

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ РФ
МОСКОВСКИЙ КОМИТЕТ ОБРАЗОВАНИЯ**

МОСКОВСКИЙ ГОРОДСКОЙ ДВОРЕЦ ДЕТСКОГО (ЮНОШЕСКОГО) ТВОРЧЕСТВА

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ,
ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ “ИНФОРМИКА”**

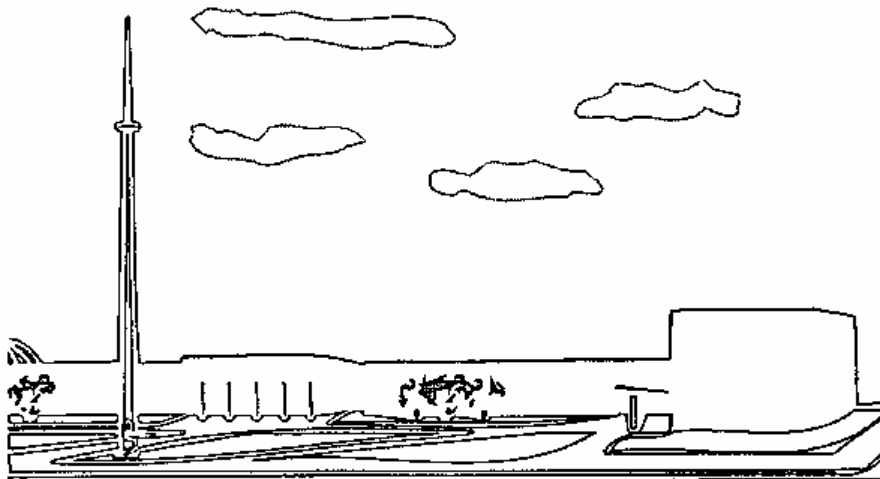
**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ (ГОУ)
«ТЕХНОПАРК ИННОВАЦИЙ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ»**

Факультет повышения квалификации
Московского межвузовского центра НИТ

В.Л. Лотоцкий

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ
УСТРОЙСТВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**
(в информационной системе МИРЭА-МГДД(Ю)Т)

учебное пособие



Москва 2002

УДК 681.3.06
ББК 32.88-421

Рецензенты: доц. Б.А.Сазонов, доц. С.Н. Ковалев
Главный редактор: Первый зам. директора МГДД(Ю)Т В.Е.Соболев
Рук. эксп. техн. комплекса: В.И.Минаков
Литературный редактор: Л.А.Карась
Технологическое обеспечение: С.В.Свечников, А.А.Савочкин, А.М.Филинов, Д.В.Двоеглазов, В.Т.Матчин
Выпускающий редактор: С.В. Свечников
Корректор и макетирование: Д.А. Блинников

Лотоцкий В.Л. Электромагнитная совместимость устройств систем управления (в информационной системе МИРЭА-МГДД(Ю)Т). Учебное пособие. МГДД(Ю)Т, МИРЭА, ГНИИ ИТТ «Информика», М., 2002. с.61.

Необходимость решения сложной задачи сосуществования различных действующих радиотехнических, электронных и электротехнических средств становится все актуальнее из-за неуклонного усложнения систем и комплексов, применяемых в народном хозяйстве страны. В связи с указанными обстоятельствами возникло новое актуальное научно-техническое направление – обеспечение электромагнитной совместимости средств, составляющих сложную систему. Значение данной проблемы неуклонно возрастает в связи с развитием новых технологий, приведших к широкому распространению полупроводниковых, микроэлектронных и микропроцессорных систем автоматического управления во всех сферах человеческой деятельности.

Предлагаемое учебное пособие посвящено рассмотрению широкого круга вопросов, связанных с воздействием на устройства автоматики и радиоэлектроники электромагнитных помех различного происхождения. Систематизированы и проанализированы виды и источники электромагнитных помех, пути их проникновения в устройства автоматики, способы и средства ослабления и подавления помех. Анализируются схемные решения, конструктивные мероприятия и методы ослабления влияния помех, обеспечивающие повышенную надежность системы управления.

Особенностью учебного пособия является то, что его электронная версия в виде многомодульной композиции размещена в ИС МИРЭА-МГДД(Ю)Т по специальности 071900 «Информационные системы в образовании».

Библиограф.: 7 назв.

ISBN 5-8094-0018-3

ББК 3288-421

Лицензия на издательскую деятельность: ЛР №040686 от 27 мая 1999

Адрес в МГДД(Ю)Т: email – cnit@mgdtd.ru 119991, Москва, ул. Косыгина, д.17, комн. 4-21, 4-31.

Адрес в МИРЭА: email – cnit@mirea.ru 117454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

МГДД(Ю)Т Заказ Тираж

ВВЕДЕНИЕ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Система автоматического управления (СУ) - это иерархически организованная и целенаправленно функционирующая совокупность радиоэлектронных, вычислительных, электромеханических и других информационно связанных и взаимодействующих устройств, обеспечивающих выполнение в полном объеме задач, связанных с обслуживанием определенных объектов (станки, поточные линии, роботизированные установки, транспортные средства и т.д.).

К устройствам, входящим в состав СУ, относятся измерительные и нормирующие преобразователи, усилительно-преобразующие устройства, вычислительные устройства, электромеханические преобразователи, источники электропитания и др. В состав СУ входят также контрольно-измерительные и индикаторные приборы, а также устройства защиты при аварийных и аномальных режимах. В зависимости от функциональной задачи, выполняемой СУ, последняя может иметь различное конструктивное исполнение. В одном случае устройства СУ составляют единое аппаратное целое (станки, автомобиль и др.) и размещаются в одном кожухе. В других случаях (управляемые на расстоянии объекты) СУ разбиваются на блоки, соединяемые линией связи. Иногда информационное воздействие может произойти при помощи излучения (электромагнитного, светового, теплового и др.), т.е. беспроводным способом.

При проектировании СУ одновременно разрабатывается для неё нормативно-техническая документация (паспорт, инструкция по эксплуатации с указанием характерных неисправностей), определяющая те предельные состояния, при достижении которых дальнейшая эксплуатация СУ должна быть прекращена во избежание выхода из строя. К числу таких состояний относятся:

- 1) неустранимое нарушение требований безопасности (перегрев, утечка изоляции);
- 2) неустранимый уход заданных в паспорте параметров за установленные пределы;
- 3) неустранимое снижение эффективности эксплуатации ниже эффективной (анормальные режимы);
- 4) необходимость проведения среднего или капитального ремонта и т.д.

На этапе проектирования СУ установление предельных состояний эксплуатации следует рассматривать как ограничения, налагаемые на принимаемые технические решения. Среди них ограничения производственного характера:

1. Ограничения, обусловленные схмотехническими возможностями (разработанность проблемы, элементная база, уровень унификации).
2. Ограничения, обусловленные технологическими возможностями производства (обработка исходных материалов, сборочные операции).
3. Ограничения по срокам и стоимости (вид производства, единичное, мелкосерийное, серийное).

На выбор принимаемых конструктивных решений оказывают влияние следующие эксплуатационные факторы:

1. Требования по электрической и конструктивной совместимости с другими устройствами системы и с другими системами создают возможность совместимой работы различных устройств и систем. Здесь совместимость обеспечения разработкой ряда стандартов на характеристики информационных сигналов (при помощи нормирующих преобразователей), источников питания с унифицированными параметрами, конструктивных решений и установочно-присоединительных размеров.

2. Эргономические и технико-эстетические требования - требования совместимости системы с оператором, чтобы обеспечить максимальную производительность оператора, создав ему комфортные условия как в смысле физических, так и психологических нагрузок.

3. Требования по ремонтпригодности обеспечивают снижение расходов на эксплуатацию. Здесь необходимо обеспечить возможность ремонта и замены любых элементов, которые могут отказать в процессе эксплуатации.

4. Требования по совместимости с внешней средой должны обеспечивать работу изделий в условиях климатических, механических и электромагнитных воздействий окружающей среды и отсутствие заметного влияния на внешнюю среду.

Только полный тщательный учет всех мешающих факторов и особенностей работы устройств СУ позволит проектировать надежные и эффективные средства автоматизации. В этом заключается смысл проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС).

1. ЗАДАЧИ ЭМС. ХАРАКТЕРИСТИКА ПОМЕХ СУ

Обеспечение совместимой работы различных устройств в СУ составляет предмет ЭМС как самостоятельное научно-техническое направление. Стремление уменьшить общие габариты современной аппаратуры приводит к необходимости уплотнять компоновку как самих приборов, так и элементов, располагающихся внутри приборов. В то же время усложнение задач (функциональной насыщенности аппаратуры) требует значительного увеличения концентрации мощности в ограниченном объеме. Обеспечение в этих условиях совместной работы различных устройств составляет в настоящее время важнейшую научно-техническую проблему.

Основными задачами этой проблемы являются:

1. Выявление источников и причин возникновения электромагнитных помех (ЭМП).
2. Определение восприимчивости аппаратуры к ЭМП.
3. Разработка эффективных мер защиты аппаратуры от ЭМП.
4. Разработка методов прогнозирования ЭМС.
5. Учет тепловых и других воздействий в аппаратуре.

ЭМС можно определить как свойство аппаратуры функционировать в заданной электромагнитной (или другого вида) обстановке. При этом подразумевают, что само рассматриваемое устройство не должно неблагоприятно воздействовать на работу другого устройства и в то же время противостоять его воздействию.

Электромагнитные помехи - электрические, магнитные, электромагнитные процессы, создаваемые любым источником в пространстве и в проводящей среде. Которые могут привести к искажению полезного сигнала. По признаку своего происхождения ЭМП подразделяются на внешние (межсистемные) и внутренние (внутрисистемные).

Внешние помехи создаются другой системой, имеющей то же или иное функциональное назначение. В качестве внешней системы выступает окружающая среда со всем комплексом происходящих в ней явлений. К внешним помехам относятся атмосферные, космические и промышленные.

Атмосферные и космические помехи являются следствием естественных процессов, происходящих в природе: грозовых разрядов, солнечной радиации, космических излучений, магнитных бурь и т.п. Наиболее существенные помехи могут возникать при грозовых разрядах, т.к. молния создает очень сильное электромагнитное поле, приводящее к значительному изменению напряжения в линиях электропередачи при нарушении их изоляции.

Для широкого класса систем особенно опасны промышленные помехи, которые создаются аппаратурой дуговой и контактной сварки, силовой пускорегулирующей аппаратурой, электрооборудованием, электромеханическими установками, медицинской аппаратурой, кабельными трассами и т.п.

Из внешних причин чаще всего встречается недопустимое изменение или кратковременное пропадание входного переменного напряжения системы электропитания.

Это связано с неустойчивой работой первичной сети или же с нарушением правил эксплуатации электроустановок со стороны потребителей работающих в нестационарных режимах и питающихся с СУ от общей трансформаторной подстанции.

К внешним относятся также помехи, образующиеся в результате электростатических разрядов между обслуживающим персоналом (операторы, техники) и корпусом аппаратуры. Электростатический разряд высокого напряжения возникает в сухой среде при синтетических покрытиях полов и искусственных материалах одежды обслуживающего персонала.

Под внутренними помехами следует понимать такие, которые создаются устройствами самой системы (внутрисистемные помехи). Особенно опасны в этом отношении электромеханические исполнительные устройства (электродвигатели, реле, контакторы и т.д.) и автономные источники питания. У последних возникновение помех связано с тем, что эти устройства включают в себя элементы, узлы и цепи нелинейного преобразования сигналов с широким спектром частот, значительного изменения импульсных напряжения и тока. Компактное конструктивное выполнение аппаратуры (микроминиатюризация) приводит к сближению электротехнических элементов (дросселей, трансформаторов) источника вторичного электропитания к электронным устройствам. При этом по шинпроводам протекают огромные токи, достигающие несколько килоампер при напряжениях на БИС и СБИС порядка 3-5 В. Это создает сильное магнитное действие на близкорасположенный кристалл.

К другим видам внутренних помех относятся помехи, не предусмотренные электрической схемой аппаратуры: шум и наводки. Шумы - это электрические сигналы (помехи), возникающие в электронных приборах, резисторах и конденсаторах, а также кристаллах, независимо от наличия сигналов и внешних связей. Шумы в основном обусловлены тепловыми флуктуациями носителей зарядов и имеют случайный характер. Шумовые параметры приводятся в технических условиях на элементы.

Наводки - это помехи, возникающие в одиночных (независимых) линиях связи вследствие волновых процессов и в зависимых линиях связи, обладающих емкостной и индуктивной паразитными связями.

Достаточно часто в радиоэлектронных устройствах возникают паразитные связи по устройствам заземления, а также в силу неэквипотенциальности корпусных конструкций.

В радиоэлектронных устройствах могут иметь место помехи, проникающие из силовой сети. Для средств цифровой техники особую опасность представляют импульсные помехи, возникающие при различных коммутациях, аварийных режимах, скачках и провалах питающего напряжения и т.п. Указанные помехи являются внешними, если они возникают в первичной питающей сети, и внутренними, если источник их возникновения связан с работой устройства вторичного электропитания.

Проникновение помех в систему от источника помех может происходить двумя путями: излучением (т.е. без непосредственного контакта источника и приемника помех) и кондуктивным путем, т.е. когда помеха от источника к приемнику проникает через проводящую среду: кожухи, шасси, экраны, оплетки, устройства заземления, силовые или сигнальные кабели и др. Сюда же можно отнести помехи, проникающие через диэлектрики (естественные и искусственные конденсаторы).

Шумы и наводки возникают в самих устройствах СУ вследствие неидеальности элементов и линий связи между ними. Здесь устройство является одновременно источником и приемником помех.

2. МЕТОДЫ РЕШЕНИЕ ЭМС УСТРОЙСТВ СУ

Проблема ЭМС чаще всего решается конструкторскими методами и реже схемотехническими.

К конструкторским методам относятся:

- 1) рациональная компоновка блоков и узлов;
- 2) выбор конструктивных материалов, не реагирующих или слабо реагирующих на электромагнитные поля;
- 3) экранирование, при помощи которого ослабляется электромагнитное поле;
- 4) заземление;
- 5) решение задачи отвода тепла от нагревающих элементов;
- 6) термостатирование термочувствительных элементов;
- 7) амортизация - защита от воздействий вибрации;
- 8) защита от ионизирующих радиационных излучений.

Для обеспечения ЭМС при конструировании СУ следует определить наличие помехонесущего поля, его вид, напряженность и направление, оценить чувствительность блоков и узлов к воздействию этого поля, а затем разработать компоновку аппаратуры таким образом, чтобы устранить или ослабить влияние этого поля.

Если ЭМС рациональной компоновкой не обеспечивается, то следует применять ЭКРАНИРОВАНИЕ узлов и блоков СУ (приемники помех), чувствительных к этим полям, или ЭКРАНИРОВАНИЕ источников поля (источников помех).

К схемотехническим методам относятся:

- 1) фильтрация;
- 2) стабилизация;
- 3) заземление;
- 4) рациональный монтаж.

Выбор метода борьбы с помехами должен осуществляться путем технико-экономического анализа.

Из конструкторских методов наиболее предпочтительна рациональная компоновка блоков и узлов, т.е. их оптимальное размещение и ориентация в пространстве.

При неэффективности этого метода применяется ослабление электромагнитных помех посредством экранирования.

В случае помех, проникающих кондуктивным путем, и наводок применяются схемотехнические методы.

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХОНЕСУЩИЕ ПОЛЯ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

3.1. Электростатическое поле

Оно создается наличием электрических зарядов, неподвижных в пространстве и неизменных во времени, и характеризуется напряженностью поля \vec{E} и потенциалом φ , которые связаны соотношениями:

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi \text{ или } \vec{E}d\vec{l} = -d\varphi$$

Источниками электростатического поля являются элементы (металлические компоненты конструкции) и провода, находящиеся под напряжением.

Электростатическое поле наводит потенциалы на поверхностях приемника помехи, т.е. вызывают появление собственного электростатического поля приемника.

3.2. Магнитостатическое поле

Оно создается при протекании постоянного тока по неподвижному проводнику или постоянным магнитом и характеризуется напряженностью \vec{H} и индукцией \vec{B} , связанных между собой соотношением:

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H}$$

где μ_a - абсолютная магнитная проницаемость среды.

Все провода, элементы конструкции, металлизированные покрытия, по которым протекает постоянный ток, являются источниками магнитостатического поля. Магнитостатическое поле создает намагниченность ферромагнитных деталей приемника, т.е. вызывает появление собственного магнитостатического поля.

3.3. Электромагнитное поле.

Оно создается:

- 1) при протекании переменного тока по неподвижному проводнику;
- 2) при протекании постоянного тока по движущемуся в пространстве проводнику;
- 3) при наличии комбинации указанных выше процессов.

Электромагнитное поле характеризуется соотношением величин векторов \vec{E} и \vec{H} , их взаимной ориентацией в пространстве и скоростью их изменения во времени.

Распространение электромагнитной энергии излучения в каждый момент времени определяется величиной и знаком векторного произведения:

$$\vec{P} = [\vec{E} \cdot \vec{H}]$$

называемого вектором Пойтинга, который является вектором плотности потока электромагнитной мощности в точке пространства.

$$\text{Размерность: } \vec{E} = \left[\frac{B}{M} \right], \vec{H} = \left[\frac{A}{M} \right], \vec{P} = \left[\frac{Bm}{M^2} \right]$$

Вектор \vec{P} определяет мощность, проходящую через единицу площади.

Электромагнитное поле в конструкциях СУ приходится учитывать чаще, чем статические поля.

Подход к изучению электромагнитного поля зависит от частоты (длины волны) и расстояния приемника от источника помехи.

Различают: ближнюю и дальнюю зоны.

3.4. Ближняя зона электромагнитного поля

Для этой зоны расстояние от источника поля (помехи) до точки его воздействия на приемник много меньше длины волны, т.е.:

$$r \ll \lambda = \frac{v_\phi}{f}$$

v_ϕ - фазовая скорость (скорость фазовой плоскости, т.е. поверхности, плоской электромагнитной волны); она не зависит от частоты колебаний и определяется только параметрами среды.

В общем случае: $v_\phi = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a}}$, где $\epsilon_a = \epsilon \cdot \epsilon_0$, $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$

Для вакуума (воздуха): $\varepsilon_a = \varepsilon_o = 8,86 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\Phi}{\text{м}} \right]$

$$\varepsilon=1, \mu=1 \quad \mu_a = \mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\Gamma\text{Н}}{\text{м}} \right]$$

и тогда

$$v_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_o \mu_o}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \quad \text{скорость света}$$

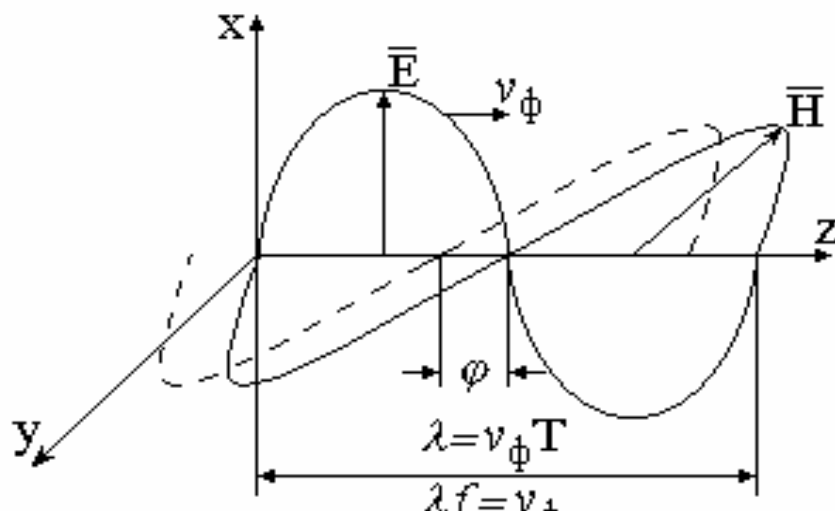


Рис.3.1.

воздух, вакуум $\varphi=0$

хороший проводник $\varphi = \frac{\pi}{4} (45^\circ)$

В звуковом диапазоне частот $f = 20 \text{ Гц} \dots 20 \text{ кГц}$

$$\lambda_{\min} = 15 \text{ км} \quad (\text{для } 20 \text{ кГц})$$

Возьмем радиодиапазоны:

$$\text{КВ} \quad f = 4 \dots 20 \text{ МГц} \quad \lambda = 75 \dots 15 \text{ м}$$

$$\text{УКВ} \quad f = 65 \dots 73 \text{ МГц} \quad \lambda = 4,1 \dots 4,6 \text{ м}$$

Эти расчеты показывают, что в пределах одного блока, прибора или узла практически во всех диапазонах мы имеем электромагнитное поле в ближней зоне.

В ближней зоне можно пренебречь излучением энергии и применять все законы статических полей, учитывая, что:

- 1) элементы с изменяющимся потенциалом (слаботочные, высоковольтные) создают преимущественно электрическое поле \bar{E} ;
- 2) элементы с переменными токами (сильноточные, низковольтные) создают преимущественно магнитное поле \bar{H} .

3.5. Электрическое поле

Если источники помехи создают преимущественно электрическое поле, а приемник находится в ближней зоне, то учитывается емкостная связь между ними.

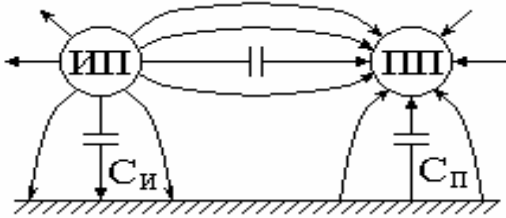


Рис.3.2.

расчетная схема

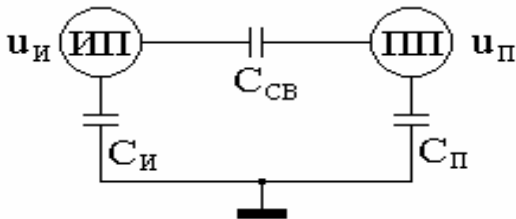


Рис3.3.

ИП - источник поля

ПП - приемник поля

C_{CB} - емкость между источником и приемником (связи)

$C_{И}$ - емкость между источником и корпусом устройства или землей

$C_{П}$ - емкость между приемником и корпусом устройства или землей

$u_{И}$ - напряжение, создаваемое источником поля

$u_{П}$ - напряжение, наведенное в приемнике поля

Из расчета:

$$u_{П} = u_{И} \cdot \frac{(C_{П} + C_{И}) \cdot C_{CB}}{(C_{П} + C_{И}) \cdot C_{CB} + C_{П} \cdot C_{И}}$$

Для ослабления действия нужно уменьшить C_{CB} или увеличить емкостное сопротивление связи:

$$x_{CB} = \frac{1}{\omega C_{CB}}, \text{ где } \omega - \text{ круговая частота помехи.}$$

3.6. Магнитное поле

Если источник создает преимущественно магнитное поле, изменяющееся во времени, а приемник поля находится в ближней зоне, то учитывается магнитная связь между ними.

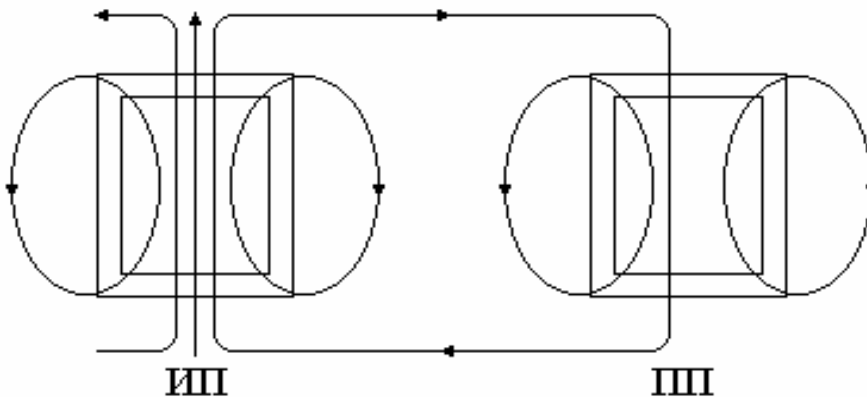


Рис.3.4.

Часть магнитных силовых линий, создаваемых ИП, пронизывает ПП. Изменяясь во времени магнитное поле наводит в приемнике индукционные токи, которые могут быть помехой по отношению к собственным рабочим токам приемника. Кроме того, наведенные в приемнике токи создают новое собственное поле приемника, не соответствующее его рабочему полю.

3.7. Дальняя зона электромагнитного поля

В дальней зоне расстояние от источника поля до точки наблюдения соизмеримо с длиной волны или больше длины волны, т.е.:

$$r \approx \lambda \text{ или } r \gg \lambda$$

От источника поля в пространство излучается сферическая волна. На расстояниях $r > 5\lambda$ фронт волны можно приближенно считать плоским, а векторы \vec{E} и \vec{H} направленными перпендикулярно направлению распространения волны. Колебания векторов \vec{E} и \vec{H} синфазны на равных расстояниях от источника и непрерывно взаимно преобразуются.

Напряженности поля \vec{E} и \vec{H} пропорциональны частоте при равных расстояниях от источника, а мощность излучения - квадрату частот.

Электромагнитное воздействие в дальней зоне рассматривается в основном в случае природных помех при расположении источника на очень большом расстоянии (атмосферные, космические помехи - как правило, внешние помехи).

4. ОСЛАБЛЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ МЕТОДОМ РАЦИОНАЛЬНОЙ КОМПОНОВКИ АППАРАТУРЫ

Предварительно следует установить:

- 1) напряженность помехонесущего поля;
- 2) чувствительность приемника поля к воздействию помехи;
- 3) расстояние между ИП и ПП.

Следует установить преобладающую чувствительность к одной из компонент поля (\vec{E} или \vec{H}), если она имеется. В противном случае нужна защита от обеих компонент.

Важно определить, какие элементы и узлы конструкции аппаратуры располагаются между ИП и ПП, т.е. сначала определить возможность «естественного» экранирования.

Рациональная компоновка в общем случае позволяет только снизить влияние помехонесущего поля на ПП, но полностью решить задачу не всегда удается.

Для уменьшения влияния электрического поля при компоновке рекомендуется:

1) максимально разносить узлы ИП и ПП для уменьшения паразитной емкости C_{CB} (не всегда приемлемо, т.к. растут габариты аппаратуры);

2) ИП и ПП располагаются таким образом, чтобы паразитная емкость была минимальной. Например, проводники и токоведущие части располагаются под углом 90° , что снижает паразитную связь;

С этой целью в двух- или многослойных печатных платах проводники в соседних сигнальных слоях нужно располагать параллельно разным осям координат, т.е. в одном слое параллельно оси X, а в соседнем - параллельно оси Y.

В некоторых случаях при мелкосерийном производстве следует заменять печатный монтаж на печатно-проводной, т.к. уменьшается длина линии связи и эффективная площадь взаимодействия.

3) уменьшать геометрические размеры ИП и ПП, тогда уменьшается эффективная площадь взаимодействия и паразитная емкость. Наиболее рационален переход от дискретных компонентов схемы к микросхемам (ИС, БИС, СБИС).

Для уменьшения влияния магнитных полей рекомендуются следующие приемы компоновки:

- 1) проводники и магнитопроводы ИП и ПП располагать возможно друг от друга;
- 2) проводники ИП и ПП располагать под углом 90° , что обеспечивает минимальную магнитную связь;
- 3) уменьшать габариты ПП, что уменьшит величину магнитного потока, пронизывающего ПП;
- 4) прямой и обратный провода электропитания следует скручивать вместе или применять двухжильные провода для компенсации их внешнего магнитного поля.

5. ЭКРАНИРОВАНИЕ

5.1. Назначение экранов

Экраны предназначены для ослабления электрического, магнитного и электромагнитного полей в некоторой части пространства для защиты элементов, узлов и блоков СУ от воздействия этих полей.

В зависимости от размещения защищаемой зоны относительно источников помехонесущего поля экраны подразделяются на наружные и внутренние.

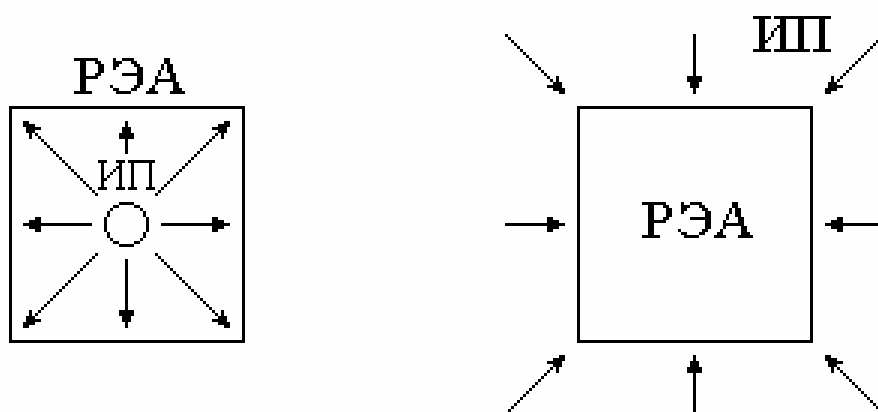


Рис.5.1.

5.2. Влияние экрана на параметры элементов СУ

Если ввести экран в пространство, заполненное полем, то измениться конфигурация этого поля, а это эквивалентно изменению параметров элемента, создающего поле (ИП и ПП).

Наличие экрана увеличивает емкость элементов конструкции и проводов, уменьшает индуктивность, увеличивает затухание и потери. При конструировании экранов нужно учитывать это влияние таким образом, чтобы изменение параметров не выходило за заданные или допустимые пределы.

5.3. Виды экранирования

В СУ отдельные элементы создают различные виды полей. На низких частотах или в ближней зоне можно выделить преобладающий вид полей - электрический или магнитный. Соответственно этому применяется электрическое или магнитное экранирование.

На высоких частотах и дальней зоне (компоненты поля \vec{E} и \vec{H} равноценны) применяется электромагнитное экранирование.

Таким образом, выбор вида и способа экранирования определяется источником помехонесущего поля и его расположением относительно экрана.

5.4. Электростатическое экранирование

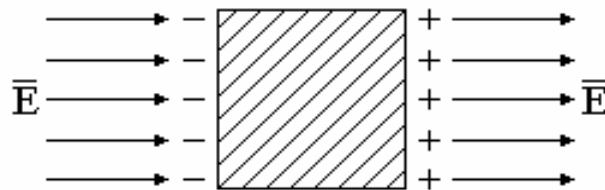


Рис.5.2.

Если в электростатическое поле поместить проводник, то на его поверхностях возникнут наведенные заряды. Эти заряды создают свое поле, которое полностью компенсирует поле внутри проводника.

За проводящей пластиной внешнее поле создают наведенные на поверхности заряды. Экран практически не изменяет поля в пространстве.

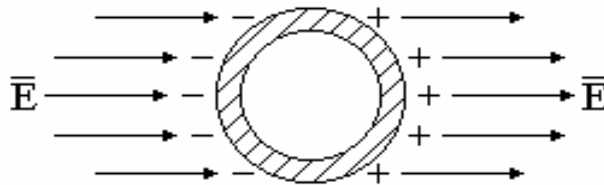


Рис.5.3.

Если сделать проводник в форме замкнутого объема, то на внутренней его поверхности не будет зарядов. Соответственно не будет электрического поля во внутренней области. Помещенный внутри проводящей полости элемент будет защищен от внешних электростатических полей.

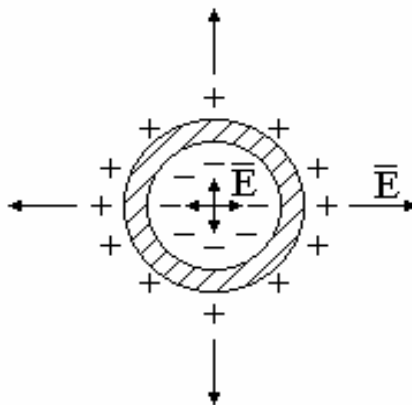


Рис.5.4.

Если источник электростатического поля помещен внутри проводящей оболочки, то на внутренней и внешней поверхностях оболочки поле будет существовать. Таким образом, поле проникает сквозь экран и он не выполняет функции экранирования.

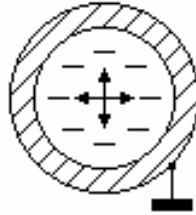


Рис.5.5.

Эффект экранирования достигается заземлением (соединением с общим корпусом), которое снимает заряды с внешней поверхности и внешнее поле пропадает.

Электростатические экраны изготавливаются из материалов с хорошей проводимостью. Толщина их сплошных стенок определяется только конструктивными требованиями. Это - различные металлические коробчатые формы (оболочки) или перегородки, заземленные на корпус. Сетки или решетчатые конструкции не применяются, так как часть линий поля проникает сквозь экран.

Заземление или соединение с общим корпусом **ОБЯЗАТЕЛЬНО!**

5.5. Электрическое (квазистатическое) экранирование

Если электрическое поле является переменным, то с частотой изменения этого поля на поверхности экрана будут меняться заряды (знак и распределение в пространстве). Следовательно, по экрану потечет ток и возникнет падение напряжения, которое будет создавать свое электрическое поле. Получается, таким образом, эффект проникновения поля сквозь экран. Уменьшить падение напряжения можно, применяя хорошо проводящие материалы и увеличивая толщину экрана.

Расположенный в ближней зоне экран называют электрическим или квазистатическим. А экранирование в этом случае сводится к устранению нежелательных емкостных связей между элементами.

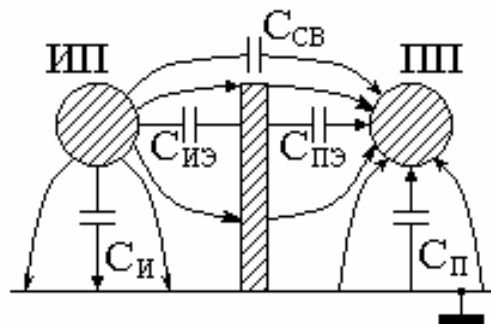


Рис.5.6.

Так введение неполного экрана между ИП и ИП ослабляет емкостную связь между ними. Замыкание на заземленный корпус создает наиболее полную защиту.

5.6. Магнитоэкранирование

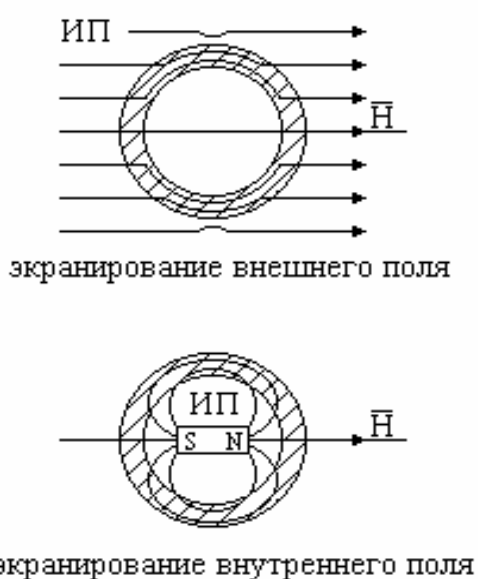


Рис.5.7.

Чем больше μ у экрана, тем тоньше могут быть стенки. Для повышения эффективности делают двух- и трехслойные экраны. При равной массе эффективнее не толстый экран, а несколько тонких с возможно большими расстояниями (зазорами) между ними.

В конструкции экрана нужно избегать стыков и швов с большим магнитным сопротивлением.

Крепление экранируемого элемента в экране и внешние крепления экрана должны быть выполнены из немагнитных материалов, чтобы не создавать малых магнитных сопротивлений в нежелательных направлениях.

Переменное магнитное поле небольшой частоты может подвергаться магнитоэкранированию, если ферромагнитный экран выполнить хорошо щиктованным.

5.7. Магнитное экранирование (электромагнитное экранирование переменного магнитного поля)

Для экранирования переменного магнитного поля эффективность магнитоэкранирующего экрана (ферромагнитного экрана) с повышением f уменьшается, так как плохая электропроводность магнитных материалов (особенно на переменном токе) не позволяет в достаточной степени компенсировать помехонесущее магнитное поле встречным полем от индуктивных вихревых токов. Кроме того, уменьшение глубины проникновения поля на повышенных частотах снижает требования к толщине экрана. Поэтому на частотах, выше звуковых (выше 20...50 кГц) применяются экраны из хороших проводников Cu, Al толщиной от 1...2 мм.

В таком экране переменный магнитный поток наводит переменный ток вихревого типа. Экран ведет себя как замкнутый виток трансформатора. Магнитное поле, образуемое этим током, сдвинуто по фазе относительно поля источника на $\sim 180^\circ$, т.е. направлено на встречу ему. Получается частичная компенсация поля IP . Чем ближе к 180° , тем лучше компенсация. Это достигается хорошей проводимостью и достаточной толщиной стенок проводника. Для принятой f толщина стенок не должна быть меньше глубины проникновения ЭМ-волны.

Основано на использовании ферромагнетиков, имеющих магнитную проницаемость значительно больше, чем у среды. Поэтому силовые линии магнитного поля будут концентрироваться в ферромагнетике.

Магнитоэкранирующий экран одинаково пригоден для защиты от внешних полей и для локализации поля источника.

5.8. Электромагнитное экранирование

Экранирование с использованием индуктивных (наведенных) токов в стенках экрана обеспечивает ослабление переменных электрических и магнитных полей. Поэтому такой способ называется электромагнитным.

В ближней зоне эффективность ЭМ-экрана для компонент \bar{E} и \bar{H} различна (больше для \bar{H}), а в дальней зоне - одинакова.

Физическую природу ЭМ-экранирования можно упрощенно представить двумя явлениями.

1. Под действием ИП на стороне экрана, обращенной к ИП, возникают разряды, а в стенках токи. Во внешнем пространстве поля этих токов близки по величине к полю ИП, а по направлению - противоположны ему. Происходит взаимная компенсация полей.

2. При рассмотрении волнового режима в дальней зоне эффект экранирования проявляется в многократном отражении волн между поверхностью экрана и ИП в сочетании с затуханием энергии волн в толще металлического экрана.

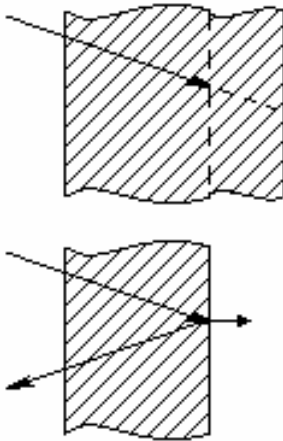


Рис.5.8.

Чем больше разница в волновых характеристиках экрана и среды, в которой он находится, тем сильнее выражено отражение энергии. Если экран тонкий (толщина Δ меньше глубины проникновения или соизмерима с ней), то нужно учитывать внутреннее отражение в экране, т.е. отражение в сторону ИП.

Теоретический расчет ЭМ-экранов очень сложен, и эта задача решена только для трех расчетных моделей:

1. Бесконечный плоский экран, расположенный перпендикулярно направлению распространения плоской ЭМ-волны.
2. Сферически замкнутый, идеально проводящий экран с ИП в центре сферы.
3. Бесконечно длинный, идеально проводящий цилиндр с ИП в виде тонкой бесконечно длинной нити на оси цилиндра.

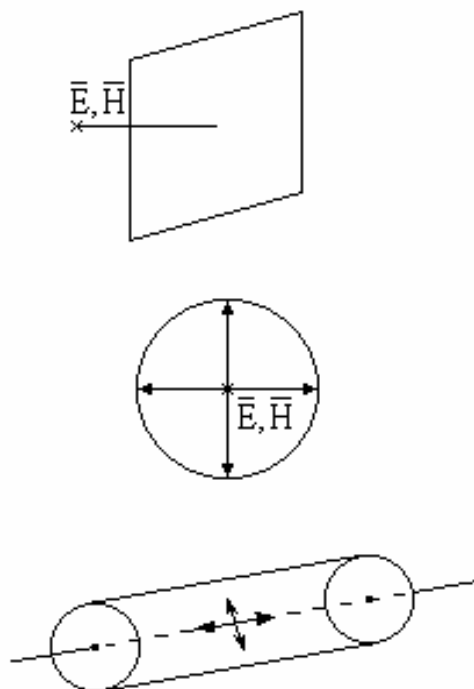


Рис.5.9.

Эти теоретические случаи не учитывают:

- а) соотношение длины волны λ и размеров \mathcal{E} ;
- б) неравномерность распределения поля внутри \mathcal{E} ;
- в) конструкцию \mathcal{E} ;
- г) проникновение поля через щели \mathcal{E} ;
- д) свойства материала \mathcal{E} .

5.9. ЭМ-экран как объемный резонатор

Свойства резонатора:

1. Отражение ЭМ-волн от стенок и перераспределение ЭМ-поля.
2. Накопление в объеме энергии.
3. Поглощение энергии в стенках.
4. Резонансные явления на некоторых частотах.
5. Реакция экрана на ИП и ПП.
6. Излучение энергии через отверстия и щели (ИП - внутри).
7. Проникновение энергии через отверстия и щели (ИП - снаружи).

Добротность резонанса Q характеризует способность резонанса накапливать ЭМ-энергию (ω_0 - резонансная частота, W - запасенная энергия):

$$Q = \omega_0 \frac{W}{p}, \quad \text{где } p - \text{ мощность потерь}$$

$$W \rightarrow V$$

$$p \rightarrow S$$

Энергия поля запасается объемом V , а мощность потерь расходуется на поверхности стенок с площадью S . С увеличением размеров экрана V растет быстрее, чем S .

Таким образом, в общем случае добротность прямо пропорциональна V и обратно пропорциональна S и глубине проникновения Z_o , т.е. в слое, где теряется энергия:

$$Q \sim \frac{V}{z_o S}$$

Значение добротности Q может быть очень велико ($10^2 \dots 10^5$).

При отсутствии поглощающего материала внутри \mathcal{E} мощность поля резонатора (из-за явления накапливания) может быть на несколько порядков больше мощности ИП.

Если размеры резонатора превышают длину волны λ , то поле в резонаторе распределено резко неравномерно, и возможен пробой в местах максимумов электрической компоненты \bar{E} .

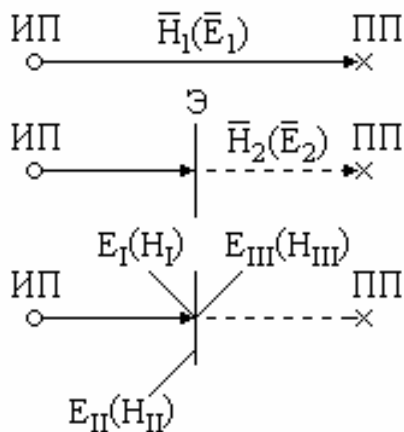
Накопление энергии и резонансные явления в экране снижают эффективность экранирования, так как расчет напряженности поля и мощность, проникающая за \mathcal{E} через отверстия в щели. Возрастает также воздействие экрана на заключенные в нем элементы.

При экранировании мощных ИП необходимо снижать потери в экране. Большие потери в \mathcal{E} могут нагреть \mathcal{E} и даже расплавить в местах протекания больших токов. Наибольший эффект дает уменьшение глубины проникновения Z_o (выбор материала) и объема экрана V .

С другой стороны, взаимодействие экрана с ПП усиливается при их сближении. Например, параметры L , Q , R катушки сильно изменяются при экране малых размеров.

6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКРАНОВ

6.1. Коэффициент экранирования



Теоретически это отношение действующих значений E_2 (H_2) в некоторой точке при наличии \mathcal{E} к действующим значениям E_1 (H_1) в той же точке при отсутствии эк-

$$\text{рана } S_E = \frac{E_2}{E_1}, S_H = \frac{H_2}{H_1}.$$

В конструкторской практике

Рис.6.1.

E_{III} и H_{III} вблизи \mathcal{E} со стороны ПП; E_1 и H_1 вблизи \mathcal{E} со стороны ИП; E_{II} и H_{II} в самом \mathcal{E} .

Коэффициент экранирования $0 \leq S \leq 1$

$S = 0$ поле не проникает в \mathcal{E} (идеальное экранирование);

$S = 1$ \mathcal{E} не ограничивает помеху и не выполняет свою функцию.

6.2. Эффективность экранирования

Определяется величинами, обратными коэффициентами экранирования.

$$\text{В теории: } \mathcal{E}_E = \frac{1}{S_E} = \frac{E_1}{E_2} \text{ и } \mathcal{E}_H = \frac{1}{S_H} = \frac{H_1}{H_2}$$

$$\text{На практике: } \mathcal{E}_E = \frac{1}{S_E} = \frac{E_I}{E_{III}} \text{ и } \mathcal{E}_H = \frac{1}{S_H} = \frac{H_I}{H_{III}}$$

Изменяются от 1 до ∞ .

6.3. Экранное затухание

При расчетах эффективности экранирования электрического и магнитного полей обычно выражается очень большими числами. Кроме того, при учете различных физических явлений эти числа приходится перемножать.

Поэтому удобнее пользоваться логарифмической величиной, называемой экраным затуханием A . Она связана с эффективностью экранирования соотношением:

$$A = 20 \cdot \lg \mathcal{E}$$

Удобство использования величины A объясняется тем, что можно оперировать небольшими числами и умножение их заменять сложением.

7. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭКРАНОВ

7.1. Металлы

Заданная эффективность экранирования в определенном диапазоне частот может быть достигнута при использовании любых металлических листовых материалов (сталь, медь, латунь, алюминий).

Однако при равной толщине листа, но на разных частотах эффективность экранирования зависит от материала экранов.

Для магнитоэлектрического экранирования следует применять ферромагнитные материалы с $\mu \gg 1$.

Для электромагнитного экранирования с преимущественным отражением ЭМ-энергии эффективнее работают немагнитные материалы.

Для электромагнитного экранирования с преимущественным поглощением ЭМ-энергии ферромагнетики работают лучше.

Исходя из требований экономичности и технологичности, на практике чаще применяют стальные листы.

При экранировании элементов, узлов и блоков, которые очень чувствительны к вносимым потерям, сталь применять не желательно.

7.2. Глубина проникновения ЭМ-поля в металл

Необходимая минимальная толщина экрана определяется эффективной глубиной проникновения ЭМ-поля в металл.

Условно принято считать эффективной глубиной проникновения расстояние от поверхности, на котором амплитуда напряженности поля убывает в e раз и соответственно мощность поля убывает в $e^2 \approx 7,4$ раза.

Из уравнений электродинамики: $z_o = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_o}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu \mu_o}}$ [рад/с] [Гц]

$$\mu_o = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ [Гн/м]}$$

$$Ag - \rho = 0,1 \cdot 10^{-7} \text{ [Ом}\cdot\text{м]}$$

$$Cu - \rho = 0,175 \cdot 10^{-7} \text{ [Ом}\cdot\text{м]}$$

$$Al - \rho = 0,28 \cdot 10^{-7} \text{ [Ом}\cdot\text{м]}$$

$$Fe - \rho = 0,92 \cdot 10^{-7} \text{ [Ом}\cdot\text{м]}$$

Эффективная глубина проникновения в металл [мм]

| f металл | 50 Гц | 1 кГц | 10 кГц | 100 кГц | 1 МГц |
|----------------------|---------|---------|----------|----------|---------|
| Ag | 9 мм | 2 мм | 0,64 мм | 0,2 мм | 64 мкм |
| Cu | 9,4 мм | 2,1 мм | 0,67 мм | 0,21 мм | 67 мкм |
| Al | 12 мм | 2,7 мм | 0,84 мм | 0,27 мм | 84 мкм |
| сталь $\mu = 50$ | 3 мм | 0,68 мм | 0,22 мм | 0,068 мм | 22 мкм |
| Сталь $\mu = 500$ | 0,96 мм | 0,22 мм | 0,068 мм | 0,022 мм | 6,8 мкм |

7.3. Пример выбора экрана

Потери энергии в экране не только нагревают его, но и влияют на параметры экранируемого элемента. Например, катушки индуктивности очень чувствительны к вносимым потерям.

Рассмотрим цилиндрический экран, соосный с экранируемой катушкой.

Мощность потерь в катушке:

$$P = \frac{2\pi n^2 I^2 r_k^4 \rho}{l_k r_э^3 z_o}$$

Здесь: n - число витков катушки;

I - действующее значение тока в катушке;

l_k - длина катушки;

r_k - радиус катушки;

$r_э$ - радиус экрана (внутренний);

ρ - удельное объемное сопротивление материала экрана;

z_o - эффективная глубина проникновения поля в материал экрана.

Эта формула справедлива при условии, что толщина экрана много больше глубины проникновения z_o .

При неизменной конструкции катушки и экрана мощность потерь зависит от материала экрана (ρ).

Возьмем отношение мощностей потерь в стальном и алюминиевом экране:

$$\frac{P_{Fe}}{P_{Al}} = \frac{\rho_{Fe} \cdot z_{oAl}}{\rho_{Al} \cdot z_{oFe}} = \sqrt{\frac{\rho_{Fe} \cdot \mu_{Fe}}{\rho_{Al}}}. \quad \text{Подставим из таблицы}$$

$$\frac{\rho_{Fe}}{\rho_{Al}} = \frac{0,92}{0,28} = 3,28 \text{ и, приняв } \mu_{Fe} = 500, \text{ получим } \frac{P_{Fe}}{P_{Al}} = 40,5.$$

Мощность потерь в стальном экране превышает мощность потерь в алюминиевом более, чем в 40 раз. Соответственно и больше вносимые в катушку потери, т.е. уменьшение ее добротности.

При одинаковых вносимых потерях размеры экрана должны быть различными в зависимости от выбора материала.

Введем условие равенства потерь в экранах:

$$\frac{\rho_{Fe}}{r_{Fe}^3 z_{oFe}} = \frac{\rho_{Al}}{r_{Al}^3 z_{oAl}}$$

Решая, получим отношение диаметров:

$$\frac{r_{Fe}}{r_{Al}} = \frac{D_{Fe}}{D_{Al}} = 3 \sqrt{\frac{\rho_{Fe} z_{oAl}}{\rho_{Al} z_{oFe}}} = 6 \sqrt{\frac{\rho_{Fe} \mu_{Fe}}{\rho_{Al}}}$$

$$\text{Приняв } \mu_{Fe} = 500, \text{ имеем } \frac{D_{Fe}}{D_{Al}} = 3,43$$

Таким образом, стальной экран должен иметь диаметр в 3,43 раза больше, чем алюминиевый.

Занимая на плате или шасси площадь в 11,8 раза больше, чем алюминиевый, он отнимает эту площадь у других элементов, увеличивая габариты и массу всего устройства.

7.4. Экранирующие сетки

Металлические сетки применяются для уменьшения массы экрана, упрощения технологии его изготовления и обеспечения вентиляции сквозь экран.

Преимущества экранирующих сеток:

1. Малая масса экрана.
2. Простота изготовления и сборки.
3. Пропуск воздуха для вентиляции и света для наблюдения.
4. Достаточная эффективность на радиочастотах.

Недостатки экранирующих сеток:

1. Малая механическая прочность, поэтому плоские сетки зажимаются по периметру в держателях.

2. Потери эффективности при старении. При этом нарушение контакта в узлах сетки компенсируется малым сопротивлением переходной емкости в точках нарушения контакта. Поэтому контакт в узлах не обязателен. Эффективность уменьшается вследствие коррозии металла. Сетки следует покрывать гальваническим путем коррозионно-стойкими металлами или антикоррозионным лаком.

3. Сетки не экранируют статических полей (\overline{E} и \overline{H}). Сетки работают на отражение в дальней зоне как ЭМ-экран.

Эффективность экранирования сетчатого экрана:

$$\mathcal{E} = \frac{\lambda}{2S \left| \ln \frac{\pi d}{S} \right|},$$

где λ - длина волны,
 S - шаг сетки (расстояние между смежными узлами),
 d - диаметр провода.

Экранное затухание сетчатого экрана:

$$A = 20 \lg \frac{\lambda}{2S \left| \ln \frac{\pi d}{S} \right|} [\text{дБ}]$$

Очень удобны для применения объемные сетки. Лучше сетку выполнять из железных проволок, покрытых медью (меднение) толщиной $(2 \dots 3) z_0$.

7.5. Примеры расчета сетчатого экрана

Шаг сетки $S = 3 \text{ мм} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Диаметр провода $d = 3 \text{ мм} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$

| | | | |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| f | 100 кГц | 1 МГц | 10 МГц |
| λ | 3000 м | 300 м | 30 м |
| A | 113 дБ | 93 дБ | 73 дБ |
| \mathcal{E} | $4,3 \cdot 10^5$ рад | $4,3 \cdot 10^4$ рад | $4,3 \cdot 10^3$ рад |

7.6. Фольговые материалы.

Промышленностью выпускается фольга толщиной 10...100 мкм из меди, латуни, алюминия и цинка. Это немагнитные материалы.

Технология проста: фольга приклеивается к диэлектрическим деталям.

Фольговые материалы хорошо экранируют от электрического и электромагнитного поля. Магнитное экранирование фольга не обеспечивает.

При ЭМ-экранировании следует избегать резонансных явлений за счет *переотражения* от поверхностей фольги (стоячие волны по толщине).

Обычно у фольги возникает при толщине ее, равной половине длины волны в металле, так как в этом случае на первой поверхности волна, пришедшая снаружи, и волна, пришедшая изнутри (отраженная от второй поверхности), оказываются инфазными.

Резонанс в фольге возникает при соблюдении условий:

$$\delta = (2n-1) \frac{\lambda_{II}}{2}$$

где δ - толщина фольги, м,
 λ_{II} - длина волны в материале фольги, м,
 n - целое число, т.е. число полуволн на пути распространения между поверхностями.

7.7. Пример расчета фольгового экрана

Длина волны в проводнике определяется из уравнения:

$$\lambda_{II} = \sqrt{\frac{4\pi\rho}{f\mu_a}} \quad \text{или} \quad \lambda_{II} = 2\pi z_o$$

Для медной фольги: $\rho = 0,175 \cdot 10^{-7} \text{ [Ом}\cdot\text{м]}$

$$\mu_n = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [Гн/м]}$$

$$\lambda_{II} = \frac{0,175}{f}, \text{ [м]}$$

Для расчетов удобнее формула:

$$\lambda_{II} = \frac{420}{\sqrt{f}}$$

Резонанс в фольге возникает при толщине материала, кратной половине длины волны:

$$n \frac{\lambda_{II}}{2} = \frac{210}{\sqrt{f}} \cdot n, \quad \text{где } n - \text{целое число.}$$

При $f = 1,0 \text{ [МГц]}$ имеем $\frac{\lambda_{II}}{2} = 0,21 \text{ [мм]}$

Поэтому желательно применять фольгу $\sim 0,3 \text{ [мм]}$.

7.8. Скорость распространения и длина волны в металле

Скорость распространения ЭМ-волны в металле определяется по формуле:

$$v = \sqrt{\frac{2\omega\rho}{\mu_a}} \quad \text{или} \quad v = \sqrt{\frac{4\pi\rho f}{\mu_a}} = f(f, \mu_a, \rho)$$

где μ_a и ρ - свойства металла.

Для немагнитного материала $\mu_a = \mu_0$ и тогда: $v = \sqrt{f \cdot \rho \cdot 10^7}$

| Материал | 50 Гц | 1 кГц | 1 МГц | 100 МГц |
|----------|---------|----------|---------|----------|
| медь | 3 м/с | 13,2 м/с | 118 м/с | 4,18 м/с |
| Алюминий | 3,7 м/с | 16,7 м/с | 530 м/с | 5,3 м/с |
| сталь | 0,3 м/с | 1,4 м/с | 43 м/с | 0,43 м/с |

$\mu = 500$

Длина волны в любой среде определяется частотой и скоростью распространения v :

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{или} \quad \lambda = 2\pi \frac{v}{\omega}$$

Длина волны в магнитном проводнике:

$$\lambda_{II} = 2\pi \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_a}} \quad \text{или} \quad \lambda_{II} = \sqrt{\frac{4\pi\rho}{f\mu_a}} = \sqrt{\frac{4\pi\rho}{f\mu\mu_0}}$$

преобразуя, получим: $\lambda_{II} = \frac{1}{\sqrt{\mu}} \sqrt{\frac{\rho \cdot 10^7}{f}}$

Для немагнитного проводника $\mu = 1$

| материал | 50 Гц | 1 кГц | 1 МГц |
|--------------------|-------|---------|----------|
| медь | 59 мм | 13,2 мм | 0,42 мм |
| алюминий | 75 мм | 17 мм | 0,53 мм |
| сталь $f = 500$ | 6 мм | 1,4 мм | 0,043 мм |

7.9. Токопроводящие краски

Основы красок - пленкообразующий диэлектрик, пластификатор, отвердитель и проводящие компоненты - графит, сажа, коллоидное серебро, порошки меди и алюминия.

Проводимость краски зависит от толщины слоя и свойств токопроводящей компоненты.

Металлические порошки в смеси с другими компонентами краски быстро окисляются. Поэтому наилучшими проводящими компонентами краски являются ацетиленовая сажа и графит.

7.10. Металлизация поверхностей

Для металлизации больших поверхностей наиболее удобен метод пульверизации расплавленного металла на подложку струей сжатого воздуха. Можно наносить слой на любые диэлектрики, картон, бумагу, ткани. Обычно напыляют цинк или алюминий. Эффективность экранирования на 30-50 дБ ниже, чем у металлических листов, но в некоторых случаях экономичнее, если поверхность больше. К покрытию можно припаивать контакты и прижимы токонесущие поверхности деталей конструкции.

Для небольших пластмассовых деталей можно применять методы электролитического осаждения или напыления металлов.

7.11. Специальные ткани

Выпускаются несколько видов технических тканей с металлической нитью, работающих как отражающие ЭМ-экраны.

Ткань РТ - из капроновой нити, скрученной и сплющенной, с посеребренной медной проволокой толщиной 0,03...0,05 мм (30...50 мкм).

Ткань 4381 - нитка свита с эмалированным проводом ПЭЛ-0,06. Провод изолирован, в сетке нет контактов в узлах. Поэтому ткань экранирует только СВЧ-поле. Из такой ткани делают спецодежду.

7.12. Электропроводящий клей

Применяются для электрической герметизации швов взамен пайки или резьбы, для заполнения щелей, малых отверстий, для крепления экранов к несущим металлическим конструкциям. Представляют собой эпоксидные смолы с наполнением металлическими порошками.

8. СПЛОШНЫЕ ЭКРАНЫ

8.1. Физические принципы экранирования

Металлические экраны создают затухание поля по трем причинам за счет:

- 1) отражения от поверхности экрана;
- 2) поглощения в толще экрана;
- 3) переотражения внутри экрана.

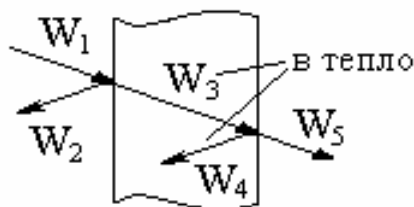


Рис.8.1.

Здесь: W_1 - энергия падающей волны,
 W_2 - энергия отраженной волны,
 W_3 - энергия затухающей волны,
 W_4 - энергия переотраженной волны,
 W_5 - энергия прошедшей волны.

8.2. Экранирование за счет отражения энергии

Коэффициент отражения от поверхности Γ есть отношение амплитуды отраженной волны к амплитуде падающей волны. Он может быть выражен через волновое сопротивление среды $z_1 = E_1/H_1$, из которой приходит волна, и среды $z_2 = E_2/H_2$, от которой она отражается.

Наиболее частый случай, когда z_1 - волновое сопротивления воздуха, а z_2 - волновое сопротивление материала экрана.

$$\Gamma^E = \frac{E_{o(отраж)}}{E_{\Pi(падающ)}} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad \text{- для электрической компоненты поля,}$$

$$\Gamma^H = \frac{H_o}{H_{\Pi}} = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \quad \text{- для магнитной компоненты поля,}$$

$$\Gamma^{\Pi} = \Gamma^E \cdot \Gamma^H = - \left(\frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2 - \text{ для плотности потока мощности}$$

(знак "-" означает изменение направления потока мощности на обратное)

Для расчетов экранирования следует определить степень прохождения поля сквозь экран, характеризуемую коэффициентом прохождения P . Он определяется как отношение амплитуды прошедшей ("пр") сквозь границу сред волны к амплитуде падающей на границу волны.

Из волновых уравнений электродинамики: $P = I + \Gamma$

Рассмотрим прохождение волны через границу «среда-экран» в дальней зоне:

$$P^E = \frac{E_{\Pi P}}{E_{\Pi}} = \frac{2z_2}{z_1 + z_2}, \quad P^H = \frac{H_{\Pi P}}{H_{\Pi}} = \frac{2z_1}{z_1 + z_2}, \quad P^{\Pi} = P^E P^H = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2}$$

Коэффициент прохождения для плотности потока мощности положительный. Это показывает, что направление распространения не изменилось.

Эффективность экранирования \mathcal{E} при отражении - величина, обратная коэффициенту прохождения P .

$$\mathcal{E}_{OTP}^E = \frac{z_1 + z_2}{2z_2}, \quad \mathcal{E}_{OTP}^H = \frac{z_1 + z_2}{2z_1}, \quad \mathcal{E}_{OTP}^{\Pi} = \frac{(z_1 + z_2)^2}{4z_1 z_2}$$

Соответственно можно выразить экранные затухания для каждой компоненты поля за счет отражения в дальней зоне:

$$A_{OTP}^E = 20 \cdot \lg(\mathcal{E}_{OTP}^E) = 20 \cdot \lg \frac{z_1 + z_2}{2z_2} [\text{дБ}]$$

$$A_{OTP}^H = 20 \cdot \lg(\mathcal{E}_{OTP}^H) = 20 \cdot \lg \frac{z_1 + z_2}{2z_1} [\text{дБ}]$$

В ближней зоне $z^E \neq z^H$ и поэтому нужно определить эффективность и экранное затухание отдельно для электрической и магнитной компонент поля. В воздухе они различны по величине, а в металле одинаковы, т.е. в металле $z^E = z^H = z_2$.

Поэтому для ближней зоны:

$$\mathcal{E}_{OTP}^E = \frac{z_1^E + z_2}{2z_2}, \quad \mathcal{E}_{OTP}^H = \frac{z_1^H + z_2}{2z_1^H}$$

После логарифмирования:

$$A_{OTP}^E = 20 \cdot \lg \frac{z_1^E + z_2}{2z_2} [\text{дБ}], \quad A_{OTP}^H = 20 \cdot \lg \frac{z_1^H + z_2}{2z_1^H} [\text{дБ}]$$

В ближней зоне: z^E очень велико, и эффективность экрана для электрической компоненты поля велика, а z^H мало и магнитное поле проникает в экран. Соответственно проходит в экран и мощность, поэтому в ближней зоне экранирование за счет

отражения дает эффект только для электрического поля. Магнитное поле почти не отражается.

8.3. Поглощение энергии в толще экрана

По мере распространения поля в металле амплитуды векторов поля затухают по экспоненте, т.е.

$$\frac{\delta}{z_0}$$

$$\mathcal{E}_{\text{ПОГЛ}} = e^{-z_0}$$

$\mathcal{E}_{\text{ПОГЛ}}$ - эффективность, вызванная поглощением энергии,

δ - толщина экрана,

z_0 - глубина проникновения поля в металл.

Экранное затухание:

$$A_{\text{ПОГЛ}} = 20 \cdot \lg(\mathcal{E}_{\text{ПОГЛ}}) = 20 \cdot \frac{\delta}{z_0} \cdot \lg e = 8,686 \frac{\delta}{z_0} [\text{дБ}]$$

т.к. $\lg e = 0,4343$

На частоте $f = 1 [\text{МГц}]$ имеем для различных материалов:

| | | | |
|----------|-------------------------|---------------------|------------------------|
| медь | $A = 130 [\text{дБ}]$; | латунь | $A = 62 [\text{дБ}]$ |
| алюминий | $A = 103 [\text{дБ}]$; | сталь ($\mu=500$) | $A = 1280 [\text{дБ}]$ |

На более высоких частотах глубина проникновения z_0 меньше, поэтому затухание за счет поглощения больше.

Эффективность экрана за счет поглощения зависит только от свойств материала, его толщины и частоты. Она не зависит от типа поля (E и H) и расстояния от ИП.

8.4. Переотражение от второй (внутренней) поверхности экрана

При прохождении через вторую поверхность поле переходит границу из среды с волновым сопротивлением (материал экрана) в среду с сопротивлением (воздух, открытое пространство):

$$\mathcal{E}_{\text{ПЕР}}^E = \frac{z_2 + z_3}{2z_3} \approx \frac{1}{2}, \quad \mathcal{E}_{\text{ПЕР}}^H = \frac{z_2 + z_3}{2z_2} \gg 1$$

для воздуха $z_3 = 377 [\text{Ом}]$

Отраженная от границы сред энергия быстро затухает в толще экрана, превращается в тепловую энергию.

При прохождении сквозь вторую границу сред электрическая компонента поля не затухает (амплитуда увеличивается в 2 раза), а магнитная компонента затухает очень быстро.

Если экран состоит из нескольких слоев «металл-диэлектрик-металл», то общее затухание может быть больше, чем у сплошного металлического экрана при той же массе.

8.5. Общая эффективность сплошного экрана

Процессы отражения, поглощения и переотражения протекают друг от друга, поэтому общая эффективность сплошного экрана определяется как произведение:

$$\mathcal{E}_{ЭКР} = \mathcal{E}_{ОТР} \cdot \mathcal{E}_{ПОГЛ} \cdot \mathcal{E}_{ПЕР}$$

Соответственно общее экранное затухание определяется суммированием:

$$A_{ЭКР} = A_{ОТР} + A_{ПОГЛ} + A_{ПЕР}$$

Для тонких экранов, работающих в основном на отражении и переотражении, нужно применять хорошо проводящие немагнитные материалы (*Cu, Al, Ag* и др.)

8.6. Пример расчета сплошного экрана

Исходные данные:

материал - латунь $\rho = 0,72 \cdot 10^{-7} [Ом \cdot м]$ $\mu_a = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [Гн/м]$;

частота $f = 1 [МГц]$ (длина волны $\lambda = 300 м$);

расстояние от ИП $r = 0,1 м$ (ближняя зона);

толщина экрана $\delta = 0,3 мм = 3 \cdot 10^{-4} м$;

среда по обе стороны Э - воздух, поэтому

$$z_3 = 120\pi [Ом] = 377 [Ом].$$

1. Волновой коэффициент:

$$\alpha = 2\pi \frac{r}{\lambda} = 2,1 \cdot 10^{-3} \ll 1$$

2. Волновое сопротивление материала экрана:

$$z_2 = \sqrt{2\pi f \mu_0 \rho} = 7,54 \cdot 10^{-7} \sqrt{f} = 7,54 \cdot 10^{-4} [Ом]$$

3. Волновое сопротивление воздуха для электрической компоненты поля:

$$z_1^E = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \frac{1}{\alpha} = 10 \cdot 10^4 [Ом]$$

4. Волновое сопротивление воздуха для магнитной компоненты поля:

$$z_1^H = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \alpha = 0,79 [Ом]$$

5. Экранные затухания для компонент E и H за счет отражения:

$$A_{ОТР}^E = 20 \cdot \lg \frac{z_1^E + z_2}{2z_2} = 161,5 [\text{дБ}]$$

$$A_{ОТР}^H = 20 \cdot \lg \frac{z_1^H + z_2}{2z_1^H} = 54,4 [\text{дБ}]$$

6. Экранные затухания для компонент E и H за счет переотражения:

$$A_{ПЕР}^E = 20 \cdot \lg \frac{z_2 + z_3}{2z_3} = -6 [\text{дБ}]$$

$$A_{ПЕР}^H = 20 \cdot \lg \frac{z_2 + z_3}{2z_2} = 108 [\text{дБ}]$$

7. Экранное затухание за счет поглощения энергии в толще Э:

$$A_{ПОГЛ}^E = A_{ПОГЛ}^H = 8,686 \frac{\delta}{z_0} = 18,6 [\text{дБ}]$$

Найдем общее экранное затухание для компонент E и H :

$$A_{ОБЩ}^E = 161,5 - 6 + 18,6 = 174,1 [\text{дБ}]$$

$$A_{ОБЩ}^H = 54,4 + 108 + 18,6 = 181 [\text{дБ}]$$

Учтем несовершенство конструкции экрана, т.е. отсутствие его электрической герметичности. Будем считать, что экран используется на 5% теоретической возможности, т.е. его действительная эффективность в 20 раз меньше теоретической. В этом случае нужно вычесть из полученных результатов величину:

$$20 \lg 20 = 26 [\text{дБ}]$$

Окончательно получим:

$$A_{ПОЛЕЗ}^E = 174,1 - 26 = 148,1 [\text{дБ}]$$

$$A_{ПОЛЕЗ}^H = 181 - 26 = 155 [\text{дБ}]$$

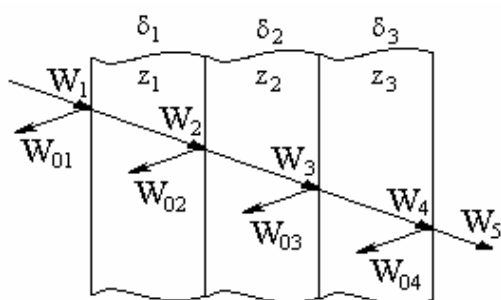
Экран обеспечивает хорошее затухание.

8.7. Многослойные электромагнитные экраны

Применяются с целью повышения эффективности экранирования в широком диапазоне частот с учетом воздействия обеих компонент поля E и H .

Наибольшее применение нашли трехслойные симметричные экраны благодаря своей технологии.

8.8. Принцип работы многослойного экрана



Z_i - волновое сопротивление слоя,
 W_i - направление распространения энергии.
 δ_i - толщина слоя,

Рис.8.2.

Из рисунка видно, что затухание в многослойном экране определяется отражением электромагнитной волны от всех границ раздела сред и поглощением в каждом слое. Общее затухание в трехслойном экране определяется по формуле:

$$A_{\text{ОБЩ}} = \sum_1^{n+1} A_{\text{ОТР}} + \sum_1^n A_{\text{ПОГЛ}}$$

Здесь: n - число слоев; $n+1$ - число границ раздела сред.

Если конструктивно слои выполнить с воздушным зазором, то число границ раздела и слоев удвоится. Вместо зазоров можно ввести слои из диэлектрика, что тоже увеличит число отражений, но позволит сохранить жесткость экрана.

Наиболее перспективен трехслойный экран, выполненный из стали (железа) с омеднением обеих поверхностей.

8.9. Некоторые рекомендации по выполнению много-, трехслойных экранов

1. Отражение энергии в многослойном экране с металлическими слоями определяется в основном наружными поверхностями, а граница «металл-металл» почти не работает на отражение. Поэтому, если нужно обеспечить затухание за счет отражения, то лучше чередовать слои «металл-диэлектрик» (или «металл-воздух»).

2. Экранирование за счет поглощения энергии эффективнее только на радиочастотах (МГц), т.е. когда глубина проникновения поля в металл меньше толщины слоя.

3. Применение двух- и трехслойных экранов с металлическими слоями целесообразно тогда, когда слои выполняют качественно различные функции. Например: медный слой обеспечивает отражение, а стальной - поглощение энергии на высоких частотах и экранирование магнитостатических полей.

4. С повышением частоты поглощение энергии и нагревание экрана растут, и на высоких частотах лучше перейти к хорошо отражающим слоям с малым поглощением. Стальным можно оставлять только последний слой, через который проходит наименьшая мощность.

5. Большое поглощение энергии поля в стали вносит большие потери в объект экранирования (снижает добротность катушек и контуров, вносит затухание во внутренние линии передачи энергии и т.д.).

8.10. Перфорированные экраны (экраны с отверстиями)

Эффективность экранирования замкнутого металлического экрана может быть получена сколь угодно высокой при соответствующем выборе материала и его толщины. Однако практически полностью сплошными экраны не бывают из-за наличия крышек для доступа к узлам аппаратуры, швов, отверстий и для соединительных входных и

выходных проводов, кабелей, разъемов, вводов питания, переключателей, измерительных приборов, а также вентиляции, механических соединений и т.д.

Образующиеся дополнительные каналы проникновения электромагнитного поля не должны существенно снижать эффективность экранирования.

Для повышения эффективности экранирования экранов с отверстиями рекомендуется:

- 1) располагать отверстия в зонах со слабыми электромагнитными полями;
- 2) при заданной площади перфорации, исходя из конструктивных соображений, необходимо уменьшать диаметр отверстий и увеличивать их число;
- 3) Выполнять отверстия щелевыми, располагая их длинные стороны вдоль линий вихревых токов, наведенных в стенках экрана (перпендикулярно силовым линиям магнитного поля).

9. КОНДУКТИВНЫЕ ПОМЕХИ ИХ ПОДАВЛЕНИЕ. ПОМЕХИ В ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Без электропитания не обходится ни одна СУ, если она не основана на иных принципах (механическом, гидравлическом или пневматическом). В системах электроавтоматики все элементы объединяются шинами электропитания и, следовательно, через эти шины взаимодействуют друг с другом, а также воспринимают нестабильность самого источника питания.

9.1. Принципы построения устройств и систем электропитания

В стационарных условиях для питания СУ используется сеть переменного тока промышленной частотой 50 Гц - однофазная или трехфазная. На автономных объектах - самолетах, кораблях, космических ракетах или станциях - используются автономные агрегаты электроснабжения, преобразующие механическую, тепловую, атомную, солнечную, химическую энергии в электроэнергию переменного тока, но чаще постоянного тока. В большинстве случаев для питания СУ требуется постоянный ток, а отдельные блоки СУ могут требовать для своего питания постоянный ток различного напряжения.

Первичный источник электроэнергии чаще всего не может обеспечить надежность и ряд других показателей СУ. Поэтому между ними и СУ включается специальное преобразующее устройство, называемое источником вторичного электропитания (ИВЭП). Назначение ИВЭП состоит в передаче электроэнергии от первичного источника к СУ с минимальными потерями и необходимым преобразованием количественных и качественных характеристик в условиях возмущающих воздействий.

Таким образом, функции, выполняемые ИВЭП, состоят в однократном или многократном преобразовании рода тока (переменный в постоянный или наоборот), изменении уровня напряжения (трансформация), стабилизации и регулировании напряжения или тока, подавлении пульсации и шумов выходного напряжения или тока (фильтрация). ИВЭП содержат также устройства защиты, блокировки и диагностики (сигнализации), что повышает их надежность и позволяет обнаруживать и устранять неисправности, возникающие в процессе эксплуатации.

ИВЭП могут выполнять либо одну из указанных выше функций, либо их произвольную комбинацию.

Свойства ИВЭП задаются некоторым множеством (совокупностью) их параметров и характеристик.

Параметры ИВЭП подразделяются на выходные, качественные и энергетические.

К *выходным параметрам* относятся: выходное напряжение, ток нагрузки, пределы регулирования выходного напряжения (тока) и др.

К *качественным параметрам* следует отнести: абсолютную и относительную нестабильность выходного напряжения (тока), коэффициент стабилизации, внутреннее сопротивление, коэффициент сглаживания пульсации (для источников постоянного тока) и др.

Энергетическими параметрами источника электропитания являются: КПД, полная, активная и реактивная мощности, потребляемые от ИВЭП, коэффициент мощности $\cos \varphi$, выходная мощность и др.

9.2. Общая характеристика помех в цепях первичного и вторичного электропитания

Так как система электроснабжения (совокупность источников первичного и вторичного электропитания) не является системой бесконечно большой мощности, то подключение к ней все большего числа потребителей приводит к понижению уровня первичного питающего напряжения. И, наоборот, отключение ряда потребителей приводит к повышению напряжения. Где-то в средней части предельных уровней первичного питающего напряжения (между холостым ходом и максимальной нагрузкой) располагается уровень называемый номинальным. Для промышленной сети это - 220 В в фазе и 380 В в линии. В настоящее время с помощью различных регулировок питающих синхронных генераторов электростанций и путем упрочнения сети за счет кольцевого объединения большого числа генераторов достигнуто предельное отклонение от номинального значения $\pm 10\%$. Это является большим достижением современной электроэнергетики. В прошлом имело место $+15\% \dots -20\%$. Очень большое падение напряжения сети обусловили линии электропередачи и преобразовательно-трансформаторные подстанции.

Значительно большее изменение напряжения первичной питающей сети допускают автономные агрегаты электроснабжения, предназначенные для питания ограниченного числа потребителей, причем суммарная мощность потребления оказывается соизмеримой с мощностью самого агрегата. Здесь пределы изменения существенно больше - $+20\% \dots -30\%$.

Таким образом, изменение питающего напряжения выступает как помеха для систем электроавтоматики. Кроме того, ситуация усугубляется, если уровень мощности подключаемой или отключаемой нагрузки значителен, что приводит к резким скачкам или провалам питающего напряжения. Питающая линия, которая обладает конечной индуктивностью, немедленно приводит к увеличению бросков напряжения.

Источником значительной помехи выступают и сами потребители, соединяемые с сетью при помощи контактного аппарата. Особенно, если потребители имеют в своей структуре индуктивный накопитель энергии.

Источником достаточно мощной помехи выступают также коллекторные электрические двигатели, которые вносят в сетевое напряжение не только пульсацию, но и искровые разряды периодического характера.

Вообще любая коммутация как контактного, так и бесконтактного типа, приводит к образованию помехи. И в первую очередь, это связано с индуктивностью и емкостью питающей линии. Не меньшее значение имеет и наличие накопителей энергии в структуре потребителя.

И, наконец, образование импульсных перепадов напряжения и тока в питающей линии, обладающей распределенными индуктивно-емкостными параметрами, приводит к возникновению волновых процессов, выступающих как вторичная, производная помеха.

Источники вторичного электропитания, выступающие в качестве согласующих устройств между первичным источником электроэнергии и потребителем, являются источниками разнообразных помех. Наличие в структуре ИВЭП выпрямителей приво-

дит к образованию пульсации выпрямленного напряжения. Ключевые регулирующие элементы создают коммутационные помехи.

Для подавления разнообразных помех в цепях первичного и вторичного электропитания используются следующие методы:

- 1) Стабилизация напряжения и тока (параметрическая и компенсационная).
- 2) Фильтрация (сглаживание, сетевое помехоподавление, развязывание цепей).
- 3) Заземление.
- 4) Схемотехническое проектирование.

9.3. Стабилизация напряжения (тока)

Стабилизаторами напряжения (тока) называются устройства, предназначенные для автоматического поддержания постоянства напряжения (тока) в нагрузке при колебаниях напряжения источника тока или изменение сопротивления нагрузки.

В настоящее время разработано большое количество различных типов стабилизаторов напряжения, предназначенных для работы в цепях переменного и постоянного тока.

Основными методами стабилизации являются *параметрический* и *компенсационный*.

При параметрической стабилизации напряжения стабилизатор должен иметь в своей структуре два элемента: линейный 1, включаемый последовательно с нагрузкой $Z_H(r_H)$ и нелинейный 2, включаемый параллельно нагрузке.

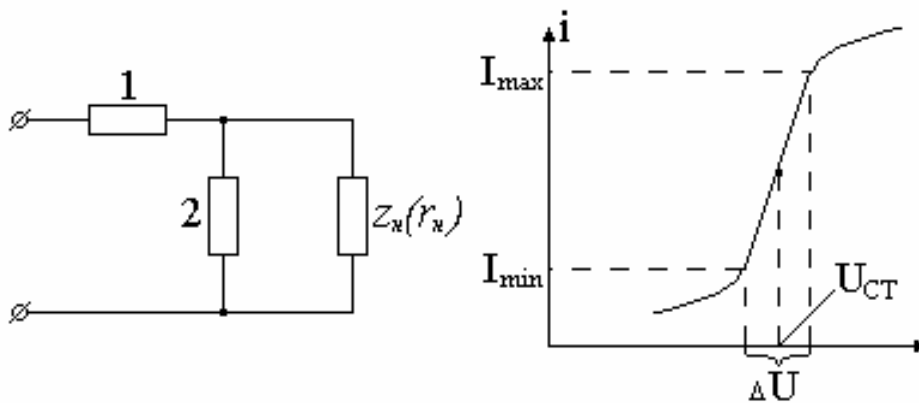


Рис.9.1.

Дестабилизирующий фактор действует непосредственно на нелинейный элемент и автоматически с заданной точностью, определяемой свойствами нелинейного элемента, стабилизирует на нагрузке $U_{СТ}$.

Если стабилизатор работает в цепи постоянного тока, то оба элемента обладают активными сопротивлениями, а в качестве нелинейного элемента используются кремниевые стабилитроны.

В цепях переменного тока линейный элемент может быть как активным, так и реактивным, а в качестве нелинейного элемента используется дроссель или трансформатор с насыщающимся сердечником.

Вольтамперная характеристика нелинейного элемента должна иметь участок "ab", в пределах которого напряжение на элементе существенно не изменяется при протекании по нему тока от I_{\min} до I_{\max} .

При компенсационном методе стабилизации напряжения стабилизатор обычно состоит из трех элементов: регулирующего 1, измерительного 2 и усилительного 3. Регулирующий элемент может включаться как последовательно, так и параллельно нагрузке, измерительный - всегда параллельно нагрузке. Усилительный элемент иногда

может отсутствовать, если сам регулирующий элемент обладает достаточными усиленными свойствами. При параллельном включении регулирующего элемента в схему вводится балансовый резистор R_{δ} .

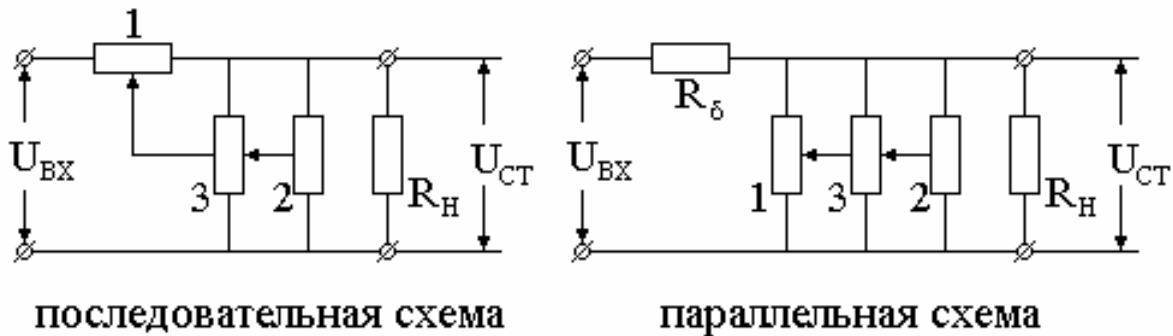


Рис.9.1.

Характерной особенностью стабилизаторов компенсационного типа является наличие обратной связи между входом и выходом.

Принцип действия компенсационного стабилизатора. Дестабилизирующий фактор, действуя на измерительный элемент 2, вызывает на нем изменение напряжения (отклонение). В результате обратного воздействия усиленного отклонения на регулирующем элементе изменяется режим его работы, приводящий к изменению падения напряжения на регулирующем элементе в последовательной схеме или на балансовом резисторе в параллельной схеме.

Стабилизатор напряжения характеризуется следующими параметрами:

- 1) коэффициент стабилизации,

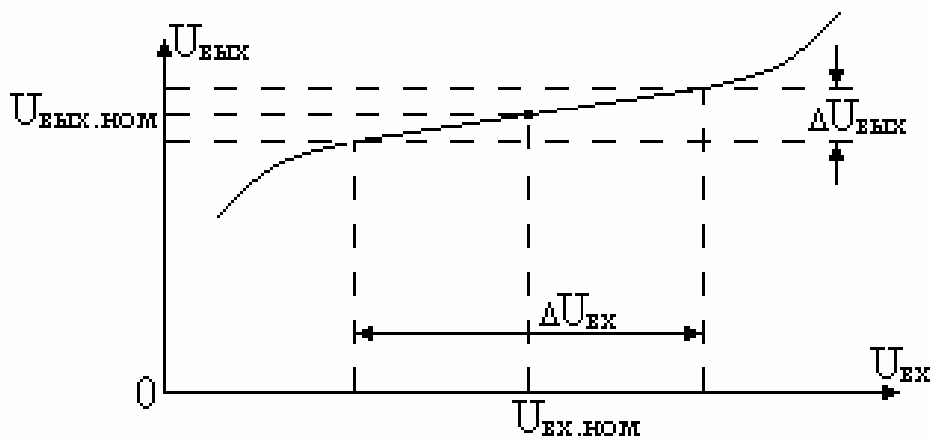


Рис.9.3.

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх.ном}} \cdot \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых.ном}}$$

то есть отношение относительного изменения напряжения на входе к относительному изменению напряжения на выходе стабилизатора (или на нагрузке).

Практически имеем:

для параметрического стабилизатора

$$K_{CT} = 15 \div 20$$

для компенсационного стабилизатора

$$K_{CT} = 10^2 \div 10^4$$

Для многокаскадного стабилизатора: $K_{CT} = K_{CT1} \cdot K_{CT2} \cdot \dots$

2) Сопротивление входа по постоянному и по переменному току:

$$R_{ВХ.СТАТ} = \frac{U_{ВХ}}{I_{ВХ}}, \quad R_{ВХ.ДИН} = \frac{\Delta U_{ВХ}}{\Delta I_{ВХ}}$$

3) Сопротивление выхода по постоянному и по переменному току:

$$R_{ВЫХ.СТАТ} = \frac{U_{ВЫХ}}{I_{ВЫХ}}, \quad R_{ВЫХ.ДИН} = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta I_{ВЫХ}}$$

4) Коэффициент сглаживания пульсации напряжения:

$$q = \frac{\Delta U_{ВХ}}{\Delta U_{ВЫХ}}$$

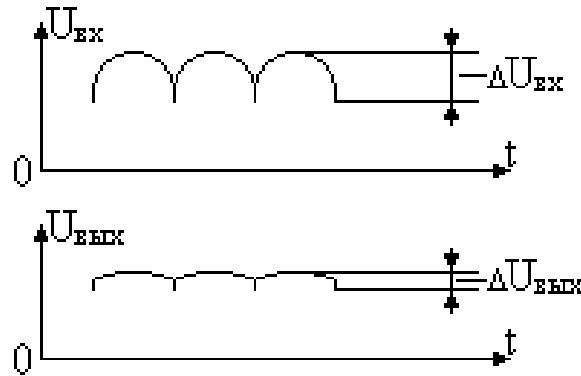


Рис.9.4.

В качестве коэффициента сглаживания может использоваться K_{CT} . Чем больше K_{CT} , тем лучше стабилизатор сглаживает пульсации.

Параметрический стабилизатор имеет КПД $\eta = 0,1 \div 0,15$.

Последовательный и параллельный компенсационный стабилизаторы имеют соответственно:

последовательный - $\eta = 0,6 \div 0,7$

параллельный - $\eta = 0,3 \div 0,4$

Вывод: непрерывный режим работы регулирующего элемента приводит к значительному рассеянию мощности.

Ключевой режим компенсационного стабилизатора. Можно значительно сократить мощность, рассеиваемую на регулирующем элементе, и этим значительно повысить КПД стабилизатора, если регулирующий элемент заставить работать в ключевом режиме («открыт» - «закрыт»). Управление регулирующего элемента в этом случае будет производиться не путем непрерывного изменения сигнала управления, а изменением соотношения времен замкнутого и разомкнутого состояния полупроводникового ключа (транзистора или тиристора).

Схема ШИМ играет роль измерительного органа и модулятора одновременно.

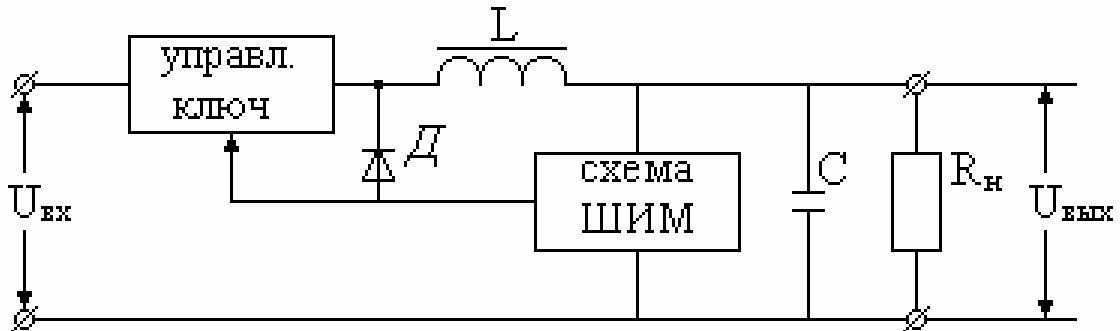


Рис.9.5.

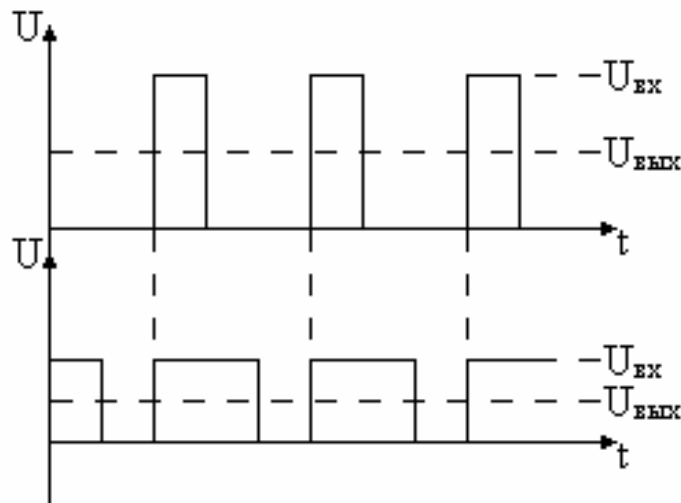


Рис.9.6.

Стабилизатор регулирует среднее значение выходного напряжения. Для выделения постоянной составляющей используется специальный фильтр, без которого стабилизатор неработоспособен. Так как частота переключений ШИМ велика, то масса и габариты фильтра невелики.

9.4. Сглаживающие фильтры

Применение выпрямителей, особенно выпрямителей однофазного тока, приводит к появлению достаточно глубоких пульсаций, которые необходимо сглаживать. Для этого используются сглаживающие фильтры.

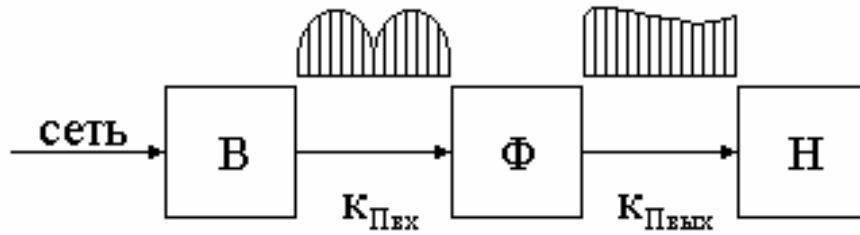


Рис.9.7.

Коэффициент пульсации. Коэффициент пульсации характеризуется отношением амплитуды 1-ой гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения к его постоянной составляющей. На входе и выходе фильтра соответственно имеем:

$$K_{П.ВХ} = \frac{U_{m1.вх}}{U_{o.вх}} \quad \text{и} \quad K_{П.ВЫХ} = \frac{U_{m1.вых}}{U_{o.вых}}$$

Коэффициент сглаживания фильтра показывает во сколько раз коэффициент пульсации на входе фильтра больше, чем на его выходе:

$$K_{СГЛ} = \frac{K_{П.ВХ}}{K_{П.ВЫХ}} = \frac{U_{m1.вх}}{U_{m1.вых}} \cdot \frac{U_{o.вых}}{U_{o.вх}} = K_{\phi} \cdot K_o$$

где $K_{\phi} = \frac{U_{m1.вх}}{U_{m1.вых}}$ - коэффициент фильтрации, показывающий во сколько раз

фильтр ослабляет переменную составляющую выпрямленного напряжения;

$K_o = \frac{U_{o.вых}}{U_{o.вх}}$ - коэффициент ослабления (снижения) постоянной составля-

щей выпрямленного напряжения.

Рассмотрим ряд конкретных схем сглаживающих фильтров.

Индуктивный фильтр - последовательный сглаживающий дроссель. Используется преимущественно при низкоомной нагрузке.

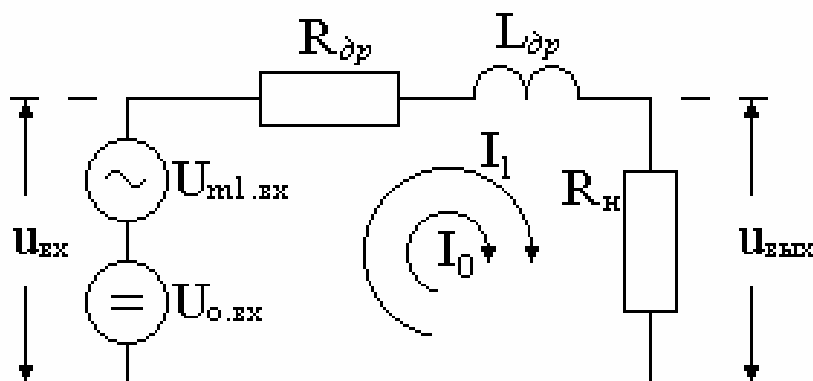


Рис.9.8.

$$K_{\phi} = \frac{U_{m1.вх}}{U_{m1.вых}} = \frac{I_1 \sqrt{(R_{\partial p} + R_H)^2 + \omega_{II}^2 L^2 \partial p}}{I_1 R_H}$$

$$K_o = \frac{U_{o.вых}}{U_{o.вх}} = \frac{I_o R_H}{I_o (R_{\partial p} + R_H)}$$

$$K_{СГЛ} = K_{\phi} K_o = \frac{\sqrt{(R_{\partial p} + R_H)^2 + x_{\partial p}^2}}{R_H + R_{\partial p}} = \sqrt{1 + \left(\frac{x_{\partial p}}{R_H + R_{\partial p}} \right)^2} \gg 1$$

Необходимость низкоомной нагрузки при использовании индуктивного фильтра вытекает из соотношения:

$$\frac{x_{\partial p}}{R_H + R_{\partial p}} \gg 1$$

Емкостный сглаживающий фильтр - конденсатор, подключенный параллельно нагрузке. В этом случае переменная составляющая тока преимущественно замыкается через конденсатор, который не пропускает постоянную составляющую тока. Для этого необходимо:

$$R_H \gg \frac{1}{\omega_{II} C} = x_c$$

Следовательно, этот вид фильтра целесообразно применять при высокоомной нагрузке. В идеальном случае - это фильтр без потерь, поэтому:

$$U_{o.вх} = U_{o.вых} \text{ и } K_o = \frac{U_{o.вых}}{U_{o.вх}} = 1$$

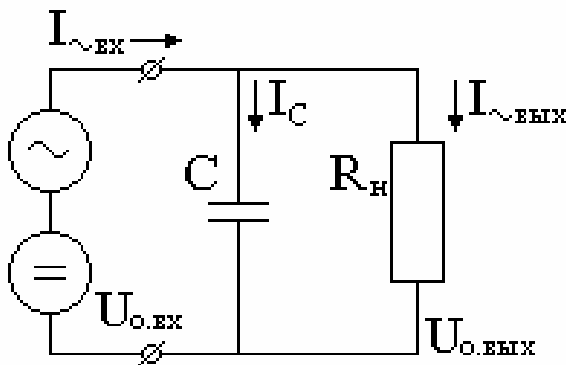


Рис.9.9.

За счет шунтирующего действия конденсатора переменная составляющая тока, проникающая в нагрузку, сильно ослабляется.

Коэффициент фильтрации можно представить в виде:

$$K_{\phi} = \frac{I_{\sim вх}}{I_{\sim вых}} = \frac{G_{вх}}{G_{вых}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{R_H}\right)^2 + \left(\frac{1}{x_C}\right)^2}}{\frac{1}{R_H}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{R_H^2} + \omega_{\Pi}^2 C^2}}{\frac{1}{R_H}} = \sqrt{1 + \omega_{\Pi}^2 C^2 R_H^2} = \omega_{\Pi} C R_H$$

Так как $K_o = 1$, то $K_{СГЛ} = K_{\phi} = \omega_{\Pi} C R_H$

Сглаживающий LC-фильтр. Дроссель фильтра должен обладать большой индуктивностью при возможно малом сопротивлении постоянному току. Для переменной составляющей имеет место большое падение напряжения на дросселе и незначительное на нагрузке. Для постоянной составляющей - наоборот. Конденсатор должен иметь большую емкость, чтобы создать для переменной составляющей шунтирующую цепь, минуя нагрузку.

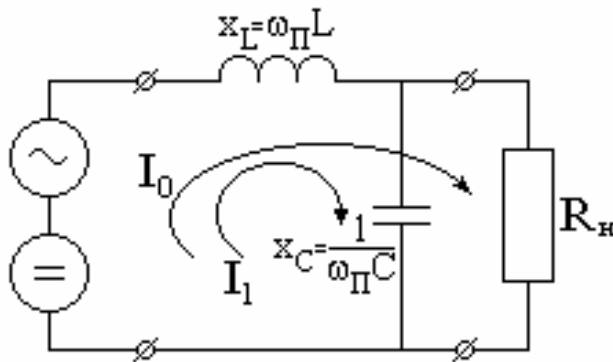


Рис.9.10.

Так как $K_o = \frac{U_{o.вых}}{U_{o.вх}} = 1$, то

$$K_{СГЛ} = K_{\phi} = \frac{U_{m1.вх}}{U_{m1.вых}} = \frac{I_1(x_L - x_C)}{I_1 x_C} = \frac{\omega_{\Pi} L - \frac{1}{\omega_{\Pi} C}}{\frac{1}{\omega_{\Pi} C}} = \omega_{\Pi}^2 LC - 1 \approx \omega_{\Pi}^2 LC$$

Сглаживающий RC - фильтр. Применяется при малых токах нагрузки. Применение резистора вместо дросселя значительно удешевляет и упрощает сглаживающий фильтр.

Допущения:

- 1) $R_{\partial p} \ll \omega_{\Pi} L$,
 $R_{\partial p} = 0$ (пренебрегаем)
- 2) $R_H \gg x_C = \frac{1}{\omega_{\Pi} C}$,

R_H на сглаживание не влияет, так как ток I_1 в R_H практически не протекает

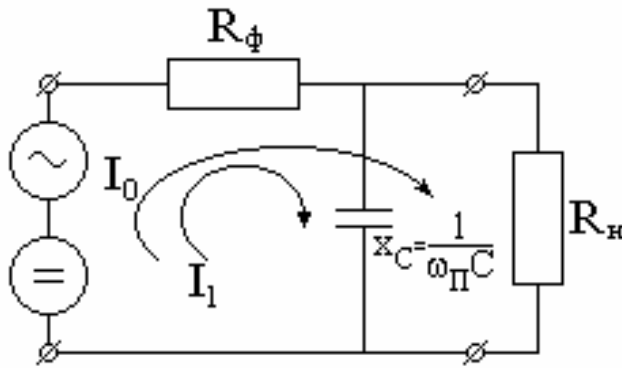


Рис.9.11.

Допущения: $R_н \gg x_C = \frac{1}{\omega_П C}$

$$K_o = \frac{U_{0.вых}}{U_{0.вх}} = \frac{R_н}{R_φ + R_н}$$

$$K_φ = \frac{U_{m1.вх}}{U_{m1.вых}} = \frac{I_1 \sqrt{R_φ^2 + x_C^2}}{I_1 x_C} = \frac{\sqrt{R_φ^2 + \frac{1}{\omega_П^2 C^2}}}{\frac{1}{\omega_П C^2}} = \sqrt{(\omega_П R_φ C)^2 + 1} \approx \omega_П R_φ C$$

$$K_{СГЛ} = K_φ K_o = \omega_П C R_φ \frac{R_н}{R_н + R_φ}$$

9.5. Многозвенные фильтры

Многозвенные фильтры представляют собой сочетание нескольких однозвенных (простых) фильтров и применяются в тех случаях, когда требуется получить очень малый коэффициент пульсации.

$$K_{СГЛ} = K_{СГЛ.1} \cdot K_{СГЛ.2} \cdot K_{СГЛ.3} \dots$$

$$K_φ = K_{φ.1} \cdot K_{φ.2} \cdot K_{φ.3} \dots$$

9.6. Развязывающие фильтры

Развязывающие фильтры ослабляют связь по переменному току между какими-либо устройствами, питаемыми от общего источника постоянного тока. Например, исключить влияние исполнительных органов СУ на измерительные устройства. Развязывающие фильтры, как правило, бывают RC-типа и редко LC-типа.

В качестве развязывающих и сглаживающих фильтров также применяются компенсационные стабилизаторы напряжения.

10. ФИЛЬТРАЦИЯ СЕТЕВЫХ ПОМЕХ

10.1. Определение эффективности фильтрации

Основным средством ослабления кондуктивных помех в цепях первичного и вторичного электропитания, вызванных коммутационными процессами, является фильтрация.

Эффективность фильтрации определяется вносимым затуханием фильтра:

$$S=20\cdot\lg\left|\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2}\right|[\text{дБ}]$$

или

$$S=20\cdot\lg\left|\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2}\right|[\text{дБ}]$$

где \dot{U}_1, \dot{I}_1 - напряжение и ток помехи на нагрузке в исходном состоянии (без фильтра);

\dot{U}_2, \dot{I}_2 - напряжение и ток помехи на нагрузке при наличии в цепи фильтра.

Основные требования, предъявляемые к фильтру:

1) обеспечение заданной эффективности фильтрации в требуемом частотном диапазоне (с учетом внутреннего сопротивления Z_i и нагрузки электрической цепи Z_H);

2) ограничение допустимого падения напряжения на фильтре при максимальном токе нагрузке;

3) ограничение по требованиям техники безопасности допустимого значения реактивной составляющей тока на основной частоте;

4) элементы фильтра должны выбираться с учетом номинальных токов и напряжений электрической цепи, а также возможных возникающих в бросков напряжений и токов, вызванных нестабильностью электрического режима и переходными процессами;

5) конструктивные: эффективность экранирования, минимальные габариты и масса, обеспечение нормального теплового режима, стойкость к механическим и климатическим воздействиям, технологичность конструкции и др.

По своему назначению помехоподавляющие фильтры являются широкополосными фильтрами нижних частот (ФНЧ).

Фильтры в цепях электропитания строятся как индуктивно- или резистивно-емкостные.

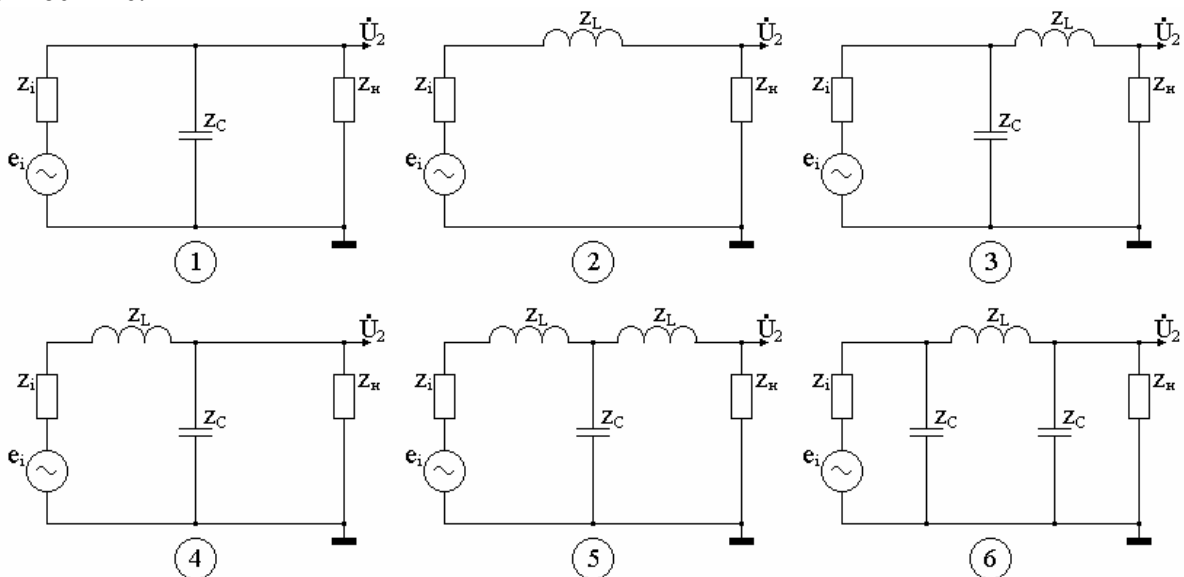


Рис.10.1.

На основании теории четырехполюсников вносимое затухание может быть выражено через матричные коэффициенты в А-форме:

$$S = 20 \cdot \lg \left| \frac{A_{11}z_H + A_{12} + A_{21}z_i z_H + A_{22}z_i}{z_i + z_H} \right| [\text{дБ}] (*)$$

Матричные коэффициенты могут быть в свою очередь выражены через импедансы (полные сопротивления) дросселей и конденсаторов фильтра. Они представлены в таблице для всех приведенных выше схем.

| № | Тип ФНЧ | A_{11} | A_{12} | A_{21} | A_{22} |
|---|-------------------------|---------------|--------------------|---------------------|---------------|
| 1 | Емкостной | 1 | 0 | $1/Z_C$ | 1 |
| 2 | Индуктивный | 1 | Z_L | 0 | 1 |
| 3 | Г-образный CL | 1 | Z_L | $1/Z_C$ | $1 + z_L/z_C$ |
| 4 | Г-образный LC | $1 + z_L/z_C$ | Z_L | $1/Z_C$ | 1 |
| 5 | Т-образный семмитричный | $1 + z_L/z_C$ | $z_L^2/z_C + 2z_L$ | $1/Z_C$ | $1 + z_L/z_C$ |
| 6 | П-образный симметричный | $1 + z_L/z_C$ | Z_C | $2/z_C + z_L/z_C^2$ | $1 + z_L/z_C$ |

Эффективность фильтрации согласно формуле затухания существенно зависит от импедансов источника и нагрузки. Поэтому структура (схема) ФНЧ определяется из следующих соображений: первым элементом фильтра (Г-, Т-, П-) при малом сопротивлении источника должна быть катушка индуктивности L , при большом сопротивлении - конденсатор C . Аналогично следует выбирать и последний элемент фильтра, предшествующий нагрузке.

Так, согласно (*) для источника помех в виде генератора напряжения ($z_i \rightarrow 0$) емкостной фильтр (№ 1) неэффективен, а для источника помех в виде генератора тока ($z_i \rightarrow \infty$) неэффективным является индуктивный фильтр (№ 2).

Эти рекомендации особенно важны при проектировании ФНЧ для подавления помех, возникающих при коммутации электрических цепей. Конкретизируем их так:

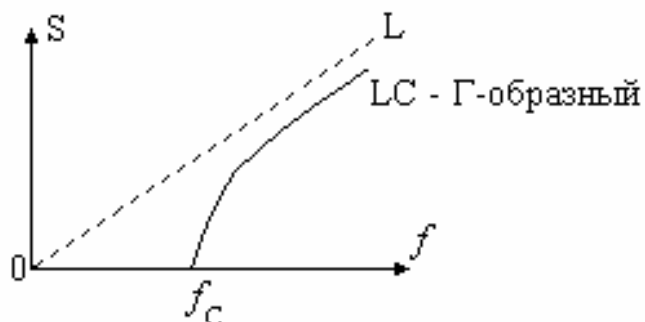
1. Если образование помехи связано с включением электронного ключа (эквивалентно включению источника напряжения, заряженной емкости C), то первым элементом фильтра по отношению к ключу должна быть катушка индуктивности L .

2. Если образование помехи связано с выключением электронного ключа (эквивалентно включению источника тока, «зараженной индуктивности L), то первым элементом фильтра должен быть конденсатор C .

Заданную эффективность фильтрации можно обеспечить при различных значениях индуктивностей и емкостей фильтра. Для оптимального выбора этих параметров следует учитывать и конструктивные особенности: конструкции катушек индуктивности проще, дешевле и надежнее для малых токов, а конструкция конденсаторов - для малых напряжений.

Поэтому при большом токе и низком напряжении следует применять в фильтре катушки с малыми индуктивностями и конденсаторы с большими емкостями, а при малом токе и высоком напряжении - катушки с максимально возможными индуктивностями или резисторы и конденсаторы с малыми емкостями.

Другим важнейшим параметром ФНЧ является частота среза, которой ограничивается участок частотного диапазона, начиная с нулевой частоты, на котором затухание равно нулю. А сам участок называется полосой прозрачности ФНЧ. Только наличие такого участка, в строгом смысле слова, характеризует четырехполюсник как ФНЧ. В этом отношении схемы № 1-3 являются только частотно-зависимыми цепями, хорошо загораживающими высокие частоты, но несколько ослабляющими и полезный сигнал основной частоты сети. Только схемы « 4-6 являются в полном смысле фильтрами ФНЧ, без ослабления пропускания сетевую частоту.



Граничные частоты полосы прозрачности получаются из решения уравнения:

$$A_{11}(\omega) = \pm 1,$$

$$\omega_1 = 0 \text{ и } \omega_2 = \omega_c,$$

$$f_1 = 0 \text{ и } f_2 = \omega_c / 2\pi = f_c$$

Рис.10.2.

Для схем № 4-6 значение A_{11} следует брать из таблицы.

Для схем № 1-3 $A_{11} = 1$ - действительное число и частота среза отсутствует.

10.2. Помехоподавляющие элементы и фильтры

Реальные характеристики помехоподавляющих элементов и фильтров определяются их конструктивными особенностями и в связи с этим имеют ряд ограничений (по частоте, току, напряжению и т.д.). Рассмотрим их.

10.3. Конденсаторы

Применяются как самостоятельные помехоподавляющие элементы и как параллельные звенья фильтров (см. 6 схем). Тип конденсаторов зависит от материала диэлектрика (бумажные, металобумажные, пленочные, керамические, электролитические и т.д.). Конструктивно помехоподавляющие конденсаторы делятся на следующие типы:

- 1) двухполюсные (с двумя выводами);
- 2) опорные (одним из выводов является металлический корпус);
- 3) проходные некоаксиальные (все выводы - токонесущие);
- 4) проходные коаксиальные (металлический корпус и центральный токонесущий проводник);
- 5) конденсаторные блоки (в одном корпусе).

Схемы замещения конденсаторов:

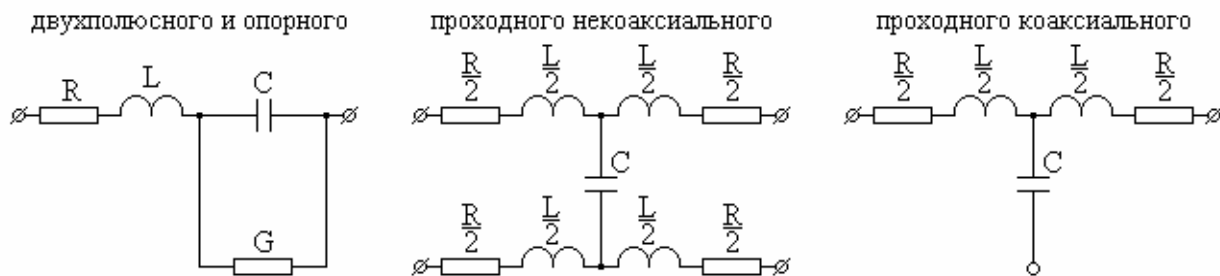
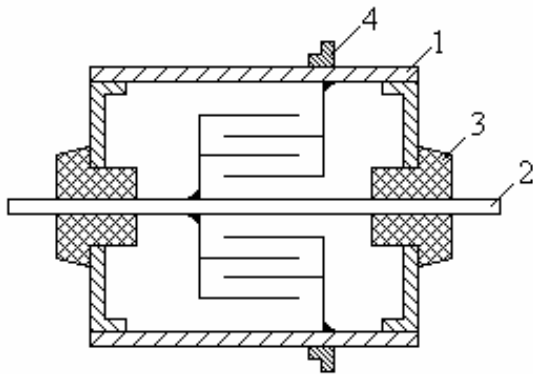


Рис.10.3.

Согласно схемам замещения реальный конденсатор не имеет чистой емкости, а имеет:
- собственную индуктивность L состоящую из индуктивностей выводов и обкладок;

- сопротивление R выводов и контактов;
- проводимость утечки G (обычно для проходных конденсаторов ей пренебрегают).

Наличие паразитных индуктивностей приводит к появлению резонансных явлений, ограничивающих частотный диапазон конденсатора. На частотах выше частоты собственного резонанса конденсатор имеет индуктивное сопротивление, увеличивающееся с частотой. Применяя проходной конденсатор, резонансную частоту можно значительно повысить.

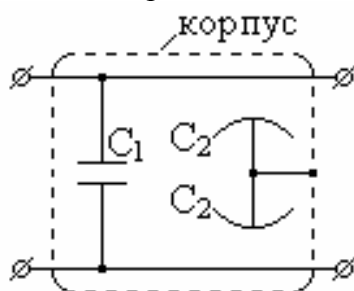


- 1 - внешняя обкладка - корпус, подсоединенный к одному торцу секции;
- 2 - токонесущий стержень, соединенный с торцом секции при помощи пайки;
- 3 - изоляционная втулка (стекло, фарфор);
- 4 - крепежный фланец.

Рис.10.4.

Максимально возможные короткие выводы позволяют получить минимально возможную паразитную индуктивность, а значит и более высокую резонансную частоту - до 100 [МГц]. Для сравнения: электролитические конденсаторы имеют резонансную частоту, не превышающую 25 [кГц].

Конденсаторные емкостные блоки служат для подавления:



- 1) симметричных (продольных) помех с помощью конденсатора C_1 ;
- 2) несимметричных (поперечных) помех с помощью проходных конденсаторов C_2 .

Рис.10.5.

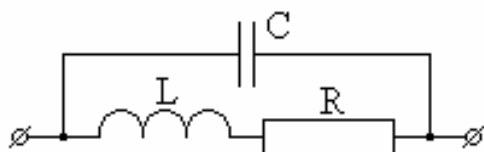
10.4. Индуктивные элементы - дроссели

Применяются как самостоятельные элементы подавления помех и как самостоятельные звенья фильтров. Наиболее распространены дроссели следующих видов:

- 1) витковые на ферромагнитном сердечнике;
- 2) безвитковые.

Они имеют следующие схемы замещения:

для виткового дросселя



для безвиткового дросселя

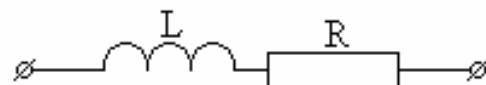


Рис.10.6.

Здесь C - межвитковая емкость.

Максимальная частота, на которой работает витковый дроссель, ограничена его собственной емкостью. На частотах, выше резонансной, дроссель имеет емкостное сопротивление, уменьшающееся с частотой. Применение секционирования обмоток снижает емкость, но одновременно уменьшается и индуктивность дросселя.

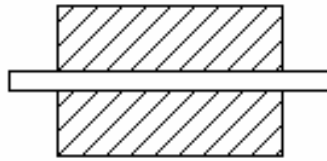


Рис.10.7.

Безвитковый дроссель представляет собой трубчатый ферромагнитный сердечник, надетый на токонесущий стержень. В качестве ферромагнитного материала используют для высоких частот (ВЧ) никель-цинковые ферриты НН100...НН600 и альсиферы марки ТЧ-90. На низких частотах (НЧ) применяются магнетодиэлектрики типов ПП90 и ПП250, изготовленные на основе Мо-пермаллоя.

Размеры ферромагнитного сердечника выбираются такими, чтобы они не насыщались и тем самым не снижали индуктивность дросселя.

10.5. Микроминиатюрные фильтры

Керамические проходные фильтры имеют миниатюрную конструкцию и позволяют эффективно подавлять помехи в широком диапазоне частот. В конструкции керамического проходного фильтра может быть реализовано Г-, Т- или П-образное звено ФНЧ. Имеются несколько конструктивных решений ФНЧ.

Рассмотрим одно из них:

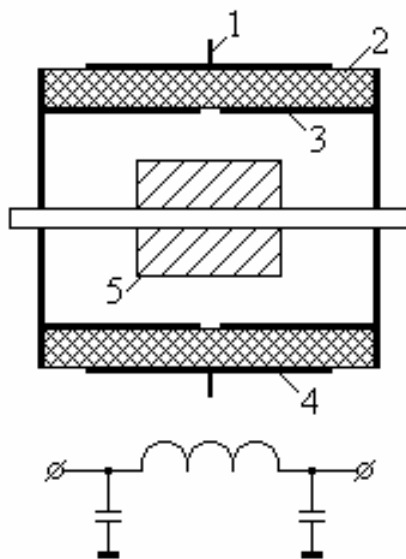


Рис.10.8.

1-сегнетокерамическая трубка;

2-крепежный фланец;

3-внутренняя обкладка;

4-наружная обкладка;

5-безвитковый дроссель;

6-токонесущий стержень.

Реализуется П-образная схема ФНЧ.

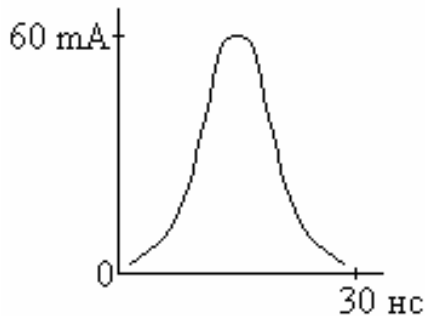
Известны конструкции многостыревых разъемов, в которых на каждый контакт встраивается по одному П-образному помехоподавляющему фильтру. Габаритные размеры такого фильтра:

$$l = 9,5[\text{мм}], d = 3,2[\text{мм}],$$

10.6. Фильтрация цепей электропитания цифровых устройств

Возрастание степени интеграции и уплотнения компоновки современных цифровых интегральных схем (ЦИС) приводит к их существенной зависимости помехозащищенности от конструктивного выполнения межсоединений в аппаратуре, включая компоновку шин электропитания в платах.

Шины питания объединяют все ЦИС. Поэтому появление импульсных помех на шинах питания, вызванных процессами коммутации ЦИС при переходе из одного логического состояния в другое, может привести к появлению сбоев в работе всего цифрового устройства. Это в равной мере относится и к импульсным помехам, проникающим в шины питания извне, например, из источника питания.



Среди современных ЦИС различных типов наибольший уровень при переключении создают ТТЛ-интегральные схемы. Включение и выключение вентиля в этих схемах приводит к появлению чрезвычайно кратковременных (десятки наносекунд) бросков тока величиной в несколько десятков миллиампер. Образование

Рис.10.8.

импульсного тока при переключении ЦИС приводит к импульсному падению напряжения в шинах питания, обладающих конечным импедансом (обычно RC -типа). Броски тока приводят к импульсным перепадам напряжения, так как:

$$u = L \frac{di}{dt}$$

Импульсные помехи в шинах питания, возникающие в процессе коммутации ЦИС, а также проникающие внешне путем, могут приводить к сбоям в цифровых устройствах по следующим основным причинам:

- 1) Изменение питающего напряжения ЦИС, превышающее установленный в ТУ допуск.

Степень воздействия помехи зависит от ее характера - форма, полярность, амплитуда и длительность, а также от места ее приложения - шина «Питание» или «Земля». Помеха может вызвать появление задержки полезного импульса, что приведет к ложному срабатыванию.

- 2) Импульсное падение напряжения на шине «Земля», приводящее к искажению информационного сигнала на входе ЦИС.

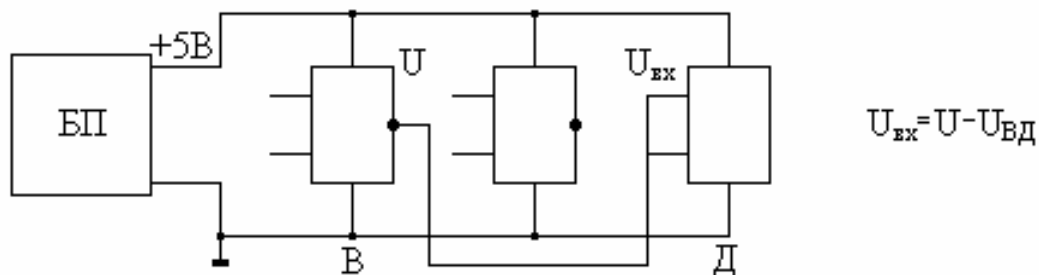


Рис.10.10.

Помехи в шине «Земля», помимо влияния на информационные сигналы, приводят к изменению питающего напряжения ЦИС, удаленной от блока питания.

3) Перенос помех из цепей питания в сигнальные цепи индуктивным или емкостным путем при больших скоростях изменения тока di/dt и напряжения du/dt .

10.7. Рекомендации по конструированию

Для снижения уровня помех в шинах питания применяются следующие схемно-конструктивные методы:

- 1) уменьшение индуктивности шин питания с учетом взаимной магнитной связи прямого и обратного проводников;
- 2) сокращение длин участков шин питания, которые являются общими для токов от различных ЦИС;
- 3) снижение скорости изменения импульсных токов в шинах питания с помощью помехоподавляющих конденсаторов; здесь появляются как бы индуктивные источники питания для групп корпусов и даже отдельных корпусов;
- 4) рациональная топология цепей питания на печатной плате. Разводка шин питания к ЦИС на печатной плате должна осуществляться не последовательно, а параллельно или в виде замкнутых контуров. Последняя приближается по своим параметрам к сплошным плоскостям питания.

11. ЗАЗЕМЛЕНИЕ

Рационально организованная система заземления в аппаратуре СУ вместе с экранированием и фильтрацией является эффективным средством ослабления помех.

Система заземления - это электрическая цепь, обладающая свойством сохранять минимально возможный потенциал, являющийся уровнем отсчета в конкретной аппаратуре. Кроме свойства минимизировать помехи, система заземления должна обеспечивать защиту обслуживающего персонала от поражения электрическим током в соответствии с требованиями техники безопасности.

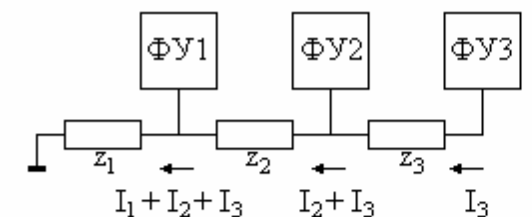
При конструировании аппаратуры к системе заземления предъявляются следующие основные требования:

- 1) минимизация общего импеданса земли, позволяющая исключить образование напряжения помех, превышающего допустимый уровень, за счет протекания токов отдельных узлов (каскадов, микросхем и т.д.) через общие участки земли;
- 2) отсутствие замкнутых контуров заземления, чувствительных к воздействию магнитных полей.

В аппаратуре СУ требуется как минимум три отдельных цепи заземления:

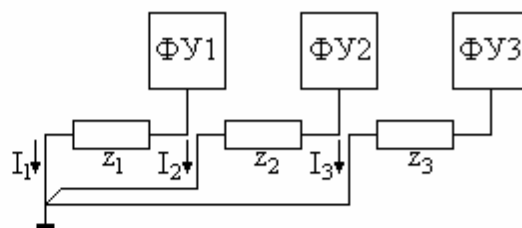
- 1) для сигнальных цепей с низкими уровнями токов и напряжений;
- 2) для силовых цепей с высокими уровнями потребляемой мощности (источники питания, выходные каскады, электродвигатели, электромагниты и т.д.);
- 3) для корпусных цепей (несущих конструкций: шасси, панелей, кожухов, крышек, корпусов, экранов, металлизированных покрытий и т.д.).

11.1 Способы заземления



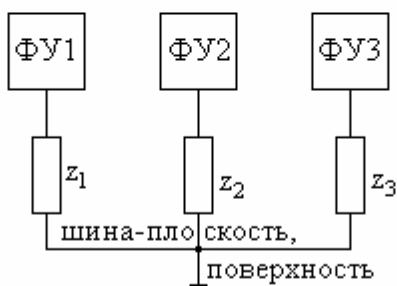
одноточечная последовательная схема

Рис.11.1



одноточечная параллельная схема

Рис.11.2



многоточечная схема заземления

Рис.11.3

Из-за простоты реализации последовательная схема находит очень широкое применение. Ее не следует для цепей с большим разбросом потребляемой мощности, так как мощные функциональные узлы (ФУ) создают большие возвратные токи заземления, которые могут повлиять на малосигнальные ФУ. Малосигнальные ФУ следует подключать возможно ближе к точке опорного заземления. Рекомендуется применять при частотах $f < 0,5-1$ [МГц].

Одноточечная параллельная схема применяется только на низких частотах $f < 0,1-0,5$ [МГц], так как ее применение приводит к удлинению соединительных проводников и увеличению индуктивной составляющей импеданса «Земля».

Многоточечная схема применяется на высоких частотах $f > 1$ [МГц], подключая ФУ в точках, ближайших к опорной земле. При этом в качестве опорной применяется заземляющая поверхность с малым импедансом: металлические шасси, слой многослойной печатной платы, металлизированное покрытие пластмассового корпуса и т.д.

12. ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ ОТ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ (ИВЭП)

Каждый из функциональных узлов ИВЭП, в котором происходит импульсное преобразование электрической энергии, является потенциальным источником помех. Уровень помех зависит от следующих факторов:

- 1) формы и параметров коммутируемого напряжения или тока, включая амплитуду, частоту коммутации и т.д.;
- 2) частотных свойств используемых электро- и радиоэлементов;
- 3) принятого метода компоновки и монтажа.

Рассмотрим некоторые типовые схемы ИВЭП.

12.1. Мостовая схема выпрямления

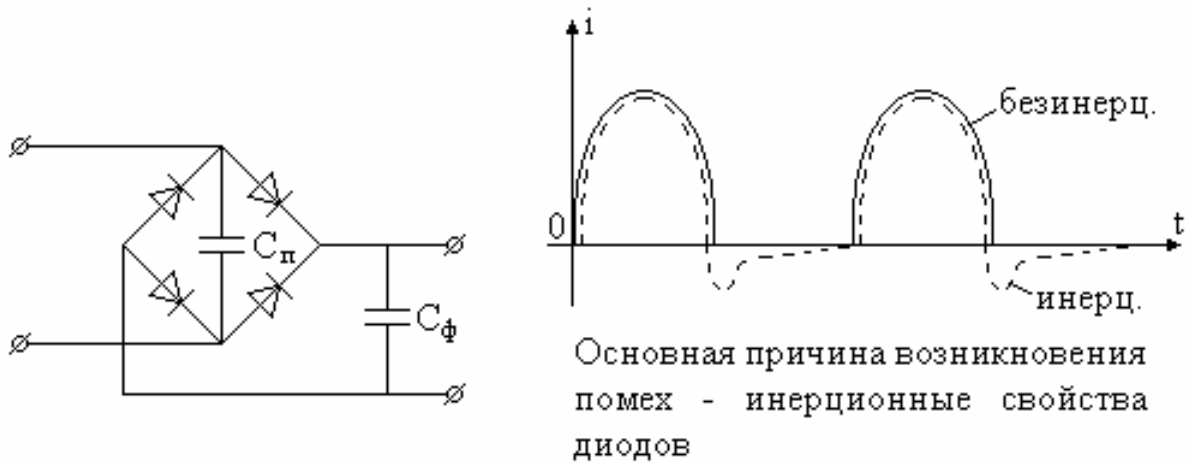


Рис.12.1.

Емкость фильтра C_f не в состоянии погасить помеху в силу низких частотных свойств электролитического конденсатора. Нужно включить непосредственно на входную диагональ выпрямительного моста помехоподавляющий конденсатор C_{II} .

12.2. Импульсный стабилизатор напряжения (ИСН)

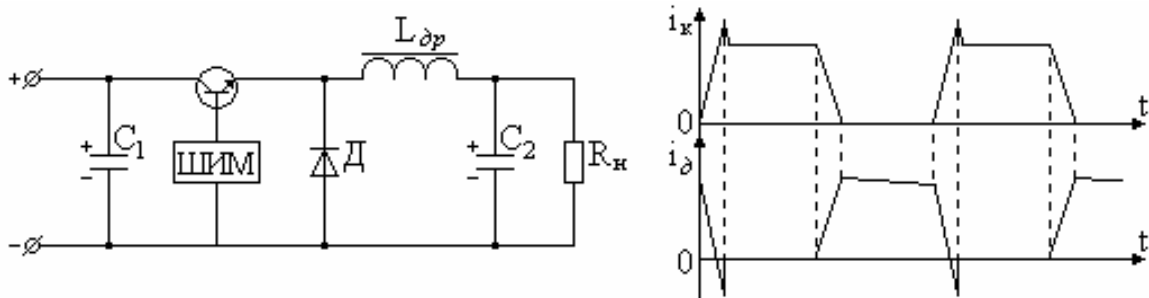


Рис.12.2.

Принцип действия ИСН заключается в накоплении энергии в магнитном поле дросселя L_{dp} при включенном состоянии транзистора T и расходовании ее при выключенном транзисторе через блокирующий диод D . Ток в нагрузку поступает непрерывно.

Образование в ИСН помех связано с ключевым принципом его работы, что с одной стороны связано с образованием пульсации преобразованного напряжения, а с другой стороны - определяется сквозными токами, протекающими через блокирующий диод в моменты восстановления его запирающих свойств. Вторая причина является более важной при образовании мощных ВЧ-помех, для подавления которых используются следующие методы:

- 1) применение импульсного блокирующего диода с повышенными частотными свойствами;
- 2) установка помехоподавляющего конденсатора параллельно блокирующему диоду;
- 3) включение токоограничивающего дросселя последовательно с электролитическим конденсатором входного фильтра, но ни в коем случае не в силовую сеть;

4) снижение общего сопротивления $R_{СКВ}$ контура сквозного тока и рациональный монтаж схемы ИВЭП.

13. ИСКРОГАШЕНИЕ КОНТАКТНЫХ КОММУТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Искрение при работе контактных устройств (реле, контакторы, выключатели, разъединители и др.) являются источником мощнейших электромагнитных помех, занимающих практически весь диапазон частот. От контактного устройства помеха распространяется как путем излучения (электромагнитное поле), так и по путям проводимости (кондуктивные помехи). Подавить помехи от искрения очень трудно. Поэтому проблема эффективного искрогашения выдвигается в ряд важнейших среди других проблем электромеханических устройств автоматики. Кроме того, при оптимальном искрогашении решается задача повышения ресурса работы контактов, повышения их надежности.

Рассмотрим работу контактов в процессе коммутации некоторого управляемого объекта, подключаемого к сети постоянного тока. В большинстве случаев управляемый объект (УО) может быть представлен схемой замещения в виде последовательной цепочки $R-L$. Во время работы контакты могут находиться в одном из четырех состояний: замкнутом, разомкнутом, в процессе размыкания и в процессе замыкания.

Имеют значение для обеспечения надежности только два режима: замкнутое состояние и процесс размыкания.

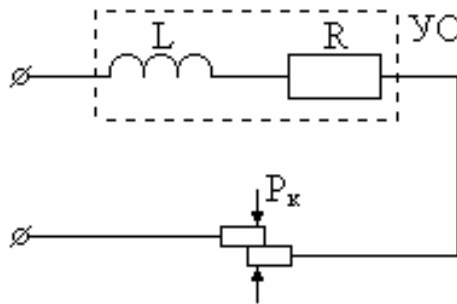


Рис.13.1.

Прохождение тока нагрузки через замкнутые контакты приводит к выделению тепла в переходном сопротивлении контактов R_K которое зависит от материала контактов, состояния контактных поверхностей и контактного давления. Максимальное давление ограничивается механической прочностью контактов при заданном числе срабатываний и чувствительностью реле (контактора), то есть его быстродействием.

Самым тяжелым режимом работы контактов является процесс размыкания. В момент начала механического разведения контакторов между ними образуется расплавленный металлический мостик, который способствует переносу металла под действием электрических сил с одного контакта на другой, что приводит к эрозии контактной поверхности.

После обрыва расплавленного мостика возникает газовый разряд в форме дуги. Рассмотрим условия возникновения дуги при размыкании $R-L$ цепи, в которой процессы описываются уравнением:

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + U_{\delta}$$

где U_{δ} - падение напряжения на дуге.

Из него получаем:

$$L \frac{di}{dt} = (U - iR) - U_{\delta}$$

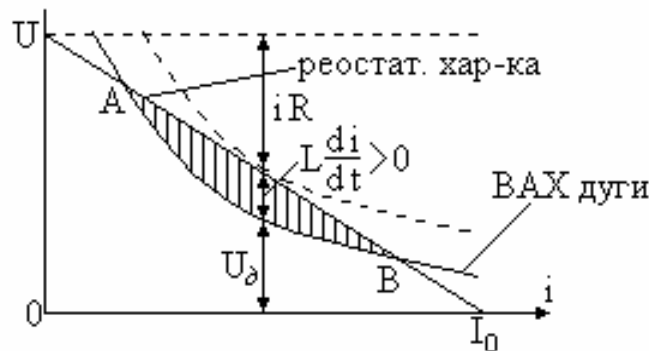


Рис.13.2.

В процессе отключения нагрузки ток изменяется от начального значения $I_0 = U/R$ до нуля. Для обеспечения гашения дуги необходимо, чтобы производная тока по времени имела отрицательное значение $di/dt < 0$. Однако между точками A и B $L \frac{di}{dt} > 0$ и дуга горит, так как избыток напряжения $L \frac{di}{dt}$ поддерживает ее горение.

точка A - неустойчивый режим горения дуги (малейшее смещение влево ведет к погасанию дуги, а малейшее смещение вправо - к дальнейшему смещению вправо и к переходу в точку B);

точка B - режим устойчивого горения дуги (смещение влево ведет к возврату в точку B, а смещение вправо приводит к возврату, так как нет избытка $L \frac{di}{dt}$).

При раздвижении контактов вольт-амперная характеристика (ВАХ) дуги перемещается вверх, точки A и B сближаются и переходят в точку отрыва ВАХ дуги от реостатной характеристики и дуга гаснет.

Отсюда вытекает два способа дугогашения: достаточное раздвижение контактов и шунтирование контактов резистором или нелинейным резистивным элементом, что эквивалентно подъему ВАХ дуги над реостатной характеристикой. А также принцип обесточивания контактов путем их шунтирования.

13.1. Схемы искрогашения

Принцип действия схем искрогашения заключается в том, что энергия, накопленная в магнитном поле управляемого объекта (УО), расходуется при размыкании не в зазоре между контактами, а в сопротивлении контуров искрогашения.

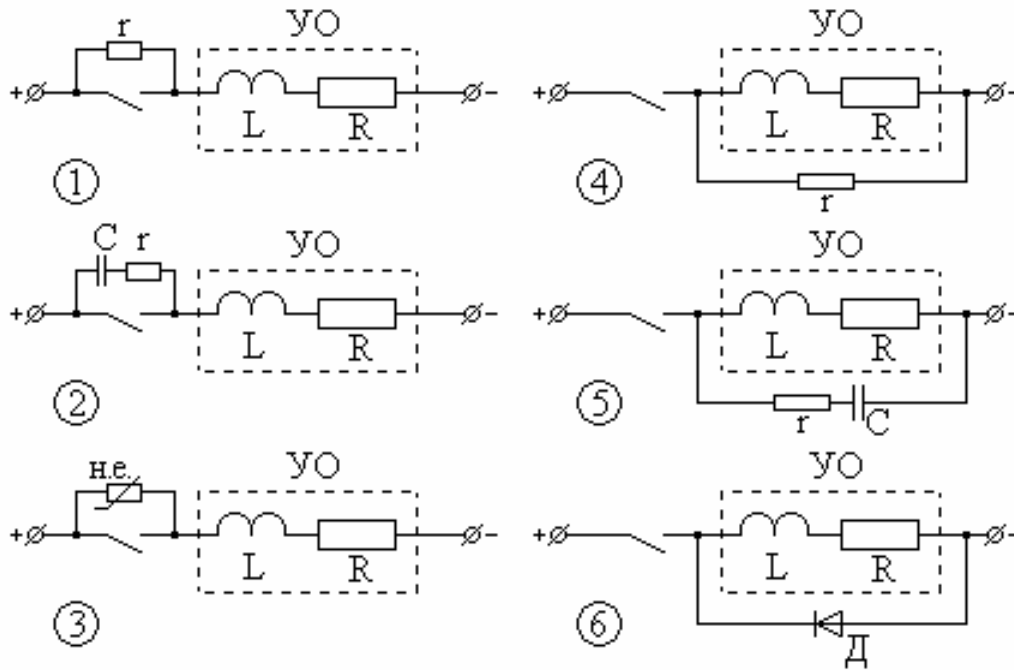


Рис.13.3.

Недостатком схемы 1 является наличие тока утечки при разомкнутых контактах. Этот ток должен быть меньше тока срабатывания УО. Схема 1 не эффективна и в настоящее время не применяется. Сказанное относится и к схеме 4.

В схема 2 и 5 пока заряжается емкость C обесточенные контакты успевают раздвинуться на значительное расстояние, при котором дуговой (искровой) процесс возникнуть не может. Схема 5 не эффективна с точки зрения нарушения переходного процесса включения УО.

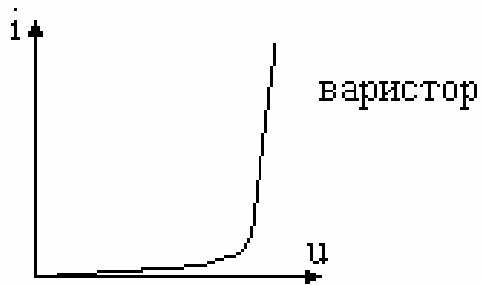


Рис.13.4.

можно рассматривать как источник тока и контакты разрывают практически безиндуктивную цепь.

В схема 3 и 6 широко используются нелинейные резистивные элементы (варисторы, стабилитроны и др.) и вентили. В схеме 3 фиксируется напряжение на разгибающихся контактах. В схеме 6 диод

14. ПОМЕХИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ИХ ПОДАВЛЕНИЯ

Коллекторные машины являются весьма интенсивными источниками электромагнитных помех, которые образуются вследствие быстрых изменений тока в секциях обмотки якоря при их коммутации. Кроме того, имеют место пульсации ЭДС и тока якоря, вызывающие появление в питающей сети постоянного тока переменной составляющей напряжения, вредно отражающейся на работе элементов автоматики, расположенных поблизости и питающихся от той же сети. Коллекторные пульсации сродни

пульсациям в выпрямителях и подавляются таким же образом, как и пульсации выпрямленного напряжения в источниках электропитания.

Гораздо более опасным с точки зрения образования электромагнитных помех является искрение, возникающее под щетками коллекторной машины. При этом создается непрерывный спектр высокочастотных колебаний, вредно отражающихся на работе близко расположенных электронных устройств СУ.

Для защиты сети и подключенных к ней устройств, для подавления электромагнитных помех в коллекторных машинах применяются:

- 1) экранирование;
- 2) симметрирование обмоток машин с последовательным и смешанным возбуждением;
- 3) установка блокировочных конденсаторов, шунтирующих проводов сети или шунтирующего фильтруемого провод на корпус машины;
- 4) использование сглаживающих электрических фильтров (рассматривались в разделе «сглаживающие фильтры выпрямителей»).

Экранирование является эффективным методом защиты от электромагнитного излучения. При наличии близко расположенных электронных узлов электрическая машина полностью экранируется. В качестве экрана используется заземленный корпус двигателя. Если в подшипниковом щите со стороны коллектора имеются окна, то их закрывают металлической сеткой, соединенной с заземленным корпусом двигателя. Если корпус двигателя или его передний подшипниковый щит (со стороны коллектора) изготовлены из пластмассы, то немагнитную часть двигателя закрывают сеткой и заземляют. Вал двигателя, выходящий наружу, имеющий большую поверхность и создающий значительные помехи, соединяется с корпусом посредством специальной замыкающей щетки.

В случае использования микродвигателей, располагаемых в окружении электронных узлов (магнитофоны, звуковоспроизводящая аппаратура и др.) применяются полные экраны, охватывающие весь двигатель.

Для машин с последовательным и смешанным возбуждением для снижения помех применяют симметрирование обмоток возбуждения, которое состоит в том, что последовательная обмотка делится на две равные части, включаемые с разных сторон якоря, подключая ее к щеткам разной полярности.

Высшие гармоники, вызываемые как пульсацией ЭДС якоря, так и искрением коллектора, могут замыкаться по различным контурам. Иногда они замыкаются по контуру, в который входит только один провод сети (один провод проходит по корпусу), и вызывают так называемые несимметричные помехи. Иногда в состав контура входят оба провода сети; помехи, вызываемые токами в таких контурах, называются несимметричными.

Следует заметить, что эквивалентное ВЧ-сопротивление сети сильно отличается от сопротивления тех приемников, которые к ней подключены. Таким сопротивлением, как правило, является емкость между проводами и емкость между отдельными деталями и корпусом. Определение эквивалентного ВЧ-сопротивления сети представляет довольно большие трудности и зачастую производится экспериментально на готовом объекте, подлежащем защите.

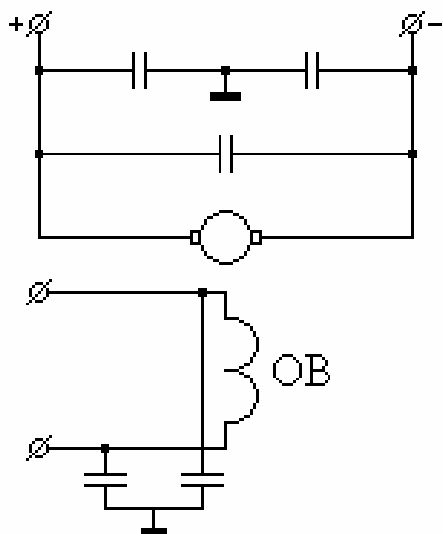


Рис.14.1.

случае используются так называемые проходные конденсаторы, токонесущие стержни которых включаются последовательно с обмоткой якоря, а металлические корпуса которых прикрепляются к статору машины и заземляются вместе с ним. Часто конденсаторы располагаются в коробке выводов двигателя.

К обмотке возбуждения также подключаются блокировочные конденсаторы.

Схема защиты от симметричных и несимметричных помех:

-симметричные помехи подавляются одним ВЧ-конденсатором;

-несимметричные помехи могут возникать как в одном, так и в другом проводе, поэтому для их подавления включаются два блокировочных конденсатора, шунтирующих каждый провод на корпус. В этом

ПРИЛОЖЕНИЯ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Программа работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой и записать ее основные данные
2. Подключить стабилизатор (параметрический или компенсационный)* к питающей сети постоянного тока ($U_H = 10[B]$) стабилизированное с возможностью регулирования в большую или меньшую стороны).
3. Устанавливая на входе испытуемого стабилизатора последовательно напряжения, равные $0,9U_{вх.н.}$, $U_{вх.н.}$ и $1,1U_{вх.н.}$, снять значения выходных напряжений и токов для указанных в схеме величин нагрузок: 480 Ом, 420 Ом, 360 Ом, 300 Ом, 240 Ом, 180 Ом, 120 Ом, 60 Ом. Опытные данные занести в таблицу.
4. В соответствии с полученными опытными данными:
 - а) построить внешние характеристики $U_{вых} = f(I_{вых.})$ для трех значений входного напряжения;
 - б) рассчитать усредненные внутренние (выходные) сопротивления стабилизатора $R_{вн.ср} = \Delta U_{вых} / \Delta I_{вых}$ и построить зависимость $R_{вн.ср} = f(U_{вх.})$;
 - в) построить зависимость $U_{вых} = f(I_{вх.})$ для минимальной и максимальной нагрузок;
 - г) рассчитать коэффициент сглаживания пульсации $q = \Delta U_{вх} / \Delta U_{вых}$ для минимальной и максимальной нагрузок стабилизатора;
 - д) рассчитать коэффициенты стабилизации

$$K_{СТ} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх.н.}} \cdot \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых.н.}} = q \cdot \frac{U_{вых.н.}}{U_{вх.н.}}$$
 для минимальной и максимальной нагрузок стабилизатора.

) * Примечание:

Испытание по п.п. 2-4 проводится отдельно для параметрического и компенсационного стабилизаторов.

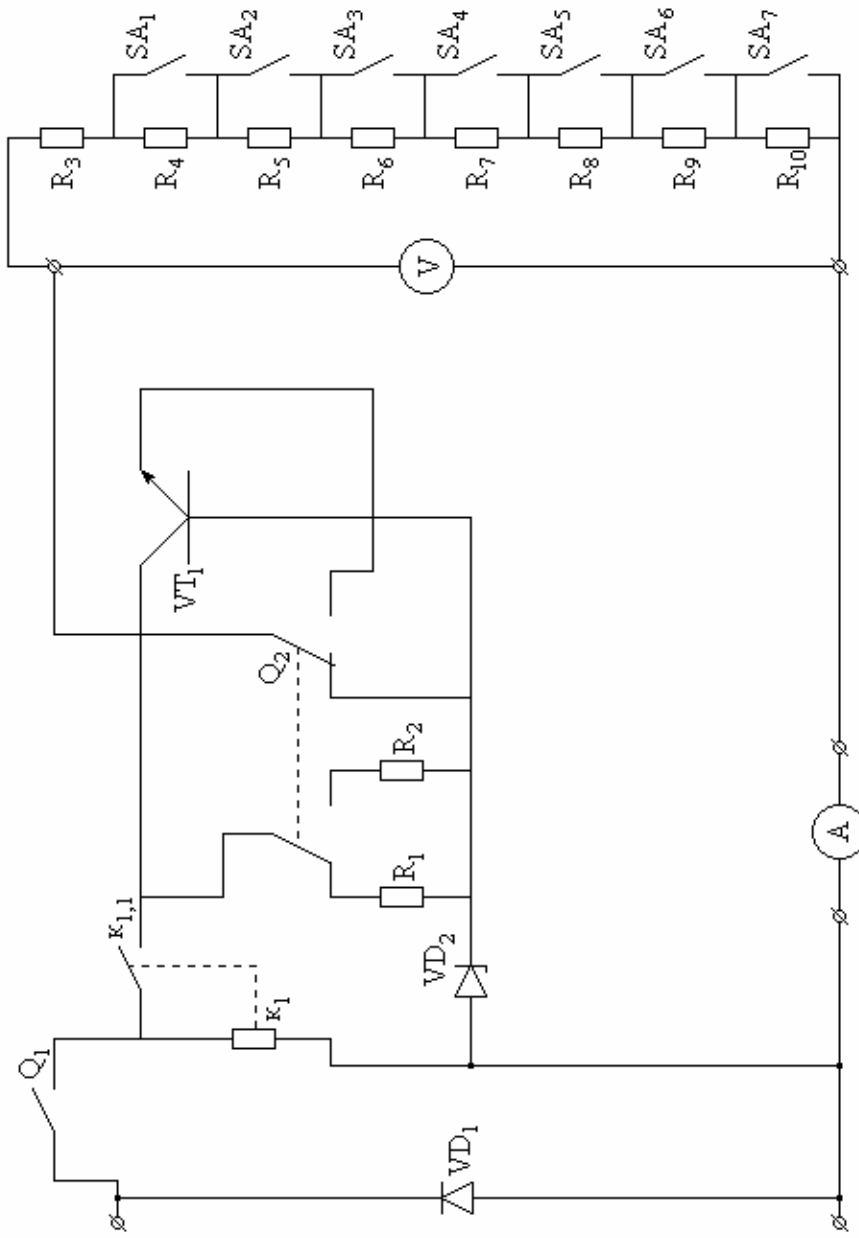


СХЕМА СТАБИЛИЗАТОРА

ОПЫТНЫЕ ДАННЫЕ**А. Параметрический стабилизатор.**

| | | | min нагр | | | | | | | | max нагр | |
|----------------------------------|-----|-----------|-------------|-----|------|------|------|------|------|------|-------------|--|
| | | R_H | 480 | 420 | 360 | 300 | 240 | 180 | 120 | 60 | Ом | |
| $U_{вх}$ $\pm U_{вх}$ =10% | 9В | $U_{вых}$ | 3,3 | 3,2 | 2,95 | 2,7 | 2,3 | 1,8 | 1,4 | 0,8 | В | |
| | | $I_{вых}$ | 8 | 8,5 | 9,25 | 10 | 10,5 | 11,5 | 12,5 | 13,5 | мА | |
| | 10В | $U_{вых}$ | 3,6 | 3,4 | 3,2 | 2,95 | 2,6 | 2,1 | 1,5 | 0,9 | В | |
| | | $I_{вых}$ | 8,5 | 9,5 | 10 | 11 | 11,5 | 12,5 | 13,5 | 15 | мА | |
| | 11В | $U_{вых}$ | 3,75 | 3,6 | 3,45 | 3,2 | 2,8 | 2,3 | 1,7 | 1,0 | В | |
| | | $I_{вых}$ | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | мА | |

Б. Компенсационный стабилизатор.

| | | | min нагр | | | | | | | | max нагр | |
|----------------------------------|-----|-----------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--|
| | | R_H | 480 | 420 | 360 | 300 | 240 | 180 | 120 | 60 | Ом | |
| $U_{вх}$ $\pm U_{вх}$ =10% | 9В | $U_{вых}$ | 4,71 | 4,7 | 4,69 | 4,68 | 4,66 | 4,62 | 4,60 | 4,5 | В | |
| | | $I_{вых}$ | 11 | 12 | 14 | 16 | 20 | 26 | 40 | 75 | мА | |
| | 10В | $U_{вых}$ | 4,77 | 4,76 | 4,75 | 4,72 | 4,71 | 4,70 | 4,65 | 4,52 | В | |
| | | $I_{вых}$ | 11 | 12 | 14 | 16 | 20 | 26 | 40 | 75 | мА | |
| | 11В | $U_{вых}$ | 4,81 | 4,80 | 4,79 | 4,78 | 4,77 | 4,75 | 4,7 | 4,6 | В | |
| | | $I_{вых}$ | 11 | 12 | 14 | 16 | 20 | 26 | 40 | 75 | мА | |

СПИСОК ВОПРОСОВ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ.

1. В чем заключается сущность электромагнитной и аппаратной совместимости устройств автоматики и телемеханики?
2. Объяснить принцип построения устройств и систем электропитания автоматической аппаратуры. Какие функции выполняет вторичный источник питания?
3. Какую роль выполняет система автоматики по отношению к объекту управления? Объяснить, как конструктивно оформляется система автоматики и какие каналы связи она имеет.
4. Что такое нестабильность первичной питающей сети и как она влияет на работу системы электроавтоматики?
5. Какие стадии обработки проходит информационный сигнал в системе электроавтоматики? Какие каналы связи могут иметь место в системе?
6. Какое влияние оказывает на образование помех наличие в питающей сети накопителей энергии?
7. Определить границу эксплуатационных возможностей системы электроавтоматики.
8. Дать характеристику методам подавления помех в цепях первичного и вторичного электропитания.
9. Показать и объяснить, в каких случаях наступает в системе электроавтоматики аномальный или аварийный режим.
10. Показать и объяснить, как устроен и работает параметрический стабилизатор напряжения.
11. Как обеспечивается совместимость системы электроавтоматики с внешней средой?
12. Как устроен и работает компенсационный стабилизатор напряжения? Какими преимуществами обладает импульсный режим его работы перед непрерывным?
13. Какое значение имеют стандартизация и унификация параметров и информационных сигналов устройств системы электроавтоматики?
14. Какими параметрами характеризуется стабилизатор напряжения?
15. Дать определение понятия помехи. Какие физические влияния могут испытывать элементы внутри системы и со стороны внешней среды?
16. Дать определение сглаживающего фильтра и объяснить его параметры.
17. Дать классификацию и характеристику внешних помех системы электроавтоматики.
18. Как устроен и работает индуктивный сглаживающий фильтр? Какими параметрами он характеризуется?
19. Дать классификацию и характеристику внешних помех системы электроавтоматики.
20. Как устроен и работает LC -сглаживающий фильтр? Какими параметрами он характеризуется?
21. Дать характеристику источников помех для системы электроавтоматики.
22. Как устроен и работает емкостной сглаживающий фильтр? Какими параметрами он характеризуется?
23. Объяснить и показать, какими путями помехи проникают в систему электроавтоматики.
24. Как устроен и работает RC -сглаживающий фильтр? Какими параметрами он характеризуется?

25. Дать характеристику конструкторским методам обеспечения электромагнитной и аппаратной совместимости.
26. Как устроены и работают сетевые фильтры?
27. Дать характеристику схемотехническим методам обеспечения электромагнитной и аппаратной совместимости.
28. Как обеспечивается эффективность сетевого фильтра и какие рекомендации для этого нужно выполнить?
29. Как производится выбор методов обеспечения электромагнитной и аппаратной совместимости?
30. Как устроен и работает помехоподавляющий конденсатор?
31. Какие рекомендации рациональной компоновки применяются для ослабления электрических и магнитных полей?
32. Как устроен и работает помехоподавляющий дроссель?
33. Пояснить назначение экранов. Как определяется вид экранирования? Как влияет экран на параметры экранирующего устройства?
34. Объяснить принципы возникновения помех в цепях электропитания цифровых интегральных микросхем.
35. Каким образом осуществляется электростатическое экранирование?
36. Какие рекомендации необходимо обеспечить для снижения помех в цепях электропитания цифровых устройств?
37. Каким образом осуществляется магнитостатическое экранирование?
38. Что такое система заземления и какие требования к ней нужно обеспечить для снижения уровня помех в сигнальных цепях?
39. Каким образом осуществляется экранирование переменного магнитного поля?
40. Дать характеристику способов заземления в аппаратуре автоматики.
41. В чем заключается сущность электромагнитного экранирования?
42. Дать характеристику помех, вызванных работой источников вторичного электропитания.
43. Пояснить принцип действия сплошного металлического экрана.
44. Объяснить особенности искрообразования контактного коммутирующего устройства.
45. Пояснить принцип действия многослойного экрана.
46. Как работают схемы искрогашения контактного коммутирующего устройства?
47. Дать определение теплового режима устройств электроавтоматики.
48. Какие методы подавления электромагнитных помех применяются в коллекторных микродвигателях постоянного тока?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Пертов Б.В.. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости.- М.: Радио и связь, 1989.
2. Русин Ю.С., Гликман И.Я., Горский А.Н. Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры.-М.: Радио и связь, 1991.
3. Мкрчтян Ж.А. Основы построения устройств электропитания ЭВМ.-М.: Радио и связь, 1990.
4. Славик И. Конструирование силовых полупроводниковых преобразователей.-М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Башмаков В.Г., Лазарев Е.М., Левин А.П. Расчет и конструирование электромагнитных экранов РЭА.- М.: МИРЭА, 1988.
6. Барнс Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами. - М.: МИР, 1990.
7. Болдырев В.Г., Бочаров В.В., Булеков В.П., Резников С.Б.Электротехническая совместимость электрооборудования автономных систем.- М.: Энергоатомиздат, 1995.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ | 3 |
| 1. ЗАДАЧИ ЭМС. ХАРАКТЕРИСТИКА ПОМЕХ СУ | 4 |
| 2. МЕТОДЫ РЕШЕНИЕ ЭМС УСТРОЙСТВ СУ | 6 |
| 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХОНЕСУЩИЕ ПОЛЯ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА | 6 |
| 3.1. Электростатическое поле | 6 |
| 3.2. Магнитостатическое поле | 7 |
| 3.3. Электромагнитное поле. | 7 |
| 3.4. Ближняя зона электромагнитного поля | 7 |
| 3.5. Электрическое поле | 9 |
| 3.6. Магнитное поле | 9 |
| 3.7. Дальняя зона электромагнитного поля | 10 |
| 4. ОСЛАБЛЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ МЕТОДОМ РАЦИОНАЛЬНОЙ КОМПОНОВКИ АППАРАТУРЫ | 10 |
| 5. ЭКРАНИРОВАНИЕ | 11 |
| 5.1. Назначение экранов | 11 |
| 5.2. Влияние экрана на параметры элементов СУ | 11 |
| 5.3. Виды экранирования | 12 |
| 5.4. Электростатическое экранирование | 12 |
| 5.5. Электрическое (квазистатическое) экранирование | 13 |
| 5.6. Магнитостатическое экранирование..... | 14 |
| 5.7. Магнитное экранирование (электромагнитное экранирование переменного магнитного поля)..... | 14 |
| 5.8. Электромагнитное экранирование..... | 15 |
| 5.9. ЭМ-экран как объемный резонатор | 16 |
| 6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКРАНОВ | 17 |
| 6.1. Коэффициент экранирования | 17 |
| 6.2. Эффективность экранирования | 18 |
| 6.3.Экранное затухание | 18 |
| 7. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭКРАНОВ | 18 |
| 7.1. Металлы..... | 18 |
| 7.2. Глубина проникновения ЭМ-поля в металл..... | 18 |
| 7.3. Пример выбора экрана | 19 |
| 7.4. Экранирующие сетки | 20 |
| 7.5. Примеры расчета сеточного экрана | 21 |
| 7.6. Фольговые материалы..... | 21 |
| 7.7. Пример расчета фольгового экрана | 22 |
| 7.8. Скорость распространения и длина волны в металле | 22 |
| 7.9. Токопроводящие краски | 23 |
| 7.10. Металлизация поверхностей..... | 23 |
| 7.11. Специальные ткани..... | 24 |
| 7.12. Электропроводящий клей | 24 |
| 8. СПЛОШНЫЕ ЭКРАНЫ | 24 |
| 8.1. Физические принципы экранирования | 24 |
| 8.2. Экранирование за счет отражения энергии..... | 24 |
| 8.3. Поглощение энергии в толще экрана..... | 26 |
| 8.4. Переотражение от второй (внутренней) поверхности экрана | 26 |
| 8.5. Общая эффективность сплошного экрана..... | 27 |
| 8.6. Пример расчета сплошного экрана | 27 |
| 8.7. Многослойные электромагнитные экраны..... | 28 |
| 8.8. Принцип работы многослойного экрана | 29 |
| 8.9. Некоторые рекомендации по выполнению много-, трехслойных экранов | 29 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 8.10. Перфорированные экраны (экраны с отверстиями) | 29 |
| 9. КОНДУКТИВНЫЕ ПОМЕХИ ИХ ПОДАВЛЕНИЕ. ПОМЕХИ В ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ | 30 |
| 9.1. Принципы построения устройств и систем электропитания..... | 30 |
| 9.2. Общая характеристика помех в цепях первичного и вторичного электропитания..... | 31 |
| 9.3. Стабилизация напряжения (тока)..... | 32 |
| 9.4. Сглаживающие фильтры..... | 35 |
| 9.5. Многозвенные фильтры | 39 |
| 9.6. Развязывающие фильтры | 39 |
| 10. ФИЛЬТРАЦИЯ СЕТЕВЫХ ПОМЕХ | 39 |
| 10.1. Определение эффективности фильтрации | 39 |
| 10.2. Помехоподавляющие элементы и фильтры | 42 |
| 10.3. Конденсаторы..... | 42 |
| 10.4. Индуктивные элементы - дроссели | 43 |
| 10.5. Микроминиатюрные фильтры..... | 44 |
| 10.6. Фильтрация цепей электропитания цифровых устройств | 45 |
| 10.7. Рекомендации по конструированию | 46 |
| 11. ЗАЗЕМЛЕНИЕ | 46 |
| 11.1 Способы заземления | 47 |
| 12. ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ ОТ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ (ИВЭП) | 47 |
| 12.1. Мостовая схема выпрямления | 48 |
| 12.2. Импульсный стабилизатор напряжения (ИСН)..... | 48 |
| 13. ИСКРОГАШЕНИЕ КОНТАКТНЫХ КОММУТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ | 49 |
| 13.1. Схемы искрогашения | 50 |
| 14. ПОМЕХИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ИХ ПОДАВЛЕНИЯ | 51 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 54 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ..... | 54 |
| СПИСОК ВОПРОСОВ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ..... | 57 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 59 |