

- **10. Обеспечение стойкости ЭС к  
электромагнитным и  
ионизирующим излучениям**

## 10.1. Источники и приёмники помех в ЭС

В ЭС имеют место источники помех и чувствительные к помехе элементы и узлы (рецепторы). Электромагнитная совместимость предполагает совместную работу источников и приёмников помех, когда уровень помехи не превышает допустимых норм для приёмника помех.

Источники помех разделяют на источники естественного и искусственного происхождения.

# **Основные источники естественного происхождения это:**

1. **Различные природные явления (атмосферные шумы, грозовые разряды и пр.);**
2. **Электростатический разряд (ЭСР);**
3. **Мощный электромагнитный импульс (ЭМИ), к примеру, от взрыва ядерного заряда и др.**

## Источники электромагнитных помех искусственного происхождения:

1. Мощные передатчики: радиостанции, TV-станции, радиолокация, навигация, (например, навигация аэропортов — военного и гражданского флота) и др.
2. Радиослужбы в условиях ограниченного объёма — корабельные радиослужбы, ВМФ — на одном корабле несколько сот радиостанций.
3. Мобильная связь.
4. Генераторы, усилители и им подобные узлы большой мощности, выходные каскады устройств большой мощности.

5. Все генераторы ВЧ и провода с ВЧ током. На высокой частоте у генераторов и проводов ВЧ тока возникает электромагнитная волна, которая слабо затухает на расстоянии.

6. Все генераторы и провода релаксационных токов. Всякий релаксационный сигнал может быть разложен в ряд гармонических синусоидальных составляющих, при этом основная энергия электромагнитного излучения сосредоточена в диапазоне частот, ширина которого обратно пропорциональна длительности импульса (случай прямоугольного импульса). Следовательно, чем короче импульс, тем шире спектр частот

7. Все устройства, работа которых связана с разрывом электрических цепей под током (реле, контакторы, тумблеры, переключатели). А также узлы, блоки и элементы, работающие в ключевом режиме — возникают новые спектральные составляющие, расширяющие спектр помех.

8. Все устройства, работа которых связана с искрением на контактах (электродвигатели с коллекторами и щетками питания, контакторы, выключатели).

9. Все высоковольтные устройства на острых гранях, которых может быть разряд или стекание зарядов.

10.РЭУ с большой напряжённостью электрического поля даже на низких частотах, например, источники питания с большим напряжением (ЛЭП и электропередача в зданиях).

11.Все электрические устройства с большой напряжённостью магнитного поля даже на НЧ (источники питания с большими токами). Изделия, содержащие индуктивности, трансформаторы, дроссели, и т. д.

Возможны различные расстояния от источника до рецептора помех, начиная от сотен километров (грозовой разряд, мощный передатчик), и заканчивая долями метра, если рассматривать пространство внутри аппарата.

## ***Рецепторы (приемники помех)***

Рецептором может выступать практически любой элемент конструкции, начиная от корпуса изделия и заканчивая выводами микросхемы, которые обладают хотя бы минимальным антенным эффектом.

Наиболее чувствительными к помехе устройствами являются:

1. Все усилители ВЧ, все контуры ВЧ и ВЧ дроссели.
2. Входные цепи усилителей НЧ.



Рецепторы могут различаться по их чувствительности к воздействию различных полей. В наиболее общей модели электромагнитной совместимости (рис. 10.1) имеется источник помех, рецептор и некоторый процесс – процесс переноса электромагнитных волн от источника к рецептору. Назовём этот процесс **эмиссией**.

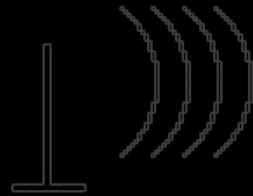
*Рис. 10.1.* Перенос электромагнитных волн от источника к рецептору



# Характеристики источников помех

Всё многообразие источников может быть сведено к двум основным типам (рис 10.2).

Рис. 10.2. Источники помех



а)



б)

**Источники с высоким волновым сопротивлением.** Для них эквивалентная схема или модель может быть представлена в виде **штыря** (антенна-штырь) (рис 10.2, а). В окрестностях этого штыря формируется относительно интенсивное электрическое поле (ЭП), и слабое магнитное поле (МП). Как мы помним,  $Z = U_{\text{п}} / I_{\text{п}}$ . Поскольку электрическое поле вызывает напряжение, а магнитное — вызывает ток, получается, что большое ЭП и малое МП обеспечивает высокое волновое сопротивление  $Z$  ( $Z = E/H$ ).

В качестве штыря может рассматриваться любой не нагруженный проводник, на который подается электрический потенциал. Например, проводник, идущий к контрольной точке, либо проводник, подходящий к разомкнутым контактам выключателя, реле, к розетке, в которую не включена нагрузка и т.д.

Источники помех, модель которых может быть представлена **в виде токовой петли** (рис 10.2, б). При этом возникает интенсивное магнитное поле и слабое электрическое. Эти источники имеют **малое волновое сопротивление**.

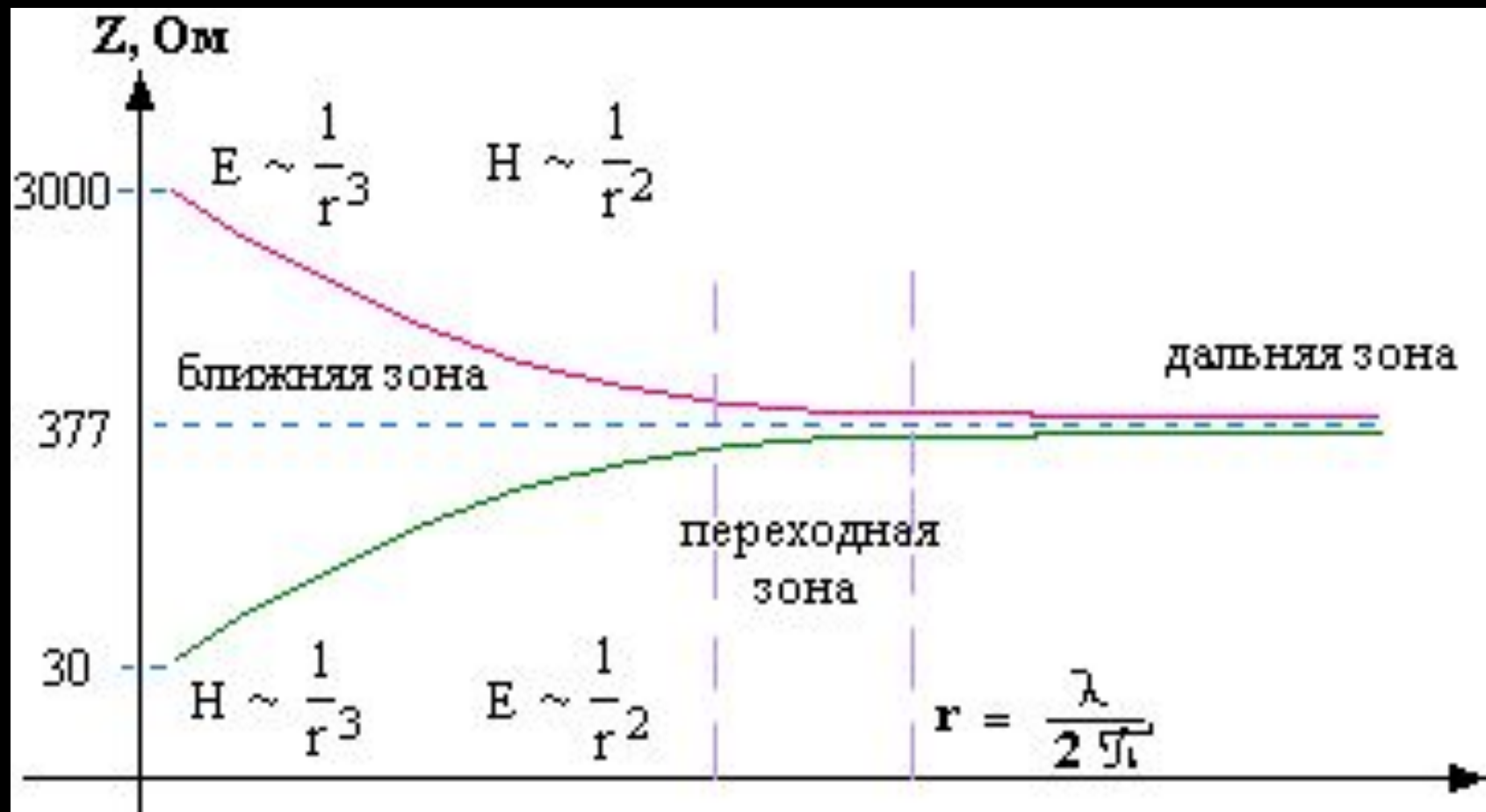
В качестве токовой петли рассматриваются любые проводники, по которым протекает электрический ток.

Полученные относительные значения  $Z$  действительны для области, которая находится в непосредственной близости от излучателя. На значительных расстояниях основная составляющая поля – та, которая имеет большее значение, убывает быстрее дополнительной составляющей. И, в конце концов, волновое сопротивление  $Z$  становится равным 377 Ом, то есть волновому сопротивлению свободного пространства.

Для первого типа источников основная составляющая - электрическая - убывает пропорционально  $1/r^3$ . Дополнительная - магнитная - пропорционально  $1/r^2$ . Для источников второго типа ситуация обратная. Магнитная составляющая убывает пропорционально  $1/r^3$ , а электрическая - пропорционально  $1/r^2$ .

Можно выделить **три зоны** действия источников (рис. 10.3).

Рис. 10.3. Три зоны действия источников



1. **Ближняя зона.** Здесь преимущественно действует механизм индукции с достаточно чётким разделением на магнитную и электрическую составляющие.
2. **Переходная зона** — зона формирования плоской электромагнитной волны.
3. **Дальняя зона** — зона действия плоской электромагнитной волны (Т-волны).

Таким образом, при обеспечении ЭМС необходимо разделять задачи локализации электрического, магнитного и электромагнитного полей.



От источника помех к приёмнику помех паразитная наводка может передаваться:

- через электрическое поле,
- через магнитное поле,
- через электромагнитное поле,
- через общие цепи источника и приёмника помех, например, провода питания.

Для электромагнитной совместимости источников и приёмников помех предлагается:

1. пространственное разнесение источников и приемников помех,
2. экранирование источников и приёмников помех,
3. фильтрация напряжений помехи в общих проводах источников и приёмников.

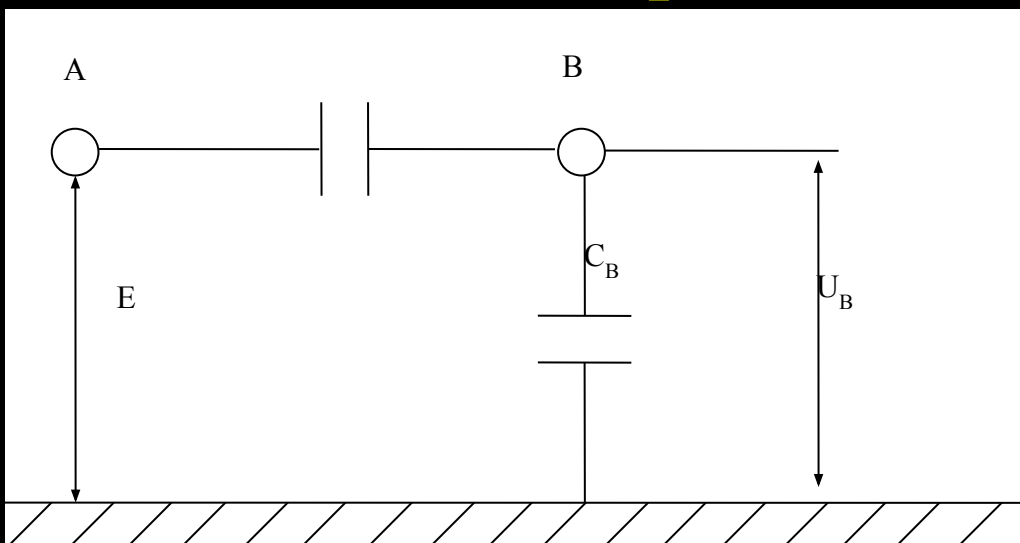
## 10.2. Экранирование электрического поля. Электростатические экраны

Для защиты от сильного электрического поля при ограниченных расстояниях между источником и приемником применяют электростатическое экранирование.

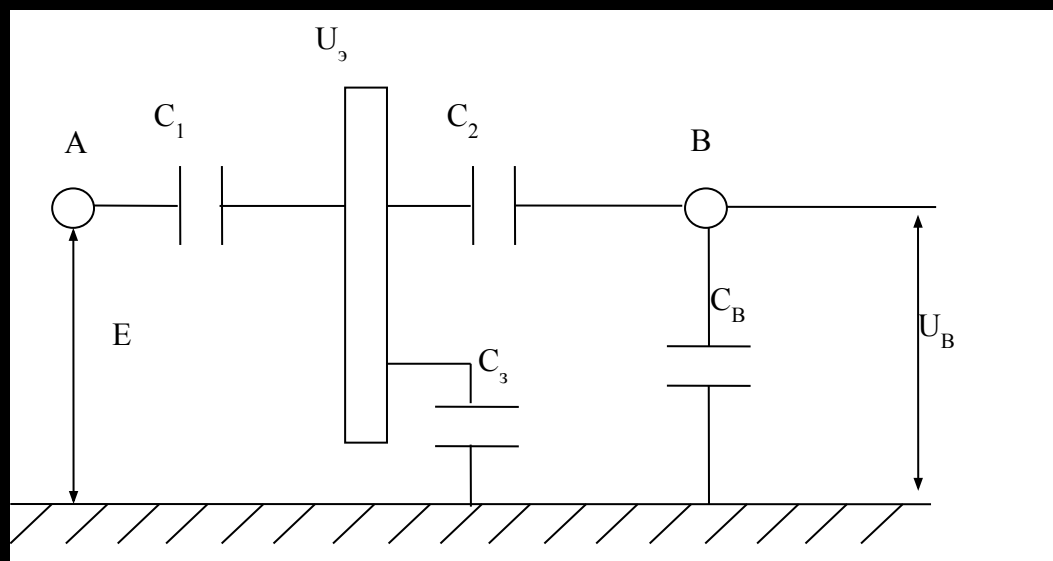
Пусть,  $A$  – источник сильного электрического поля напряжения  $E$ ,

$B$  – приёмник помех с ёмкостью  $C_B$  на корпус (рис. 10.4)

*Рис. 10.4. Источник и приемник помех*



*Рис. 10.5. Использование экрана для защиты от помех*



Между источником и приёмником существует паразитная ёмкость. На приёмнике помехи В имеет место напряжение помехи.

$$U_B = \frac{E}{\frac{1}{\omega \cdot C_{\text{пар}}} + \frac{1}{\omega \cdot C_B}} \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_B} = E \cdot \frac{C_{\text{пар}}}{C_{\text{пар}} + C_B}$$

Напряжение помехи будет тем больше, чем ближе источник и приёмник помех, чем больше ёмкость  $C_{\text{пар}}$ .

Поставим между источником и приёмником металлическую перегородку – экран (рис. 10.5).

Т.к. электростатический экран имеет ёмкости  $C_1$  и  $C_2$  относительно источника и приёмника, то на экране по

$$U_3 = E \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_3}$$

где  $C_3$  – емкость экрана относительно корпуса.

В таком случае на приёмнике помех имеем напряжение

$$U_B = U_3 \cdot \frac{C_2}{C_2 + C_B} = E \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{(C_1 + C_3) \cdot (C_2 + C_B)}$$

Если ёмкость экрана на корпусе  $C_3$  очень малая, то напряжение на экране  $U_3$  примерно равно  $E$ . Следовательно, источник помех оказался на экране, т.е. приближен к приёмнику помех, т.е. стало хуже, чем было без экрана.

Для того чтобы напряжение на экране приближалось к нулю необходимо увеличивать ёмкость экрана  $C_3$  до бесконечно большой, т.е. сопротивление экрана на корпус необходимо сделать бесконечно малым.

Следовательно, к электростатическому экрану предъявляются следующие требования:

1. Электростатический экран представляет собой перегородку между источником и приёмником помех.



Перегородка должна выполняться из металла с малым удельным сопротивлением (медь, алюминий). Перегородка может быть в виде металлического листа или металлической сетки.

2. Электростатический экран должен иметь заземление, т.е. соединение на корпус прибора. Его сопротивление должно быть минимальной величины, а поэтому основные способы выполнения заземления — посредством пайки или сварки.

Существенную проблему представляет выполнение экрана для аппаратуры в пластмассовых корпусах (например, мониторы

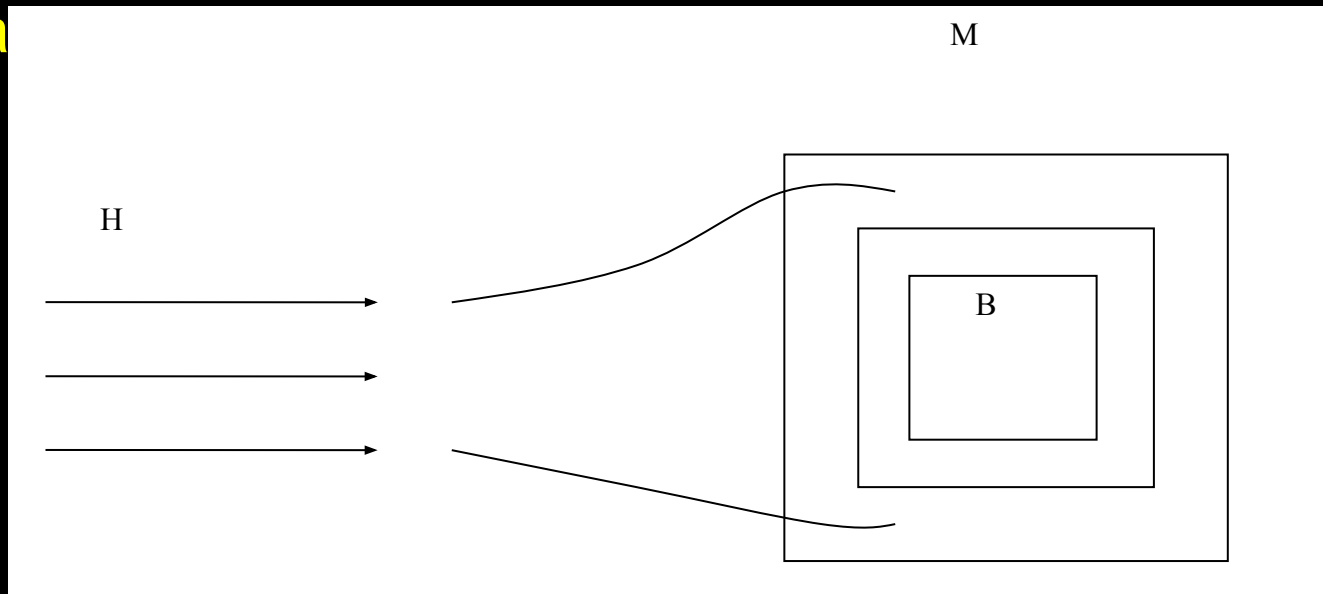
Повышение эффективности экранирования в этом случае достигается:

- - Применением композиционных материалов (пластмасса с металлическим наполнителем);
- - Нанесением поверхностных слоёв металла (напыление металлов, нанесение специальной проводящей краски, оклейка корпуса фольгой и т. п.).

### 10.3. Экранирование магнитного поля. Магнитные экраны

Принцип экранирования магнитного поля и конструкции магнитного экрана различны в зависимости от частоты магнитного поля. Различают экраны низкочастотных магнитных полей (рис. 10.6) и высокочастотных магнитных полей (рис. 10.7).

Рис. 10.6. Принцип шунтирования низкочастотного маг

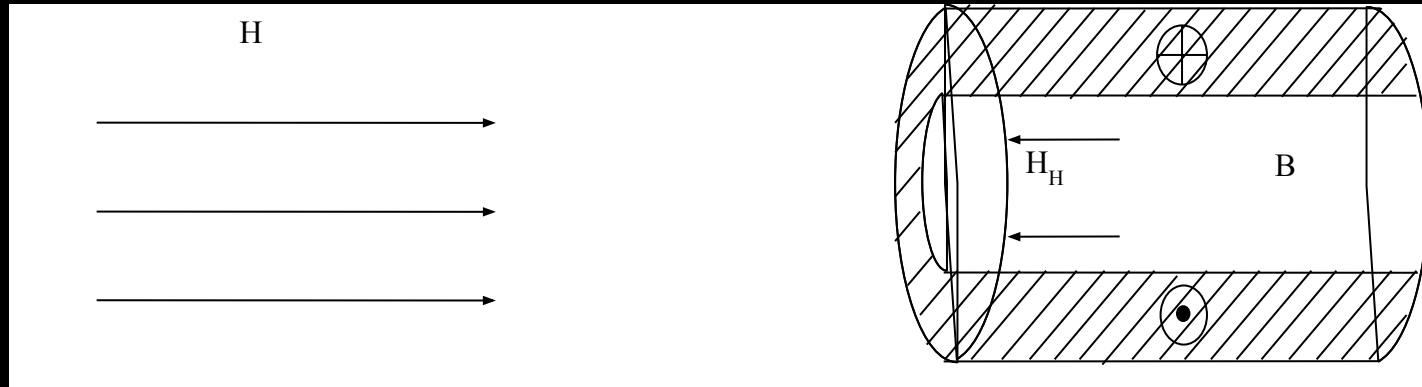


Для экранирования НЧ магнитного поля применяют принцип шунтирования магнитного поля около приёмника В стенками экрана с высокой магнитной проницаемостью (рис. 10.6).

Следовательно, НЧ магнитный экран должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Экран должен иметь замкнутую конфигурацию у экранируемого объекта для силовых линий магнитного поля  $H$ .
2. Экран должен выполняться из материала с высокой магнитной проницаемостью  $\mu$ , т.е. из ферромагнитных материалов (сталь, электротехническая сталь).

Рис. 10.7. Принцип вытеснения ВЧ магнитного поля



Магнитные экраны на ВЧ выполняют на принципе вытеснения паразитного магнитного поля около объекта В магнитным полем от наведённых токов в экране.

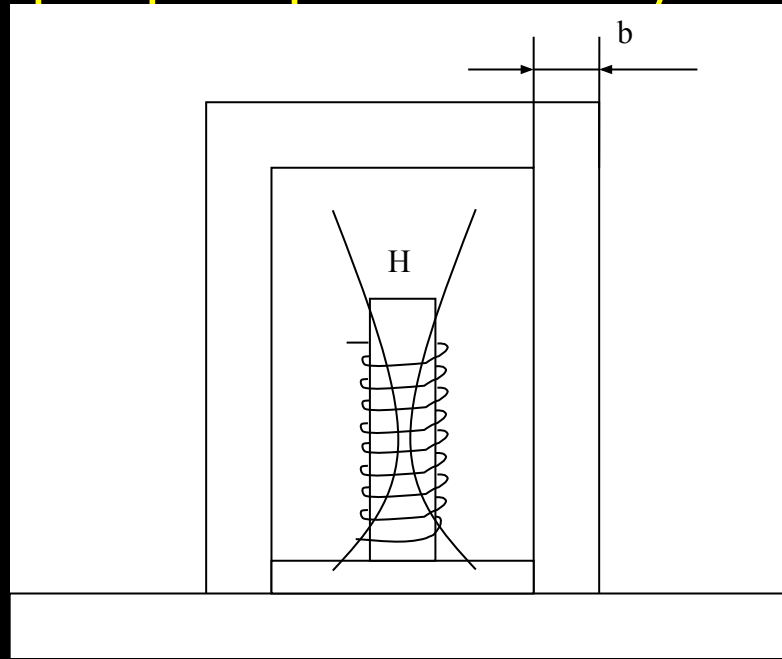
Для того чтобы в экране наводились токи, создающие противоположное магнитное поле  $H_H$ :

- экран должен иметь замкнутую конфигурацию конструкции в направлении перпендикулярном направлению напряжённости  $H$ ;
- экран должен выполняться из металлов, в которых может наводиться ток.

Качество экранирования зависит от толщины экрана, удельного сопротивления, магнитной проницаемости экрана, от частоты экранируемого поля.

Рассмотрим случай экранирования LC-контура (рис. 10.8).

*Рис. 10.8.* Пример экранирования катушки индуктивности



Магнитный экран катушки индуктивности может быть круглого или прямоугольного сечения в направлении, перпендикулярном оси катушки. В стенках экрана от электромагнитного поля катушки наводятся токи, которые распределены по сечению экрана не равномерно.

Максимальное значение ток имеет на поверхности экрана ближайшей к источнику помех. Чем больше толщина экрана, тем меньше значение тока на другой от источника помех поверхности экрана. В теории экранирования вводят понятие эквивалентной  $x_0$  глубины проникновения тока в экране.



На этой глубине в сечении экрана величина тока уменьшается от максимального на поверхности в  $e$  раз.

Эквивалентная глубина  $x_0$  проникновения тока зависит от удельного сопротивления материала экрана, магнитной проницаемости материала экрана, частоты поля  $f$ :

$$x_0 = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \cdot \mu \cdot \pi \cdot f}}$$

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.}$$

Если необходимо ослабить поле в  $N$  раз, то следует сделать экран толщиной  $b$ , большей, чем  $x_0$  в соответствии с формулой:

$$b = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \cdot \mu \cdot \pi \cdot f}} \cdot \ln N$$

При проектировании экрана необходимо выполнить конструкцию малой толщины и массы при условии обеспечения, на заданную степень ослабления  $N$ . Для этого можно выбирать экран малого удельного сопротивления (медь, латунь, алюминий) или большой магнитной проницаемости (сталь).

**Выбор зависит от частоты магнитного поля.**

При проектировании экранов на высоких частотах применяются экраны из материалов низкого удельного сопротивления, т.к. на высоких частотах магнитная проницаемость стали, заметно, уменьшается. При экранировании на низких частотах выполняют экраны из материалов с высокой магнитной проницаемостью (сталь, электротехническая сталь).

## 10.4. Электромагнитные экраны. Особенности конструкции

Электромагнитный экран должен обеспечить ослабление напряжённости магнитного и электрического полей, а, следовательно, должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Конструкция экрана должна быть замкнута в направлении перпендикулярном напряжённости магнитного поля.
2. Конструкция экрана должна быть заземлённой.
3. Экран выполняется из электропроводных материалов, малого удельного сопротивления или высокой магнитной проницаемости  $\mu$ . В зависимости от частоты поля.

Толщина экрана зависит от частоты экранируемого поля. Чем больше частота, тем тоньше будет экран.

Медный экран ослабит поле в 100 раз, на частоте  $f = 10^5$  Гц, при толщине экрана  $b = 0,98$  мм, а на частоте  $f = 10^8$  Гц, при  $b = 0,038$  мм.

Можно видеть, что во всём ВЧ диапазоне медный экран до 1 мм обеспечивает надёжное экранирование. В СВЧ диапазоне эффективное экранирование обеспечивают экраны с  $b = 35$  мкм. Т.е. роль экранирующей поверхности может исполнять фольга платы.

В этом диапазоне экран можно выполнить даже пластмассовым корпусом с осаждением слоя меди на стенках корпуса.

## **Особенности конструирования экранов катушек индуктивности и контуров.**

Экран определяет дополнительные потери энергии, а значит, уменьшает добротность катушки. Уменьшение добротности приводит к расширению полосы пропускания, а значит, к ухудшению избирательности.

При экранировании катушки индуктивности, уменьшается значение её индуктивности. Уменьшить эти отрицательные влияния можно увеличением размеров экрана. Оптимальной считается такая конструкция, когда стенки экрана отстоят от обмотки катушки на половину диаметра катушки.

В таком случае диаметр экрана равен двум диаметрам катушки. При этом индуктивность уменьшается на 17...18 %.

Для подстройки контура применяют подстроечный (ферритовый) сердечник. Значит, в конструкции экрана должны предлагаться отверстия для доступа к ферритовым сердечникам сверху, снизу или и сверху и снизу.



Электромагнитный экран должен запаиваться на плату. Это можно сделать с помощью усика стенки экрана, который через отверстие в плате запаивается на контактную площадку печатного проводника цепи корпуса.

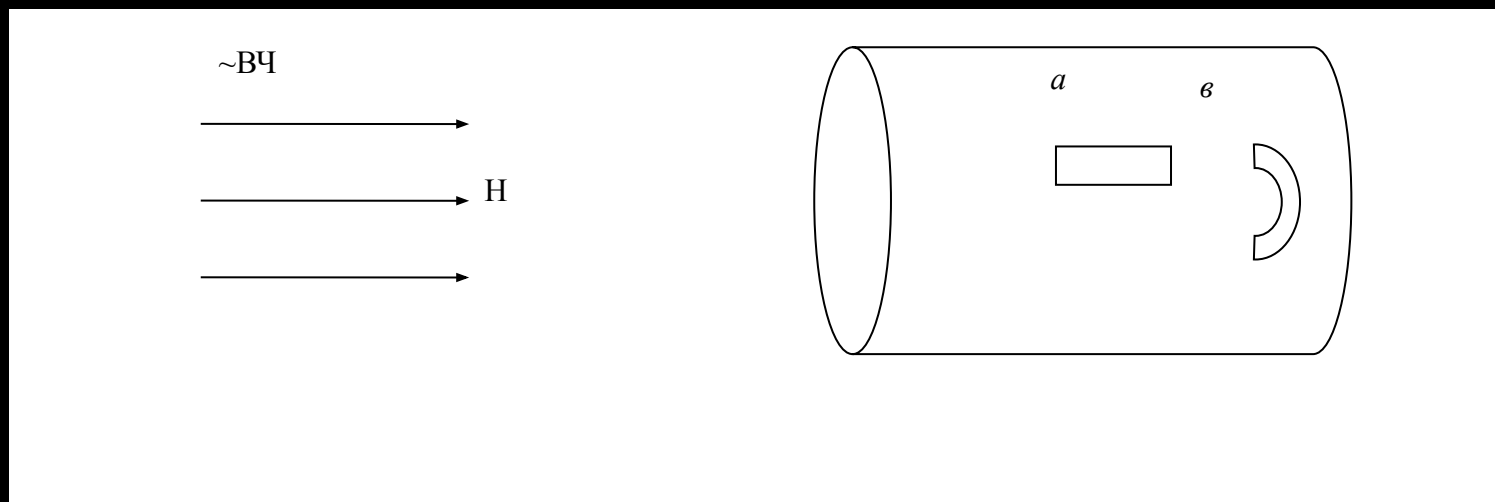
Для алюминиевых экранов может предлагаться биметаллический лепесток, выполненный из алюминия, плакированного медью. Он приваривается контактной сваркой к экрану вместо усика (алюминий на алюминий) и по слою меди запаивается на контактную площадку проводника корпуса.

## ***Некоторые особенности проектирования электромагнитных экранов.***

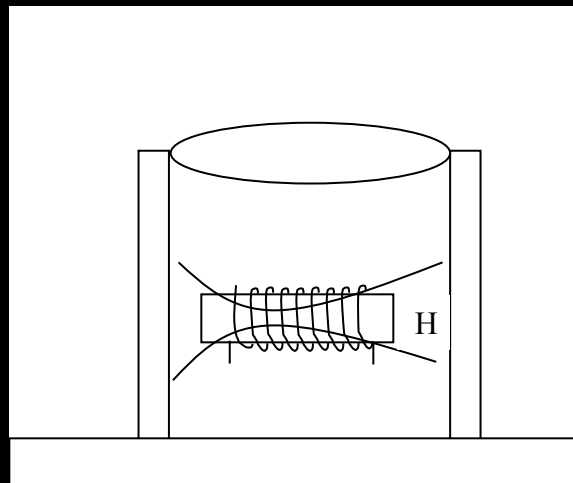
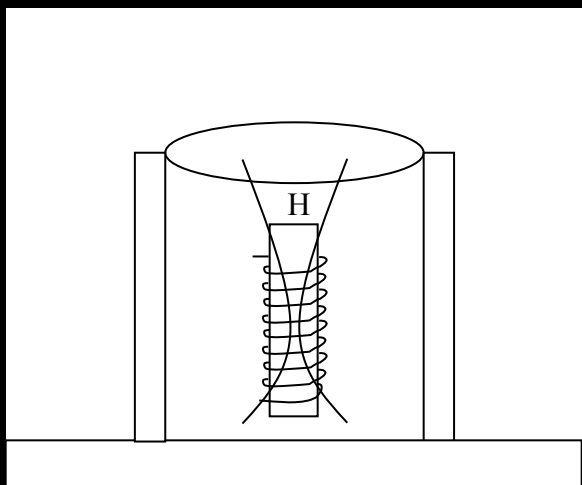
В электромагнитных экранах часто бывают прорези, отверстия, которые могут ухудшить качество экранирования.

Прорези в конструкциях могут выполняться в качестве перфорации для охлаждения и как конструктивные при соединениях элементов экранирования (рис. 10.9).

*Рис. 10.9.* Примеры прямоугольных прорезей *a* и *в*  
в экране



Пример конструктивной прорези в месте стыка экрана с печатной платой представлен на рис. 10.10.



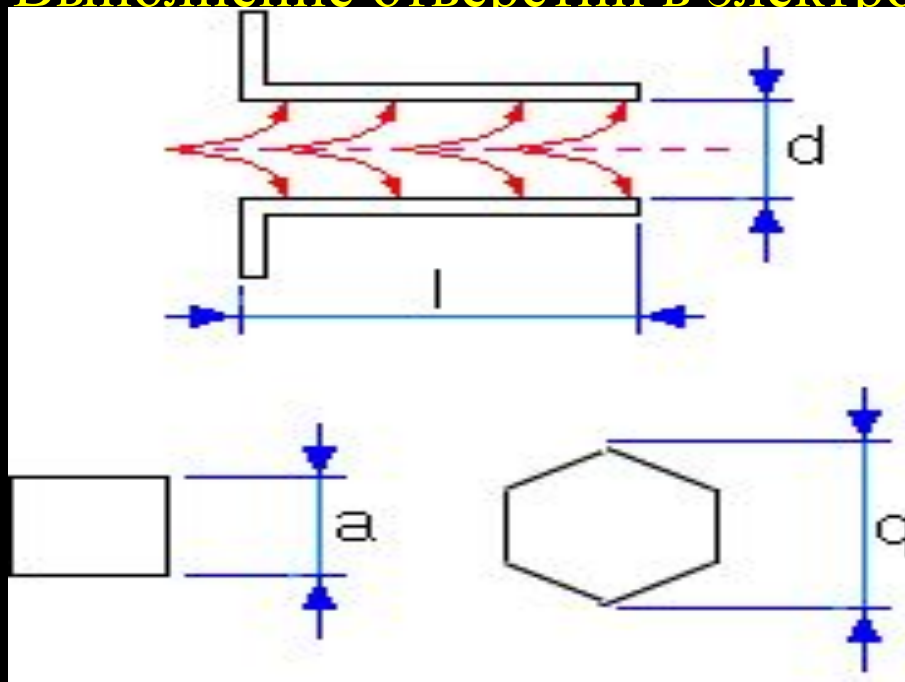
В случае а) экран катушки индуктивности имеет прорез круглой формы на стыке экрана с печатной платой, которая допустима с точки зрения качества экранирования, т.к. не допускает прерывания линии наведенного тока в экране.

В случае б) эта прорезь не допустима, и чтобы обеспечить качество экранирования при такой компоновке катушки необходима экранирующая плоскость экрана со стороны печатной платы, которая может быть выполнена фольгированной поверхностью платы.

Выполнение отверстий, не пропускающих электромагнитную волну, требует применения определённых приемов.

Наиболее часто применяют специальную форму отверстий, которые называют "запредельным волноводом". Подобные отверстия выполняются путем вытягивания металла на длину  $l$  при выполнении отверстия в экране (10.11).

*Рис. 10.11.* Выполнение отверстий в электромагнитном экране



При этом образуется некоторое подобие волновода с определенной частотой среза, выше которой электромагнитные волны не проникают за волновод. В свою очередь, частота среза зависит от поперечных размеров сечения и длины волновода. Сечение подобных "запредельных волноводов" может быть круговым, квадратным и весьма часто - в виде правильного шестиугольника ("соты").

Частота среза для волновода круглого сечения:

$$f_{cp} = \frac{1,75 \cdot 10^4}{d, \text{мм}}, \text{Гц}$$

Формулы для расчета ослаблений (эффективность экранирования) для волноводов различных сечений представлены в таблице 10.1.

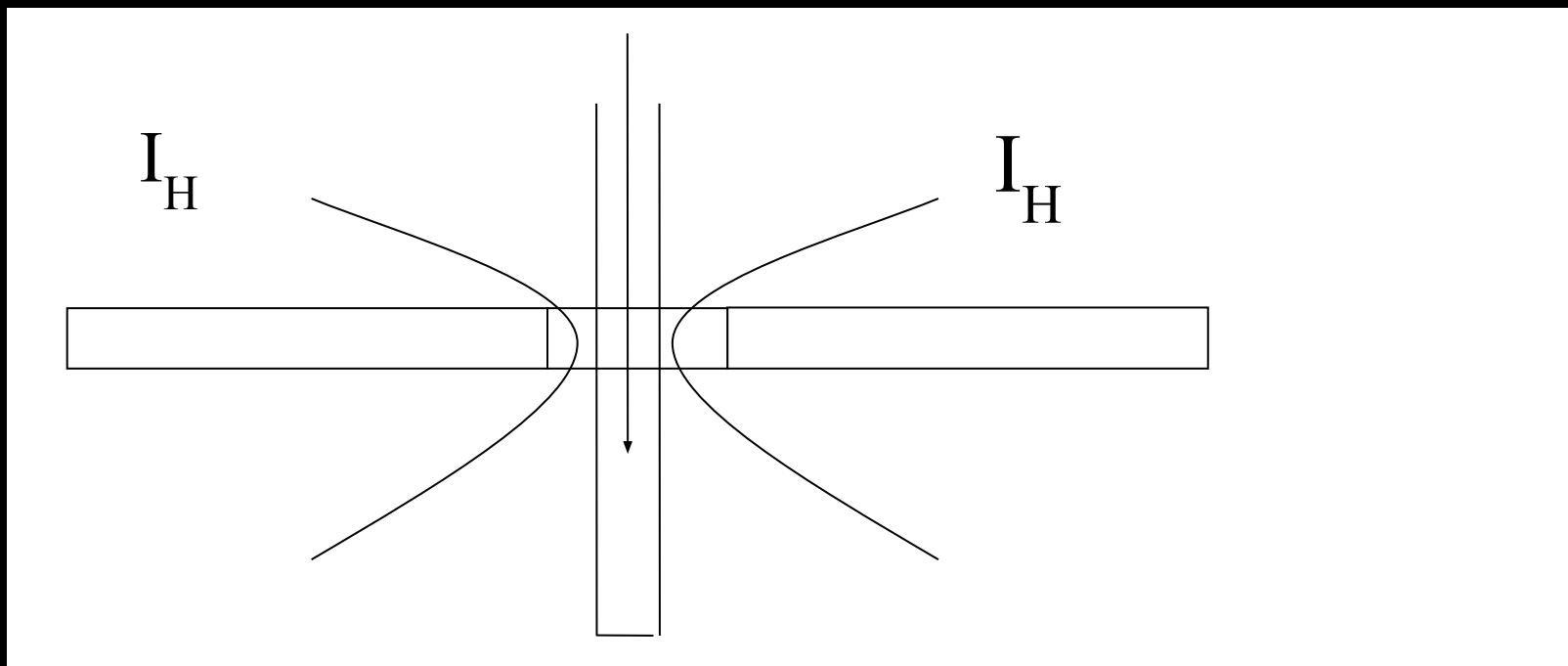
Таблица 10.1. Формулы для расчета ослаблений волноводов

| Вид сечения | Расчетное соотношение                                    |
|-------------|----------------------------------------------------------|
| Круговое    | $S = 32 \cdot \frac{1}{d} , \text{ дБ}$                  |
| Квадратное  | $S = 27,2 \cdot \frac{1}{a} , \text{ дБ}$                |
| Сота        | $S = 27 \cdot \frac{1}{q} - 20 \cdot \lg N , \text{ дБ}$ |



В экране электромагнитный ввод и вывод проводов выполняют через отверстия (рис. 10.12).

*Рис. 10.12.* Выполнение отверстий в электромагнитном экране

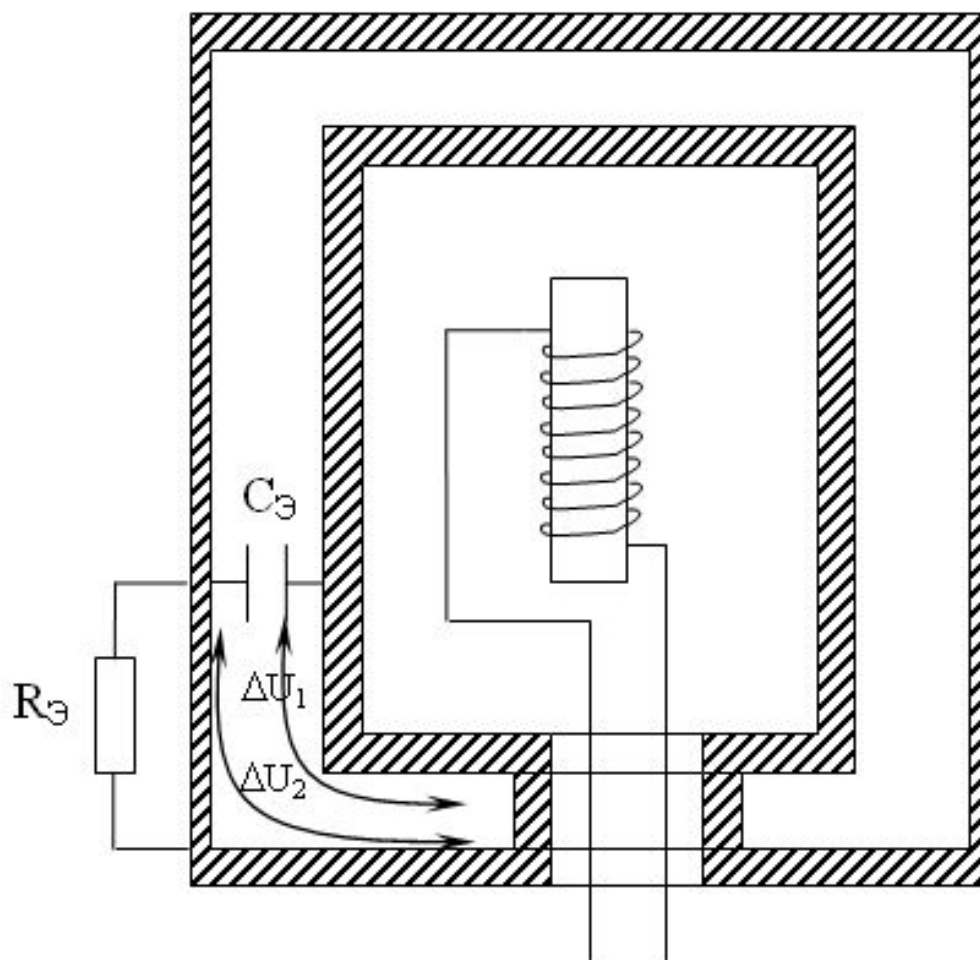


Если через отверстие в пластине из идеального проводящего материала проходит провод с высоко частотным током  $I$ , то в поверхностном слое пластины около отверстия наводятся токи  $I_H$ , определённого направления, так что сумма токов  $I_H + I$  в области отверстия равна нулю. Эти токи вызывают падение напряжения в плоскости экрана около отверстия, которое может быть причиной наводки на другие провода и элементы.

## **Особенности конструкций многослойных экранов**

Получить высокую эффективность экранирования можно, увеличивая толщину экрана или предлагая многослойный экран. Многослойный экран представляет собой конструкцию экран в экране, когда между слоями экрана имеется диэлектрический зазор (рис. 10.13).

*Рис. 10.13. Многослойный экран*



Многослойный экран обеспечивает бóльшую эффективность экранирования, чем однослойный экран суммарной толщины. Около отверстий с проводами в плоскости экранов появляется падение напряжения, а, следовательно, разность потенциалов между экранами, которая может быть причиной наводки на провода.

Чтобы убрать разность потенциалов между экранами, замыкают экраны между собой, около отверстий распорной крепёжной втулкой. Если экраны замкнуть между собой по всей их поверхности, то есть сделать толстый однослойный экран, то качество экранирования

На поверхности экранов за счёт поверхностных токов возникают падения напряжения  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_2$ . Если экраны соединяем по всей поверхности, то  $\Delta U_1 = \Delta U_2$ . Если же между экранами получается ёмкость  $C_3$  в случае многослойного экрана, то напряжение на втором экране меньше за счёт ёмкостного резистивного делителя:

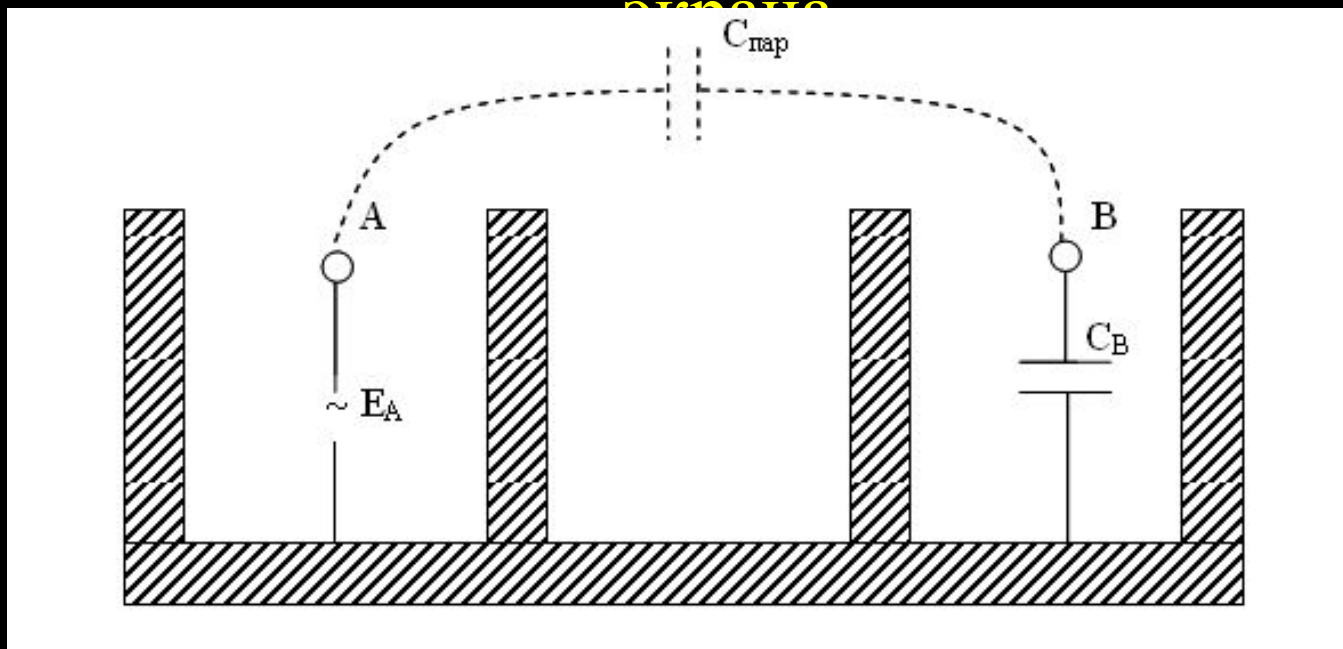
$$\Delta U_2 = \Delta U_1 \cdot \frac{R_Y}{R_Y + \frac{1}{\omega \cdot C_Y}}$$

где  $R_3$  – сопротивление для наведенных токов в экране.

## Особенности конструкций секционированных экранов.

Если в ЭС имеет место несколько источников и приёмников помех, то можно исполнить один корпус — экран, который разбивается экранирующими перегородками на отдельные секции (рис. 10.14).

Рис. 10.14. Пример конструкции секционированного



В первой секции находится источник помех  $A$ , на которой имеется напряжение  $E_A$ . В другой секции размещается приёмник  $B$ , который имеет паразитную ёмкость  $C_B$  на корпус. Между  $A$  и  $B$  возникает паразитная связь за счёт ёмкости  $C_{\text{пар}}$ . Наденем на корпус экран-крышку, обеспечивающую контакт с экраном в местах крепления к корпусу по периметру.

Нарисуем эквивалентную электрическую схему для паразитных связей от источника к приёмнику помех (рис. 10.15).

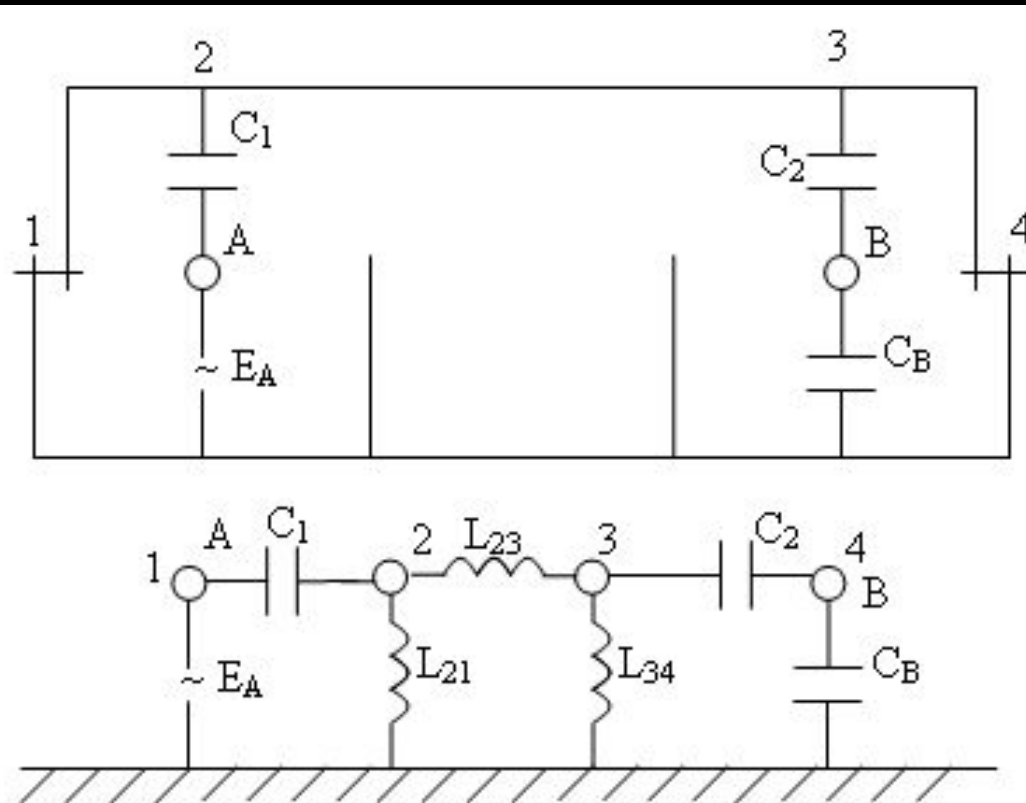


$C_1$  и  $C_2$  – ёмкости источника и приёмника помех относительно крышки;

$L_{23}$  – индуктивное сопротивление крышки.

$L_{21}$  и  $L_{34}$  – индуктивные сопротивления соединения крышки на корпус.

*Рис. 10.15. Эквивалентная электрическая схема*



Емкостное сопротивление находят по формуле

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

а индуктивное сопротивление равно

$$X_L = \omega \cdot L$$

По предложенной схеме большая часть напряжения помехи  $E_A$  оказывается на крышке, а, следовательно, через крышку на приёмнике В, т.к. индуктивное сопротивление участка 1-2

$$X_L = \omega \cdot L_{12}$$

много меньше емкостного сопротивления

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C_1}$$

Для того чтобы уменьшить коэффициент передачи помехи в такой конструкции необходимо уменьшить сопротивление соединений крышки на корпус. Для этого необходимо в каждой секционирующей перегородке обеспечить электрический контакт на крышку. В таком случае заземление крышки на корпус будет выполняться не только по периметру крышки, но и через индуктивные параллельные ветви каждой секционирующей перегородки.

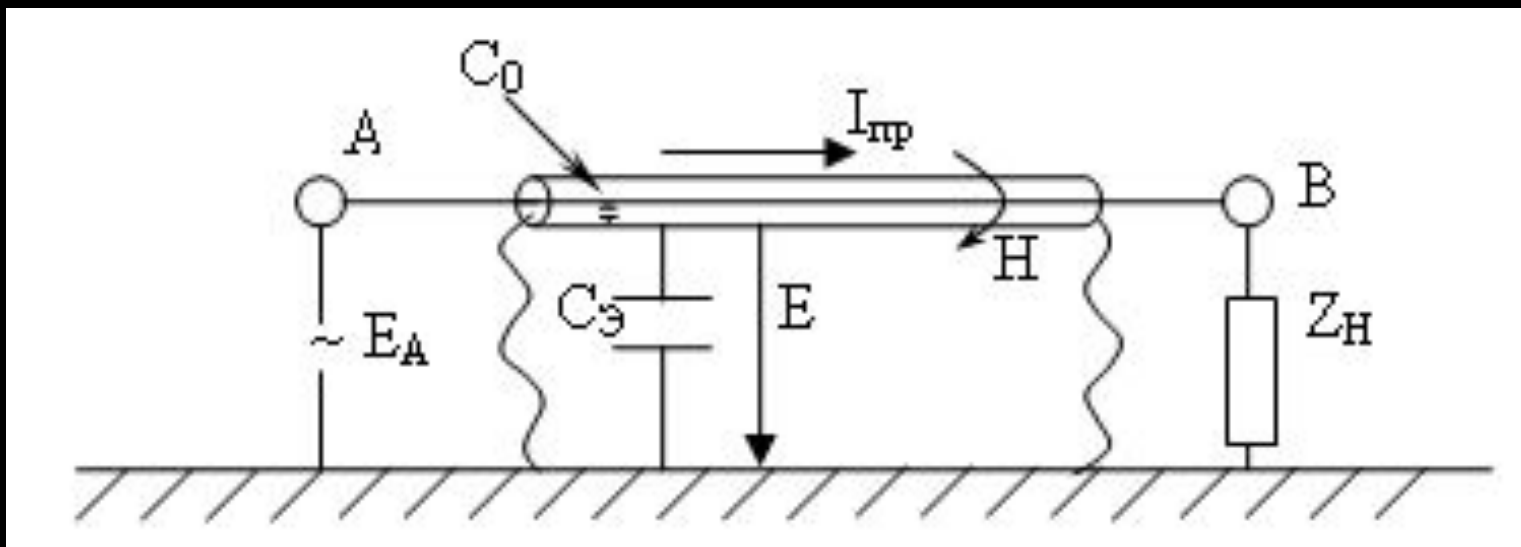
Соединить каждую секцию на крышку можно через фланец перегородки винтами на крышку, а можно с помощью контактирующих пружин — губок крышки.

Если же требуется герметичное исполнение корпуса, то можно предложить между корпусом и крышкой уплотнительную прокладку из токопроводящей резины.

### 10.5. Помехи в ЭС через электромонтаж. Особенности экранирования проводов ЭС

Провода с высоко-частотными или релаксационными токами являются источниками помех. Провода на входы усилителей (даже НЧ) могут быть приёмниками помех. Для ослабления помехи можно предложить экранирование проводов (рис. 10.16).

Рис. 10.16. Принцип экранирования провода



От источника к нагрузке по проводу АВ протекает прямой ток  $I_{\text{пр}}$ . Около провода имеет место электрическое поле напряжённостью  $E$  и магнитное поле напряжённостью  $H$ . Чтобы ослабить это поле, наденем на провод цилиндрический экран — оплётку.

Заземление провода на одном конце обеспечивает электростатическое экранирование, но не обеспечивает экранирования магнитного поля, т.к. не создаёт замкнутого контура для наведённых токов в экране. Чтобы обеспечить экранирование магнитного поля надо провод заземлить и на другом конце. Заземление экранирующей оплётки необходимо выполнить с минимальными значениями сопротивления, обычно самой оплёткой.



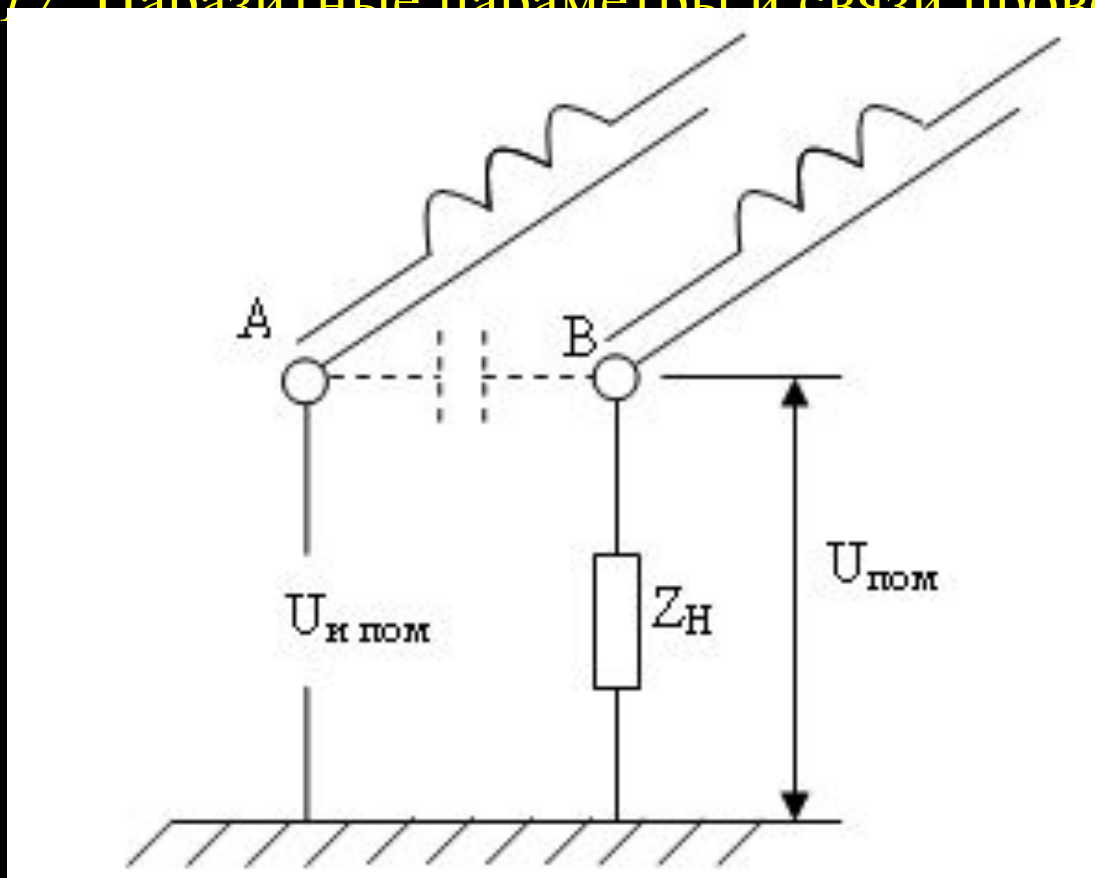
Высокое качество экранирования провода будет в том случае, если прямой ток провода равен обратному току от нагрузки, протекающему по оплетке. Такое возможно для случая использования экранированных проводов или коаксиальных кабелей для соединения между проводами, устройствами или блоками.

Экранирование провода имеет недостатки и ограничивает применение в конструкциях ЭС:

1. Увеличивается емкость провода относительно корпуса, что может быть недопустимо для некоторых проводов по схеме электрической принципиальной.
2. Экранированный провод требует изоляции или крепления в конструкции, чтобы не было заземлений на элементы конструкций, находящихся под напряжением.
3. Если длина экранированного провода соизмерима с длиной волны электромагнитных сигналов, то необходимо согласование волнового сопротивления линии с сопротивлением нагрузки.

Через печатные проводники или навесные проводники монтажа имеют место помехи с провода на провод. Такие помехи называют перекрёстными помехами. Принцип возникновения перекрестных помех показан на рис. 10.17.

*Рис. 10.17. Паразитные параметры и связи проводов*



Провод А – источник помехи имеет напряжение  $U_{\text{и пом}}$ . Провод В – приёмник помехи не имеет прямой электрической связи с проводом А. Однако между проводами существует ёмкостная и взаимоиנדуктивная паразитная связь, а, следовательно, на проводе В будет помеха  $U_{\text{пом}}$ .

Паразитные параметры монтажа в зависимости от частоты сигнала от формы импульсного сигнала оказывают следующие отрицательные влияния:

- Паразитные параметры  $L_{\text{пар}}$  и  $C_{\text{пар}}$  проводов определяют реактивные сопротивления  $X_L$ ,  $X_C$  линий связи, а, следовательно, линии связи вносят задержку сигнала по времени. Время распространения сигнала по линии:

$t_{\text{л}} = \tau_{\text{ол}} \cdot l$ , где  $l$  – длина линии,  $\tau_{\text{ол}}$  – удельная задержка распространения сигнала в линии.

$$\tau_{ол} = \sqrt{L_{пог} \cdot C_{пог}}$$

где  $L_{пог}$ ,  $C_{пог}$  – погонные индуктивности и ёмкости линии длиной в 1м.

Чтобы увеличить быстродействие устройства необходимо уменьшать длину проводов линий связи  $L$  и уменьшать их паразитные индуктивности и ёмкости.

И индуктивные и ёмкостные сопротивления электро монтажа зависят от частоты, а, следовательно, имеют различные сопротивления для различных частотных составляющих спектра сигнала.

При передаче релаксационных сигналов особенно сильно искажается фронт сигналов, т.к. длительность фронта  $\tau_{\text{ф}}$  мала по времени, а значит, имеет широкий спектр частотных составляющих.

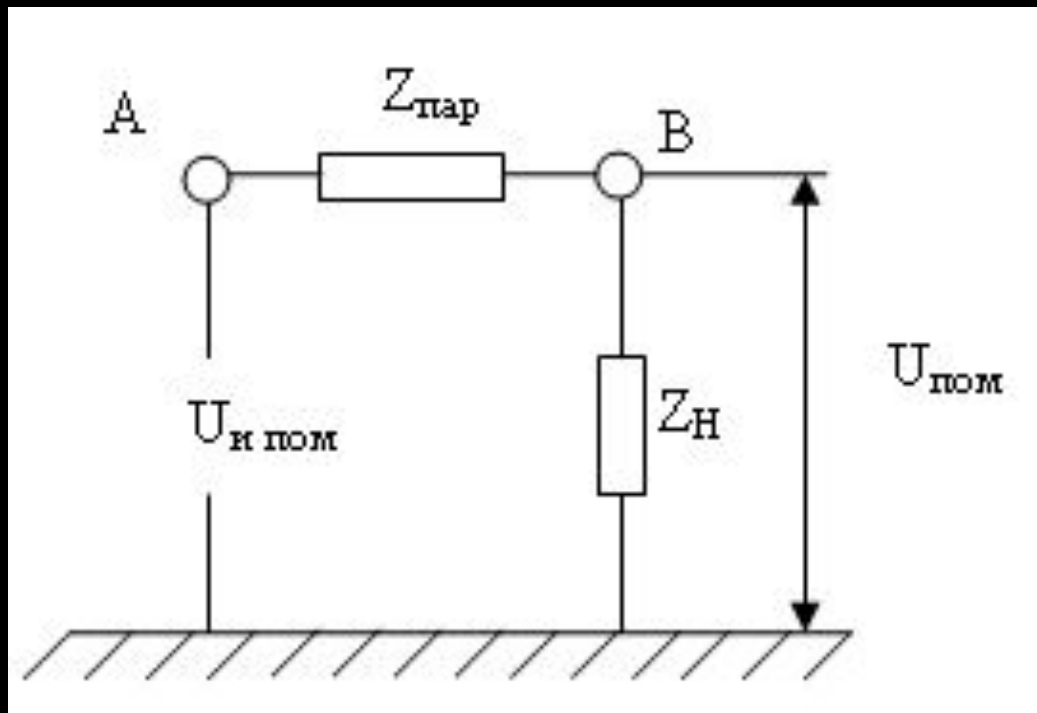
Поэтому при проектировании линий с допустимыми искажениями сигнала необходимо сравнивать длительность фронта сигнала со временем его задержки и выполнять условие

$$t_{\text{л}} = \sqrt{L_{\text{пог}} \cdot C_{\text{ног}}} \cdot 1 \leq 0,1 \tau_{\text{ф}}$$



Для того чтобы судить об устойчивости работы цифровых или аналоговых устройств необходимо рассчитывать напряжение помехи  $U_{\text{пом}}$ . Для различных видов связи обобщенная эквивалентная схема паразитной связи имеет вид, представленный на рис. 10.18.

*Рис. 10.18.* Обобщенная эквивалентная схема паразитной



В общем случае:

$$U_{\text{пом}} = U_{\text{и пом}} \frac{Z_{\text{Н}}}{Z_{\text{пар}} + Z_{\text{Н}}}$$
$$K = \frac{Z_{\text{Н}}}{Z_{\text{пар}} + Z_{\text{Н}}}$$

где  $Z_{\text{Н}}$  и  $Z_{\text{пар}}$  — комплексные сопротивления паразитной связи и нагрузки приемника.

Коэффициент передачи помехи с провода на провод будет тем меньше, чем больше паразитное сопротивление  $Z_{\text{пар}}$  между проводами.

Рассмотрим частный случай, когда  $Z_{\text{пар}}$  имеет ёмкостной характер (рис. 10.19). В таком случае

$$K = \frac{Z_H}{\frac{1}{\omega \cdot C_{\text{пар}}} + Z_H}$$

Рис. 10.19. Схема емкостной паразитной связи

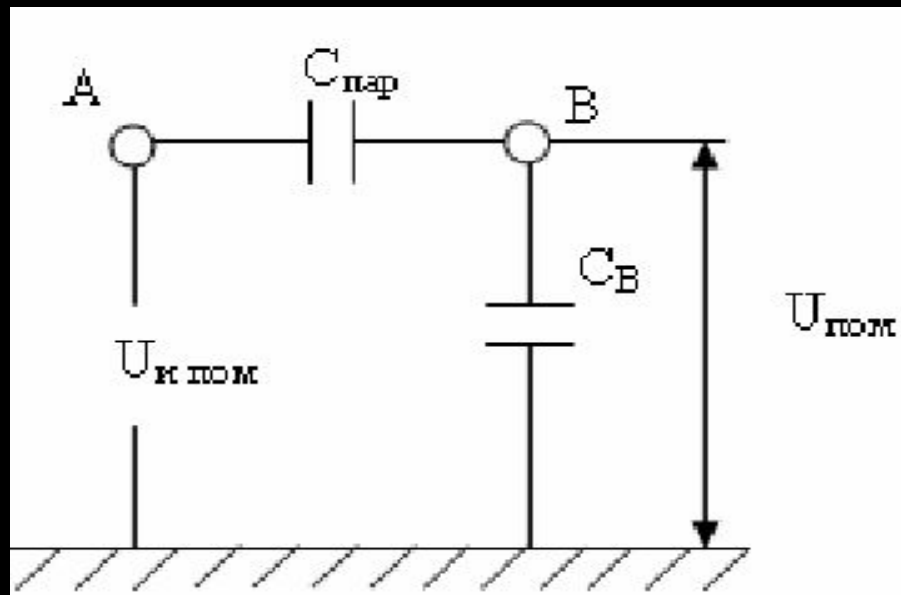
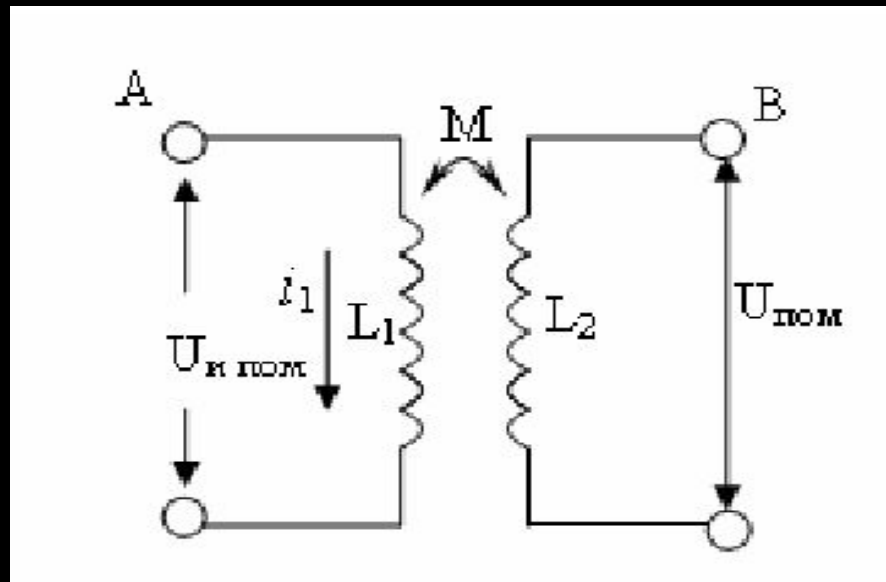


Рис. 10.20. Схема индуктивной паразитной связи



В том случае, когда нагрузка ёмкостная (конденсатор  $C_B$ ), то коэффициент передачи с провода на провод:

$$K_c = \frac{\frac{1}{\omega \cdot C_B}}{\frac{1}{\omega \cdot C_{\text{пар}}} + \frac{1}{\omega \cdot C_B}} = \frac{C_{\text{пар}}}{C_{\text{пар}} + C_B}$$

Чтобы уменьшить ёмкостную связь с провода на провод необходимо уменьшить паразитную ёмкость этих проводов.

В случае наличия индуктивности проводов имеем взаимоиндуктивную паразитную связь (рис. 10.20).

При наличии тока  $i_1$  в приводе генератора помех на высоких частотах имеем наведённые напряжения в проводе приёмника В.

$$U_{\text{пом}} = M \cdot \frac{di_1}{dt}$$

где  $M$  – коэффициент взаимоиנדукции между проводами,

$\frac{di_1}{dt}$  – скорость изменения тока в приводе генератора.

## Индucedированное напряжение помехи на провода генератора

$$U_{\text{и пом}} = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt}$$

$$\frac{U_{\text{и пом}}}{L_1} = \frac{di_1}{dt}$$

поставим  $\frac{di_1}{dt}$

$$U_{\text{пом}} = U_{\text{и ппо}} \cdot \frac{M}{L_1}$$

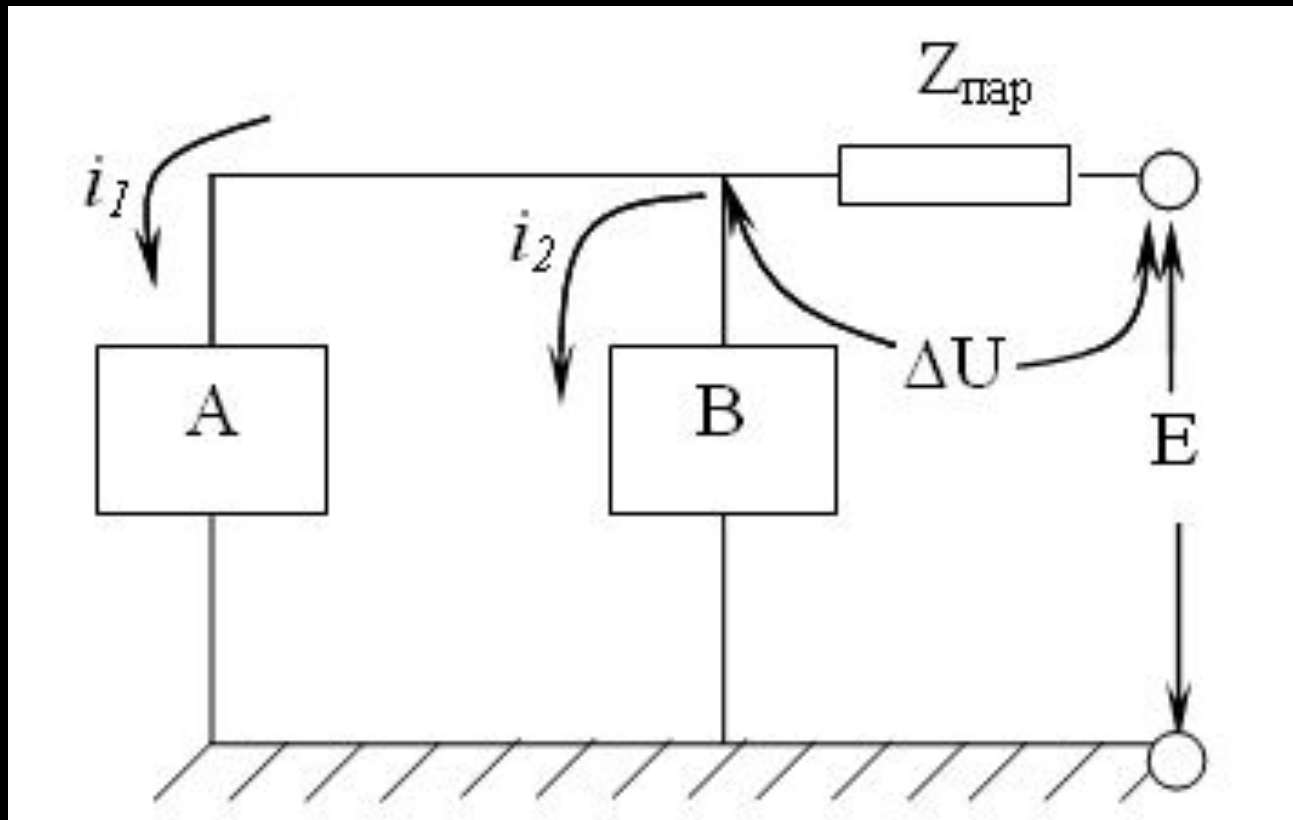
Следовательно, коэффициент перед  $K_m$  с провода на провод при взаимоиндуктивной связи прямопропорционален коэффициенту взаимоиндукции  $M$  и обратно пропорционален индуктивности  $L_1$  провода источника помех:

$$K_m = \frac{M}{L_1}$$



Между элементами А и В имеют место также кондуктивные паразитные связи за счёт наличия общих проводов между А и В, например проводов питания (рис. 10.21).

*Рис. 10.21.* Схема кондуктивной паразитной связи



$Z_{\text{пар}}$  – паразитное сопротивление проводов питания.

$$Z_{\text{пар}} = R_{\text{пар}} + j \cdot \omega \cdot L_{\text{пар}}$$

Элементы А и В имеют общий источник питания напряжением  $E$ , а значит у них общие провода питания. Через паразитное сопротивление проводов протекает суммарный ток  $i_1 + i_2$ , который создаёт падение напряжения на этом сопротивлении

$$\Delta U = (i_1 + i_2) \cdot Z_{\text{пар}}$$

## Напряжение питания на элементе А

$$U_1 = E - \Delta U = E - (i_1 + i_2) \cdot Z_{\text{пар}}$$

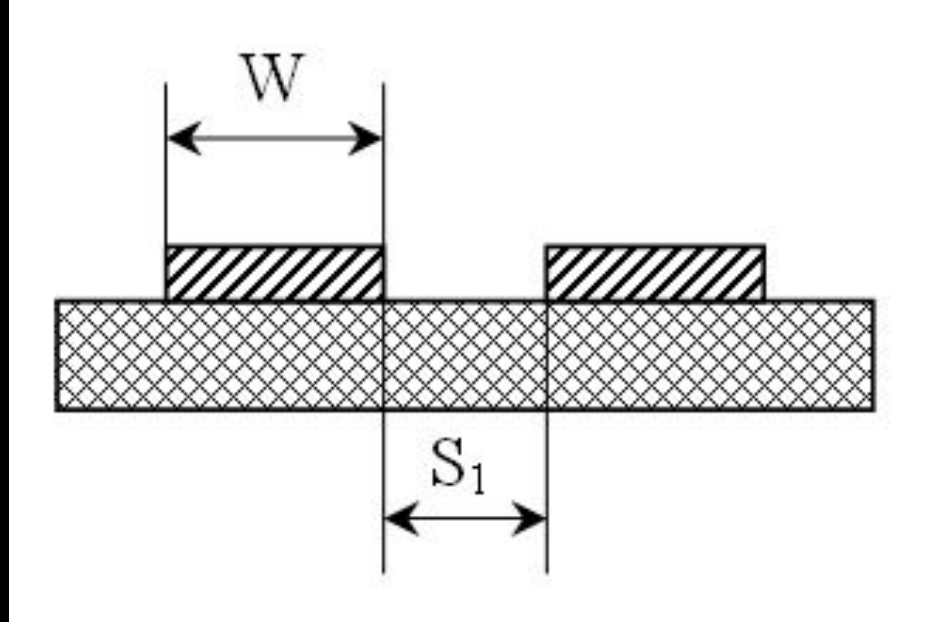
Можно видеть, что напряжение питания одного элемента зависит от токов питания других элементов. Уменьшить влияние одного элемента на другой можно уменьшая  $Z_{\text{пар}}$ , т.е. паразитное сопротивление цепей питания.

Следовательно, уменьшить кондуктивную связь можно; 1) увеличивая сечение проводов питания и уменьшая их длину, 2) уменьшая высокочастотные составляющие тока питания через источник питания, для чего в цепи питания микросхем ставят фильтрующие конденсаторы.

## 10.6. Основы расчёта паразитных параметров печатного монтажа

Паразитная ёмкость между печатными проводниками зависит от ширины печатных проводников и зазора между проводниками (рис. 10.22).

Рис. 10.22 Печатные проводники



$$C_{\text{пар}} = C_{\text{пог}} \cdot l_1$$

где  $l_1$  – длина взаимного перекрытия проводников, между которыми рассчитывается ёмкость, см,

$C_{\text{пог}}$  – погонная ёмкость между проводниками, пф/см:

$$C_{\text{пог}} = K_{\text{П}} \cdot \varepsilon'$$

где  $\varepsilon'$  приведённая диэлектрическая проницаемость диэлектрика в зазоре между проводниками.1

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon}{2}$$

где  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость воздуха,

$\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость материала платы.

Если для влагозащиты плата покрыта лаком, то

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_{\text{л}} + \varepsilon}{2}$$

где  $\varepsilon_{\text{л}}$  – диэлектрическая проницаемость лака.

$K_{\Pi}$  – коэффициент пропорциональности зависит от зазора между проводниками и ширины проводников, выбирается по графикам.

Зависимость коэффициента пропорциональности  $K_{\Pi}$  от параметра печатной платы знак представлена на рис. 10.23.



$K_{\Pi}$  – коэффициент пропорциональности зависит от зазора между проводниками и ширины проводников, выбирается по графикам.

Зависимость коэффициента пропорциональности  $K_{\Pi}$  от

параметра печатной платы  
10.23.

$$\frac{S}{W}$$

представлена на рис.

Чтобы уменьшить коэффициент передачи с провода на провод рекомендуется:

- 1) Уменьшать длину  $l_1$  смежных параллельно проходящих печатных проводников.
- 2) Увеличивать зазор  $S$  между смежными параллельными проводниками.
- 3) Такие проводники должны исполняться узкими, т.е. малой ширины  $W$ .

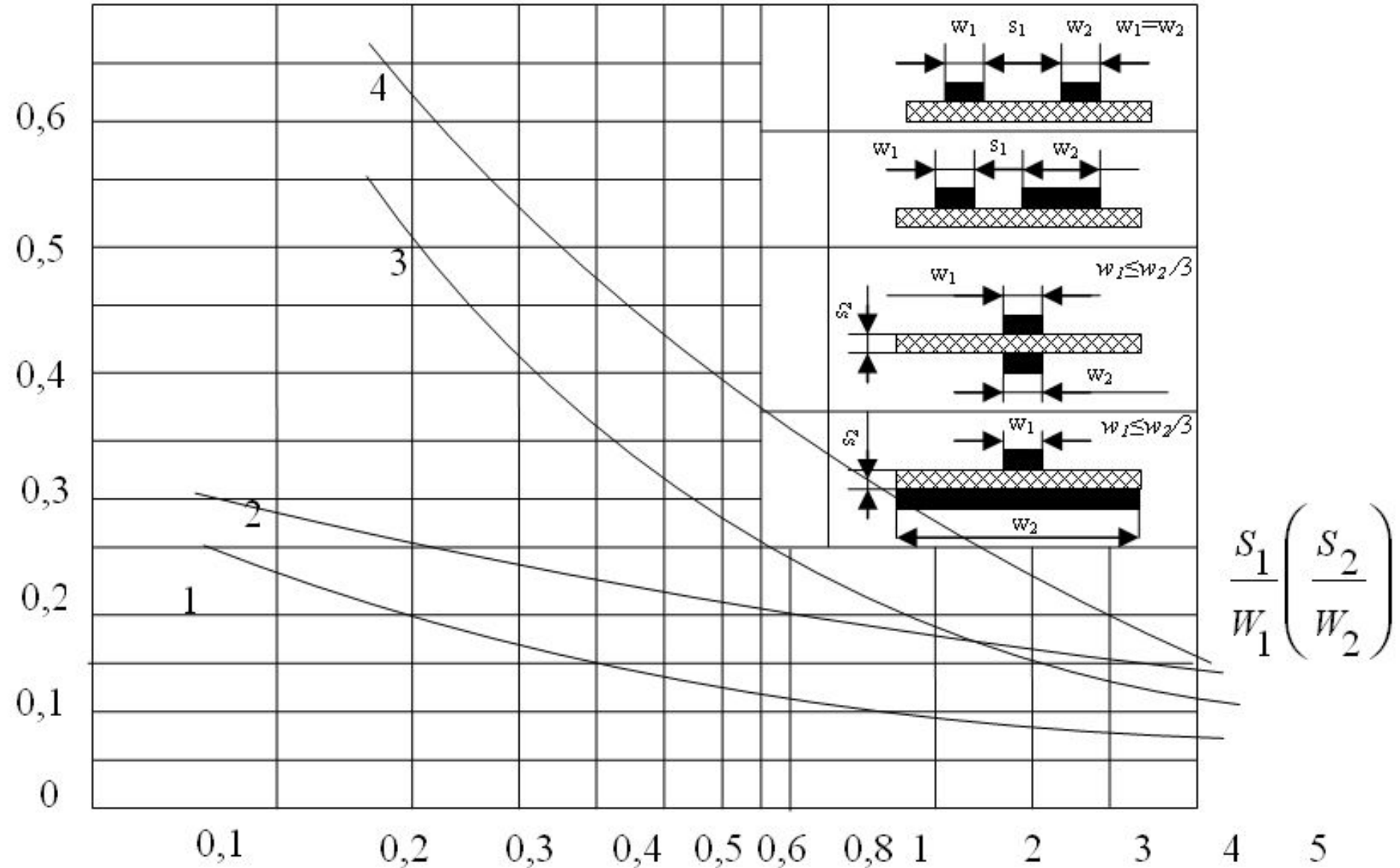
Паразитные ёмкостные связи особенно опасны в аналоговых устройствах для сигнальных цепей. Например, в усилителях особенно опасна паразитная ёмкость вход-выход усилителя (рис. 10.24).

$C_{\text{пар}}$  – паразитная ёмкость между входным и выходным усилителями.

Если ёмкость  $C_{\text{пар}}$  больше допустимых значений, то усилитель может самовозбудиться и работать в режиме автогенератора.

# Зависимость коэффициента пропорциональности $K_n$ от параметра печатной платы

$K_{nl} \text{ нФ/см}$

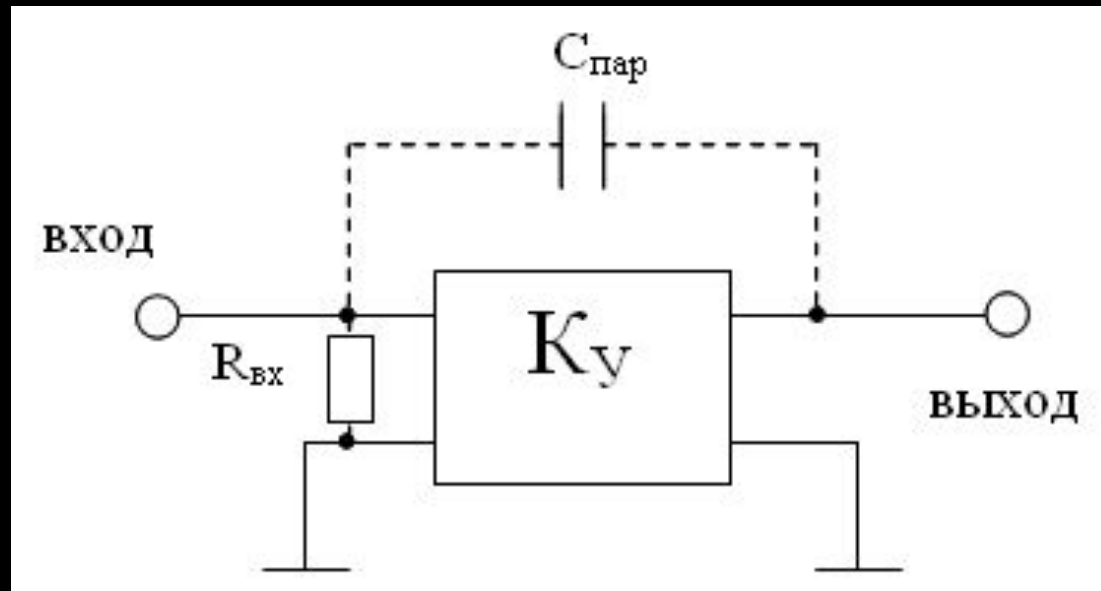


$S_1, S_2$  – расстояние между печатными проводниками;

$W_1, W_2$  – ширина печатных проводников

# Паразитная ёмкость вход-выход усилителя

Рис. 10.24. Паразитная ёмкость вход-выход усилителя



Усилитель самовозбудится, если в нём будет выполняться условие баланса амплитуд и баланса фаз в замкнутом кольце автогенератора

$$K_y \cdot K_{oc} \geq 1$$

где  $K_{oc}$  – коэффициент обратной связи, т.е. коэффициент передачи с выхода на вход усилителя.

$K_y$  – к-т усиления усилителя.

$R_{вх}$  – входное сопротивление усилителя.

$$K_{oc} = \frac{R_{ex}}{R_{ex} + \frac{1}{\omega \cdot C_{пар}}} \approx R_{ex} \cdot \omega \cdot C_{пар}$$

Значением  $R_{ex}$  в знаменателе пренебрегаем, т.к. оно много меньше емкостного сопротивления паразитной связи.

Следовательно, усилитель возбудится и будет работать в режиме автогенерации при условии:

$$K_y \cdot R_{ex} \cdot \omega \cdot C_{пар} \geq 1$$



Чтобы усилитель не возбуждался, должно выполняться обратное неравенство, а, следовательно, допустимое значение ёмкости должно быть:

$$C_{пар} < \frac{1}{K_y \cdot R_{ex} \cdot \omega}$$

Можно видеть, что усилитель легче самовозбуждается при больших коэффициентах усиления и на ВЧ. Чтобы усилитель не возбуждался необходимо пространственно разнести вход и выход, исполнить эти цепи проводниками не широкими, не параллельно.

При проектировании многокаскадных усилителей необходимо компоновать их в линию (линейка усиления) пространственно разнося выходы с сильным сигналом от входов.

Чтобы уменьшить коэффициент передачи при взаимоиндуктивной связи проводников рекомендуется:

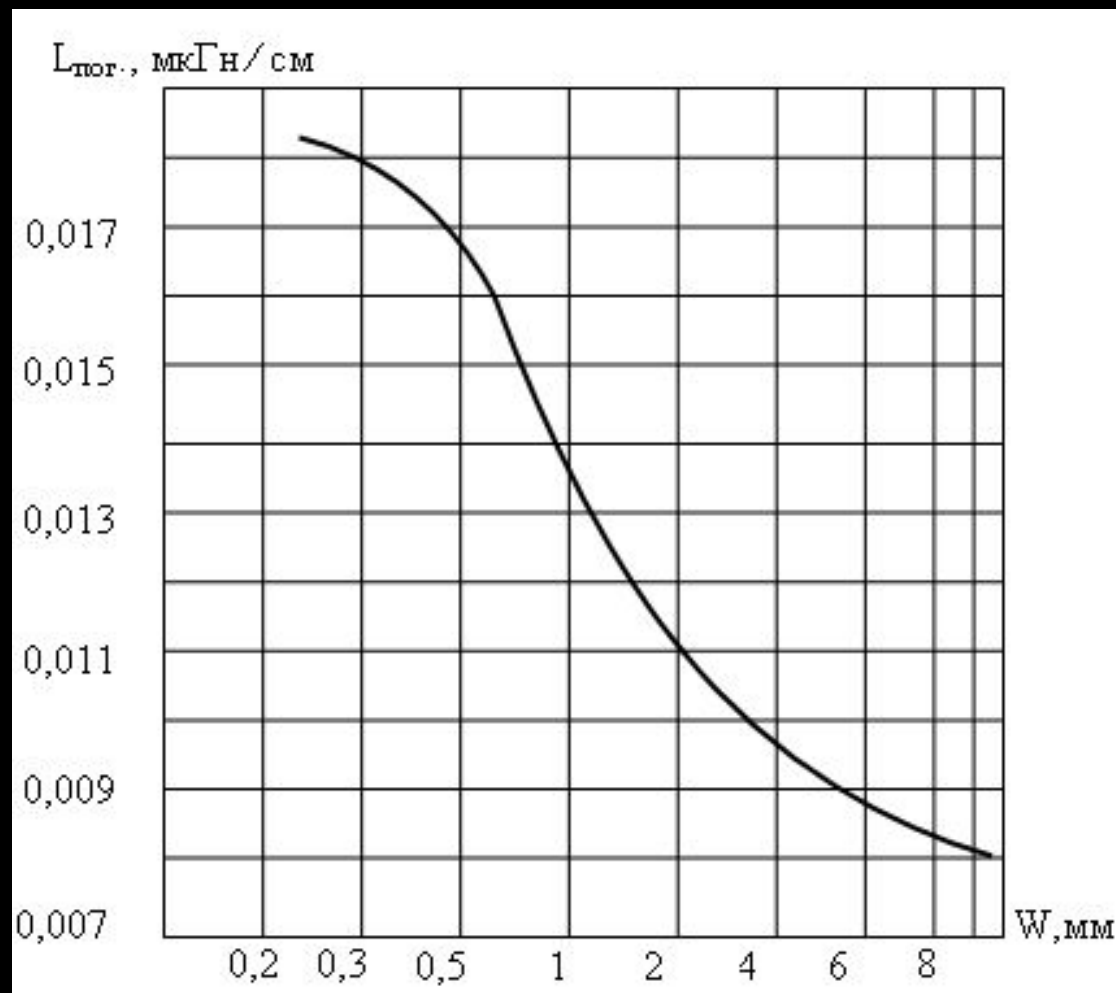
- 1) Уменьшать длину  $l_2$  параллельного прохождения сигнальных цепей печатного монтажа.
- 2) Увеличивать зазор  $S_1$  между параллельно проходящими сигнальными цепями.
- 3) Рекомендуется также цепи исполнять не параллельно, например, в разных плоскостях перпендикулярно.

Индуктивность печатных проводников определяется по формуле:

$$L = L_{\text{пог}} \cdot l_2$$

где  $L_{\text{пог}}$  – погонная индуктивность мкГн/см (индуктивность единицы длины проводника) зависит от сечения проводника, т.е. от ширины и толщины проводника.

Величина погонной индуктивности печатного проводника определяется по графику. Зависимость погонной индуктивности печатного проводника  $L_{\text{пог}}$  от его ширины  $W$  при толщине проводника 0,05 мм показана на рис. 10.25.



Можно видеть, что чем шире проводник, тем меньше его индуктивность. Поэтому для сигнальных цепей чтобы уменьшить коэффициент взаимоиנדуктивной связи рекомендуется выполнять проводники узкими.

Для уменьшения кондуктивной паразитной связи по цепям питания, необходимо выполнять цепи питания – потенциальный и корпусной провод большой ширины

$$Z_{\text{пар}} = R_{\text{пар}} + j \cdot \omega \cdot L_{\text{пог}}$$

Поэтому цепи питания и цепи корпуса рекомендуют выполнять шириной печатного проводника 3-5 мм и более.

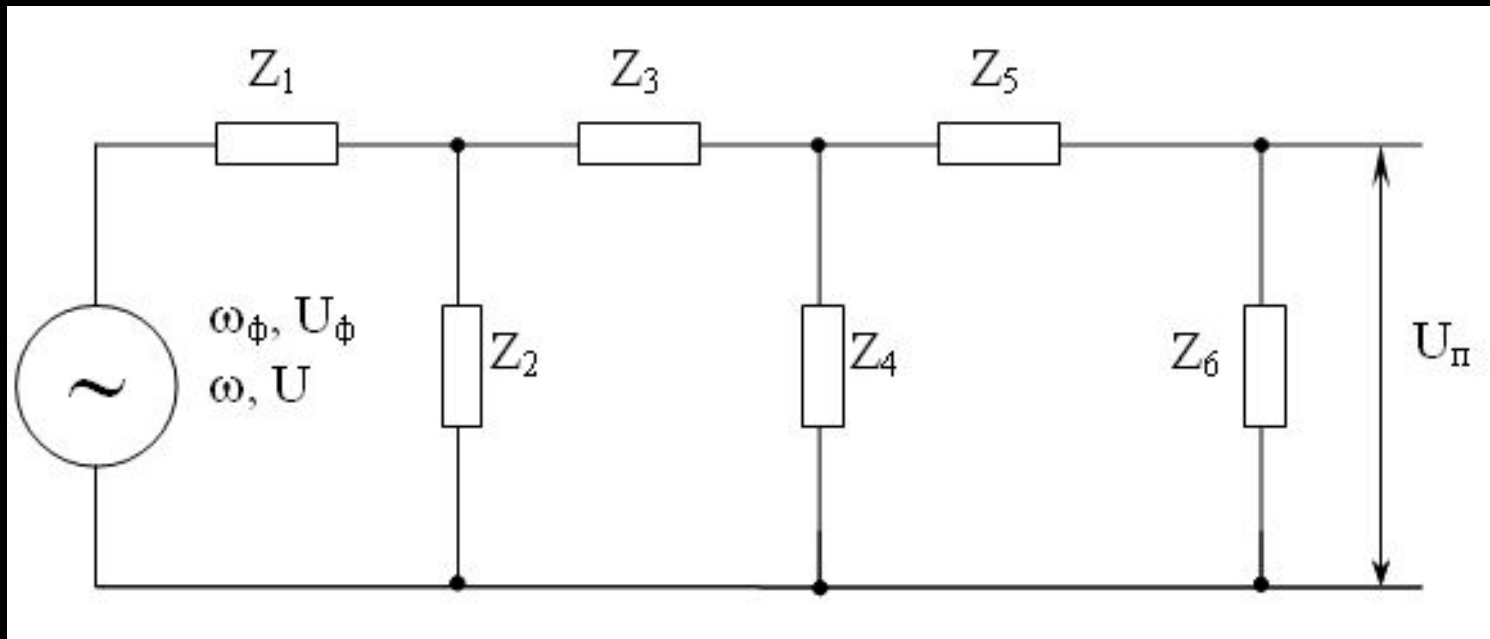
Увеличивать сечение потенциального провода питания и провода корпуса, не мешая трассировке сигнальных цепей, можно за счёт следующего:

1. Исполнять несколько параллельных цепей корпуса и питание на плате, увеличивая этим самым результирующую ширину и сокращая длину этих цепей на каждую микросхему.
2. Вместо печатных проводников использовать навесные шины питания.
3. Шины питания и шины корпуса можно и лучше располагать параллельно и рядом, т.к. большая ёмкость между ними будет работать как фильтрующая конструктивно выполненная емкость.

## ***Фильтрация напряжений наводки в проводах. Особенности проектирования фильтров.***

Помеха от источника к приёмнику может пройти через общие для них провода (через сигнальные цепи от одного устройства к другому), или же через общие цепи питания. Для ослабления помехи через общие цепи до допустимых значений в эти цепи ставят фильтры.

На рис. 10.26. представлена эквивалентная схема включения фильтра в цепь передачи сигнала от генератора к нагрузке.



$\omega, U$  – рабочая частота и рабочее напряжение генератора.

$\omega_{\phi}, U_{\phi}$  – частота и напряжение фильтруемой помехи.

Напряжение помехи  $U_{\Pi}$  на выходе фильтра зависит от величины и содержания сопротивления  $Z_i$  фильтра.



Напряжение помехи для одного звена фильтра будет равно:

$$U_{\text{п1}} = U_{\Phi} \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \approx U_{\Phi} \cdot \frac{Z_2}{Z_1}$$

т.к. сопротивление  $Z_2 \ll Z_1$  на фильтруемой частоте.

Аналогично для многозвенного фильтра:

$$U_{\pi} = U \cdot \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_4 \cdot Z_6}{Z_3 \cdot Z_5}$$

Следовательно, коэффициент передачи фильтра:

$$K = \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_4 \cdot Z_6 \cdot \dots}{Z_3 \cdot Z_5 \cdot \dots}$$

На фильтруемой частоте сопротивление параллельных ветвей  $Z_2 \cdot Z_4 \cdot Z_6 \cdot \dots$  должно быть минимально, а сопротивление последовательных ветвей  $Z_1 \cdot Z_3 \cdot Z_5 \cdot \dots$  должно быть максимально.

Т.к. емкостное сопротивление  $X_C$  обратно пропорционально частоте, а индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте, чтобы от высокочастотного фильтра не было электромагнитных помех, его обычно экранизируют.

Чтобы уменьшить коэффициент передачи помехи фильтром, необходимо выполнять определенные требования к компоновке фильтра.

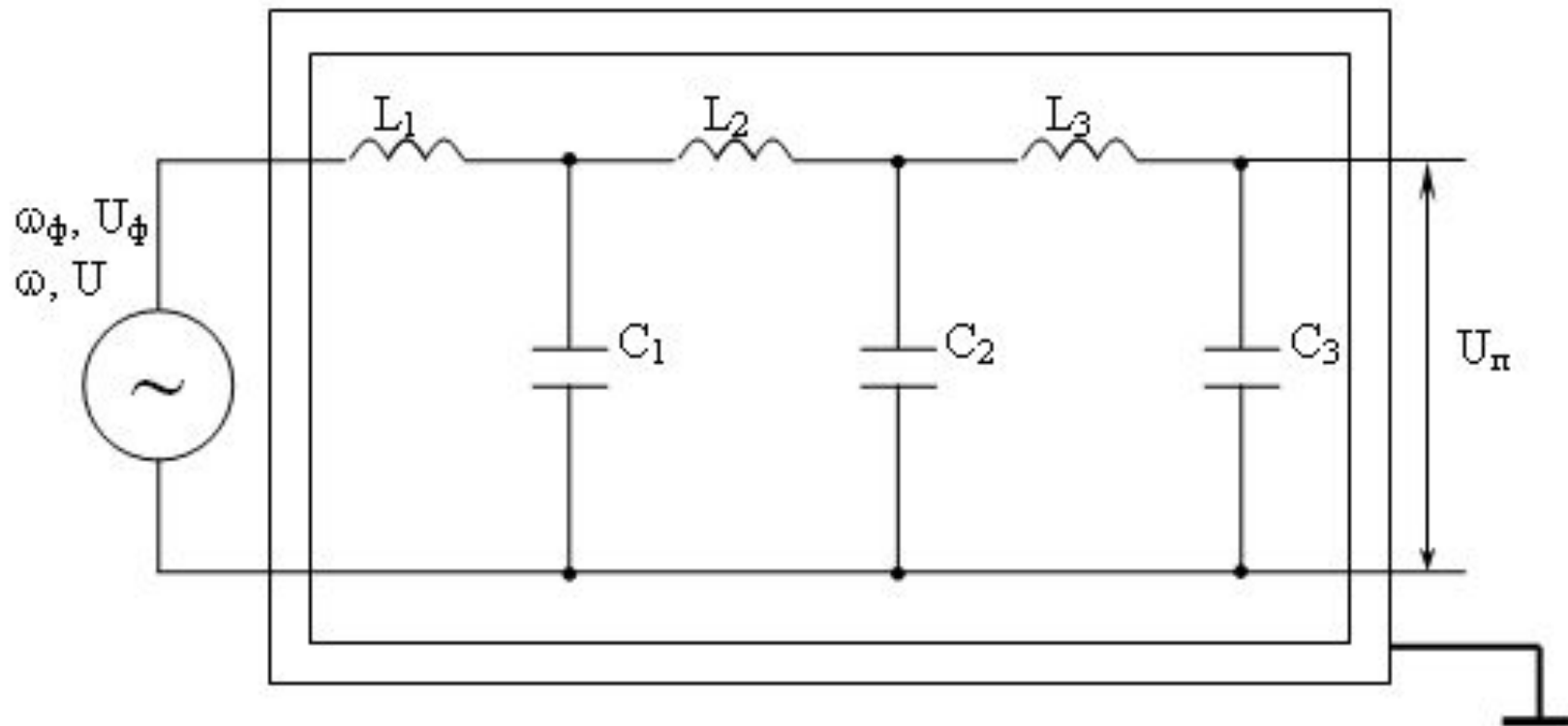
Пример неудачной компоновки фильтра показан на рис. 10.27.

Учитывая, что  $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$  и с ростом частоты падает,

$$X_L = \omega \cdot L$$

а  $X_L$  и с увеличением частоты растет, то фильтр должен содержать конденсаторы в параллельных ветвях и дроссели (индуктивности) в последовательных

*Рис. 10.27. Неудачная компоновка фильтра*



Эта компоновка имеет следующие недостатки исполнения:

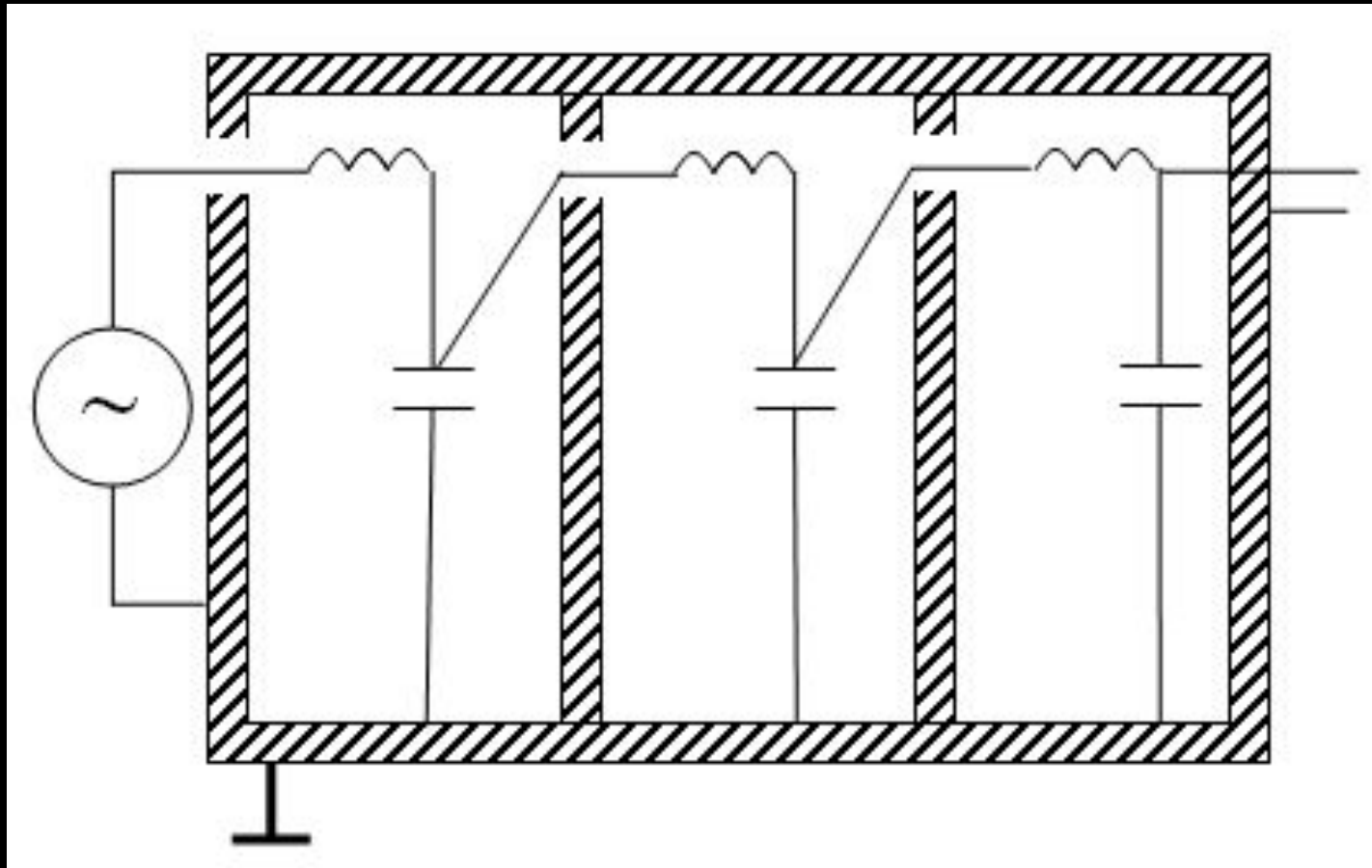
1. Индуктивности трех звеньев фильтра, расположенных рядом, не экранированы, следовательно, имеют взаимноиндуктивную связь, а значит, передают помеху за счет взаимноиндуктивной связи.
2. Конденсаторы фильтра соединяются между собой, а затем на корпусе общим проводом, что вызывает падение напряжения помехи на общем проводе, которое передается на выход фильтра.

Индуктивности звеньев фильтра соединяются между собой и общим проводом на конденсатор, что увеличивает сопротивление параллельной ветви и падение напряжения помехи в ней.

3. Если общий провод корпуса генератора проходит внутри фильтра, то на нём будет иметь место наводка напряжения помехи от звеньев фильтра.

Пример рациональной компоновки показан на рис. 10.28., где индуктивности соединяются на конденсаторы, а конденсаторы на корпус своими выводами, без общего провода; индуктивности фильтра экранированы друг от друга секционирующими перегородками корпуса фильтра; провод корпуса не проходит внутри фильтра, а в качестве провода используется сам корпус фильтра.

*Рис. 10.28. Рациональная компоновка фильтра*



Количество звеньев и номиналы элементов фильтра зависят от фильтруемой частоты и требуемого коэффициента ослабления.



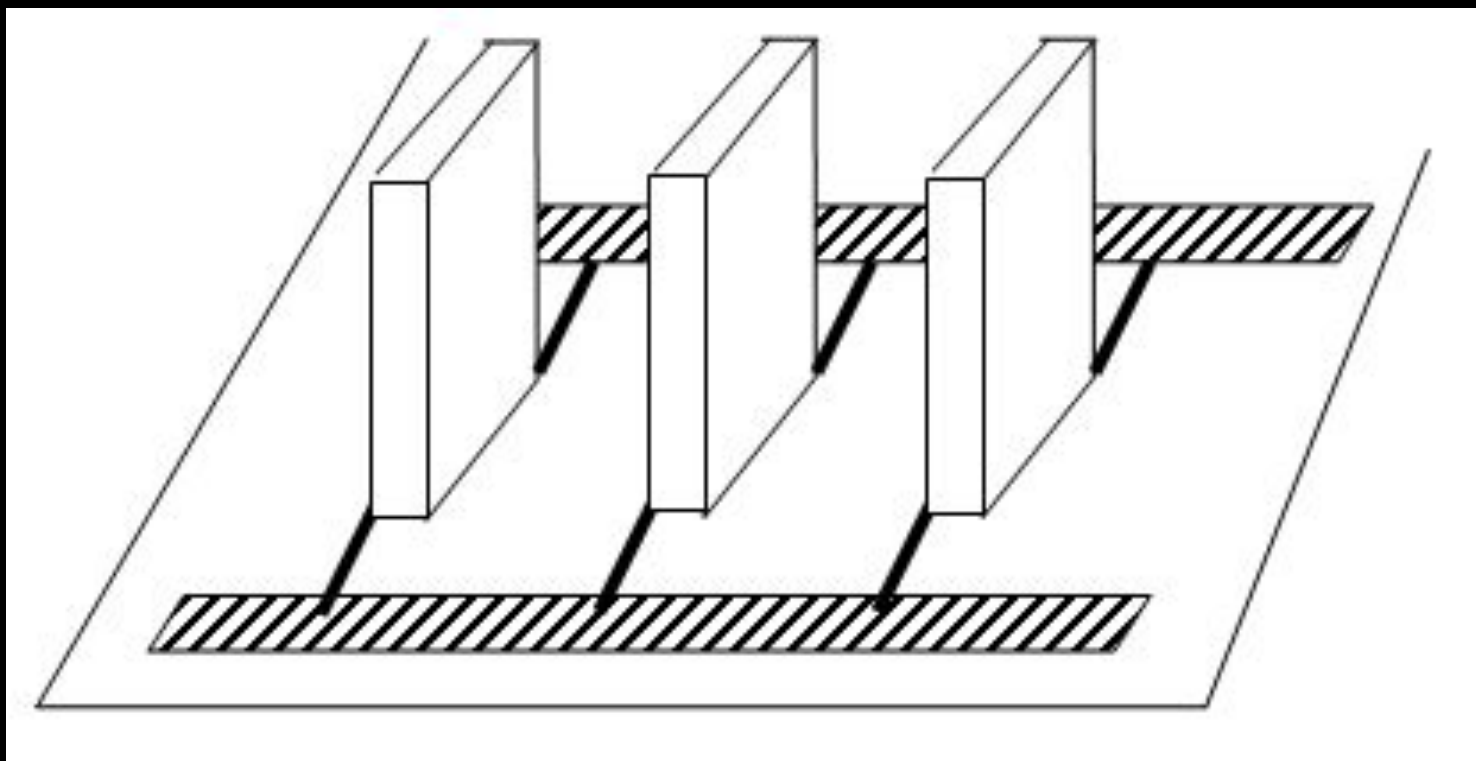
Чем выше частота фильтруемой помехи, тем меньше значение ёмкости и индуктивности фильтра. Самый простой фильтр может содержать одно звено, т.е. индуктивность-ёмкость, а то и просто фильтрующий конденсатор. Например, в цепи питания микросхем, цифровых устройств часто ставят конденсатор. Эти конденсаторы необходимо размещать непосредственно около микросхем на плате с тем, чтобы отфильтровать высокочастотные составляющие через источник питания.

## ***Особенности проектирования цепей питания и корпуса ЭС***

Цепи питания и цепи корпуса являются общими для источников и приёмников помех на плате, а поэтому, чтобы уменьшить кондуктивную паразитную связь они должны выполняться малого активного и индуктивного сопротивления. Следовательно, эти цепи должны выполняться большой ширины на плате или же навесными проводами.

Цепи питания и корпуса при ограниченной площади платы можно выполнить навесными медными шинами, с зазором над платой, что позволяет использовать площадь платы для печатных проводников. Если же цепи корпуса и питания на печатной плате исполняют большой ширины, то для облегчения условий трассировки их обычно располагают по краю платы двумя параллельными цепями.

Для межъячеечных и межплатных соединений в ЭС может использоваться коммутационная печатная плата с параллельным соединением печатных проводников по цепям питания и корпуса, как показано на рис. 10.29.



Каждую цепь корпуса на ячейке и на коммутационной печатной плате можно выводить на отдельный контакт разъема. Если в ЭС используется навесной проводной монтаж межъячеечных или межблочных соединений, то цепь корпуса может выполняться проводом достаточного сечения при последовательном соединении цепей корпуса ячеек.

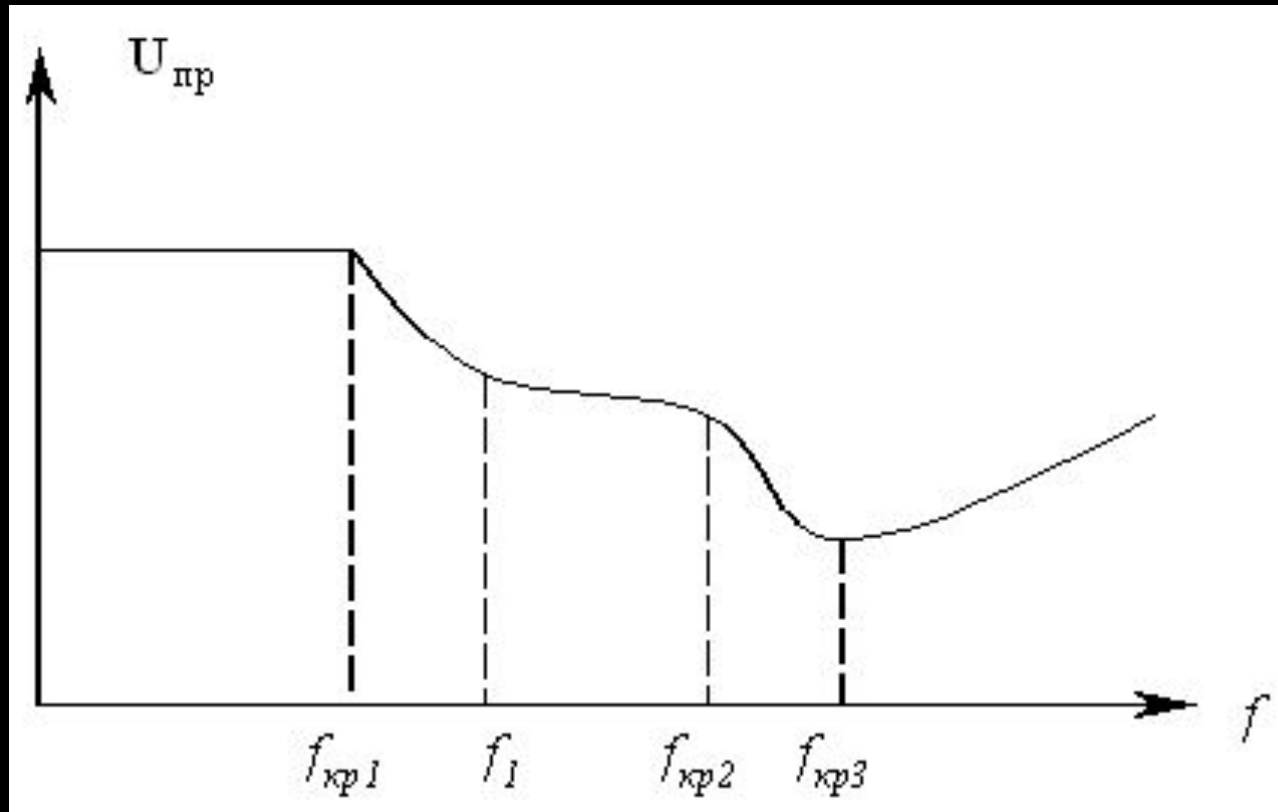
Соединение цепей корпуса на металлический корпус прибора или устройства выполняют навесным проводом-шиной на соединительный контакт на корпусе.

Соединение медного провода заземления на алюминиевый корпус непосредственно не допускается, т.к. медь и алюминий - не приемлемая для контакта пара. Соединение на корпус можно выполнить через биметаллический лепесток.

## ***Обеспечение электрической прочности в конструкциях ЭС***

Электрические поля в конструкциях ЭС могут вызвать пробой воздушных промежутков. Особенно часто такая опасность возникает в мощной передающей аппаратуре, которая строится на генераторных лампах, работающих на высоких питающих напряжениях (рис. 10.30). Диапазон частот чрезвычайно широк.

Рис. 10.30. Зависимость разрядного напряжения от частоты

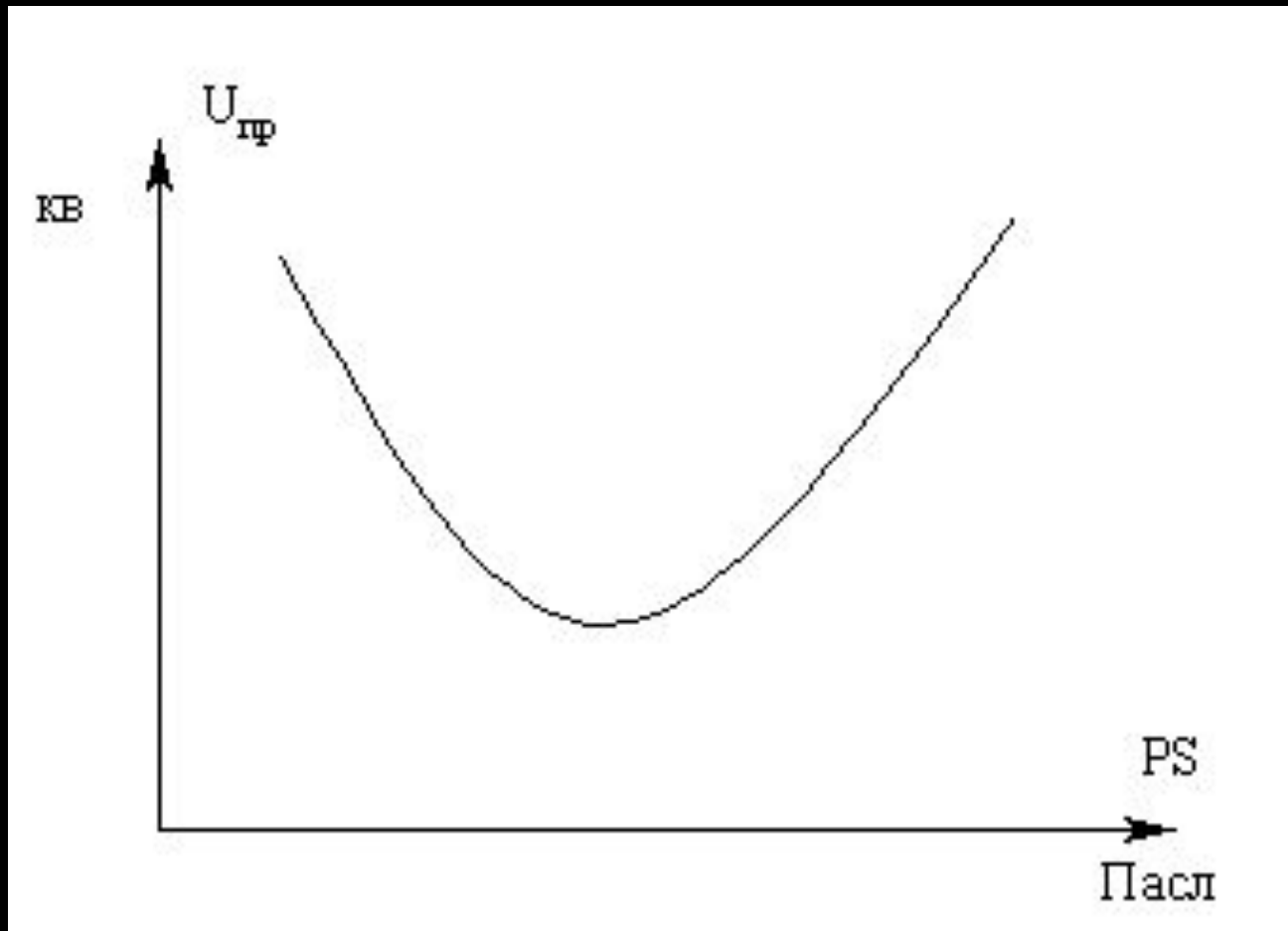


Исследования зависимости разрядного напряжения от частоты поля в воздухе при нормальных условиях позволяет разбить весь частотный диапазон на ряд поддиапазонов, в каждом из которых проявляется свой механизм развития разряда.



На рис.10.30 показан характер развития разрядного напряжения в зависимости от частоты питающего поля. При изменении частоты от 0 до  $f_{кр1}$  разрядное напряжение практически не зависит от частоты и определяется ударной ионизацией под действием электронов, приобретающих дополнительную энергию за счет электрического поля. Интенсивность ионизации в основном определяется энергией ионизации газа и средней длиной свободного пробега электронов в данном газе.

При неизменной температуре пробивное напряжение газа в однородном поле является функцией произведения давления  $P$  и расстояния  $S$  между электродами (рис. 10.31).



При атмосферных давлениях, заданных условиями эксплуатации наземной и самолетной (вертолетной) аппаратуры, пробивное напряжение соответствует правой части ветви. Аппроксимируя правую ветвь этой зависимости, можно получить простое выражение для пробивного напряжения:

$$U_{\text{пр}} = a_0 \cdot PS + b \cdot \sqrt{PS} \quad \text{— формула закона Пашена.}$$

Вводя в нее относительное давление  $P/P_0$ ,

где  $P_0 = 101,3$  кПа – давление при нормальных условиях (при  $T = 293$  K), имеем

$$U_{\text{пр}} = a_0 \cdot P/(P_0 \cdot S) + b_0 \cdot \sqrt{P/(P_0 \cdot S)}$$

Числовые значения  $a_0$  и  $b_0$  приведены в табл. 10.2.

Таблица 10.2. Числовые значения  $a_0$  и  $b_0$  для различных газов

| Постоянная    | Значения $a_0$ , $b_0$ газов |                |                |      |      |
|---------------|------------------------------|----------------|----------------|------|------|
|               | воздух                       | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | Ar   | He   |
| $a_0$ , кВ/см | 24,5                         | 26,0           | 23,5           | 5,7  | 2,01 |
| $b_0$ , кВ/см | 6,40                         | 6,35           | 9,55           | 2,26 | 2,53 |

Приведенная формула позволяет рассчитать зазоры  $S$  и оценить электрическую прочность промежутка для различных давлений при эксплуатации.

Герметичные конструкции ЭС для надежности герметизации иногда заполняют инертным газом с избыточным давлением. Учитывая, что электрическая прочность инертных газов в несколько раз меньше, чем у воздуха, тем более требуется расчет электрической прочности.