей при превышении допустимых по термической стойкости токовых нагрузок на кабели вызовет повреждение этих кабелей.

Ток однофазного короткого замыкания на землю на шинах высокого напряжения в общем случае формируется из составляющих от силового автотрансформатора (АТ) и из электроэнергетической системы (ЭЭС) по линиям, подключенным к шинам высокого напряжения. От места короткого замыкания ток возвращается в нейтраль трансформатора и в энергосистему через заземляющее устройство и непосредственно через землю (рис.5.3, а).

Если наложить, в соответствии с методом суперпозиции, распределение потенциалов от АТ на распределение потенциалов от ЭС, то получим суммарное распределение потенциалов (рис.5.3, б). Для того чтобы определить возможные уровни воздействующих на кабели систем релейной защиты и технологического управления напряжений и токов при однофазном коротком замыкании на землю, проводят измерения распределения потенциалов и токов на заземляющем устройстве при имитации однофазного короткого замыкания на землю (рис. 5.4.)

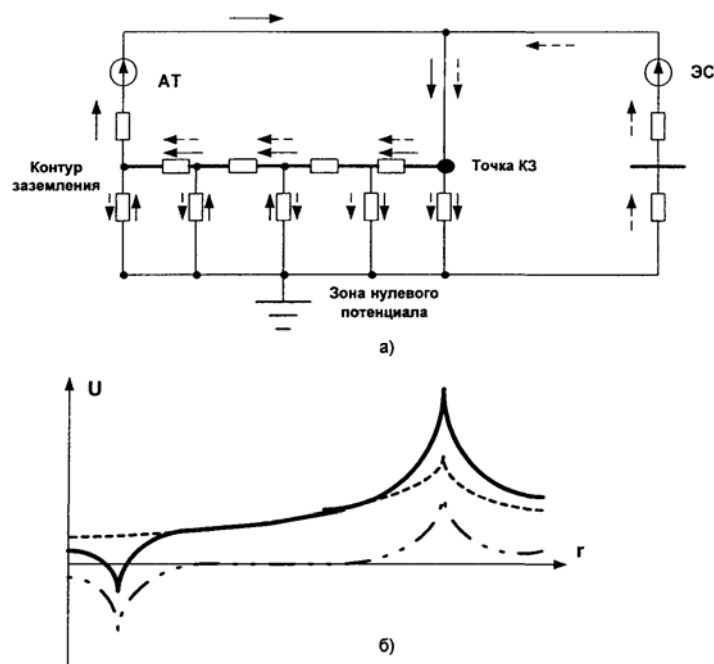


Рис 5.3. Однофазное короткое замыкание на шинах ПС высокого напряжения
а - схема растекания тока в контуре заземления ПС, *б* - распределение потенциалов на заземляющем устройстве ПС :

— — — — — суммарное, — — — — — от тока АТ, - - - - - от тока ЭЭС

Измеряют также разности потенциалов между местом короткого замыкания и заземляющим устройством релейного щита. Результаты измерений пересчитывают на реальные токи короткого замыкания.

Проводят расчеты распределения токов и потенциалов при аналогичных режимах, и сравнивают результаты расчетов и измерений. При наличии расхождений определяют причины таких расхождений и вносят коррективы в расчетную схему. При необходимости проводят дополнительные уточняющие измерения на объекте. После того, как будет получено соответствие расчетов и экспериментов, рассчитывают распределения токов и потенциалов при коротких замыканиях в различных точках на шинах высокого напряжения.

По результатам расчетов определяют максимальные значения напряжений и токов промышленной частоты, воздействующих на системы релейной защиты и технологического управления при однофазных коротких замыканиях.

5.2.3. Импульсные помехи, обусловленные переходными процессами в цепях высокого напряжения при коммутациях и коротких замыканиях

Возникновение импульсных помех в цепях вторичной коммутации связано со следующими видами возмущений в первичных цепях:

-короткие замыкания на землю в цепях высокого напряжения;

-коммутации разъединителями, короткозамыкателями и выключателями в цепях высокого напряжения;
-работа разрядников.

При коммутациях и коротких замыканиях на землю в результате переходного процесса в цепях высокого напряжения происходит разряд емкостей оборудования и шин на землю, и через заземлитель проходит импульсный ток высокой частоты. На заземляющем устройстве оборудования и в месте короткого замыкания происходит импульсный подъем потенциала. Этот потенциал с определенным коэффициентом ослабления передается по кабелям на вход устройств систем релейной защиты и технологического управления.

Для определения значений импульсных помех проводят имитационные испытания. Имитацию высокочастотной составляющей тока короткого замыкания осуществляют при помощи генератора высокочастотных импульсов (ГВЧИ).

Один вывод генератора подключают к заземляющему проводнику оборудования, к которому приходят кабели от устройств систем релейной защиты и технологического управления, а второй вывод генератора заземляют на расстоянии не менее 50 м от данного оборудования. В заземление оборудования подают импульсный ток (колебательный затухающий импульс амплитудой до 10А с декрементом колебаний 3—5, частотой колебаний 0,5; 1,0 и 2,0 МГц). При этом проводят измерения импульсных помех на входах устройств автоматических и автоматизированных систем технологического управления. Также измеряют импульсный потенциал заземляющего устройства и определяют импульсное сопротивление заземления оборудования. Потенциал измеряют относительно точки, удаленной от места ввода тока на расстояние не менее 50 м в противоположном направлении от точки заземления генератора.

Высокая частота обуславливает резко неравномерное распределение потенциала на заземляющем устройстве. Чем меньше удельное сопротивление грунта, тем быстрее спадает потенциал на заземляющем устройстве по мере удаления от места ввода тока. На расстоянии 50 м от точки ввода импульсного тока потенциал падает более чем в 10 раз даже при сопротивлении грунта 500 Ом·м.

На реальных объектах частота колебаний импульсных помех может изменяться от десятков килогерц до десятков мегагерц. Измерения при трех указанных частотах позволяют установить зависимость уровня импульсных помех от частоты.

Результаты измерений при имитации импульсных помех приводятся к реальному значению высокочастотной составляющей тока короткого замыкания. Реальный ток определяют путем расчета переходного процесса на шинах распределительного устройства при коммутациях и КЗ на землю.

Приближенную оценку можно выполнить следующим образом.

Полученное при измерениях напряжение умножают на коэффициент пересчета:

$$K_{пер} = I_{реал} / I_{измер}$$

где $I_{реал}$ - реальный ток с оборудования в контур заземления при коммутациях или однофазном коротком замыкании на землю; $I_{измер}$ - ток полученный при измерениях в данных точках подключения ГВЧИ.

Токи $I_{реал}$ для различных случаев приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

Токи $I_{реал}$ при однофазных коротких замыканиях на ПС
разных напряжений, кА

	Номинальное напряжение подстанции, кВ									
	110		220				330		500	
Число отходящих линий	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4
Ток короткого замыкания на подстанции с ОПН	0,48	1,9	0,95	3,8	1,15	6,2	2,75	11,0	4,75	19,0
Ток короткого замыкания на подстанции с РВ: при минимальном и максимальном значении пробивного напряжения	0,55 2,2	2,2 0,88	1,1 3,5	4,25 1,8	1,8 7,1	7,0 8,7	3,2 3,3	12,8 15,3	4,4 5,4	17,6 21,5
Максимальный ток при коммутационных процессах	0,225		0,45		0,77		1,450		2,450	
Наиболее вероятное значение тока при коммутационных процессах	0,035		0,09		0,23		0,50		0,85	

На действующем объекте измерения на клеммах устройств релейной защиты и системы технологического управления не всегда возможно провести в полном объеме. В этих случаях измерения дополняют расчетами. Определяют параметры высокочастотной составляющей тока КЗ (амплитуда и частота) и производят пересчет полученного импульсного сопротивления при реальной частоте. Затем рассчитывают синфазные напряжения на входе устройства РЗА в соответствии со схемой замещения (рис. 5.5).

При коммутациях первичного оборудования и при однофазном КЗ по ошиновке распредустройства протекают импульсные токи. Электромагнитные поля от этих токов взаимодействуют с кабелями цепей вторичной коммутации и в результате этого взаимодействия в них наводятся импульсные помехи.

Наибольший уровень полевых помех может быть при возникновении КЗ на шинах высокого напряжения. Определение импульсных полевых помех проводят следующим образом.

Расчетным путем определяют наиболее опасные виды коммутаций.

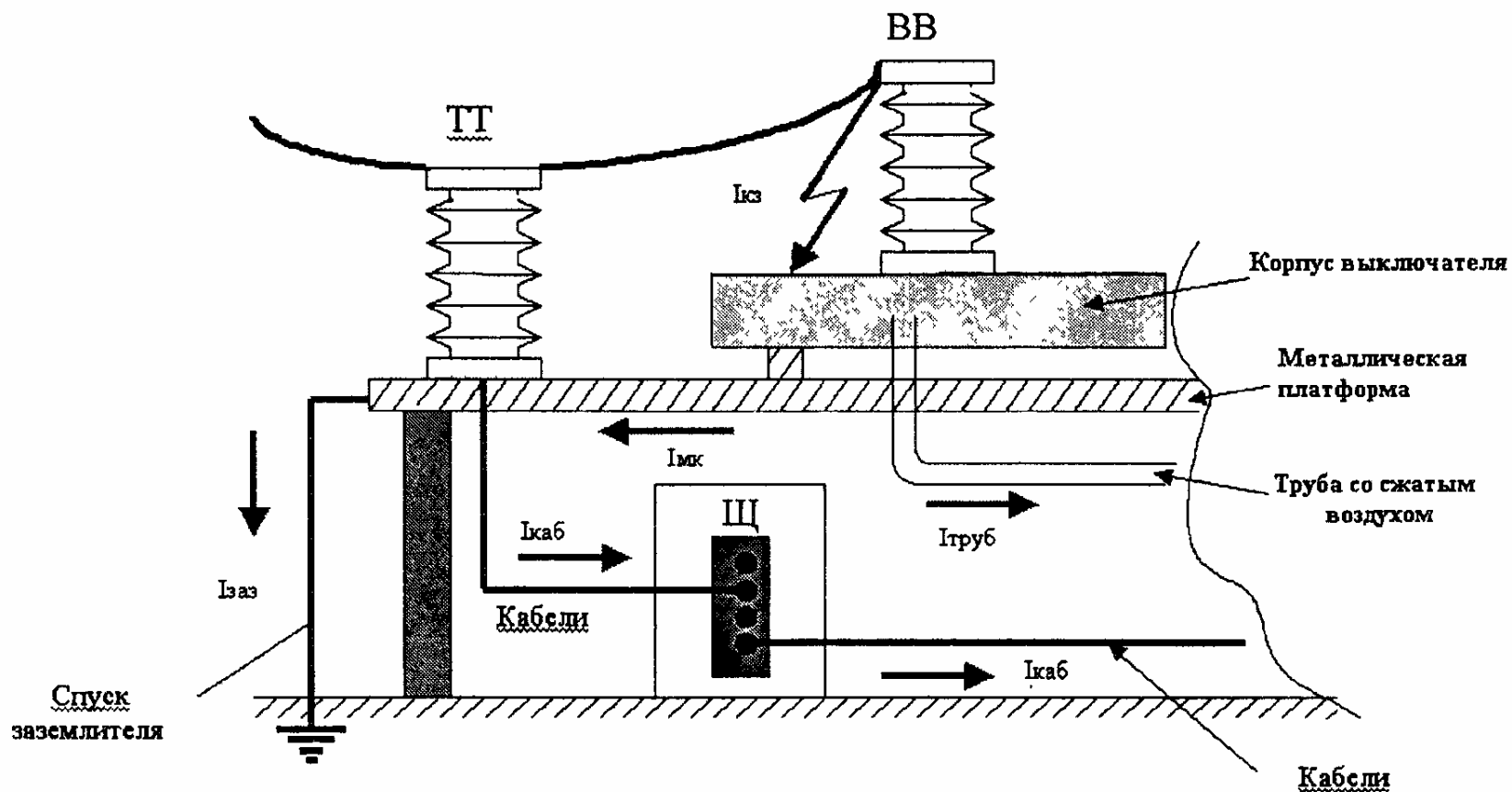


Рис. 5.4. Схема растекания тока при имитации однофазного короткого замыкания на землю на воздушном выключателе (ВВ):

$I_{кз}$ - ток КЗ; $I_{кз}$ - ток по металлоконструкциям; $I_{ТРУБ}$ - ток по трубам; $I_{заз}$ — ток по заземляющему проводнику; $I_{КАБ}$ - ток по оболочкам кабелей

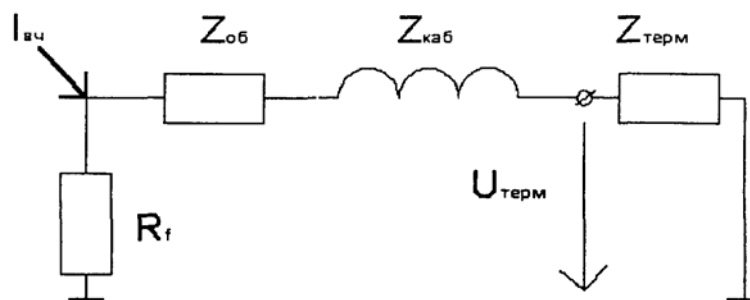


Рис. 5.5. Схема замещения для расчета синфазного напряжения на терминале при однофазном КЗ на шинах ВН энергообъекта:

$I_{вч}$ - высокочастотная составляющая тока КЗ, R_f - импульсное сопротивление заземления оборудования; $Z_{об}$ - входное сопротивление оборудования относительно земли, $Z_{каб}$ - сопротивление контрольного кабеля; $Z_{терм}$ - входное сопротивление терминала.

На объекте проводят имитации коммутационных процессов при помощи генератора высокочастотных импульсов и контрольного провода, проложенного по трассе прокладки вторичных кабелей.

Определяют реальный коэффициент экранирования помех $K_{взаим}$ соседними кабелями. Проводят измерения помех на кабелях защит и на контрольном проводе при реальных коммутациях, сопоставляют полученные результаты с результатами расчетов. При расхождении результатов расчета и измерений вносят коррективы в расчетную схему.

После проведения расчетов окончательно определяют максимальные значения помех рассматриваемого типа.

В общем случае на вход устройств автоматических и автоматизированных систем технологического управления приходит суммарная импульсная помеха, обусловленная скачком потенциала на земле и электромагнитным полем. Обычно на реальных объектах одна из этих составляющих существенно выше другой. Поэтому имитация импульсных помех, приходящих по земле и обусловленных электромагнитным полем, может проводиться отдельно. В тех случаях, когда эти помехи соизмеримы по амплитуде, имитируют импульсные помехи одновременно.

5.2.4. Импульсные помехи при ударах молнии

При ударе молнии в объект возможны следующие воздействия тока молнии:

- полевые наводки на контрольных кабелях и воздействие импульсных магнитных полей на оборудование;

-термическое воздействие тока молнии на заземляющие проводники, оболочки и экраны кабелей;

- обратные перекрытия с земли на кабели.

Определение уровней полевых помех, наводимых в кабелях, выполняют расчетным путем.

Параметры тока молнии для расчета выбираются в соответствии с рекомендациями МЭК 1312-1:

При расчетах распределения потенциала принимают максимальное значение импульса тока $I_m=100$ кА, длительность фронта импульса $t_{\text{фр}}=10$ мкс; при расчетах наведенных напряжений на кабелях - $I_m=25$ кА, $t_{\text{фр}}=0,25$ мкс.

Полевые наводки можно предварительно оценить по мощности излучения источника наводки. Используем выражение для мощности излучения дипольных антенн

$$P = \frac{(I \cdot l \cdot \omega)^2}{12\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot c^3},$$

где I - амплитуда тока, l - длина антенны, ω - круговая частота изменения тока, ε_0 - электрическая постоянная, c - скорость света.

Для тока молнии эквивалентную частоту можно определить как

$$\omega \approx \frac{\pi}{2 \cdot \tau},$$

где τ - время нарастания тока молнии.

Положим, что $l = 100$ м, а параметры импульса тока молнии соответствуют нормативам МЭК. Тогда для импульса тока положительной молнии (100 кА, 10/350 мкс) имеем мощность $P=2.8 \times 10^7$ Вт, а для последующего импульса (25 кА, 0,25/100 мкс) $P = 10^{10}$ Вт. При расчете полевых наводок импульс тока положительной молнии можно не рассматривать.

Для открытых распределительных устройств определяют напряжения, наводимые в кабелях вторичной коммутации при ударах молнии в молниеотводы, расположенные вблизи трасс прокладки кабелей. Для зданий и сооружений определяют напряжения, наводимые в кабелях при протекании тока молнии по токоотводам молниеприемника здания.

При расчетах необходимо учитывать коэффициент экранирования электромагнитного поля молнии, так как обычно используются экранированные кабели, проложенные в кабельных каналах или коробах.

Принцип действия экрана состоит в том, что электромагнитное поле индуцирует в экране ток, магнитное поле которого компенсирует воздействующее поле. В зависимости от соотношения длины кабеля l и длины электромагнитной волны λ этот ток замыкается по разным путям.

При $\lambda > l$ ток в экране замыкается через заземления на концах экрана и грунт, а при $\lambda < l$ - непосредственно в самом экране. Удар молнии генерирует наводки с частотой ~ 1 МГц, что соответствует длине волны $\lambda \approx 300$ м. Протяженности большинства кабельных линий вторичных цепей не превышают этой величины, то есть ток в экране замыкается через заземляющие экран проводники и грунт. Методика расчета коэффициентов экранирования этого случая состоит в следующем. Коэффициент экранирования $k \geq 1$ для линии с заземленным с обеих сторон экраном определяется из общего выражения

$$k = \frac{R_G + R_3 + j\omega L_3}{Z_t l + j\omega L_g}$$

где l - протяженность системы; $Z_t = (R_3 + j\omega L_t)/l$ - погонное передаточное сопротивление, R_3 - активное сопротивление экрана; $L_t = M_{13} - L_3$ - передаточная индуктивность; L_3 индуктивность экрана, M_{13} - взаимная индуктивность между экраном и жилой, R_G - сопротивление пути протекания тока в земле; L_g - собственная индуктивность заземляющих проводников экрана.

На рис. 5.6. приведены зависимости коэффициентов экранирования кабельного экрана из меди, стального короба и кабельного канала со стальной арматурой от частоты внешнего поля. В расчетах использованы следующие параметры. Для экранированного кабеля $R = 10$ мм, $d = 5$ мм, $r = 0,1$ мм, удельная проводимость меди $\gamma = 60 \cdot 10^6$ Ом \cdot м. Для стального короба $b = 0,5$ м, $r = 1$ мм, удельная проводимость стали $\gamma = 10 \cdot 10^6$ Ом \cdot м, $\mu_e = 200 \cdot 10^{-6}$ Гн/м. Для кабельного канала $b = 5$ м, $r = 8$ мм, $h = 200$ мм, удельная проводимость стали $\gamma = 10 \cdot 10^6$ Ом \cdot м, $\mu_e = 200 - 10^{-6}$ Гн/м.

При наличии нескольких совместно действующих экранов перемножение коэффициентов даст оценку сверху общего коэффициента экранирования. Приведенные на рис. 5.6 зависимости могут быть использованы при расчетах электромагнитных помех в кабелях, если невозможно экспериментально определить коэффициент экранирования непосредственно на объекте.

Для определения возможного обратного перекрытия с земли на кабели проводят измерения распределения потенциалов по земле при ударе молнии в молниеприемник с помощью измерительного комплекса ИК-1. Осуществляют имитацию удара молнии в молниеприемник. На ОРУ генератор импульсов тока подключают между заземлением молниеприемника и заземленным штырем на расстоянии не менее 50 м от молниеприемника. Измеряют потенциалы на земле вблизи кабельных каналов и лотков относительно точки, удаленной на расстояние не менее 50

м. Для зданий и сооружений генератор подключают к молниеприемнику (стержень или сетка) наверху здания и к земле на расстоянии не менее 20 м

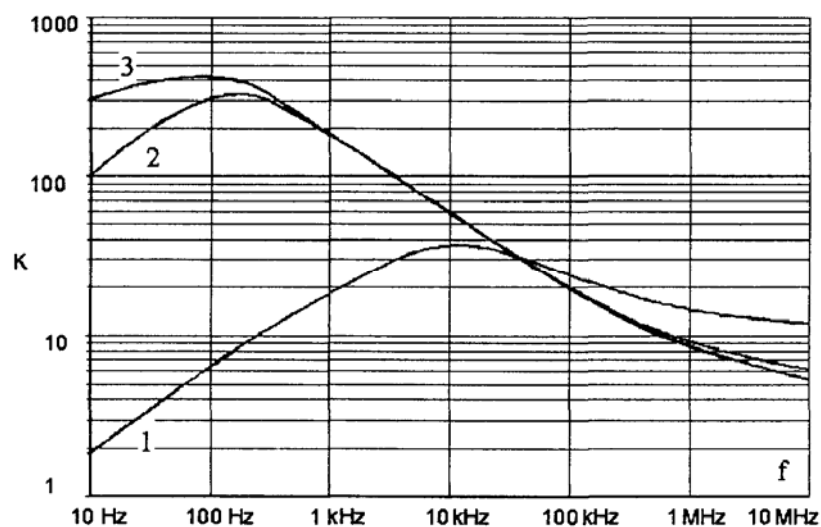


Рис. 5.6. Расчетные коэффициенты экранирования. / — экранированный кабель, 2 — стальной короб, 3 — кабельный канал

от здания. Осуществляют имитацию удара молнии в молниеприемник, и измеряют потенциалы в здании. Полученные результаты пересчитывают на реальный ток молнии. При анализе проектных решений проводят расчеты по программе «ОРУ-М».

5.2.5. Электромагнитные поля радиочастотного диапазона

Измерения полей радиочастотного диапазона проводят в местах установки устройств автоматических и автоматизированных систем технологического управления в частотном диапазоне от 1 до 1000 МГц. Измеряют также напряженности электромагнитного поля от переносных и стационарных радиопередающих станций, которые используются персоналом энергообъекта. Измеряют зависимость напряженности поля от расстояния до источника электромагнитного излучения и ослабление поля искусственными преградами (стены, экраны, корпуса шкафов и т.д.).

Для измерения помех в радиочастотном диапазоне обычно используют перестраиваемые селективные высокочастотные вольтметры с соответствующим набором антенн. Для сигналов вертикальной поляризации в диапазоне 26-300 МГц возможно использование биконических антенн с круговой диаграммой направленности и входным сопротивлением 50 Ом. Для сигналов с горизонтальной поляризацией следует использовать дипольные антенны с входным сопротивлением 50 Ом. Существенным для правильных измерений является хорошее согласование антенно-фидерного тракта с вольтметром во всем диапазоне измеряемых частот. Значение коэффициента стоячей волны напряжения не должно превышать 3.

Для измерения сигналов в диапазоне частот 300-1000 МГц возможно использование калиброванной измерительной антенны, рупорной измерительной антенны П-6-33 с входным сопротивлением 50 Ом. Эта антенна позволяет принимать сигналы любой линейной поляризации, но обладает ограниченной диаграммой направленности ($\pm 45^\circ$). Для сигналов с горизонтальной поляризацией можно также использовать калиброванную широкополосную антенну в виде конического диполя ДП-3 из измерительного комплекса FSM-8,5. Этот диполь имеет входное сопротивление 50 Ом и коэффициент стоячей волны не более 2. Описанные антенны предназначены для измерения напряженности электрического компонента электромагнитного поля. Магнитный компонент поля определяют пересчетом по формуле

$$H, \text{ дБ (мкА/м)} = E, \text{ дБ (мкВ/м)} - 52.$$

Возможность быстрого графического представления частотного спектра помех дает применение для измерений радиочастотных сигналов спектроанализаторов.

5.2.6. Разряды статического электричества

Оценку электростатического потенциала тела человека проводят путем непосредственных измерений. При этом измеряют характеристики диэлектрического покрытия пола в помещении, где работает оператор.

Измерения удельных поверхностных сопротивлений полимерных диэлектриков осуществляют в соответствии с ГОСТ 64433.3-71 «Материалы электроизоляционные твёрдые. Методы определения электрических сопротивлений при постоянном напряжении». Для измерений поверхностного сопротивления c_s используется тераомметр и стандартные электроды, схема подключения которых представлена на рис. 5.7.

Для расчета удельного поверхностного сопротивления ρ_s используется следующее выражение:

$$\rho_s = \frac{\pi(D+g)R_s}{g},$$

где R_s - измеренное поверхностное сопротивление, D - диаметр потенциального электрода, g - зазор между потенциальным и измерительным электродами (см рис. 5.7.)

Измерения потенциала тела человека проводят электростатическим вольтметром (например, типа С 502 с диапазоном измеряемого напряжения 0,4-3 кВ). Для расширения диапазона измерений используется ёмкостный делитель. Потенциал тела оператора определяется из выражения:

$$U_p = [(C_1 + C_2)/C_1]U_v,$$

где C_1 - суммарная ёмкость вольтметра, соединительного кабеля и оператора, C_2 - ёмкость делителя, U_V — показания вольтметра.

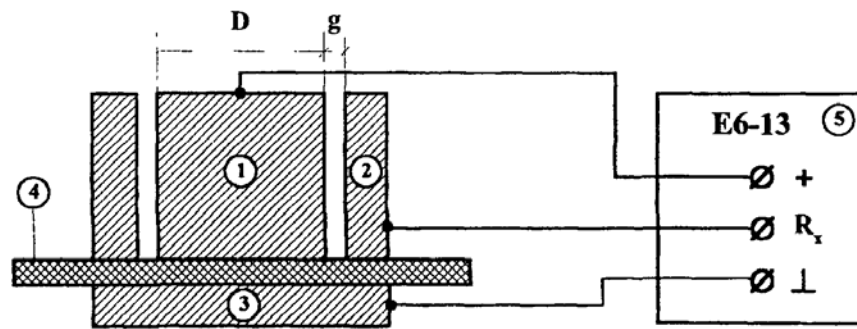


Рис. 8.13. Схема измерений поверхностного сопротивления полимерного диэлектрика:

1 - потенциальный электрод; 2 - измерительный электрод; 3 - охранный электрод; 4 - образец полимерного диэлектрика; 5 - тераомметр

5.2.7. Магнитные поля промышленной частоты

Непосредственные измерения магнитных полей частотой 50 Гц проводят в нормальных режимах в местах установки устройств автоматических и автоматизированных систем технологического управления, на распределительном устройстве ВН вдоль трассы прокладки кабелей при помощи измерителя магнитного поля (например, с помощью ИПМ-50/200/400, входящего в комплект КДЗ-1).

Для режимов однофазного короткого замыкания на шинах высокого напряжения уровень напряженности магнитных полей определяется расчетным путем. Рассматривается режим однофазного короткого замыкания на шинах высокого напряжения вблизи места установки устройств систем релейной защиты и технологического управления. Приближенные оценки проводят по формуле: $H = I_{кз} / 2\pi r$ (r - расстояние до шин, по которым проходит ток однофазного короткого замыкания $I_{кз}$) Точные расчеты проводят по специальной программе. В тех случаях, когда вблизи места установки устройств автоматических и автоматизированных систем технологического управления размещены реакторы или трансформаторы, измеряют напряженность магнитного поля в нормальном режиме и пересчитывают на токи короткого замыкания. Приближенный расчет поля, создаваемого вдоль оси реактора, может быть выполнен по выражению:

$$H = \frac{I \cdot n}{2} \frac{r^2}{(r^2 + x^2)^{1,5}}$$

где r - радиус реактора, x - расстояние по оси реактора от его центра до точки измерения, I - ток в реакторе, n - число витков.

Приближенный расчет поля, создаваемого реактором в горизонтальной плоскости на расстояниях более 2-х диаметров реактора, может быть выполнен по выражению

$$H = \frac{I \cdot n}{4\pi} \left[\int_0^{2\pi} \frac{rx \cos \beta}{(r^2 + x^2 - 2rx \cos \beta)^{1.5}} d\beta - \int_0^{2\pi} \frac{r^2}{(r^2 + x^2 - 2rx \cos \beta)^{1.5}} d\beta \right]$$

где β - угол между вектором, направленным из центра реактора в точку измерений, и осью абсцисс.

Для нескольких реакторов искомое поле определяется методом суперпозиции полей от каждого реактора с учетом фазового сдвига токов. Расчеты могут быть выполнены при помощи программы MathCAD.

5.2.8. Помехи, связанные с возмущениями в цепях питания низкого напряжения

К основным периодическим помехам в цепях постоянного тока относится переменная составляющая напряжения (пульсации) и кондуктивные помехи радиочастотного диапазона. К импульсным помехам в цепях постоянного тока относятся помехи, возникающие при срабатывании реле, электромагнитов, приводов силовых выключателей, автоматических выключателей в цепях постоянного тока. К основным периодическим помехам в цепях питания переменного тока относят гармонические составляющие напряжения. К импульсным помехам в цепях переменного тока относят помехи, возникающие при коммутациях автоматическими выключателями в этих цепях.

Измерительную аппаратуру в ходе определения помех подключают к цепям питания по противофазной схеме (провод-провод) и, при необходимости, по синфазной схеме (провод-земля). При этом проводят следующие виды измерений:

- кратковременные измерения (осциллографирование формы сигнала помехи);
- длительная регистрация (в том числе при коммутациях в цепях высокого напряжения).

Кратковременные измерения проводят в нормальных режимах (стационарные режимы работы силового оборудования, режим срабатывания реле аппаратуры автоматических и автоматизированных систем технологического управления; режим срабатывания автоматических выключателей в цепях питания; режим срабатывания электромагнитных приводов силовых выключателей 6—10 кВ).

При измерениях в стационарных режимах определяют характеристики пульсаций или коэффициент синусоидальности переменного напряжения.

Измерения помех, возникающих при срабатывании реле, проводят при принудительном их срабатывании, например, при опробовании силовых

выключателей, проверке защит. При этом помехи измеряют в тех панелях (шкафах), где срабатывают реле.

Измерения помех при срабатывании автоматических выключателей в цепях питания проводят при коммутациях в силовых сборках, на щите собственных нужд, щите постоянного тока. Помехи фиксируют в местах установки аппаратуры систем релейной защиты и технологического управления.

Измерения помех в цепях оперативного тока при срабатывании электромагнитных приводов силовых выключателей проводят в местах установки аппаратуры систем релейной защиты и технологического управления. При этом возможно проведение коммутаций выключателями на холостом ходу. Особое внимание следует уделять этому виду помех в том случае, когда питание аппаратуры релейной защиты и технологического управления и приводов выключателей осуществляется от одной системы шин.

Длительную регистрацию проводят с целью определения диапазона характеристик помех в длительно существующих режимах.

При данном типе измерений определяют амплитуду переменных и импульсных помех в цепях постоянного тока и гармонических составляющих и импульсных помех в цепях переменного тока.

Измерения проводят в тех же цепях, что и при кратковременной регистрации.

Измерения проводят продолжительностью не менее одной недели при помощи самописцев или специализированных регистраторов параметров качества электрической энергии.

Анализируют также аварийные режимы в сети питания и определяют возможные уровни пульсаций в сети постоянного тока и максимальное время провалов напряжения.

5.2.9. Импульсные магнитные поля

Расчетные оценки напряженностей импульсных магнитных полей проводят для случаев протекания тока молнии по молниеотводам или токоотводам молниеприемников зданий и сооружений, расположенных вблизи места размещения устройств автоматических и автоматизированных систем технологического управления. Приближенные оценки проводят по формуле: $H = I_m / 2\pi r$ (r - расстояние до молниеприемника или токоотвода, по которому проходит весь ток молнии I_m или его часть).

8.3. Сравнение полученных значений с допустимыми уровнями

По результатам измерений и расчетов составляют протокол, в котором уровни воздействующих на системы автоматических и автоматизированных

систем технологического управления электромагнитных возмущений сравнивают с испытательными значениями для устройств указанных систем и кабелей вторичной коммутации. На основании проведенных сравнений делают заключение о помехоустойчивости систем автоматических и автоматизированных систем технологического управления. В качестве примера приведем примеры протоколов измерений для одного из обследованных объектов.

ПРОТОКОЛ № 1

Воздействие токов и напряжений промышленной частоты на контрольные кабели

№ кабеля	Трасса	Место воздействия	Напряжение на кабеле кВ	Ток в экране кабеля, А	Время воздействия, с	Допустимое значение $U_{50 \text{ Гц}}$, кВ	Допустимое значение $I_{50 \text{ Гц}}$, А	Выводы	Рекомендации
ОРУ 220 кВ (ток КЗ 12,9 кА)									
-	ОРУ-220 кВ-РЩ 220 кВ	Оборудование ОРУ-220	4,5	1250	0,1	1	230	Напряжения и токи выше нормы	См. заключение
ОРУ 500 кВ (ток КЗ 7,2 кА)									
-	ОРУ – 500 кВ-РЩ 500 кВ	Оборудование ОРУ 500 кВ	0,5	120	0,5	1	130	Напряжения и токи ниже нормы	-

Заключение: При однофазном КЗ на ОРУ-220 кВ напряжения промышленной частоты, воздействующие на контрольные кабели от оборудования ОРУ до РЩ 220 кВ, и токи по экранам кабелей превышают допустимые уровни. При однофазном КЗ на ОРУ-500 кВ или ОРУ-220 кВ может иметь место вынос высокого потенциала с ОРУ в машзал по кабелям с гальваническими связями между ними и повреждение этих кабелей. Для остальных трасс кабелей уровни воздействующих потенциалов и токов не превышают допустимые.

ПРОТОКОЛ № 2

Импульсные помехи, вызванные подъемом потенциала заземлителя

Устройство (терминал)	Вид цепи	Оборудование, от которого отходят цепи	Измерения			Пересчет к реальным воздействиям		Допустимый уровень, кВ	Выводы	Рекомендации
			Ток генератора, А	Напряжение на терминале, В	f , МГц	ВЧ ток КЗ, кА	Напряжение на терминале, кВ			
Терминалы РЗА	ТН	ТН 1 СШ	2,3	0,6	1	3,5	0,9	2,5	В норме	-
	ТН	ТН 2 СШ	4,2	0,9	0,5	3,5	0,75	2,5	В норме	-
	ТН	ТН Л-501	3,8	0,7	0,5	3,5	0,65	2,5	В норме	-
Терминалы	ТН	ТН 1 СШ	2,8	0,6	0,5	1,5	0,32	2,5	В норме	-
	ТН	ТН 2 СШ	1,3	0,3	1	1,5	0,3	2,5	В норме	-
	ТН	АТ	2,0	0,4	1	1,5	0,3	2,5	В норме	-

Заключение: Импульсные помехи на терминалах не превышают допустимых уровней.

6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В УЗЛАХ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

6.1. Введение

В идеальной электроэнергетической системе (ЭЭС) энергия должна передаваться при номинальных значениях частоты и напряжения, не изменяющихся во времени. В реальных энергосистемах эти условия не выполняются вследствие того, что многие потребители электроэнергии имеют нелинейные характеристики нагрузки (вентильные преобразователи, силовая электронная преобразовательная техника, электродуговые сталеплавильные печи на металлургических заводах и предприятиях других отраслей промышленности).

Возросший интерес к этой проблеме связан с увеличением числа и единичной мощности нелинейных электронных устройств, используемых для управления силовыми установками и системами.

Отклонения форм кривых тока и напряжения от правильной синусоиды обычно представляют с помощью гармонических составляющих.

Гармоника определяется как значение сигнала с частотой, кратной фактической частоте сети, например основной частоте сигнала, производимого генератором. Следует различать гармоники в установившихся режимах, когда форма кривой не изменяется, и гармоники в переходных режимах, когда форма кривой существенно меняется от цикла к циклу.

Существенной характеристикой, определяющей форму кривой, является фазовый угол (угол сдвига) гармоники по отношению к гармонике основной частоты. Одни и те же гармоники от различных источников могут производить различный эффект в зависимости от их относительного положения.

Как и многие другие формы искажений, гармоники воздействуют на все виды электрического оборудования, находящегося на довольно большом расстоянии от места генерации гармоник.

Наиболее ясно ощущается влияние гармоник, возникающих в силовых цепях, на качество звука телефонной связи, снижающегося из-за наводимого силовыми гармониками гармонического шума. Однако существуют и другие, менее слышимые, но зачастую более опасные воздействия, выражающиеся в ложных срабатываниях ответственной управляющей и защитной аппаратуры, перегрузке силовых аппаратов и систем. Очень часто длительное существование искаженной кривой напряжения приводит к разрушению силовых конденсаторов. Кроме того, при неблагоприятном состоянии электрической сети придется чаще ремонтировать или заменять выходящие из строя элементы. В этом случае применение даже элементарных мер

защиты оборудования в виде фильтров, устанавливаемых у потребителя, приводит к существенному улучшению кривой напряжения.

Большое развитие получили технологии, основанные на использовании управляемых выпрямителей, что привело к увеличению уровня гармоник тока в сетях. Вместе с тем при разработке такого оборудования обычно предполагают, что напряжение в точке присоединения синусоидально. Это возможно лишь в случае, если энергетическая система, питающая оборудование, имеет малое гармоническое сопротивление. Следовательно, мелкие потребители, питающиеся от такой сети, подвергаются дополнительным опасностям, связанным с влиянием гармоник на управляющее оборудование, установленное в их сетях.

Энергоснабжающие организации обычно снимают с себя ответственность за причины возникновения гармоник, вводя стандарты или рекомендации по ограничению уровней гармонических составляющих в точках общего присоединения потребителей.

Однако определение допустимых уровней гармоник не является простой и однозначной задачей. Знания о токах гармоник различных источников недостаточны для того, чтобы установить пределы, в которых обеспечивалась бы электромагнитная совместимость оборудования в любой энергосистеме. Поэтому если знания о гармониках тока исходят в основном из физической сущности явления, то разработанные стандарты и рекомендации являются результатом анализа предшествующего практического опыта, используемого для того, чтобы избежать появления подобных проблем в будущем.

До тех пор пока не будет достигнуто достаточного понимания характера гармонических явлений в сложных системах, энергоснабжение будет оставаться под угрозой повышенной опасности и энергоснабжающие организации и потребители будут часто вынуждены принимать меры уже после аварий.

6.2. Статический преобразователь как источник гармоник и другие источники гармоник

Для правильного расчета гармоник тока, генерируемых статическими силовыми преобразователями, необходимо иметь точную информацию о форме кривой напряжения переменного тока на выводах преобразователя, его схеме, типе системы управления, полном сопротивлении сети переменного тока и параметрах цепи постоянного тока. Однако представление столь значительного числа факторов с самого начала затруднит понимание основных положений теории. Более удобно начать оценку явления с изложения теории управления преобразователем, работающим в идеализированных системах переменного тока и постоянного тока, а затем рассмотреть поочередно влияющие факторы.

В зависимости от положения момента включения одного вентиля относительно другого при устойчивой работе преобразователя различают четыре принципа управления:

1. Управление с постоянным фазовым углом, при котором включение вентиля производится через равные промежутки времени в соответствии с их коммутационными напряжениями;

2. Симметричное управление, при котором последовательное включение вентиля производится в одинаковые моменты синусоиды питающего напряжения;

3. Модулированное фазовое управление, при котором включение вентиля производится через переменные промежутки времени;

4. Интегральное управление, выбирающее целое число циклов или полциклов питающей частоты.

Изменение фазового угла - наиболее широко используемый способ управления. Спектральный анализ Фурье прямо применим к кривым, получающимся при фазовом и симметричном управлении вентилями.

Увеличилось количество и единичная мощность принудительно коммутируемых преобразователей, в особенности инверторов, питающих привод переменного тока. Их питающим источником обычно служит система переменного тока, от которой питается выпрямитель. Гармонический же состав кривой на стороне инвертированного тока имеет характерные особенности.

Управление с постоянным фазовым углом обычно встречается в нормально коммутируемых статических преобразователях и регуляторах напряжения.

Регуляторы напряжения переменного тока, состоящие из встречно-параллельно включенных пар тиристоров в каждой фазе, генерируют изменяющиеся по амплитуде гармоники. В случае индуктивной нагрузки они могут содержать гармоники четных порядков и постоянный ток. Хотя тиристорное регулирование напряжения в настоящее время используется в основном в маломощных устройствах (таких, как регуляторы силы света электрических ламп и малые асинхронные двигатели), однако в связи с возрастающим интересом к экономии электроэнергии их использование будет расти и они могут в будущем превратиться в существенный источник гармонических искажений.

Основными источниками гармоник тока в настоящее время являются выпрямители и инверторы с фазовым управлением. Все они могут быть разделены на три большие группы: 1 - большие преобразователи, используемые, например, в металлургии и в передачах постоянного тока высокого напряжения; 2 - преобразователи средней мощности, подобные используемым в промышленности для управления электромоторами и на железной дороге; 3 - маломощные преобразователи однофазных устройств, таких, как телевизоры и устройства перезарядки батарей.

Формы кривых напряжений и токов преобразователей первой группы близки к идеальным и могут быть приняты за основу для получения характеристик гармоник стандартных схем преобразователей. На эти данные обычно ссылаются при оценке гармоник в кривых, отличающихся от идеальной.

До появления статических преобразователей наличие гармонических искажений в энергосистемах ассоциировалось, в первую очередь, с работой электрических машин и трансформаторов. И, действительно, основными источниками гармоник, существовавшими ранее в электрических системах, были намагничивающие токи силовых трансформаторов.

После того как выполнение требований по конструированию экономичных генераторов привело к искажению формы кривой напряжения, генераторы электрических станций стали вторым основным источником гармоник.

Современные трансформаторы и вращающиеся машины в нормальных условиях работы не вносят существенных искажений в сеть. Однако в переходных процессах и в условиях работы, отличных от проектируемых, эти искажения могут сильно увеличиться.

Кроме статических преобразователей, существует еще два вида нелинейных нагрузок, чье влияние на формы кривых напряжения и тока должно быть рассмотрено, - это дуговые печи и флюоресцентные лампы.

6.3. Влияние гармоник на системы электроснабжения

6.3.1. Элементы систем электроснабжения

После того как выявлены источники гармоник и определены их уровни, необходимо выяснить характер влияния гармоник на работу электрооборудования. Все элементы систем электроснабжения должны быть рассмотрены с точки зрения их чувствительности к гармоникам. На основе этого рассмотрения затем вырабатываются рекомендации по допустимым уровням гармоник в сетях.

Основными формами воздействия высших гармоник на системы электроснабжения являются: увеличение токов и напряжений гармоник вследствие параллельного и последовательного резонансов; снижение эффективности процессов генерации, передачи и использования электроэнергии; старение изоляции электрооборудования и сокращение вследствие этого срока его службы; ложная работа оборудования.

Резонансы. Наличие в сетях конденсаторов, используемых для компенсации реактивной мощности, может привести к местным резонансам, которые, в свою очередь, могут вызвать чрезмерное увеличение тока в конденсаторах и выход их из строя.

Параллельный резонанс возникает вследствие высокого сопротивления гармоникам тока на резонансной частоте. Так как большинство гармоник генерируется источниками тока, то это вызывает увеличение напряжения гармоник и большие их токи в каждой из параллельных ветвей.

Параллельные резонансы могут возникать в различных условиях, простейшие из них соответствуют случаю присоединения конденсаторов к тем же шинам, к каким присоединен источник гармоник. Резонанс в этом случае возникает между источником гармоник и конденсаторами.

Предполагая сопротивление источника полностью индуктивным, резонансную частоту определим по формуле

$$f_p = f \sqrt{S_{K3} / (Q_S + Q_L)} \quad (6.1)$$

где Q_K - мощность силовых конденсаторов и емкости питающей сети; S_{K3} - мощность короткого замыкания в точке общего присоединения (Рис. 6.1.).

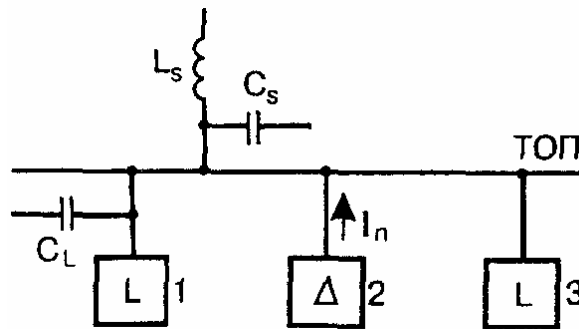


Рис 6.1. Параллельный резонанс

1,3 – нагрузки; 2- источник гармоник; ТОП – точка общего присоединения.

Для того чтобы определить условия резонанса в конкретном случае, необходимо измерить токи гармоник в ветвях каждой нагрузки и ветви питания, а также напряжение гармоник на шинах. Если ток, текущий от шин в энергосистему, мал, а напряжение велико, это говорит о наличии резонанса между L_S и C_L, C_S .

Последовательный резонанс иллюстрируется рис. 6.2. Данный вид резонанса возникает при наличии искажений на шинах источника питания. На высоких частотах сопротивление нагрузки может не учитываться, в то время как сопротивление конденсаторов резко снижается. Резонансную частоту этой цепи определяют по формуле

$$f_p = f \sqrt{\frac{S_T}{(Q_K U_{K3})} 100 - \frac{P^2}{Q_K^2}} \quad (6.2.)$$

где Q_K - мощность силовых конденсаторов; S_T - мощность трансформатора; $U_{KЗ}$ - напряжение короткого замыкания трансформатора; P_H - мощность нагрузки.

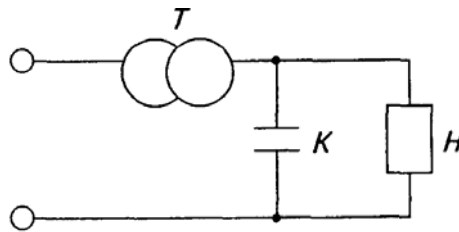


Рис. 6.2. Схема последовательного резонанса
К – конденсатор, Т – трансформатор, Н – активная нагрузка

При последовательном резонансе большой ток гармоника может течь через конденсатор при относительно небольшом напряжении гармоника. Фактическое значение тока определяется добротностью контура. Обычно она составляет порядка 5 на частоте 500 Гц.

Влияние резонансов на системы. Резонансы в системах электроснабжения обычно рассматриваются применительно к конденсаторам, и в частности к силовым конденсаторам. При превышении гармониками тока уровней, предельно допустимых для конденсаторов, последние не ухудшают свою работу, однако через некоторое время выходят из строя.

6.3.2. Вращающиеся машины

Потери электроэнергии. Гармоники напряжения и тока приводят к дополнительным потерям в обмотках статора, в цепях ротора, а также в стали статора и ротора. Потери в проводниках статора и ротора при этом больше из-за вихревых токов и поверхностного эффекта, чем определяемые омическим сопротивлением. Токи утечки, вызываемые гармониками в торцевых зонах статора и ротора, приводят к дополнительным потерям.

В случае асинхронного двигателя с ротором со скошенными пазами и пульсирующими магнитными потоками в статоре и роторе высшие гармоники вызывают дополнительные потери в стали. Значение этих потерь зависит от угла скоса пазов и характеристик магнитопровода.

Влияние формы кривой напряжения на потери в асинхронном двигателе было показано на примере двигателя мощностью 16 кВт, работающего с полной загрузкой при частоте сети 60 Гц и номинальном напряжении. При синусоидальной форме кривой напряжения полные потери составили 1,3 кВт, а при квазипрямоугольной форме - 1,6 кВт.

Среднее распределение потерь от высших гармоник в двигателе постоянного тока, питающегося от выпрямителя, составляет: обмотки статора 14,2 %, цепи ротора 41,2 %, торцевые зоны 18,8 %; потоки в пазах 25,8 %.

За исключением последней составляющей потерь, их распределение в синхронных машинах приблизительно аналогично. Следует отметить, что соседние нечетные гармоники в статоре синхронной машины вызывают в роторе гармонику одинаковой частоты. Например, 5-я и 7-я гармоники в статоре вызывают в роторе гармоники тока 6-го порядка, вращающиеся в разные стороны. Для линейных систем средняя плотность потерь на поверхности ротора пропорциональна $(I_5^2 + I_7^2)$, однако из-за разного направления вращения плотность потерь в некоторых точках пропорциональна $(I_5^2 + I_7^2)^2$.

Дополнительные потери - наиболее серьезный эффект, вызываемый гармониками во вращающихся машинах. Они приводят к повышению общей температуры машины и к местным перегревам, наиболее вероятным в роторе. Двигатели с ротором типа «беличья клетка» допускают более высокие потери и температуру, если это не приводит к недопустимой температуре статора; поэтому двигатели с фазным ротором оказываются более чувствительными к гармоникам. Некоторые технические руководства ограничивают допустимый уровень тока обратной последовательности в генераторе 10 %, а уровень напряжения обратной последовательности на вводах асинхронных двигателей - 2%. Допустимость гармоник определяют по тому, какие уровни напряжений и токов обратной последовательности они создают.

Вращающие моменты, создаваемые высшими гармоническими составляющими достаточно малы и в расчетах обычно не учитываются. Вместе с тем они могут приводить к значительной вибрации вала.

6.3.3. Статическое оборудование

Линии электропередачи. Гармоники тока в линиях приводят к дополнительным потерям электроэнергии и напряжения.

В случае кабельных линий гармоники напряжения увеличивают воздействие на диэлектрик пропорционально увеличению максимальной амплитуды напряжения. Это, в свою очередь, увеличивает число повреждений кабеля и стоимость ремонтов.

В линиях сверхвысокого напряжения гармоники напряжения по той же причине (увеличение амплитуды) могут вызывать увеличение потерь энергии на корону.

Трансформаторы. Гармоники напряжения вызывают в трансформаторах увеличение потерь энергии на гистерезис, потерь,

связанных с вихревыми токами в стали, и потерь в обмотках. Кроме того, сокращается срок службы изоляции.

Увеличение потерь в обмотках наиболее важно в случае преобразовательного трансформатора, так как наличие фильтра, присоединяемого обычно к стороне переменного тока, не снижает гармоник тока в трансформаторе. Поэтому требуется устанавливать большую мощность трансформатора. Кроме того, наблюдаются локальные перегревы бака трансформатора.

Важная составляющая воздействия гармоник на мощные трансформаторы состоит в циркуляции утроенного тока нулевой последовательности в обмотках, соединенных в треугольник. Это может привести к их перегрузке.

Батареи конденсаторов. Дополнительные потери энергии в конденсаторах определяются выражением

$$\delta P = \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_0 \omega C n U_n^2, \quad (6.7.)$$

Где ΔP_0 - удельные потери на основной частоте; C – емкость конденсатора; U_n напряжение n -й гармоники.

Эти потери приводят к дополнительному нагреву конденсаторов. В общем случае конденсаторы проектируются так, чтобы допускать определенную токовую перегрузку. Конденсаторы, выпускаемые в Великобритании, допускают перегрузку 15%, в Европе и Австралии – 30%, в США – 80%, в РФ - 30%. При превышении этих значений, наблюдающихся в условиях повышенных гармоник напряжения на вводах конденсаторов, последние перегреваются и выходят из строя.

6.3.4. Устройства релейной защиты в энергосистемах

Гармоники могут нарушать работу устройств защиты или ухудшать их характеристики. Характер нарушения зависит от принципа работы устройства. Цифровые реле и алгоритмы, основанные на анализе выборки данных или точки пересечения нуля, особенно чувствительны к гармоникам.

Для электромеханических реле в большинстве случаев изменения характеристик несущественны. Испытания показали, что большинство типов реле нормально работает при коэффициенте искажения до 20 %. Однако увеличение доли мощных преобразователей в сетях может в будущем изменить ситуацию.

Проблемы, возникающие из-за гармоник, различны для нормальных и аварийных режимов и ниже рассмотрены отдельно.

Влияние гармоник в аварийных режимах. Устройство защиты обычно реагирует на напряжение или ток основной частоты, а все гармоники в переходном режиме либо отфильтровываются, либо не оказывают воздействие на устройство. Последнее характерно для электромеханических

реле, особенно используемых в максимальной токовой защите. Эти реле имеют большую инерцию, что делает их практически нечувствительными к высшим гармоникам.

Более существенным оказывается влияние гармоник на работу защиты, основанной на измерении сопротивлений. Дистанционная защита, основанная на измерении сопротивлений на основной частоте, может давать существенные ошибки в случае наличия в токе КЗ высших гармоник (особенно 3-го порядка). Большое содержание гармоник обычно наблюдается в случаях, когда ток КЗ течет через землю (сопротивление земли доминирует в общем сопротивлении контура). Если гармоники не отфильтровываются, вероятность ложной работы весьма велика.

В случае металлического КЗ в токе и напряжении преобладает основная частота. Однако в связи с насыщением трансформатора тока возникает вторичное искажение кривой, особенно в случае большой апериодической составляющей в первичном токе. В этих случаях также возникают проблемы обеспечения нормальной работы защиты.

В установившихся режимах работы нелинейность, связанная с перевозбуждением трансформатора тока, вызывает только гармоники нечетного порядка. В переходных режимах могут возникнуть любые гармоники, причем наибольшие амплитуды имеют обычно вторая и третья.

Однако, все эти проблемы являются проблемами правильного проектирования. Правильный выбор оборудования устраняет множество трудностей, связанных с измерительными трансформаторами.

Фильтрация гармоник, особенно в цифровых защитах, наиболее важна для дистанционных защит. Ряд работ, выполненных в области цифровых способов фильтрации, показал, что хотя алгоритмы такой фильтрации частот достаточно сложны, получение нужного результата не представляет особых трудностей.

Влияние гармоник на системы защиты в нормальных режимах работы электрических сетей. Низкая чувствительность устройств защиты к параметрам режима в нормальных условиях обуславливает практическое отсутствие проблем, связанных с гармониками в этих режимах. Исключение составляет проблема, обусловленная включением в сеть мощных трансформаторов, сопровождающимся броском намагничивающего тока. На практике высокое содержание высших гармоник в намагничивающем токе трансформатора в большинстве случаев используется для блокировки отключения выключателей высокого напряжения защитой трансформатора, несмотря на исключительно высокий пик намагничивающего тока.

Амплитуда тока зависит от индуктивности трансформатора, сопротивления обмотки и момента времени, в который происходит включение. Остаточный поток в воздушном зазоре в момент перед включением несколько увеличивает или уменьшает трудности в зависимости от полярности потока по отношению к начальному значению мгновенного

напряжения. Так как ток на вторичной стороне во время намагничивания отсутствует, большой первичный ток может вызвать ложное срабатывание дифференциальной защиты.

Наиболее простым способом является использование задержки времени, однако это может привести к серьезному повреждению трансформатора, если авария произойдет во время его включения. На практике нехарактерную для сетей вторую гармонику, присутствующую в токе включения, используют для блокировки защиты, хотя защита остается достаточно чувствительной к внутренним повреждениям трансформатора во время включения.

6.3.5 оборудование потребителей

Телевизоры. Гармоники, увеличивающие пик напряжения, могут вызвать искажения изображения и изменение яркости.

Флюоресцентные и ртутные лампы. Балластные устройства этих ламп иногда содержат конденсаторы, и при определенных условиях может возникнуть резонанс, приводящий к выходу ламп из строя.

Компьютеры. Существуют пределы на допустимые уровни искажений в сетях, питающих компьютеры и системы обработки данных. В некоторых случаях они выражаются в процентах от номинального напряжения (например, для компьютера Honeywell DEC - 3 %, IBM — 5 %) либо в виде отношения пика напряжения к действующему значению.

Преобразовательное оборудование. Провалы на синусоиде напряжения, возникающие во время коммутации вентилях, могут влиять на синхронизацию другого подобного оборудования или устройств, управление которыми осуществляется в момент перехода кривой напряжения нулевого значения.

Оборудование с регулируемой тиристорами частотой вращения. Теоретически гармоники могут влиять на такое оборудование несколькими способами: провалы на синусоиде напряжения вызывают неправильную работу из-за пропусков зажигания тиристоров; гармоники напряжения могут вызвать зажигание не в требуемый момент; резонанс между различными типами оборудования может привести к перенапряжениям и качаниям машин.

Описанные выше воздействия могут ощущаться и другими потребителями, присоединенными к той же сети. Если потребитель не испытывает затруднений с тиристорно управляемым оборудованием в своих сетях, он вряд ли окажет влияние на других потребителей. Потребители, питающиеся от разных шин, теоретически могут влиять друг на друга, однако электрическая удаленность снижает вероятность такого взаимодействия.

6.3.6. Влияние гармоник на измерение мощности и энергии

Измерительные приборы калибруются при чисто синусоидальном токе и напряжении, поэтому при их использовании для измерения мощности при искаженных токах и напряжениях они могут давать погрешности сверх нормированных.

Значение и направление гармонических искажений (вторичной мощности) важны для коммерческих расчетов за электроэнергию, так как знак погрешности определяется направлением вторичной мощности. Исследования показали, что погрешности измерений, вызванной высшими гармониками, варьируется в широких пределах и возможны как положительные, так и отрицательные погрешности.

Наиболее распространенным прибором для измерения энергии является индукционный счетчик электромагнитной системы, вращающие и тормозящие магнитные потоки которой действуют на ротор счетчика, создавая результирующий момент вращения. В счетчике предусмотрены специальные элементы, создающие вторичные потоки и позволяющие увеличить точность измерения и скомпенсировать момент трения регистрирующего механизма. Эти элементы, создающие первичный и вторичный моменты, обычно нелинейны по отношению как к амплитуде, так и к частоте. Нелинейные элементы включают в себя токовые и напряженческие части, перегрузочные магнитные шунты и частотно-чувствительные элементы, такие, как диск, квадратурный и антифрикционный контуры.

Восприимчивость счетчика к частотам, находящимся за пределами расчетных параметров, невелика.

Исследования показали, что обычно индукционные счетчики завышают мощность, потребляемую преобразователями, на несколько процентов (были отмечены случаи до 6 %) в основном вследствие слабого демпфирования в интервалы отсутствия тока. Такие потребители оказываются автоматически наказанными за внесение искажений в сеть, поэтому в их собственных интересах установка соответствующих средств для подавления гармоник. Повышенные показания счетчиков хорошо компенсируют добавочные потери мощности в сети энергосистемы, вызываемые гармониками.

Количественных данных о влиянии гармоник на точность измерения максимума нагрузки нет, однако предположительно оно такое же, как и на точность измерения энергии. Точное измерение энергии независимо от формы кривых тока и напряжения обеспечивается электронными счетчиками, имеющими более высокую стоимость.

Гармоники оказывают воздействие и на точность измерения реактивной мощности, которая точно определена лишь для случая синусоидальных токов и напряжений, и на точность измерения коэффициента мощности.

Редко упоминается влияние гармоник на точность поверки и калибровки приборов в лабораториях, хотя эта сторона вопроса также важна.

6.4. Ограничение уровней гармоник напряжений и токов

В электрических системах фильтры применяются прежде всего для того, чтобы уменьшить амплитуду токов или напряжений одной или нескольких фиксированных частот (параллельные фильтры).

Когда же необходимо избежать проникновения токов определенной частоты в отдельные узлы преобразовательной подстанции или части энергетической системы (как, например, в случае пульсации управляющих сигналов), можно использовать последовательный фильтр, состоящий из параллельно включенных конденсатора и катушки индуктивности, создающих большое сопротивление протеканию тока на выбранной частоте. Однако такое решение не может быть применено для ограничения уровня напряжений гармоник самого источника, поскольку генерация гармоник нелинейными элементами подстанции (например, трансформаторами и статическими преобразователями) является неотъемлемой чертой их нормальной работы.

Что касается самих статических преобразователей, то обычно в них приняты меры к ограничению проникновения гармоник тока в систему с помощью создания короткозамкнутого пути с малым сопротивлением для гармонических частот. В принципе возможно создание комбинированных последовательных и параллельных фильтров для минимизации тока и напряжения гармоник, однако для этого необходимы большие затраты.

Фильтры. Параллельный фильтр настроен на определенную частоту, если на этой частоте его индуктивное и емкостное сопротивления равны.

Добротность фильтра Q определяет точность его настройки. Фильтр с высокой добротностью (от 30 до 60) настраивается строго на одну из гармонических частот (например, пятую). Фильтр же с низкой добротностью имеет малое сопротивление в широком диапазоне частот, особенно в случае, если его уровень добротности не превышает 5.

Если такой фильтр используется для подавления гармоник высоких порядков (например, свыше 17-й), то его можно рассматривать и как фильтр верхних частот. На рис. 6.3 и 6.4 представлены основные схемы фильтров и соответствующие зависимости сопротивления от частоты.

Для настроенного фильтра Q определяется как отношение индуктивного (или емкостного) сопротивления при резонансе к активному сопротивлению:

Как показано на рис. 6.3, б полоса пропускания частот фильтра P ограничена частотой, на которой реактивное сопротивление фильтра равно его активному сопротивлению (т.е. угол полного сопротивления равен 45°) и частотой, на которой модуль полного сопротивления равен $\sqrt{2}R$.

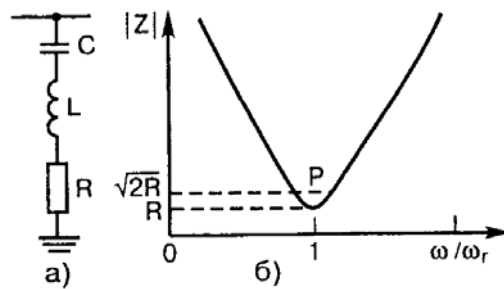


Рис. 6.3. Схема параллельного фильтра, настроенного на одну частоту (а) и зависимость его полного сопротивления Z от частоты (б)

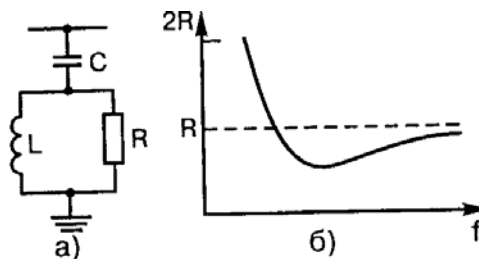


Рис. 6.4. Схема параллельного фильтра второго порядка подавления частот (а) и зависимость его полного сопротивления R от частоты (б)

Добротность фильтра связана с шириной его полосы пропускания следующим соотношением:

$$Q = \omega_n / P, \quad (6.8)$$

где ω_n настроенная угловая частота, рад/с.

Точность настройки фильтра подавления высоких частот обратна добротности настроенных фильтров.

Степень несоответствия настройки фильтра номинальной настроенной частоте характеризуется коэффициентом d , учитывающим изменения основной (питающей) частоты, изменения емкости и индуктивности фильтра, вызываемые старением деталей фильтра и колебаниями температуры, а также собственную расстройку фильтра, связанную с промышленными допусками при его изготовлении и конечностью шагов настройки.

Общая расстройка фильтра на единицу номинальной настроенной частоты

$$\delta = (\omega - \omega_n) / \omega_n \quad (6.9)$$

Кроме того, изменение L или C , скажем, на 2% вызывает такую же расстройку фильтра, как и изменение частоты системы на 1%. Следовательно, δ можно представить и в виде

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad (6.10)$$

Мощность фильтра определяется по реактивной мощности, генерируемой фильтром на основной частоте. Эта мощность почти в точности равна реактивной мощности основной частоты, генерируемой конденсаторами. Суммарная же мощность ветвей фильтра определяется требованиями по реактивной мощности, предъявляемыми к источнику гармоник, и тем, в какой степени эти требования могут быть удовлетворены за счет сети переменного тока.

Идеальным критерием разработки фильтра является подавление всех искажений формы напряжения, в том числе и телефонных помех, являющихся самыми сложными для подавления. Однако идеальный критерий нереален как с технической, так и с экономической стороны. С технической точки зрения очень трудно предварительно оценить проникновение гармоник в сеть переменного тока. С экономической стороны уменьшение телефонных помех может быть получено с меньшими затратами, если принять некоторые предварительные меры в телефонных системах и в энергетической системе в целом.

Более реальный критерий предполагает уменьшение искажений до допустимого уровня в точке общего соединения нескольких потребителей и использует или гармонический ток, или гармоническое напряжение, или то и другое. Критерий, основанный на гармониках напряжения, более удобен для разработки фильтров, так как сопротивление сети переменного тока постоянно меняется и проще гарантировать работу фильтра в определенном диапазоне напряжений, чем значение рабочего тока.

Для того чтобы учесть требуемые гармонические ограничения, при разработке фильтров необходимо следовать следующей схеме:

- в цепь, состоящую из фильтров, параллельно соединенных с электрической системой переменного тока (рис. 6.5) вводится спектр гармоник тока, генерируемого нелинейной нагрузкой на соответствующих частотах, и рассчитываются гармоники напряжения;
- результаты, полученные после выполнения предыдущего пункта, используются для определения других характеристик, таких, как искажение напряжения, коэффициенты влияния на линии связи и другие;
- рассчитываются напряжения на элементах фильтра (конденсаторах, катушках индуктивности, резисторах) и их параметры и потери энергии в них.

Особое внимание при разработке фильтров требуется уделить трем элементам: источнику тока, проводимостям фильтра и системы.

В зависимости от нагрузки, а для случая статического преобразователя и от углов зажигания, будет меняться характеристика источника тока. После того как будут изучены проводимости фильтра и системы, потребуется рассчитать для каждой частоты минимальное значение общей эквивалентной проводимости, дающей максимальное искажение напряжения.

Определив схему соединения конкретного фильтра, можно построить геометрическое место точек, соответствующее сопротивлению (проводимости) фильтра. Гораздо труднее построить кривую, соответствующую сопротивлению источника тока даже с малой точностью.

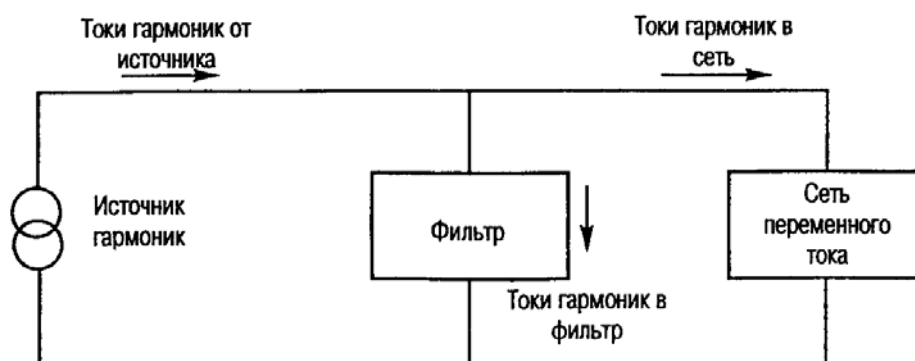


Рис. 6.5. Схема определения коэффициента искажения напряжения

Разработанный фильтр представляет собой однополюсную схему, способную гасить весь спектр пропускаемых гармоник (пример, для случая шестипульсного преобразователя гармоник начиная с пятой). Однако требуемая для осуществления этой цели емкость фильтра очень велика, и гораздо экономичнее подавлять гармоники малых порядков с помощью одноплечевого настроенного фильтра.

Настроенные фильтры. Фильтр одной частоты представляет собой последовательную RLC -цепочку (рис. 6.3, *a*), настроенную на частоту одной гармоники (обычно канонической гармоники малого порядка). Полное сопротивление такого фильтра

$$Z_{\phi} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (6.11)$$

на резонансной частоте f_n уменьшается до чисто активного сопротивления R .

Фильтры двойной настройки. При соответствующем выборе параметров вместо двух одночастотных фильтров (рис. 6.6, *a*) применяется фильтр двойной настройки. В районе резонансных частот сопротивления двух одночастотных фильтров практически равны сопротивлениям схемы фильтра, настроенного на две частоты (рис. 6.6, *b*).

Эта схема имеет преимущество по сравнению с одночастотными фильтрами, так как позволяет существенно снизить потери энергии на основной частоте. Основным же достоинством фильтра, настроенного на две частоты, является большее рабочее напряжение. Это связано с тем, что можно уменьшить число катушек индуктивностей, находящихся под полным линейным напряжением.

В качестве примера на рис. 6.6,в приведены эквивалентные сопротивления фильтров с двойной настройкой, используемых на подстанции Эчинген передачи энергии через Ла-Манш.

В принципе возможно создание фильтров, настроенных на три и четыре частоты, но в этом редко бывает необходимость, так как подобные фильтры требуют сложной настройки.

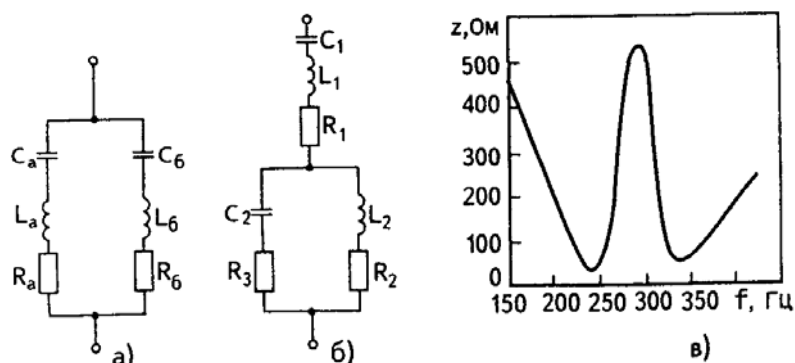


Рис. 6.6. Одночастотный фильтр (а), фильтр двойной настройки (б) и расчетная зависимость сопротивления от частоты фильтра пятой и седьмой гармоник на подстанции Эчинген (в)

Фильтры с автоматической настройкой. При разработке настроенных фильтров желательно уменьшить максимальное отклонение частоты. Этого можно добиться применяя настройку фильтра с помощью автоматического регулирования емкости или изменения индуктивности. Обычно считается приемлемой регулировка $\pm 5\%$. В преобразователях постоянного тока использовалась система управления, измеряющая реактивную мощность гармонической частоты в фильтре и изменяющая значение L или C в зависимости от ее знака и значения.

По сравнению с фильтрами с фиксированной настройкой автоматически настраиваемые фильтры имеют ряд преимуществ:

- имеют меньшую емкость конденсаторов;
- применяемые конденсаторы могут иметь одновременно и большой температурный коэффициент емкости, и большую реактивную мощность в расчете на единицу массы и единицу стоимости;
- из-за большой добротности потери мощности меньше. Первые два преимущества позволяют снизить стоимость конденсаторов - наиболее дорогих элементов фильтра. Второе преимущество снижает стоимость резисторов и стоимость потерянной энергии.

Широкополосные фильтры. Широкополосный фильтр имеет следующие достоинства:

- меньшая чувствительность к изменениям температуры, отклонениям частоты, промышленным допускам при изготовлении элементов, потерям в емкостных элементах и т.п.;

- малое сопротивление широкому спектру гармоник, отсутствие необходимости разбивки фильтра на параллельные ветви, вызывающей затруднения при переключениях и обслуживании;

- удобство применения в случае, если использование настроенных фильтров вызывает появление резонанса токов между проводимостями фильтра и системы на частотах гармоник, меньших нижней частоты настроенного фильтра, или на частотах гармоник, лежащих между настроенными частотами.

Основными недостатками широкополосных фильтров являются:

- для получения одинакового уровня фильтрации широкополосные фильтры должны быть рассчитаны на более высокую мощность, хотя в большинстве случаев хорошая работа фильтра осуществляется в диапазоне, требующемся для регулировки коэффициента мощности;

- потери энергии в резисторе и в катушке индуктивности гораздо выше.

Типы широкополосных фильтров. На рис. 6.7 показаны четыре типа гасящих фильтров: первого, второго, третьего порядков и С-типа.

Фильтр первого порядка применяется редко, так как для него требуется конденсатор большой мощности, а потери на основной частоте велики.

Фильтр второго порядка удобен в эксплуатации, но потери на основной частоте по сравнению с фильтром третьего порядка велики.

Основным достоинством фильтра третьего порядка являются его малые потери энергии на основной частоте (по сравнению с фильтром второго порядка), связанные с увеличением полного сопротивления на этой частоте, вызванным наличием конденсатора C_2 . Емкость C_2 много меньше емкости C_1 . По своей работе фильтр С-типа занимает положение между фильтрами второго и третьего порядка.

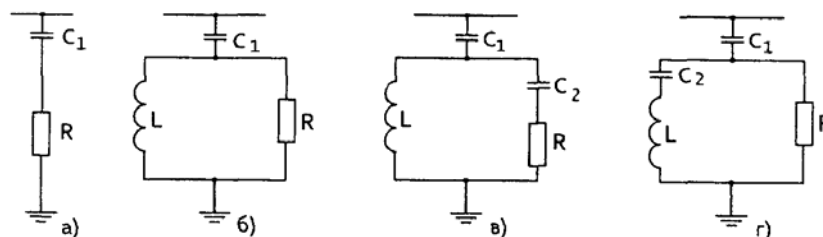


Рис. 6.7. Широкополосные высокочастотные фильтры:

а) первого порядка; б) второго порядка; в) третьего порядка; г) С-типа

Основным его преимуществом является существенно меньшие потери на основной частоте из-за того, что на этой частоте C_2 и L последовательно

настроены. Такие фильтры наиболее чувствительны к изменениям основной частоты и отклонениям параметров элементов.

Схемы фильтров. Обычно мощные статические преобразователи проектируются на работу по крайней мере с 12-пульсным циклом. Однако очень часто по условиям эксплуатации или из-за временных сбоев в работе допускается 6-пульсная работа преобразователя. В этих условиях преобразователь генерирует дополнительно к каноническим гармоникам 12-пульсного режима гармоники пятого и седьмого порядка. Эти гармоники отфильтровываются с помощью специальной схемы, состоящей из настроенных фильтров для гармоник малых порядков (5, 7, 11 и 13-го) и высокочастотного гасящего фильтра для гармоник 17-го и более высоких порядков, рис. 6.8.

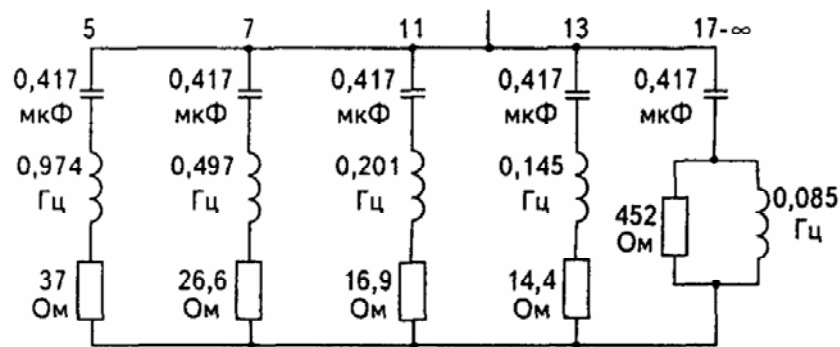


Рис. 6.8. Фильтр переменного тока

Полосовая фильтрация для 12-пульсных преобразователей. Установка на преобразовательной подстанции настроенных фильтров резонанса напряжений для 11- и 13-й гармоник и высокочастотных фильтров для гармоник более высоких порядков обычно приводит к более сильному, чем это требуется, подавлению гармоник.

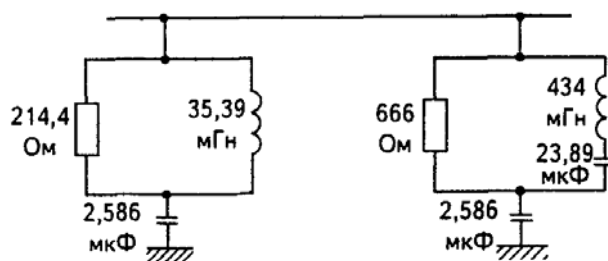


Рис. 6.9. Смешанный фильтр второго порядка и С-типа

Это связано с тем, что минимальная мощность фильтра обычно определяется наименьшей емкостью конденсаторов, допустимой с точки зрения экономики, и минимальной реактивной мощностью, генерируемой преобразователем.

Таким образом, схема фильтрации может быть упрощена либо заменой настроенных фильтров 11-й и 13-й гармоник на один гасящий фильтр, либо заменой на такой фильтр всех фильтров схемы. В первом случае гасящий фильтр, заменяющий два настроенных фильтра, должен быть настроен приблизительно на 12-ю гармонику, при этом его добротность будет достаточно большой (20 - 50), в то время как добротность гасящего фильтра высших гармоник гораздо меньшей (2 - 4). Во втором случае гасящий фильтр также настраивается на 12-ю гармонику, но для обеспечения достаточно низкого сопротивления для больших гармоник добротность выбирается относительно малой (2 - 6).

В создаваемых в настоящее время мощных преобразовательных схемах высокого напряжения велика вероятность резонанса гармоник малых порядков между полным сопротивлением системы и емкостным сопротивлением фильтра.

В зависимости от того, что является источником гармоник малых порядков - система переменного тока или преобразователь, могут наблюдаться резонанс напряжений и резонанс токов. Из-за несимметрии системы преобразователь генерирует существенную третью гармонику тока. Эти гармоники имеют прямую последовательность чередования фаз и, следовательно, не поглощаются обмоткой трансформатора, соединенной в треугольник.

Для исключения появления резонанса на малых частотах была предложена другая схема фильтрации, состоящая из фильтра С-типа и фильтра второго порядка (рис. 6.9).

7. ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ И ТЕХНОГЕННОЕ ВЛИЯНИЕ ПОЛЕЙ

7.1. Экологические аспекты электромагнитной совместимости

7.1.1. Роль электрических процессов в функционировании живых организмов

Живые организмы, включая организм человека, представляют собой исключительно сложные системы, функционирование которых обеспечивается разнообразными процессами - физическими, химическими, биологическими, регулирующими внутренние условия функционирования живых организмов, их воспроизводство, мыслительную деятельность человека и многое другое. В основе реализации этих процессов лежат электрические явления на молекулярном и клеточном уровнях.

По структуре живой организм, как правило, состоит из совокупности клеточных тканей, образующих мышечную, кровеносную, лимфатическую, нервную и иные системы. Внутренняя среда организма является электропроводящей. В ней, представляющей собой водные электролиты, осуществляется транспорт ионов, молекул, циркулируют электрические токи, которыми возбуждаются, определяются и регулируются все жизненно важные процессы. Токи возбуждаются электрическими полями, создаваемыми ионами, концентрация которых зависит от вида химических реакций, протекающих в организме, вида и скорости обменных процессов и т.д.

Следует отметить ключевую роль электрических процессов и в двигательных функциях мышечных тканей. В них на заключительном этапе сложных биохимических процессов осуществляется преобразование энергии электрического поля в механическую работу.

Нормальное функционирование клеток организма связано с обменом веществ через мембраны. Обмен осуществляется путем открытия каналов в мембране, через которые проходят ионы натрия, кальция, хлора и других элементов. Открытие каналов происходит за счет электростатических сил, действующих на белковые молекулы мембраны, при изменениях напряжения между стенками мембраны вследствие различия концентраций ионов внутри и снаружи клетки. Изменения концентрации ионов снаружи клетки и возникновение потенциала действия являются неотъемлемыми элементами механизмов электрохимической передачи информации по тканям. В спокойном состоянии напряжение составляет примерно 80 мВ. Для того чтобы каналы мембраны оказались прозрачными для ионов натрия, достаточно уменьшить напряжение на 20 мВ. С учетом электропроводности и структуры нервных тканей этому состоянию соответствуют усредненные напряженность электрического поля в организме человека 40 В/м и плотность тока 4 А/м². Если внутри тела человека искусственно создать указанные поле или плотность тока, то будут нарушены естественные

процессы функционирования органов, например, наступит паралич нервных тканей или нарушится ритм сокращений сердечной мышцы. Таким образом, указанные значения напряженности поля или плотности тока являются, безусловно опасными.

Поле внутри тела может быть создано как при непосредственном касании человеком токоведущих частей, так и за счет протекания по телу токов смещения, если человек находится в переменном электрическом поле, или в поле индуктированных токов при нахождении в переменном магнитном поле. Указанной напряженности поля или плотности тока внутри тела соответствует напряженность внешнего электрического поля промышленной частоты 100 МВ/м или магнитного поля примерно 1 МА/м. Следует отметить, что ни магнитные, ни электрические поля указанной напряженности на практике не встречаются и случаев непосредственного поражения человека магнитным или электрическим полем промышленной частоты не зарегистрировано.

Однако правоверен вопрос, при каких напряженностях внешних полей, возможно негативное или позитивное влияние на человека электромагнитных возмущений, создаваемых электрическими, электронными и иными приборами, в которых используется электрическая энергия. В организме человека при нахождении в электрическом, магнитном или электромагнитном внешних полях, индуктируются токи, накладывающиеся на собственные биотоки, в результате чего могут измениться естественные процессы или возникнуть новые явления.

Постоянные внешние электрические поля не могут вызвать токов в организме. Единственным следствием воздействия таких полей может быть возникновение электрических зарядов на поверхности тела. Постоянные магнитные поля проникают внутрь организма без изменения, так как в организме отсутствуют ферро- или диамагнитные образования.

Переменные электрические и магнитные поля вызывают соответственно токи смещения и индуктированные токи. Для оценки возможного влияния этих токов на организм необходимо сопоставить их амплитуды и частоты с аналогичными параметрами естественных биотоков.

Электромагнитные поля высокой частоты также способны индуктировать токи в организме. Появление этих токов, безусловно, является новым, влияющим на процессы в организме, фактором, так как в естественных условиях высокочастотные токи в организме отсутствуют.

Поскольку электрические, магнитные и электромагнитные поля становятся все более сильным фактором искажения окружающей среды и достоверно известны некоторые конкретные механизмы воздействия полей на человека, в зарубежной печати появилось новое определение этому явлению — электросмог. В загрязнение окружающего пространства электрическими и магнитными полями промышленной частоты основной вклад вносят объекты электроэнергетики, в первую очередь линии элек-

тропередачи и подстанции высокого напряжения, электрифицированный транспорт, мощные промышленные установки, а также разнообразные бытовые электроприборы.

Проблема электромагнитной обстановки как фактора негативного влияния на самочувствие и здоровье человека привлекает все большее внимание общественности, причем часто опасность преувеличивается из-за недостатка знаний в этом вопросе либо по конъюнктурным соображениям, таким как стремление найти рынки сбыта устройств для измерения параметров полей или устройств и методов ослабления напряженности полей.

В связи с развитием электроэнергетики, с непрерывно расширяющимся применением мощных электротехнических и электронных устройств на производстве, транспорте и в быту искажения электромагнитной обстановки становятся все более заметным, а напряженности электрических и магнитных полей на рабочих местах, например, на объектах электроэнергетики, могут существенно превышать значения естественных полей. Изучению влияния электромагнитной обстановки на состояние здоровья человека в последние годы придается большое значение. Оно обусловлено, в частности, появлением сообщений о повышенном риске раковых заболеваний у людей, длительно проживающих вблизи линий электропередачи высокого напряжения, что связывается с влиянием на организм человека магнитного поля, создаваемого токами в проводах линий; жалобами персонала объектов электроэнергетики напряжением выше 220 кВ на ухудшение самочувствия при длительном воздействии электрических и магнитных полей промышленной частоты на рабочих местах и т.п.

Как в научных трудах, так и в средствах массовой информации все чаще появляются сенсационные материалы об опасности для здоровья электрических, магнитных и электромагнитных полей, в том числе и слабых, но длительно действующих. Например, появляются безосновательные утверждения, что опасной для человека границей является напряженность магнитного поля промышленной частоты 0,16 А/м при нормированной за рубежом напряженности 80 А/м и более. Как правило, фактическая база таких утверждений оказывается недостоверной. Однако интерес к этой проблеме не ослабевает, так как существует вероятность недооценки опасного влияния полей на здоровье и повторения ситуации, сходная с той, которая складывалась при недооценке опасности ионизирующих излучений.

Упомянутые проблемы находятся в поле зрения многих международных организаций, таких как Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ), Международная электротехническая комиссия (МЭК), Международная ассоциация по защите от ионизирующих излучений (IRPA), Европейский комитет по нормированию в области электротехники (CENELEC), Комиссии европейского союза (CEU), национальные комиссии и т.д., занимающиеся вопросами нормирования воздействующих на персонал

и население электрических, магнитных и электромагнитных полей, включая поля промышленной частоты.

Согласно многочисленным исследованиям воздействия полей на человека неопасной считается плотность тока в организме $\sim 10 \text{ мА/м}^2$, что соответствует при частоте 50 Гц напряженности внешних полей 20 кВ/м и 4 кА/м. При больших плотностях наблюдаются такие последствия, как обратимые изменения скорости синтеза протеинов и ДНК, нарушения ионного равновесия, концентрации промежуточных продуктов обмена и активных веществ в клетках, изменения процессов деления клеток и т.п. При плотностях тока 100—1000 мА/м^2 могут происходить сильные возбуждения клеток и тканей, центральной нервной системы, возникают болевые ощущения, а при больших плотностях тока возможны аритмия и фибрилляция сердца. Интересно отметить, что напряженность полей, кратковременно создаваемых приборами электротерапии в организме человека, как правило, выше границы восприимчивости (ощущения человеком наличия поля), а при работе дефибриллятора в сердечной мышце создается импульсное поле напряженностью $\sim 600 \text{ В/м}$, что соответствует плотности тока $\sim 60 \text{ А/м}^2$. Таким образом, следует четко различать возможные негативные или позитивные последствия электрических и магнитных полей в зависимости от их напряженности и экспозиции

Плотность тока $\sim 10 \text{ мА/м}^2$ в теле человека считается уровнем естественных биотоков. Все клетки нормально функционируют при такой плотности тока. Частоты биотоков, как правило, лежат в диапазоне 4—1000 Гц. Регистрация сигналов, связанных с биотоками (электрокардиограммы, энцефалограммы) является эффективным средством диагностики состояния организма человека.

Более удобным для пользования является не плотность тока, а ток, протекающий через тело по направлению рука-рука. Безопасный для человека ток зависит от времени его воздействия. Согласно ГОСТ 12.1.038 эти зависимости для производственных и бытовых условий приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1.

Предельно допустимые токи через тело человека в зависимости от времени протекания при частоте 50 Гц, мА

Условия	Время протекания, с											
	0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	>1,0
Производственные	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50	6
Бытовые	220	200	100	70	55	50	40	35	30	27	25	2

Используя эти нормированные токи, можно оценить внешние поля, которые создают указанные в табл. 7.1. токи. Такие оценки, как уже отмечалось, при времени воздействия более 1 с дают значения 25 кВ/м и 4

кА/м. При сокращении времени воздействия предельно допустимые напряженности полей возрастают примерно на 2 порядка, при этом напряженность электрического поля становится выше напряженности, при которой произойдет электрический пробой по воздуху вдоль тела человека. Вероятно, этим объясняются случаи разряда генератора импульсных напряжений в лабораториях на человека, не приводящих к летальному исходу

Учитывая важную роль электрических процессов в функционировании организма человека, возможное влияние на организм внешних полей, создаваемых электрическими и электроэнергетическими устройствами, далее рассмотрим электромагнитную обстановку, окружающую человека на производстве и в быту, механизмы воздействия полей на организм, а также некоторые вопросы нормирования допустимых напряженностей.

7.1.2. Электромагнитная обстановка на рабочих местах и в быту

Электромагнитная обстановка характеризуется напряженностями электрического и магнитного полей. При высоких частотах речь может идти о воздействии электромагнитного поля, при этом наибольший интерес представляет воздействие плоской электромагнитной волны, при которой плотности энергии электрической и магнитной составляющих равны.

Подразделяют естественную электромагнитную обстановку и обстановку от электрических, электроэнергетических и иных, созданных человеком устройств, в которых используется электрическая энергия. Поля естественного и искусственного происхождения накладываются друг на друга, векторы напряженностей суммируются.

Естественное электрическое поле Земли обусловлено отрицательным избыточным зарядом поверхности и составляет на открытой местности примерно 100-500 В/м, (см. заштрихованную область в левой части рис. 14.1). При наличии грозового облака напряженность поля может возрасти до нескольких десятков и даже сотен кВ/м, менять направление, а при грозовых разрядах возникают импульсы электромагнитного поля.

Сильные электрические поля промышленной частоты в основном создаются объектами электроэнергетики (линии электропередачи высокого напряжения).



Рис. 7.1. Характерные напряженности электрических и магнитных полей промышленной частоты

Здания экранируют постоянное электрическое поле Земли и электрическое поле промышленной частоты, созданное линиями электропередачи высокого напряжения и иными объектами. Внутри зданий постоянное электрическое поле как естественного, так и искусственного происхождения определяется, в основном, наличием электризующихся природных и синтетических материалов, являющихся основой для покрытий полов, мебели, одежды, обуви и т.д. Напряженность электростатического поля в помещении может достигать десятков и сотен кВ/м. При разрядах статического электричества наблюдаются электромагнитные импульсы с очень высокой крутизной. Возникают сильные электрические поля вблизи некоторых приборов, не имеющих специальной защиты и использующих высокое постоянное напряжение (телевизоры, мониторы, осциллографы и т.д.).

Постоянное магнитное поле Земли создается токами внутри нее. Оно ориентировано относительно магнитных полюсов. Напряженность магнитного поля зависит от географических координат и составляет 55,7 А/м у магнитных полюсов и 33,4 А/м у магнитного экватора, где вектор напряженности параллелен поверхности Земли. В средних широтах напряженность составляет примерно 40 А/м. Значения напряженности постоянного магнитного поля Земли лежат в пределах заштрихованной зоны в правой части рис. 7.1. На постоянное поле накладывается медленно изменяющееся геомагнитное поле, порожденное токами в магнитосфере и ионосфере, содержащее широкий спектр частот, в том числе и низкочастотную (до 100 Гц) составляющую напряженности до 0,1 А/м. Во время магнитных бурь, причиной которых являются процессы усиления солнечной активности, амплитуда низкочастотной составляющей многократно возрастает.

Геомагнитные постоянные и низкочастотные поля, в отличие от электрических, не экранируются стенами зданий и другими объектами, за

исключением изготовленных из ферромагнитных материалов. Внутри зданий, имеющих стальной каркас, напряженность геомагнитного поля снижается в несколько раз.

Представление о типичных напряженностях электрического и магнитного полей на объектах электроэнергетики дают рис. 7.1. и табл. 7.2. В таблице приведены граничные значения напряженностей, воспринимаемых человеком, вызывающих нарушение ритма сокращений сердечной мышцы; напряженность электрического поля, приводящая к пробоям воздушных промежутков, а также некоторые нормированные напряженности по данным ВОЗ, IRPA и DIN VDE (немецкие промышленные нормы Союза немецких электротехников).

Таблица 7.2.

Электромагнитная обстановка на объектах электроэнергетики

Наименование объекта или параметра	Напряженность электрического поля, В/м	Напряженность магнитного поля, А/м
ОРУ 500, 750 кВ	$103 - 5 \cdot 10^4$	10-100
ВЛ 380 кВ	$103 \cdot 10^4$	1-40
ВЛ 330 кВ	$103 \cdot 5 \cdot 10^3$	10-100
ВЛ-110	$102 \cdot 3 \cdot 10^3$	0,1-20

Как видно из рис. 7.1 и табл. 7.2, сильные электрические поля промышленной частоты в основном создаются объектами электроэнергетики (линии электропередачи высокого напряжения, сборные шины подстанций, трансформаторы и аппараты высокого напряжения). В остальных случаях электрические поля имеют относительно невысокие напряженности. Некоторое представление о напряженности таких полей дает рис. 7.1, где приведены усредненные данные, полученные в результате анализа многочисленных отечественных и зарубежных публикаций, а также непосредственных измерений под воздушными линиями электропередачи (ВЛ) и на открытых распределительных устройствах (ОРУ) 500 и 750 кВ.

Напряженность вблизи ВЛ 220 кВ и выше может достигать границы индивидуальной восприимчивости поля, когда человек по косвенным признакам (шевеление волос, ощущение покалывания при микроразрядах между телом и одеждой и т.д.) может установить наличие поля. Напряженность электрических полей, создаваемых бытовыми электроприборами, проводами систем электропитания, по амплитуде меньше, чем естественная напряженность постоянного поля Земли на открытой местности.

Таким образом, магнитная обстановка внутри помещений в основном определяется постоянным полем Земли, на которое накладываются переменные поля. Амплитуда этих полей может иметь такой же порядок

величин, что и переменная составляющая естественного магнитного поля Земли.

Напряженность магнитного поля промышленной частоты внутри помещений может быть достаточно высокой, если вблизи проходит ВЛ электропередачи, проложены силовочные кабели или расположены мощные электротехнические устройства.

Напряженность поля, созданного ВЛ электропередачи, даже при расстоянии нескольких сотен метров от линии может составлять десятые доли А/м. Кабельные линии создают несколько большие напряженности вблизи них, чем воздушные, однако напряженность уменьшается сильнее при удалении от кабеля, и зона заметного поля (напряженность порядка десятых долей А/м) обычно не превышает нескольких десятков метров. Кабели и ВЛ среднего напряжения (6 - 10 кВ) из-за малого расстояния между фазами создают невысокие напряженности поля, и с их влиянием внутри помещений можно не считаться.

Поле трансформаторов системы электроснабжения изменяется обратно пропорционально расстоянию, и оно может быть заметным на расстоянии менее 10 м. Сети электроснабжения низкого напряжения создают поле, зависящее от несимметрии нагрузки фаз. Его напряженность обратно пропорциональна расстоянию и может быть заметной на расстоянии до 20 м.

В производственных условиях на рабочих местах напряженность магнитного поля промышленной частоты может быть гораздо большей, чем в жилых помещениях. В экстремальных случаях, например вблизи сварочного аппарата, электродуговой печи или непосредственно у проводов мощных ВЛ при выполнении работ под напряжением, персонал может подвергаться воздействию поля напряженностью 1 - 10 кА/м, что на два порядка и более превышает напряженность поля Земли.

Ориентировочные значения напряженности магнитных полей промышленной частоты, создаваемых различными устройствами, показаны в правой части рис. 7.1. Из этого рисунка видно, что напряженность полей, как правило, лежит много ниже порога восприимчивости (например, ощущение магнитного поля по появлению магнитосфенов в форме мерцаний на периферийных участках поля зрения).

Новым фактором, не свойственным естественной обстановке, является появление высокочастотных электромагнитных полей, создаваемых устройствами связи, телекоммуникаций, радиолокационной техники, микроволновыми аппаратами и т.д. Эти поля частично или полностью экранируются проводящими стенами. Обычно напряженности этих полей, воздействующих на человека, малы по сравнению с рассмотренными. Однако, несмотря на это, влияние высокочастотных полей на человека, создаваемых, например, устройствами радиотелефонной связи, в настоящее время является предметом исследований и дискуссий.

В жилых помещениях в зависимости от числа, мощности включенных приборов, схемы и исполнения электропроводки напряженность поля может меняться в широких пределах. При современном исполнении сети электропитания, отсутствии токовых петель, связанных с заземленными системами водопровода, отопления и т.д., она обычно не превышает десятых долей А/м.

Электромагнитная обстановка в жилых помещениях в основном определяется естественным магнитным полем. Напряженность магнитного поля промышленной частоты при включении электроприборов, как правило, не превышает одного процента от напряженности постоянного поля Земли. Напряженность магнитного поля промышленной частоты имеет тот же порядок, что и переменная составляющая естественного магнитного поля Земли. Исключение составляет лишь использование сравнительно мощных электроприборов, находящихся в непосредственной близости от организма (электроодеяло, утюг, фен, электроинструмент и т. д.).

Сказанное означает, что организм человека практически не испытывает неестественного воздействия, и типичное искажение электромагнитной обстановки в быту не может рассматриваться как электросмог.

Однако на рабочих местах и на объектах электроэнергетики напряженности электрического и магнитного полей могут достигать и даже в десятки раз превышать напряженности полей естественного происхождения. Поэтому рассмотрим возможное влияние таких полей на человека.

7.1.3. Механизмы воздействия электрических и магнитных полей на живые организмы

В настоящее время научно установлены два механизма влияния электрических, магнитных и электромагнитных полей на человека за счет индуктированных в теле токов:

- изменение разности потенциалов между наружными и внутренними поверхностями мембран клеток (возникновение так называемого потенциала действия);
- нагрев тканей.

Проявления этих механизмов при воздействии магнитного поля в зависимости от частоты показаны на рис. 7.2. Обстоятельства, связанные с проявлением первого механизма, рассмотрены в разделе 7.1.1. Кроме отмеченных там эффектов существуют более слабые эффекты воздействия электрических и магнитных полей на организм, обусловленные изменением потенциала действия, которые имеют место при меньших, чем указанные в разделе 7.1.1 (на несколько порядков), напряженностях полей. Одним из таких эффектов является восприимчивость поля человеком не только по косвенным признакам (шевелению волос или ощущениям покалывания при частичных разрядах между кожей и одеждой), но и по подсознательному ощущению наличия поля, а также появлению магнито- или электрофосфенов

(ощущению мерцаний на периферийных участках поля зрения) при наличии магнитного или электрического поля определенной напряженности. Восприимчивость полей исключительно индивидуальна. Примерно 5% людей чувствуют наличие электрического поля промышленной частоты, начиная с напряженности 7 кВ/м, а 60% не ощущают поле напряженностью до 20 кВ/м. Усредненные границы восприимчивости электрических и магнитных полей промышленной частоты приведены на рис. 7.1, а граница ощущения наличия магнитного поля в зависимости от частоты дана на рис. 7.2 (кривая 2). Объективно регистрируемые нарушения зрения, недомогание, головные боли наблюдаются при напряженностях около 10^5 А/м (рис. 7.2, кривая 3). У некоторых людей магнитофосфены появляются при напряженностях, соответствующих кривой 1.

Как видно из рис. 7.2, кривые 1 и 2 имеют минимум в области промышленных частот. Возрастание кривых с увеличением частоты объясняется инерционностью системы открытия каналов в стенках клеточных мембран, а с уменьшением частоты - снижением индуктированных токов.

Значения напряженности магнитного и электрического полей, воспринимаемых человеком, лежат, как правило, выше встречающихся в быту и на производстве (рис. 7.1). Если напряженность электрического поля частотой 50 Гц, воспринимаемая человеком, может встречаться на практике, например, под проводами линий электропередачи или на территории ОРУ сверхвысокого напряжения, то соответствующая напряженность магнитного поля может быть получена только в специальных условиях.

Вторым, научно установленным механизмом воздействия полей на организм человека, является нагрев тканей при протекании в них емкостных или индуктированных токов. Считается безопасным для организма нагрев тканей на 1°C , чему соответствует удельная мощность 4 Вт, приходящаяся на 1 кг массы тела. При этой мощности система терморегулирования организма способна обеспечить отвод тепла в окружающее пространство без опасного повышения температуры внутренних органов человека. При частоте 50 Гц напряженность внешнего электрического поля, способная обеспечить тепловую удельную мощность 4 Вт/кг, составляет около 4 МВ/м, т. е. превышает электрическую прочность воздуха. Напряженность магнитного поля, необходимая для выделения указанного тепла в организме, равна ~ 50 МА/м. Таким образом, напряженности электрического или магнитного полей промышленной частоты, способные повысить температуру на безопасное значение, равное примерно 1°C , на много порядков превышают пороговые значения восприимчивости полей человеком и встречающиеся на практике. Ситуация меняется при высоких частотах, так как индуктированные токи с увеличением частоты возрастают. Количественные данные о зависимости напряженности магнитного поля от частоты, при которой удельная мощность

тепла, выделенного внутри организма человека, составляет 4 Вт/кг, приведены на рис. 7.2 (кривая б).

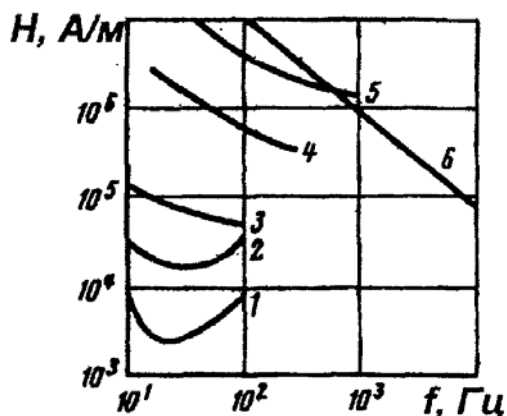


Рис. 7.2. Эффекты воздействия магнитного поля разной частоты на человека:

1- появление мерцания на периферийных участках поля зрения; 2 - ощущение наличия поля; 3 - объективно регистрируемые нарушения зрения, недомогание, головные боли; 4 - нарушение работы сердца; 5 - нарушения работы нервной системы; 6 - джоулев нагрев тканей при мощности 4 Вт/кг

7.2. Нормирование безопасных для человека напряженностей электрических и магнитных полей

14.2.1. Нормативная база за рубежом и в РФ

Во многих странах, включая Россию, идет процесс совершенствования нормирования безопасных для здоровья людей напряженностей электрического и магнитного полей, а также потока мощности высокочастотных полей.

Обоснование норм в последние годы становится все более актуальным. При этом все отчетливее проявляются две тенденции: стремление установить более жесткие нормы, закладывая в них большие коэффициенты запаса и возможности проявления пока научно не установленных механизмов влияния на здоровье, например слабых, но длительно действующих полей промышленной частоты, и стремление оценить реальную опасность полей для здоровья человека и на этой базе пересмотреть существующие и обосновать новые нормы по допустимым напряженностям полей и ограничениям пребывания человека в них.

Проявление этих тенденций тесно связано с экономическими аспектами, так как соблюдение санитарных и строительных норм по допустимым напряженностям полей, обеспечение нормированных зон отчуждения для линий электропередачи высокого напряжения и т.д. сопряжено с большими затратами или экономическими потерями.

Следует заметить, что процесс пересмотра норм по воздействию электрических, магнитных и электромагнитных полей на человека в настоящее время является чрезвычайно динамичным. Нормативные документы за рубежом часто пересматриваются и изменяются, становится иным их правовой статус.

В настоящее время в основу нормирования допустимых напряженностей магнитных и электрических полей положены научно установленные механизмы влияния на организм человека: изменение разности потенциалов на мембранах клеток при частотах ниже 10 кГц и нагрев тканей при более высоких частотах. Соответственно базовыми величинами являются безопасные плотность тока в тканях организма в диапазоне частот 4 - 1000 Гц 10 мА/м^2 , а при частотах выше 10 кГц - удельная энергия 4 Вт/кг. При частоте 50 Гц указанной плотности тока соответствуют напряженности внешних полей 20 кВ/м и 4 кА/м.

При нормировании допустимой напряженности полей и времени их воздействия на рабочих местах и для населения в настоящее время вводят коэффициенты запаса. Так, при тепловом воздействии высокочастотных полей нормы устанавливаются по удельной энергии, в 10 раз меньшей безопасной, т. е. по энергии 0,4 Вт/кг. При низких частотах также устанавливаются коэффициенты запаса от 2,5 до 10 и выше. В нашей стране гигиенические нормы внутри зданий составляют 0,5 кВ/м, напряженность электрического поля на границе отчуждения линий электропередачи не должна превышать 1 кВ/м. Близки к этим значениям и нормы других стран. В США, например, нормированы напряженности электрического поля на границе зоны отчуждения в пределах от 1 кВ/м до 3 кВ/м для различных штатов. В некоторых странах, например в Австралии, в исключительных случаях для линии 500 кВ допускается напряженность на границе зоны отчуждения 5 кВ/м.

Аналогичная ситуация и с нормированием допустимой напряженности магнитного поля промышленной частоты на рабочих местах и для населения. Рекомендации и нормы различных международных организаций и стран, как правило, не согласованы между собой, а приводимые в них значения напряженностей могут отличаться в несколько раз. В некоторых странах, в том числе и в России, нормы для населения по допустимым напряженностям магнитного поля промышленной частоты отсутствуют.

В настоящее время наиболее обоснованными и полными представляются временные нормы ENV50166, предложенные Техническим комитетом CENELEC и действующие с 1995 г. Срок действия этих норм определен в три года, по прошествии которых они должны стать основными нормами EN-50166 или должны быть отозваны.

Остановимся кратко на содержании норм ENV50166. За базисное значение напряженности электрического поля при длительном воздействии приняты: постоянное поле — 42 кВ/м, переменное с частотой (0,1 - 4) Гц - 30 кВ/м (критерий воздействия поля на человека — ощущение поля по косвенным признакам). В диапазоне частот 4—1000 Гц базисным значением считается плотность тока в 10 мА/м^2 , которому соответствуют уже приводимые значения напряженности 20 кВ/м и 4 кА/м. С учетом специфики механизмов изменения разности потенциалов на мембранах клеток при более

низких частотах берется базовая плотность тока, обратно пропорциональная, а при более высоких — прямо пропорциональная частоте.

Базисным значением напряженности постоянного магнитного поля принято значение 1,6 МА/м. Впервые нормирован ток, протекающий через человека при контакте с объектами, находящимися в электрическом поле промышленной частоты: 3,5 мА на рабочих местах и 1,5 мА для населения.

Нормы по напряженности полей промышленной частоты на рабочих местах подразделяются на три категории. Первая категория - 6,1 кВ/м и 159 А/м - обязательна информация персонала о поле; вторая - 12,3 кВ/м, 320 А/м и выше - обязательны мероприятия по ограничению пребывания в поле; третья - 19,6 кВ/м и 480 А/м - обязательно, помимо ограничения пребывания в поле, предупреждение: «опасная работа». Для населения базисные значения берутся в 2,5 раза меньшими, чем на рабочих местах.

Следует отметить, что в области низких частот нормы ENV50166 дают более высокие напряженности полей на рабочих местах, чем прежние нормы IRPA. Вероятно, тенденция ослабления ограничений по напряженностям при нормировании может сохраниться и в дальнейшем, если будет доказано, что опасность вредного влияния полей на человека преувеличена.

Следует остановиться на последних отечественных санитарно-эпидемиологических правилах и нормативах СанПиН 2.2.4.11910S. В них установлены предельно допустимые уровни электромагнитных полей на рабочих местах.

Впервые установлены временные (сроком на 3 года) допустимые уровни ослабления геомагнитного поля в два раза в течение смены.

Предельно допустимые уровни постоянного магнитного поля составляют: при времени воздействия за рабочий день до 10 мин — 24 кА/м; при времени 11- 60 мин - 16 кА/м; при времени воздействия 61- 480 мин - 8 кА/м. Уровень допустимого локально воздействующего поля повышается примерно в 1,5 раза.

Напряженность электрического поля частотой 50 Гц в течение всей смены может составлять 5 кВ/м. При сокращении времени воздействия допустимая напряженность увеличивается (до 20 кВ/м). При напряженности 20 - 25 кВ/м допустимое время пребывания человека в поле составляет 10 мин, а при напряженности выше 25 пребывания человека без применения средств защиты не допускается.

Предельно допустимые уровни напряженностей магнитного поля промышленной частоты, действующего на все тело человека, следующие: при времени пребывания до 1 часа за смену - 1600 А/м; до 2 час - 800 А/м; до 4 час - 400 А/м; до 8 час - 80 А/м.

При локальном воздействии (на конечности) предельно допустимые напряженности увеличиваются в 4-10 раз в зависимости от времени

пребывания в поле. Импульсные поля частоты 50 Гц могут иметь напряженность в зависимости от режима генерации и времени воздействия, от 6000 А/м до 1400 А/м, то есть в несколько раз большую, чем при непрерывном воздействии.

В СанПиН 2.2.4.1191-03 нормированы допустимые напряженности, потоки мощности, экспозиции высокочастотных электромагнитных полей.

7.2.2. Нормирование условий работы персонала и проживания людей в зоне влияния ПС и ВЛ СВН

Исследования показали, что для персонала подстанций и линий СВН, длительно и регулярно находящегося под воздействием электрического поля, допустимые напряженности поля и длительности их воздействия не должны превышать значений, приведенных в табл. 7.3.

При выполнении этих условий обеспечивается самовосстановление физиологического состояния организма в течение суток без остаточных реакций и функциональных или патологических изменений.

Нормативные данные табл. 7.3 действительны, если остальное время рабочего дня человек находится в местах, где напряженность электрического поля меньше 5 кВ/м и исключена возможность воздействия на него электрических разрядов. При этом напряженность определяется на уровне головы человека (1,8 м над уровнем земли).

Следует отметить, что данные табл. 7.3 получены для периодического и длительного пребывания человека в электрическом поле, когда у него через 1 - 2 месяца выработался динамический стереотип восприятия поля. Единоновременно допускаются и большие кратковременные воздействия электрического поля.

При проектировании подстанций СВН определяются маршруты обхода, виды оперативных переключений при производстве ремонтов и других работ; на моделях или по программе на ЭВМ рассчитывается напряженность электрического поля в этих местах и возможная длительность работ, что сравнивается с данными табл. 7.3.

Таблица 7.3.

Допустимая продолжительность работы персонала в электрическом поле промышленной частоты

Напряженность электрического поля кВ/м	Допустимая продолжительность пребывания персонала в течение суток, мин.
5	Без ограничения (в течение рабочего дня)
10	180
15	80
20-25	10

При невыполнении условий табл. 7.3 применяются меры по экранированию рабочих мест, тросовые экраны над дорогами, экранирующие козырьки и навесы над шкафами управления, вертикальные экраны между фазами и др.

Для ОРУ подстанции СВН наряду с расчетами, после ее пуска в эксплуатацию проводят измерения напряженности поля в различных точках, после чего при необходимости экранная защита усиливается. При ремонтных работах применяют съемные экраны. Предъявляются определенные требования к компоновке ОРУ, например не допускается расположение ошиновки над выключателями, чтобы обеспечить возможность их безопасного ремонта и др.

Для линий СВН, вблизи которых возможно нахождение персонала посторонних организаций и местного населения, на основании специально проведенных исследований установлены следующие нормативы по допустимой напряженности под линией без определения допустимой длительности пребывания: 20 кВ/м - для труднодоступной местности (болота, горные склоны и т. п.); 15 кВ/м - для ненаселенной местности; 10 кВ/м - для пересечений с дорогами; 5 кВ/м - для населенной местности.

Кроме того, нормируется допустимая напряженность на границах жилых застроек - 0,5 кВ/м, что допускает пребывание человека в электрическом поле неограниченное время в течение всей жизни.

Если, согласно расчетам, при расстоянии проводов до земли, определяемом перенапряжениями, напряженности под линиями 330 кВ не превышают 8,5 кВ/м, а под линиями 500 кВ - 14 кВ/м и не возникают затруднения при их сооружении в ненаселенной местности, то для линий более высокого класса напряжений расстояние до земли в той же местности определяется допустимой напряженностью - 5 кВ/м.

Напряженность поля имеет наибольшее значение под линией и по мере удаления от нее быстро уменьшается. Соответственно зона наибольшего влияния поля из-за провисания проводов находится в середине пролета, а наименьшего - у опор, где высота подвеса проводов наибольшая и, кроме того, сказывается экранирующее действие самих опор. Поэтому дороги, трассы прогона скота, пешеходные дорожки, линии связи и линии более низкого напряжения рекомендуется размещать вблизи опор.

В охранной зоне линии (ее границы параллельны линии и внутри нее напряженность поля превышает 1 кВ/м, для линий 500 кВ - это 25 м, а 750 кВ - 40 м от крайних фаз) не разрешается размещение постоянных и временных жилых и производственных сооружений, регламентируется режим работы ремонтного персонала.

Если при пересечении линией дороги необходимо снизить напряженность, линия экранируется тросовыми экранами, выполненными из

одного или двух тросов под каждой фазой, натянутых на железобетонных стойках и заземленных по концам.

Тросовые экраны могут применяться и для снижения напряженности электрического поля на границах жилых застроек (у стен жилых зданий).

Напряженности поля под линией при принимаемых обычно расстояниях проводов до земли для всех линий СВН значительно превышают допустимое для населенной местности значение - 5 кВ/м. Ввиду того, что этот норматив распространяется только на вновь строящиеся линии, в перспективе станет затруднительным вывод таких линий от крупных ТЭС и АЭС, которые расположены в городах или поселках, так как при этом расстояния от проводов линии до земли должны быть не менее 12 м для ЛЭП 330 кВ; 16,5 м для ЛЭП 500 кВ; 22 м для ЛЭП 750 кВ. Учитывая наличие на шинах станций и выводах линий более низких напряжений, в ряде случаев может оказаться экономичным осуществление таких выводов в виде комбинированных линий, у которых под цепью более высокого напряжения расположена цепь более низкого напряжения со сдвигом систем напряжений цепей на 120° за счет изменения фазировки нижней цепи (например, 330/110, 500/220, 750/330). Возможно также использование линий с сильным сближением фаз, экранировка линий и др.

В густонаселенной местности такие решения могут быть приняты и для всей линии электропередачи СВН, так как они не только снижают напряженность поля, но и повышают пропускную способность.

Вторичным фактором, оказывающим существенное влияние на условия работы в охранной зоне, является ток, стекающий с проводящего, но изолированного объекта при прикосновении к нему. Величина этого тока должна быть безопасна для местного населения, причем необходимо учитывать возможность соприкосновения с этими объектами не только мужчин, но также женщин и детей. В этих случаях используются американские данные, согласно которым безопасным для мужчин является ток 9 мА, для женщин - 6,5 мА, для детей - 4,5 мА (как уже отмечалось, ENV50166 устанавливает более жесткие нормы - 3,5 мА на рабочих местах и 1,5 мА для населения).

Стекающий ток при прикосновении человека определяется напряжением линии, емкостью объекта относительно линии, определяемой объемными параметрами объекта и активным сопротивлением человека. Этот ток эмпирически можно выразить как

$$I_{np} = K_{\phi} V E$$

Где K_{ϕ} - коэффициент формы объекта; V - объем объекта; E - напряженность поля на уровне 1,8 м над землей

Таким образом, стекающий ток пропорционален напряженности поля и объему объекта. Например, при напряженности поля 15 кВ/м комбайн СК-4 с

прицепом дает стекающий ток 6—6,5 мА, крупные автобусы – 5 - 6 мА и т. д., т. е. этот ток может быть опасен для женщин и детей.

Вышесказанное регламентирует условия труда и нахождения местного населения в охранной зоне линии 750 кВ и выше, в частности, все сельскохозяйственные машины и механизмы должны быть оборудованы двумя заземляющими цепями с утяжеленными грузами на концах для обеспечения постоянного контакта с землей и сбрасываемыми заглубляемыми заземлителями.

Следует отметить, что эффективным средством ограничения напряженности поля под воздушными линиями электропередачи являются растительные массивы. Выполненные измерения показали, что в зоне сплошных растительных массивов высотой 3-4 м напряженность поля под линиями не отличается от напряженности поля земли ясного дня. В зоне фруктовых садов (яблони, вишни) с расстояниями между деревьями 6-8 м напряженность поля под ВЛ в междурядьях снижается в 2-3 раза по сравнению со случаем прохождения линии в полевых условиях. В кронах деревьев напряженность поля не отличается от напряженности поля земли ясного дня.

7.3. Экологическое влияние коронного разряда

Коронный разряд на линиях электропередачи создает помехи радио- и телевизионному приему, а также акустический шум. Основная причина радиопомех и шума - стримерная корона на проводах. Поскольку наиболее благоприятные условия для возникновения стримерной короны складываются при атмосферных осадках, когда значительно снижается начальная напряженность поля, наиболее сильные радиопомехи и акустический шум возникают при коронировании линий сверхвысокого напряжения во время дождя и снега. В хорошую погоду помехи возрастают по мере загрязнения проводов.

7.3.1. Радиопомехи

Спектр частот излучения, создающего радиопомехи, охватывает диапазон от 10 кГц до 1 ГГц. Помехи на частотах выше 30 МГц оказывают мешающее влияние на телеприем и возникают только при коронировании линий 750 кВ. Источниками помех в этом случае помимо короны на проводах служат частичные разряды в зазорах и трещинах изоляторов и корона на заостренных элементах арматуры. В хорошую погоду корона на проводах практически не создает помех телевизионному приему

Интенсивность радиопомех характеризуется вертикальной составляющей напряженности электрического поля вблизи поверхности земли (E_2). Уровень радиопомех, дБ, определяется величиной

$$Y = 10 \lg \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^2 = 20 \lg \frac{E_2}{E_1},$$

где E_1 — базовая напряженность электрического поля, мкВ/м. Обычно за базовое значение принимают $E_1 = 1$ мкВ/м, тогда

$$Y = 20 \lg E$$

В качестве расчетной частоты по рекомендации Международного комитета по радиопомехам принимается 0,5 МГц. Уровень полезного сигнала при этой частоте составляет примерно 60 дБ. Радиоприем считается удовлетворительным, если полезный сигнал превышает помехи на 20 дБ. Поэтому допустимый уровень радиопомех в хорошую погоду составляет 40 дБ, что дает $E=100$ мкВ/м. Это значение напряженности электрического поля радиопомех принято в качестве допустимого на расстоянии 100 м от проекции на землю крайнего провода линии электропередачи напряжением 330 кВ и выше.

По мере удаления от линии уровень помех снижается. Между уровнями радиопомех Y_1 и Y_2 на расстояниях соответственно l_1 и l_2 существует зависимость

$$Y_2 - Y_1 = 20k \lg \frac{l_1}{l_2},$$

где k — коэффициент затухания, равный 1,6 в диапазоне частот 0,15-1 МГц

Зависимость между уровнем радиопомех и напряженностью электрического поля на поверхности проводов линейна и выражается эмпирической формулой

$$Y_2 - Y_1 = k_l l (E_{np2} - E_{np1}),$$

где Y_1 и Y_2 - уровни радиопомех, дБ, при напряженностях на проводах E_{np1} и E_{np2} кВ/см, k_l - коэффициент, равный 1,8 при напряженностях поля на проводах 20-30 кВ/см

Увеличение радиуса проводов при неизменной напряженности поля на них приводит к росту уровня радиопомех, поскольку спад напряженности поля у провода в радиальном направлении при этом замедляется и создаются условия для развития более интенсивной стримерной короны. Связь между

уровнями радиопомех и радиусами проводов устанавливается эмпирической формулой

$$Y_2 - Y_1 = 20 \lg \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2,$$

где r_2 и r_1 - радиусы проводов.

Радиопомехи практически не зависят от числа составляющих проводов расщепленной фазы, поскольку происходит взаимное электромагнитное экранирование проводов фазы.

Если известны уровень радиопомех Y_1 на нормированном расстоянии от линии и параметры E_1 и r_1 тщательно исследованной базовой линии электропередачи, то уровень радиопомех при хорошей погоде Y_2 создаваемый другой линией, например проектируемой с параметрами E_2 и r_2 , может быть определен по обобщенной формуле

$$Y_2 = Y_1 + 1,8(E_2 - E_1) + 40 \lg \frac{r_2}{r_1}.$$

7.3.2. Акустический шум

Акустический шум возникает главным образом в плохую погоду, когда усиливается интенсивность коронирования проводов. Звуковой эффект при этом имеет две составляющие: 1) шипение, соответствующее частоте 100 Гц и кратным ей частотам; 2) широкополосный шум. Первая составляющая обусловлена движением объемного заряда у проводов, что дважды за период создает волны звукового давления. Вторая генерируется стримерной короной.

Уровни громкости шумов в дБ (А) измеряются с применением корректирующих фильтров типа А, которые позволяют учесть физиологические особенности органов слуха человека (психометрическую характеристику).

Особенно интенсивный шум от короны возникает при сильном дожде, однако такой дождь сам создает шум, превышающий по громкости возможные акустические помехи от линии электропередачи. Поэтому более существенны помехи при морозящем дожде, в туман, при мокрых проводах после сильного дождя. Уровень громкости в этих случаях на 5 - 6 дБ (А) ниже, чем в сильный дождь, но значительно превышает общий звуковой фон. Оценка акустического шума делается по условиям «влажных» проводов.

Для оценки громкости при дожде может быть использована эмпирическая формула

$$A = 16 + 1,14E_{\max} + 9r + 15 \lg n - 10 \lg l,$$

где A - уровень громкости, дБ (А); r - радиус провода, см; E_{max} - максимальная напряженность поля на поверхности проводов, кВ/см; n - число проводов в расщепленной фазе; l - расстояние от крайней фазы, м.

В соответствии с действующими в РФ нормами для чистых районов допустимые напряженности на поверхности проводов ВЛ определяются акустическими помехами при диаметре проводов $d > 3,26$ см. В районах с промышленным загрязнением допустимые напряженности определяются радиопомехами при $d = 2,7 \div 3,3$ см и акустическим шумом при $d > 3,3$ см.

7.3.3. Нормативная база на радиопомехи и акустические шумы

Для решения задач электромагнитной совместимости линий электропередачи и радиоприемных устройств различного назначения (т. е. для обеспечения их функционирования без ухудшения качественных показателей) важное значение имеют реальные уровни напряженности поля помех, создаваемых ВЛ.

Помехи от ВЛ могут возникать не только от короны на проводах, но и вследствие частичных разрядов и короны на изоляторах, пробоя или перекрытия дефектных изоляторов, короны на линейной арматуре и распорках проводов расщепленной фазы, а также из-за искрения между элементами линейной арматуры, распорок проводов и между изоляторами.

Снижению радиопомех от ВЛ и улучшению электромагнитной обстановки вдоль трасс способствует нормирование уровней радиопомех от ВЛ. Принятие норм создает юридическую основу взаимоотношений между проектировщиками и владельцами радиоприемных средств и объектов. Нормирование радиопомех от ВЛ требует от проектировщиков и владельцев ВЛ принятия мер к тому, чтобы уровень радиопомех не превышал допустимых величин в течение заданного процента годового времени.

В большинстве стран установлены национальные нормы на величины напряженности поля помех, создаваемых воздушными линиями электропередач и высоковольтным оборудованием.

В таблице 7.4 приведены нормы на радиопомехи от ВЛ ряда стран.

Для сравнения требований национальных норм допустимые уровни радиопомех были пересчитаны на расстояние 100 метров от ВЛ и на частоту 0,5 МГц, рекомендованную СИСПР (Международный специальный комитет по радиопомехам) в качестве базисной при расчетах.

Таблица 7.4.

Сравнение норм различных стран на радиопомехи от линий электропередачи

№№ п.п.	Страна	Частота измерения	Место измерения	Погодные условия % времени	Нормы дБ	Допустимые уровни радиопомех на расстоянии 100 м от проекции крайней фазы на землю. Прибор СИСПР, дБ

						В хорошую погоду	80% времени
1.	РФ	0,5 МГц	Расстояние от крайней фазы 100 м	80	43	37,0	43,0
2.	США	1 МГц	Расстояние от проекции крайней фазы ВЛ 362 кВ – 14 м, ВЛ>550 кВ – 20 м	80	52	27,3 29,6	33,6 35,6
3.	Япония	1 МГц	Под линией	50, дождь	53	24,9	30,9
4.	Индия	0,5 МГц	На границе зоны отчуждения (30 м)	В хорошую погоду	46	24,7	30,7
5.	Польша	0,5 МГц	Расстояние от проекции крайней фазы на землю	50, хорошая погода	46	27,6	33,6

Из таблицы видно, что нормы Российской Федерации так же как нормы Польши, устанавливают более высокие уровни допустимых помех, чем нормы других стран.

Для оценки мешающего влияния ВЛ на радиоприем должны быть использованы не только абсолютные значения напряженности поля помех, но и значения отношения сигнал/помеха.

Понятие отношения сигнал/помеха означает отношение напряженности поля полезного сигнала и напряженности поля помех, измеренных в одном и том же месте.

Одна и та же линия электропередачи может считаться источником значительных помех для районов с низким уровнем полезного сигнала и малых помех в зонах с высоким уровнем сигнала.

Исходной величиной при разработке норм на радиопомехи является гарантированный уровень защищенного полезного сигнала. В соответствии с международной практикой за минимальную напряженность поля радиосигнала, которую необходимо защищать от помех на частоте 1 мегагерц, принят уровень 60 децибел, а на частоте 0,5 мегагерц — 66 децибел.

Взаимосвязь между отношением сигнал/помеха и качеством приема устанавливалась опытным путем.

7.4. Влияния линий электропередачи на линии связи

7.4.1. Опасные влияния

Линии электропередачи (ВЛ) оказывают на линии проводной связи влияния, которые обусловлены различными механизмами взаимодействия и при определенном взаимном расположении между линиями электропередачи и связи могут достигать значения, представляющие опасность для обслуживающего персонала и превышающие электрическую прочность кабеля связи и вводных устройств аппаратуры уплотнения.

Влияние за счет индуктивной связи обусловлено прохождением части или всего переменного тока ВЛ по цепи провод-земля. Это может иметь место, например, при несимметричной нагрузке трехфазных ВЛ, при работе ВЛ по системе два провода-земля, при однофазных или двухфазных замыканиях ВЛ на землю. Магнитному влиянию подвержены все линии проводной связи, как воздушные, так и кабельные.

Влияние за счет емкостной связи обусловлено наличием вокруг проводной ВЛ электрического поля. Провода линий связи (ЛС), находящиеся в зоне действия поля, оказываются под воздействием потенциала этого поля. Электрическому влиянию подвержены провода воздушных линий связи, а также кабельные линии связи, выполненные кабелем без металлических оболочек, подвешенным на опорах или стойках.

Влияние через гальваническую связь (полное сопротивление связи) обусловлено протеканием в земле силовых токов. Гальваническому влиянию подвержены заземленные металлические оболочки кабелей и цепи воздушных и кабельных ЛС, использующих землю в качестве обратного провода.

Расчет продольных ЭДС в проводах связи при аварийном режиме ВЛ с заземленной нейтралью производят для наиболее неблагоприятного случая положения точек короткого замыкания, изменяя места их расположения по длине сближения.

При расчете продольной ЭДС рассматривают короткое замыкание ВЛ из графика в самой неблагоприятной точке, т.е. случай, когда влияние будет наибольшим. Обычно это соответствует короткому замыканию в начале или конце сближения.

Экранирование. При расчетах уровней влияния ВЛ и ЛС необходимо учитывать экранирующее действие различных металлических коммуникаций, расположенных в зоне влияния и соединенных с землей. К таким коммуникациям могут быть отнесены железнодорожные рельсы, трубопроводы, оболочки силовых кабелей и кабелей связи, тоннели и коллекторы, грозозащитные тросы ВЛ и т.д.

Экранирующее действие зависит от собственного сопротивления экрана, расположения его относительно ВЛ и ЛС, условий заземления, удельного сопротивления земли, а для экранов с магнитными материалами - также от продольной ЭДС, наводимой в экране влияющим током.

Мероприятия по защите от опасного влияния. Если по техническим и экономическим или эксплуатационным соображениям оказывается невозможным или нецелесообразным выбрать трассу проектируемой ВЛ или ЛС таким образом, чтобы индуктируемые в проводах ЛС напряжения не превышали допустимых значений, применяют специальные меры защиты.

К мерам защиты на ВЛ относятся:

- применение хорошо проводящих заземленных грозозащитных тросов, а также специальных проводников, проложенных в земле;
- частичное разземление нейтралей трансформаторов высоковольтной сети, обеспечивающее снижение токов короткого замыкания ВЛ;
- применение на ВЛ с изолированной нейтралью аппаратуры для контроля состояния изоляции фазовых проводов по отношению к земле или перекоса фазных напряжений, обеспечивающей скорейшее обнаружение и устранение электрического влияния ВЛ на ЛС;
- частичное или полное каблирование ВЛ на городских участках;
- использование быстродействующей защиты, ускоряющей отключение поврежденной ВЛ с заземленной нейтралью.

К специальным мерам защиты на ЛС относятся:

- включение специальных разрядников между каждым проводом и землей. Для воздушных ЛС, как правило, общее количество разрядников на 100 км ЛС не должно превышать для уплотненной цепи 15 шт., для неуплотненной цепи - 25 шт. Допустимое количество разрядников ограничивается эксплуатационными соображениями и поэтому по соглашению между заинтересованными сторонами допускается в исключительных случаях установка большего количества разрядников. Защита разрядниками цепей полуавтоматической блокировки и цепей фидерных линий проводного вещания не допускается;
- включение разделительных трансформаторов в телефонные цепи без дистанционного питания и разделительных трансформаторов с защитными контурами при наличии дистанционного питания;
- включение дренажных катушек или дросселей с заземленной средней точкой в телефонные цепи без дистанционного питания и дренажных катушек с резонансными заземляющими контурами в телефонные цепи с дистанционным питанием;
- частичное или полное каблирование ЛС;
- замена железобетонных или металлических опор ЛС на деревянные (в том числе с железобетонными приставками) в пределах усилительного участка ЛС, на котором имеются опасные сближения с ВЛ;
- по соглашению заинтересованных сторон введение высоковольтного режима обслуживания ЛС;
- включение редуцированных трансформаторов;
- замена кабеля связи на кабель с повышенным защитным действием и др.

Защита цепей ЛС с помощью редуционных трансформаторов.

Одной из мер защиты линий связи от опасного и мешающего влияния линий высокого напряжения являются применение редуционных трансформаторов (РТ).

Применение редуционных трансформаторов в ряде случаев дает значительный экономический эффект по сравнению с другими мерами защиты.

Редуционный трансформатор представляет собой два О-образных магнитопровода из электротехнической стали Э-320 (толщина пластин 0,35 мм), на которых размещена обмотка.

Роль первичной обмотки трансформатора выполняет оболочка (внешний проводник) кабеля, роль вторичной обмотки — жилы (внутренний проводник) кабеля. На магнитопроводе трансформатора размещены одновременно две одинаковые обмотки, выполненные кабелем в целях защиты с помощью одного трансформатора сразу двух кабелей при двухкабельной системе связи. При однокабельной системе связи обмотки этого трансформатора включаются последовательно.

Трансформатор размещен в стальном герметичном корпусе, покрытом антикоррозийной краской. Для ввода защищаемого кабеля в корпусе предусмотрены специальные отверстия.

Принцип действия РТ заключается в следующем.

Первичная обмотка включается в разрез металлических покровов кабеля, которые заземляются по концам защищаемого участка, вторичная обмотка — в разрез жил кабеля. При протекании тока в цепи металлические покровы — земля и, следовательно, в первичной обмотке во вторичной обмотке индуцируется ЭДС, направление которой противоположно ЭДС, индуцированной в жилах кабеля от влияния линий высокого напряжения. Таким образом, суммарная ЭДС в жилах кабеля уменьшается.

7.4.2. Мешающие влияния

Мешающие влияния ВЛ на цепи ЛС возникают при исправном состоянии ВЛ и действуют все время, пока ВЛ находится под напряжением.

Мешающие напряжения в телефонных каналах тональной частоты создаются электрическими полями токов и напряжений ВЛ как основной частоты, так и частот гармонических составляющих токов и напряжений ВЛ.

Мешающие напряжения в телефонных каналах высокой частоты создаются магнитными и электрическими полями токов и напряжений каналов высокочастотной связи по проводам ВЛ.

Если симметричная трехфазная ВЛ с изолированной нейтралью будет оставаться в работе при условии заземления одной из фаз на срок свыше 2 ч, то следует определять мешающее влияние такой ВЛ при ее работе в этом режиме работы.

При расчете мешающих напряжений в телефонных цепях ЛС от влияния ВЛ с изолированной нейтралью учитывается магнитное влияние фазных токов и электрическое влияние фазных напряжений ВЛ в нормальном режиме ее работы при ширине сближения до 30 м и только магнитное влияние фазных токов при ширине сближения свыше 30 м.

При аварийном режиме работы такой ВЛ учитывается электрическое влияние фазных напряжений. При расчетах мешающих влияний в телефонных цепях ЛС от ВЛ с заземленной нейтралью необходимо учитывать магнитное влияние фазных токов, токов нулевой последовательности и электрическое влияние фазных напряжений ВЛ при ширине сближения до 50 м. При ширине сближения от 50 до 200 м учитывается магнитное влияние фазных токов и токов нулевой последовательности, при ширине сближения более 200 м — только магнитное влияние токов нулевой последовательности.

Меры защиты от мешающего влияния. К специальным мерам защиты на ВЛ относятся запрещение режима работы по системе два провод-земля или провод-земля.

К специальным средствам защиты на ЛС относятся:

- частичная или полная замена воздушной ЛС на кабельную. Это дает возможность полностью исключить электрическое влияние на участках каблирования, снизить напряжение помех от магнитного влияния в соответствии с коэффициентом экранирования оболочки и брони кабеля, а также практически не считаться с возможностью влияния высокочастотных каналов связи по ВЛ на ВЧ каналы по цепям ЛС, работающих в совпадающем спектре частот;

- применение кабелей со специальной оболочкой и броней, обеспечивающих повышенное экранирующее действие от влияния ВЛ;

- изменение профиля ЛС с крюкового на траверсный;

- отказ от использования каналов тональной частоты и замена их высокочастотными каналами;

- применение в телефонных каналах специальных устройств, позволяющих снизить эффективность воздействия помех на передаваемый разговор в 3 - 4 раза; использование на кабельных ЛС редуцированных и других трансформаторов.