

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиоэлектронных средств

В. Е. Галузо, В. В. Мельничук, А. И. Пинаев

ТЕОРИЯ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ

Методическое пособие
для студентов специальности I-38 02 03
«Техническое обеспечение безопасности»
заочной формы обучения

Минск 2007

УДК 621.396.6(075.8)

ББК 32.844-02 я 73

Г 16

Галузо, В. Е.

Г 16 Теория систем безопасности : метод. пособие для студ. спец. I-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности» заоч. формы обуч. / В. Е. Галузо, В. В. Мельничук, А. И. Пинаев.– Минск : БГУИР, 2007. – 18 с.

ISBN 978-985-488-250-5

В методическом пособии изложены основные сведения об угрозах безопасности информации, причинах образования технических каналов утечки информации, экранировании электрических и магнитных полей, фильтрации электрических сигналов.

Рассмотрены методики расчета и оценки влияния паразитных связей, конструктивного расчета экранов и оценки их применения, оценки эффективности фильтрации.

УДК 621.396.6(075.8)

ББК 32.844-02 я 73

ISBN 978-985-488-250-5

© Галузо В. Е., Мельничук В. В.,
Пинаев А. И., 2007

© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2007

Введение

Под безопасностью информации принято понимать состояние защищенности информации, носителей и средств, обеспечивающих ее получение, обработку, хранение, передачу и использование, от различного вида угроз, к числу которых можно отнести следующие:

- недостаточная квалификация (некомпетентность) персонала, использующего технические средства обработки информации (ТСОИ);
- несовершенство программного обеспечения средств и систем информатизации и АСУ;
- несовершенство технических решений, реализованных при проектировании ТСОИ и монтаже систем информатизации и АСУ;
- естественное старение технических средств и систем в процессе эксплуатации, приводящее к изменению их свойств и характеристик;
- экстремальные нагрузки, испытываемые ТСОИ в процессе эксплуатации;
- неисправности ТСОИ и вспомогательного оборудования;
- действия спецслужб, конкурентов и злоумышленников.

Угрозы безопасности информации реализуются через опасные воздействия со стороны перечисленных выше источников угроз. При этом в зависимости от цели воздействия различают несколько основных видов угроз.

Угрозы безопасности информации

1. Уничтожение. При уничтожении (например при хищении) информационных объектов или их элементов они утрачиваются или разрушаются (например, в результате стихийного бедствия или вооруженного конфликта, неквалифицированных действий пользователей, преднамеренного введения в программное обеспечение определенного типа вирусов и т.п.).

2. Утечка. При утечке информационные объекты не утрачиваются, однако становятся доступными посторонним лицам (например, случайное или преднамеренное подслушивание конфиденциального разговора, перехват излучений ТСОИ техническими средствами разведки, незаконное копирование информации в компьютерных системах и т.п.).

3. Искажение. Результатом искажения является преднамеренное или непреднамеренное изменение информационного объекта (например изменение информации в процессе обработки и передачи).

4. Блокирование. В результате блокирования информационный объект не утрачивается, но становится недоступным для его собственника, владельца или пользователя (потребителя) в результате физического или логического блокирования этого элемента.

Причины образования технических каналов утечки информации

Работа систем информатизации и связи, а также ведение переговоров по закрытым вопросам сопровождаются возникновением электромагнитных и акустических полей, распространяющихся в различных средах (в воздухе, в токопроводящих конструкциях и т.д.). Это создает определенные предпосылки для образования технических каналов утечки информации при работе различных технических средств и систем. Необходимым условием образования таких каналов является наличие опасного сигнала (т.е. сигнала, содержащего закрытую информацию) в тех полях, которые порождаются работой технических средств. Обнаружение, прием и анализ носителей опасного сигнала техническими средствами разведки позволяют несанкционированно получить закрытую информацию, обрабатываемую техническими средствами систем информатизации и связи.

Возможность образования технических каналов утечки информации в системах и средствах информатизации и связи обусловлена следующими причинами:

- наличием информационных радио-, оптических и электрических сигналов в различных технических средствах передачи и обработки информации;
- наличием нежелательных электромагнитных излучений систем и средств информатизации и связи;
- образованием наводок электромагнитных излучений на различные токоведущие цепи и конструкции;
- применением специальных воздействий на элементы технических средств;

- возникновением и распространением в окружающей среде акустических колебаний при обсуждении вопросов, содержащих секретные сведения;

- наличием случайных электроакустических преобразователей в отдельных элементах технических средств.

Нежелательные излучения технических средств обработки информации

Технические средства, не являющиеся радиопередающими устройствами, могут быть источниками нежелательных электромагнитных излучений. В цепях различных радиоэлектронных устройств протекают переменные электрические токи, порождающие электромагнитные поля, излучаемые в окружающее пространство. Параметры электромагнитных полей, создаваемых токоведущими элементами, определяются конструктивными особенностями систем и средств информатизации и связи, а также условиями их размещения и эксплуатации. Такие электромагнитные излучения, например, излучения, возникающие при работе ПЭВМ (излучения дисплея, усилителей записи и считывания, кабельных соединений и т.д.), являются потенциальными носителями опасного сигнала.

Технические средства различного назначения могут иметь в своем составе устройства, которые для выполнения своих основных функций генерируют электромагнитные колебания (генераторы тактовых частот, генераторы развертки электронно-лучевых трубок). В отдельных технических средствах, например в усилительных каскадах, могут возникать паразитные излучения, обусловленные их самовозбуждением за счет паразитных емкостных положительных обратных связей, по которым усиленное напряжение может поступать из точек с большим уровнем напряжения в точки с меньшим уровнем напряжения.

В процессе функционирования ТСОИ элементы генераторов, усилителей и других излучающих электромагнитные поля устройств могут оказаться в зоне действия электромагнитных полей опасных сигналов. Воздействие электромагнитного поля опасного сигнала на рассматриваемые устройства может привести к паразитной модуляции опасными сигналами нежелательных излучений технических средств. Следствием этого является появление в окружающем пространстве нежелательных излучений, модулированных опасными сигналами, т.е. создаются предпосылки для утечки информации, обрабатываемой техническими средствами.

Нежелательные электромагнитные связи

Между двумя электрическими цепями (радиоэлектронными средствами), находящимися на некотором расстоянии друг от друга, могут возникать нежелательные электромагнитные связи. Наличие таких связей приводит к тому, что сигналы, циркулирующие в одной цепи (в цепи источника наводки), появляются в другой электрической цепи (в цепи приемника наводки). Основными путями возникновения нежелательных

связей являются:

- ближнее электрическое поле;
- ближнее магнитное поле;
- электромагнитное поле излучения.

Связь через ближнее электрическое и магнитное поля. Приемлемые для практики результаты получаются при рассмотрении нежелательных связей между цепями в предположении полной взаимной независимости ближнего электрического и магнитного полей. В этом случае связь между источником и приемником наводки через ближнее электрическое поле рассматривается как емкостная связь через малую паразитную емкость без учета появляющегося при этом магнитного поля. Связь между источником и приемником наводки через ближнее магнитное поле рассматривается как индуктивная связь через малую паразитную взаимоиндуктивность без учета появляющегося при этом электрического поля.

Емкостная и индуктивная паразитные связи проявляются при отсутствии непосредственного электрического соединения между источником и приемником наводки.

Связь через электромагнитное поле. Электромагнитные излучения, сопутствующие работе технических средств систем информатизации и связи, распространяются в окружающее пространство. В зону действия этих излучений попадают токопроводящие элементы и конструкции, обладающие свойствами антенн. В таких случайных антеннах электромагнитное поле наводит ЭДС и ток опасного сигнала. Роль случайных антенн могут играть проводники технических средств, токоведущие элементы систем заземления, металлические корпуса аппаратуры, посторонние протяженные проводники (например, провода открытой телефонной или громкоговорящей связи, сигнализации). Токи опасных сигналов, наводимые электромагнитными полями, сопутствующими работе технических средств, распространяясь по токоведущим коммуникациям, создают реальные предпосылки утечки информации.

Экранирование электрических полей

Функциональные узлы и элементы технических средств обработки информации, в которых имеют место большие напряжения и протекают малые токи, создают в ближней зоне электромагнитные поля с преобладанием электрической составляющей.

Связь через ближнее электрическое поле между источником и приемником наводки рассматривается как связь через малую паразитную емкость $C_{св}$.

Амплитуда напряжения наводки в цепи приемника равна

$$U_{\Pi} = \frac{E_{\Pi} Z_{\Pi}}{\frac{1}{\omega C_{CB}} + Z_{\Pi}}, \quad (1)$$

где E_{Π} – амплитуда ЭДС в цепи источника наводки;

Z_{Π} – сопротивление приемника наводки относительно корпуса, в общем случае состоящее из параллельно включенных входного сопротивления Z_{BX} и емкости C_{Π} относительно корпуса;

$$X_{CB} = \frac{1}{\omega C_{CB}} \text{ – емкостное сопротивление связи,}$$

ω – частота напряжения источника наводки.

Для широко распространенного в практике конструирования ТСОИ случая параллельных проводников шириной b , длиной l , находящихся на расстоянии a друг от друга, емкость связи определяется по формуле

$$C_{CB} = \epsilon \epsilon_0 l [1 + 0,51 \lg(b/a)]. \quad (2)$$

Для ослабления влияния электрической связи в аппаратуре следует:

- 1) максимально разносить цепи приемника и источника наводки, что снижает C_{CB} ;
- 2) компоновать цепи приемника и источника наводки так, чтобы емкость связи C_{CB} между ними была минимальной (например, располагать провода линий источника и приемника наводки под углом, близким к 90°);
- 3) уменьшать размеры цепей источника и приемника наводки.

Если возможность применения указанных мер при проектировании ТСОИ и систем информатизации ограничена, то для обеспечения требуемого ослабления воздействия источника наводки необходимо использовать электрическое экранирование.

Для осуществления электрического экранирования используется явление электростатической индукции. Если источник электростатического поля защищен металлическим экраном, то в результате индукции на внутренней и внешней поверхностях экрана произойдет разделение электрических зарядов.

При заземлении экрана заряд, индуцированный на внешней поверхности экрана, нейтрализуется и поле вне экрана становится равным нулю.

Эффективность экранирования электрического поля определяется по формуле

$$A = 20 \lg \frac{U_{\Pi}}{U_{\Pi 3}}, \quad (3)$$

где U_{Π} , $U_{\Pi 3}$ – напряжения, наводимые в цепи приемника наводки при отсутствии и наличии заземленного экрана соответственно.

Экранирование магнитных полей

Функциональные узлы и элементы ТСОИ и систем информатизации, в которых протекают большие токи и имеют место малые перепады напряжения, создают в ближней зоне электромагнитные поля с преобладанием магнитной составляющей.

Переменное магнитное поле возбуждает в находящихся в этом поле проводниках переменные ЭДС. Если такой проводник является частью замкнутой электрической цепи, то под влиянием возникающей в нем ЭДС в цепи начинает протекать переменный электрический ток, магнитное поле которого будет направлено против возбуждающего первоначального поля, стремясь скомпенсировать его.

Магнитная связь двух электрических цепей определяется их взаимной индуктивностью M , зависящей от индуктивностей L_{II} источника и L_{II} приемника наводки.

Взаимная индуктивность M между цепями источника наводки и приемника определяется выражением

$$M = K_{CB} \sqrt{L_{II} L_{II}}, \quad (4)$$

где K_{CB} – коэффициент связи.

Наведенное на сопротивлении нагрузки приемника наводки напряжение равно:

$$U_{II} = \frac{w M I_{II}}{w L_{II} + Z_{II} + Z_{НП}}, \quad (5)$$

где Z_{II} – внутреннее сопротивление приемника наводки,

$Z_{НП}$ – сопротивление нагрузки приемника наводки,

I_{II} – амплитуда тока в цепи источника наводки.

Величина взаимной индуктивности цепей источника и приемника наводки прямо пропорциональна магнитной проницаемости среды и длине проводника приемника и зависит от взаимного расположения цепей источника и приемника наводки.

Для требуемого ослабления влияния магнитной связи в аппаратуре прибегают к экранированию магнитных полей.

Используются следующие методы экранирования магнитных полей:

1. Магнитостатическое экранирование, основанное на шунтировании магнитного поля ферромагнитными материалами.

2. Вытеснение (компенсация) магнитного поля источника наводки полем вихревых токов в экране.

Эффективность экранирования, основанного на шунтировании магнитного поля, определяется выражением:

$$A = 20 \lg \left(\frac{m S_1 + S_2}{S} \right), \quad (6)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость материала экрана;

S_1 – площадь поперечного сечения экрана;

S_2 – площадь поперечного сечения экранируемого пространства;

$$S = S_1 + S_2.$$

Если экран выполнен из немагнитного материала с относительной магнитной проницаемостью $\mu = 1$ (медь, латунь, алюминий), то он не оказывает на магнитное поле источника наводки никакого влияния и эффективность экранирования будет равна нулю.

Если же экран изготовлен из ферромагнитного материала (пермаллой, сталь) с большим значением относительной магнитной проницаемости μ , то магнитный поток замыкается в основном на стенки экрана, имеющего меньшее магнитное сопротивление по сравнению с магнитным сопротивлением воздушного пространства, занятого экраном. Полагая $S_1 \ll S_2$, получим

$$A \approx 20 \lg \left(\frac{\mu S_1 + S_2}{S_2} \right) = 20 \lg \left(1 + \frac{\mu S_1}{S_2} \right). \quad (7)$$

Магнитоэкранирование используется при необходимости подавить наводки на низких частотах от 0 до 3–10 кГц.

Основные требования, предъявляемые к магнитоэкранирующим экранам, можно сформулировать следующим образом:

1. Магнитная проницаемость μ материала экрана должна быть высокой.
2. Увеличение толщины стенок экрана приводит к повышению эффективности экранирования.
3. Заземление экрана не влияет на эффективность магнитоэкранирования.

Экранирование методом вытеснения (компенсации) магнитного поля полем вихревых токов в экране основано на использовании явления электромагнитной индукции. Переменное магнитное поле, пронизывая экран, индуцирует в нем ЭДС, которая, в свою очередь, вызывает вихревые токи в экране. Эти токи создают вторичное магнитное поле, направленное в защищаемой экраном области навстречу воздействию на экран полю.

Результирующее магнитное поле внутри экрана оказывается ослабленным, а за пределами экрана усиленным. Таким образом, происходит вытеснение поля из защищаемой области во внешнюю область пространства, а следовательно, и экранирование рабочего объема экрана от внешнего магнитного поля.

С увеличением частоты магнитного поля распределение вихревых токов по сечению материала экрана становится все более неравномерным, т.е. проявляется поверхностный эффект, при котором происходит сосредоточение вихревых токов в поверхностных слоях экрана и ослабление переменного магнитного поля при проникновении его в толщу экрана. Чем выше частота магнитного поля, тем меньше глубина проникновения. Следовательно, экранирование магнитного поля обусловлено, во-первых, компенсацией этого поля магнитным полем вихревых токов, и во-вторых, ослаблением магнитного

поля при проникновении в толщу стенок экрана. До тех пор, пока толщина стенок экрана меньше глубины проникновения (для низких частот), основную роль играет компенсация поля. С повышением частоты, когда толщина стенок экрана становится больше глубины проникновения, решающим может оказаться ослабление поля при проникновении его в толщу стенок экрана. Так как с ростом частоты магнитного поля глубина проникновения уменьшается, то уменьшается и магнитопроводность экрана, которая зависит от габаритных размеров и магнитной проницаемости материала экрана. В этих условиях из-за существенного уменьшения эквивалентной толщины стенок экрана явление шунтирования магнитного поля не проявляется. Поэтому для обеспечения экранирования на высоких частотах в качестве материала экранов часто применяют немагнитные материалы.

Эффективность экранирования высокочастотного магнитного поля определяется потерями за счет поглощения и за счет отражения или компенсации полем вихревых токов в экране и может быть найдена с помощью выражения

$$A = 8,68 \frac{d}{\delta} + 20 \lg \left[\frac{r}{m \cdot s \cdot m \cdot \sqrt{2}} \right], \quad (8)$$

где r – радиус экрана;

d – толщина стенки экрана;

δ – глубина проникновения;

σ – удельная проводимость материала экрана.

Введение в формулу (8) множителя m позволяет использовать ее также для расчета эффективности плоских и сферических экранов. Для этого при расчете эффективности плоского экрана следует заменить радиус экрана половиной расстояния между стенками экрана и положить $m = 1$, для цилиндрического экрана принять $m = 2$.

Глубина проникновения для различных металлов в области высоких частот достаточно мала. Следовательно, экран из любого металла сравнительно небольшой толщины действует достаточно эффективно.

Таким образом, основные требования, которые предъявляются к экранам, действующим по принципу вытеснения магнитного поля полем вихревых токов в экране, заключаются в следующем:

1. Толщина экрана должна выбираться намного больше, чем глубина проникновения. Этому условию могут удовлетворять как немагнитные, так и магнитные материалы. Однако применение последних возможно в случае, если вносимыми ими в экранируемые узлы аппаратуры потерями можно пренебречь.

2. Снижение электрического сопротивления материала экрана вихревым токам повышает его эффективность. Поэтому чаще всего высокочастотные экраны изготавливают из алюминия, меди и латуни.

3. Стыки, разрезы и швы должны располагаться в направлении вихревых токов в экране.

4. Заземление экрана, работающего за счет образования вихревых токов, не влияет на эффективность магнитного экранирования.

Фильтры. В цепях фильтрации в технических средствах систем информатизации и связи широко используют различные фильтры (нижних и верхних частот, полосовые, заграждающие и т.д.). Основное назначение фильтра – пропускать без значительного ослабления сигналы с частотами, лежащими в рабочей полосе частот, и подавлять (ослаблять) сигналы с частотами, лежащими за пределами этой полосы.

Количественно эффективность ослабления (фильтрации) нежелательных (в том числе и опасных) сигналов защитным фильтром оценивается в соответствии с выражением

$$A_{[дБ]} = 20 \lg \left(\frac{U_1}{U_2} \right), \quad (9)$$

где U_1, U_2 – напряжение опасного сигнала на входе и выходе фильтра.

Основные требования, предъявляемые к защитным фильтрам, заключаются в следующем:

1. Величины рабочих напряжения и тока фильтра должны соответствовать величинам напряжения и тока цепи, в которой фильтр установлен.

2. Эффективность ослабления нежелательных сигналов должна быть не меньше заданной в защищаемом диапазоне частот.

3. Ослабление полезного сигнала в полосе прозрачности фильтра должно быть незначительным, не влияющим на качество функционирования системы.

Фильтры нижних частот. Фильтр, полоса прозрачности которого простирается от $\omega = 0$ (постоянный ток) до некоторой граничной частоты ω_0 , называется фильтром нижних частот (ФНЧ). Для частот $0 < \omega < \omega_{зр}$ фильтр совершенно прозрачен (коэффициент передачи $K=1$), а частоты $\omega > \omega_{зр}$ абсолютно не пропускает ($K = 0$). Последовательная ветвь ФНЧ должна иметь ничтожное сопротивление для постоянного тока и нижних частот. Вместе с тем для того, чтобы высшие частоты задерживались фильтром, последовательное сопротивление должно расти с частотой ω . Этим требованиям удовлетворяет индуктивность L .

Параллельная ветвь ФНЧ, наоборот, должна иметь малую проводимость для низких частот, с тем чтобы токи этих частот не шунтировались параллельным плечом. Для высоких частот параллельная ветвь должна иметь большую проводимость, тогда колебания этих частот будут ею шунтироваться и их ток на выходе фильтра будет ослабляться. Таким требованиям отвечает емкость C .

Фильтры верхних частот. Фильтр, у которого полоса прозрачности занимает все частоты выше некоторой определенной граничной частоты $\omega_{зр}$, называется фильтром верхних частот (ФВЧ).

В таком фильтре постоянный ток и все колебания с частотами ниже определенной граничной частоты ω должны задерживаться, а колебания частот

$\omega > \omega_{зр}$ – беспрепятственно пропускаться. Если в качестве последовательного плеча фильтра включить емкость, то она будет представлять большое

сопротивление для низких частот и способствовать их задержанию. Включение в параллельную ветвь индуктивности приведет к увеличению проводимости ее на нижних частотах и уменьшению проводимости на высоких частотах. Это также будет соответствовать требованиям, предъявляемым к ФВЧ.

Полосовые и заграждающие (режекторные) фильтры. Полосовые фильтры характеризуются тем, что обе частоты $\omega_{зр1}$ и $\omega_{зр2}$, ограничивающие полосу прозрачности, конечны и ни одна из них не равна нулю.

В ряде случаев ставится задача задержания определенной полосы частот и в то же время пропускания всех остальных частот. Такая задача решается заграждающим фильтром.

Непосредственная емкостная паразитная связь (ПС)

Эта ПС осуществляется через ближнее электрическое поле. Если источник наводки (ИН) имеет напряжение $E_{ин}$ относительно корпуса, то на приемнике наводки (ПН), связанном с источником наводки малой паразитной емкостью $C_{св}$, возникает напряжение $U_{пн}$, величина которого определяется соотношением между емкостным сопротивлением $x_{св}=1/\omega C_{св}$ и входным сопротивлением ПН $Z_{пн}$. Комбинация из этих двух сопротивлений является простейшим делителем, к которому сводится любая емкостная ПС. Так как всегда $x_{св} \gg Z_{пн}$, то напряжение $U_{пн} = E_{ин} Z_{пн} / x_{св}$ и коэффициент паразитной емкостной связи будет

$$\beta_e = U_{пн} / E_{ин} = Z_{пн} / x_{св} = \omega C_{св} Z_{пн}. \quad (10)$$

Отсюда следует, что влияние емкостной ПС тем больше, чем выше рабочая частота, если $Z_{пн}$ не падает с повышением частоты.

Пример. Если $C_{св} = 1$ пФ и $Z_{пн} = 1$ кОм, то на высшей частоте УНЧ 5 кГц согласно (10):

$$\beta_e = 2\pi \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-12} \cdot 10^3 = 3,14 \cdot 10^{-5} = 0,00314 \%$$

В видеоусилителе, высшая частота которого достигает 5 МГц, этот коэффициент возрастает в 1000 раз, т. е. $\beta_e = 3,14 \%$.

Часто ПН имеет чисто емкостное входное сопротивление $Z_{пн} = 1/\omega C_{пн}$, тогда коэффициент ПС

$$\beta_e = C_{св} / C_{пн} \quad (11)$$

не зависит от частоты.

Непосредственная паразитная индуктивная связь

Эта ПС возникает через ближнее магнитное поле. В цепи источника наводки **А** протекает переменный ток $I_A = E_{ин} / Z_A$, где Z_A – полное сопротивление цепи **А**. Эта цепь индуктивно связана с цепью приемника наводки **В** паразитной взаимной индуктивностью $M_{пар}$. Ток I_A возбуждает в цепи **В** электродвижущую силу

$$E'_{ин} = I_A \omega M_{нар} = E_{ин} \omega M_{нар} / Z_A,$$

под действием которой в цепи **В** протекает ток $I_B = E'_{ин} / Z_B = E_{ин} \omega M_{нар} / Z_A Z_B$, где Z_B – полное сопротивление цепи **В**, частью которого является входное сопротивление приемника наводки $Z_{ин}$. В результате на входе ПН получается напряжение $U_{ин} = I_B Z_{ин} = E_{ин} \omega M_{нар} Z_{ин} / Z_A Z_B$, откуда коэффициент индуктивной ПС

$$\beta_m = U_{ин} / E_{ин} = \omega M_{нар} Z_{ин} / Z_A Z_B \quad (12)$$

Таким образом, индуктивная ПС проявляется тем сильнее, чем выше частота, больше паразитная взаимоиנדуктивность и выше входное сопротивление ПН и чем меньше полные сопротивления связывающихся цепей.

Пример. Определим коэффициент индуктивной ПС между выходным и входным трансформаторами УНЧ на высшей частоте $\nu_B = 5$ кГц, если известно, что входное сопротивление первого каскада $Z_{ин} = 1$ кОм, индуктивность рассеивания выходного трансформатора $L_{s\text{ вых}} = 10$ мГн, входного трансформатора – $L_{s\text{ вх}} = 40$ мГн, полное сопротивление выходной цепи $Z_A = 10$ Ом, входной – $Z_B = 2$ кОм. Для расчета $M_{нар}$ нужно знать величину коэффициента связи k_C между трансформаторами, которая зависит от их взаимного расположения и может быть определена только измерением на макете.

Предположим, что измерение дало $k_C = 0,1$ %. Тогда $M_{нар} = k_C \sqrt{L_{s\text{ вых}} L_{s\text{ вх}}} = 10^{-3} \sqrt{40 \cdot 10} = 20$ мкГн, откуда согласно (12) коэффициент индуктивной ПС $\beta_m = \frac{2\pi \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3 \cdot 10} = 3,14$ %. Эта величина означает, что при коэффициенте усиления по напряжению $K_{ус} > 32$ УНЧ может самовозбудиться. Во избежание этого нужно или изменить расположение трансформаторов так, чтобы уменьшить k_C , или изменить конструкцию входного трансформатора для уменьшения $L_{s\text{ вх}}$.

вых •

Экранирование постоянного и медленно изменяющегося магнитного полей

Экран таких полей используется редко, только при необходимости подавить наводку на частотах 0...1 кГц. Эффективность экранирования можно приближенно определить по уравнению

$$\mathcal{E} = 1 + \mu \delta_{экр} / D, \quad (13)$$

где $\delta_{экр}$ – толщина стенки экрана;

μ – относительная магнитная проницаемость материала экрана (табл. 1);

D – диаметр эквивалентного сферического экрана, равный длине стенки кубического экрана.

Электрофизические параметры некоторых металлов

	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь		Пермаллой
Удельное сопротивление ρ , Ом·мм ² /м	0,0175	0,06	0,03	0,1		0,65
Удельная проводимость σ , сим·см ³	$57 \cdot 10^4$	$16,6 \cdot 10^4$	$33 \cdot 10^4$	$10 \cdot 10^4$		$1,54 \cdot 10^4$
Относительная магнитная проницаемость μ	1	1	1	50	100	5000

Пример. Определим эффективность подавления наводки на частотах 0...1 кГц экраном кубической формы с длиной ребра $D = 100$ мм; материал – сталь толщиной $\delta_{\text{экр}} = 0,8$ мм, $\mu = 100$. Подставляя в (13), получаем: $\mathcal{E} = 1 + 100 \cdot 0,8 / 100 = 1,8$ или $A = 20 \lg 1,8 = 5,1$ дБ.

Увеличением толщины стального экрана нельзя добиться значительного повышения его эффективности. Так, при $\delta_{\text{экр}} = 2$ мм (что технологически крайне неудобно) $\mathcal{E} = 3$ и $A = 9,6$ дБ, т. е. значение \mathcal{E} возрастает всего на 4,5 дБ. Если же взять пермаллой ($\mu = 5000$) той же толщины (0,8 мм), то $\mathcal{E} = 41$, $A = 32$ дБ.

Экранирование высокочастотного магнитного поля

Вихревые токи, наведенные полем ИН в теле экрана, вытесняют внешнее поле из пространства, занятого экраном. Токи в экранирующем цилиндре распределяются неравномерно по его сечению, что обусловлено поверхностным эффектом (скин-эффектом).

Из-за поверхностного эффекта плотность тока и напряженность магнитного поля падают по экспоненциальному закону по мере углубления в металл:

$$\frac{\text{Плотность тока на глубине } x}{\text{Плотность тока на поверхности}} = e^{-x/\delta},$$

где δ – показатель уменьшения поля и тока, называемый эквивалентной глубиной проникновения (табл. 2). На глубине $x = \delta$ плотность тока и напряженность магнитного поля падает в e раз, т. е. до величины $1/2,72 = 0,37$ от плотности и напряженности на поверхности.

Экранирующее действие вихревых токов определяется двумя факторами: обратным полем, создаваемым токами, протекающими в экране, и поверхностным эффектом в материале экрана. На высоких частотах, при относительно большой толщине материала экрана $\delta_{\text{экр}} > \delta$ действуют оба фактора и эффективность экрана можно определить по приближенному

уравнению

$$\mathcal{E} \approx e^{d_{\text{экp}}/d} \left(\frac{1}{2} + \frac{D}{2,8m\mu\delta} \right). \quad (14)$$

На низких частотах, когда $\delta_{\text{экp}} < \delta$, поверхностный эффект незначителен, действует почти только первый фактор и эффективность рассчитывают по уравнению

$$\mathcal{E} \approx \sqrt{1 + \left(\frac{w\mu_0 s D d_{\text{экp}}}{2m} \right)^2}. \quad (15)$$

В этих уравнениях приняты следующие обозначения: $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8}$ Гн·см⁻¹ – магнитная постоянная; $\omega = 2\pi\nu$ – угловая частота; ν – частота, Гц; σ – проводимость, сим·см³; m – коэффициент формы экрана, для прямоугольного $m = 1$, для цилиндрического $m = 2$.

Пример. Определить эффективность медного цилиндрического экрана ($\delta_{\text{экp}} = 0,8$ мм, $D = 80$ мм) на частоте 0,1 МГц.

По табл. 2 находим ЭП $\delta = 0,21$ мм; так как $\delta_{\text{экp}}/\delta = 0,8/0,21 = 3,8$, то можно пользоваться формулой для случая $\delta_{\text{экp}} > \delta$. После подстановки в (14) получим:

$$\mathcal{E} = e^{3,8} \left(0,5 + \frac{80}{2,8 \cdot 2 \cdot 0,21} \right) = 44,7 \cdot 68,5 = 3063,$$

$$A = 69,7 \text{ дБ.}$$

Пример. Определить, как изменится значение \mathcal{E} , если экран из предыдущего примера выполнить из стали с $\mu = 100$ (см. табл. 1).

Таблица 2

ЭП δ для различных экранирующих материалов, мм

Частота ν , Гц	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь		Пермаллой
				$\mu=50$	$\mu=100$	
10^2	6,7000	12,4000	8,8000	—	1,540	0,380
10^3	2,1000	3,9000	2,7500	—	0,490	0,120
10^4	0,6700	1,2400	0,8800	—	0,154	0,038
10^5	0,2100	0,3900	0,2750	—	0,049	0,012
10^6	0,0670	0,1240	0,0880	0,0230	—	—
10^7	0,2100	0,0390	0,0275	0,0070	—	—
10^8	0,0067	0,0124	0,0088	0,0023	—	—

По табл. 2 находим $\delta=0,049$ мм. Отношение $\delta_{\text{экp}}/\delta=0,8/0,049=16,3$. Подставляя в (14), получаем

$$\mathcal{E} = e^{16,3} \left(0,5 + \frac{80}{2,8 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 0,049} \right) = 1,2 \cdot 10^7 \cdot 3,4 = 4,1 \cdot 10^7,$$

$$A = 152 \text{ дБ.}$$

Пример. Определить экранирующее действие вихревых токов на частотах 0,1 и 1 кГц, возникающих в цилиндрическом медном экране: $\delta_{\text{экр}} = 0,8$ мм, $D = 80$ мм.

По табл. 2 $\delta_{0,1} = 6,7$ мм; $\delta_I = 2,1$ мм. Для обеих частот $\delta_{\text{экр}} < \delta$, и нужно пользоваться формулой (15). После подстановки получим для частоты 0,1 кГц:

$$\mathcal{E} = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi \cdot 100 \cdot 57 \cdot 10^4 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 8 \cdot 0,08}{2 \cdot 2} \right)^2} = 1,008,$$

$$A = 1,8 \text{ дБ.}$$

Для частоты 1 кГц:

$$\mathcal{E} = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi \cdot 100 \cdot 57 \cdot 10^4 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 8 \cdot 0,08}{2 \cdot 2} \right)^2} = 7,27,$$

$$A = 17,4 \text{ дБ.}$$

Пример. Найти, как изменится значение \mathcal{E} при замене медного экрана в предыдущем примере стальным с $\mu = 100$.

По табл. 2 $\delta_{0,1} = 1,55$ мм; $\delta_I = 0,49$ мм. Так как $\delta_{0,1} > \delta_{\text{экр}}$, то на частоте 0,1 кГц нужно пользоваться формулой (15):

$$\mathcal{E} = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi \cdot 100 \cdot 10 \cdot 10^4 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 8 \cdot 0,08}{2 \cdot 2} \right)^2} = 1,008.$$

На частоте 1 кГц нужно пользоваться формулой (14):

$$\mathcal{E} = e^{0,8 / 0,49} \left(0,5 + \frac{80}{2,8 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 0,49} \right) = 5,1 \cdot 0,79 = 4,05,$$

$$A = 12,2 \text{ дБ.}$$

Экранирование электромагнитного поля излучения

Экранирование происходит вследствие отражения электромагнитной волны от металлической поверхности экрана и затухания преломленной волны в теле экрана. Отсюда следует, что эффективность экранирования электромагнитного поля излучения равна

$$\mathcal{E} = e^{\delta_{\text{экр}} / \delta} Z_{\text{возд}} / 4Z_{\text{мет}}, \quad (16)$$

где $Z_{\text{возд}} = 377$ Ом – характеристическое сопротивление воздуха;

$Z_{мет} = \sqrt{w \cdot m_0 \cdot m} / s$ – модуль характеристического сопротивления металла.

Пример. Определить эффективность экрана из алюминиевой фольги толщиной $\delta_{экр} = 0,1$ мм на частоте $\nu = 10$ МГц.

Из табл. 2 имеем: $\delta = 0,0275$ мм;

$\delta_{экр} / \delta = 3,6$;

$Z_{мет} = \sqrt{2p \cdot 10^7 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} / 33 \cdot 10^4} = 1,55 \cdot 10^{-3}$ Ом;

$\mathcal{E} = e^{3,6} \cdot 377 / 4 \cdot 1,55 \cdot 10^{-3} = 2,27 \cdot 10^6$;

$A = 127$ дБ.

Фильтрующие цепи

В фильтрующую цепь включают последовательно ($Z1, Z3, Z5\dots$) и параллельно ($Z2, Z4, Z6\dots$) сопротивления. Фильтрующую цепь можно рассматривать как серию последовательно включенных делителей напряжения. Напряжение на входе приемника наводки будет равно

$$U_{nn} = U_{ин} Z2 \cdot Z4 \cdot Z6 / Z1 \cdot Z3 \cdot Z5. \quad (17)$$

Под эффективностью фильтрации понимают отношение

$$\mathcal{E}\Phi = U_{ин} / U_{nn} = Z1 \cdot Z3 \cdot Z5 / Z2 \cdot Z4 \cdot Z6, \quad (18)$$

показывающее, во сколько раз изменяется напряжение на входе приемника наводки от включения фильтра. Величина $\mathcal{E}\Phi$ выражается в децибелах.

Пример. Определить $\mathcal{E}\Phi$ трехъячеечного фильтра, начинающегося с конденсатора, при условии, что $\nu = 1$ МГц и выходное сопротивление источника наводки равно $R_{ин} = Z1 = 100$ Ом. В качестве последовательных сопротивлений применены резисторы $R = Z3 = Z5 = 50$ Ом. Емкость параллельной цепи $C = 0,047$ мкФ. Согласно (18)

$$\mathcal{E}\Phi = R_{ин} \omega C \cdot R \omega C \cdot R \omega C = 6440,$$

$$A = 76 \text{ дБ.}$$

Контрольные задания

1. Рассчитать паразитную емкость между двумя проводниками.
2. Определить коэффициент паразитной емкостной связи. Дать анализ полученного значения.
3. Рассчитать индуктивности проводников.
4. Определить коэффициент паразитной индуктивной связи. Дать анализ полученного значения.
5. Пояснить принцип и определить эффективность экранирования низкочастотного магнитного поля.
6. Пояснить принцип и определить эффективность экранирования высокочастотного магнитного поля.
7. Пояснить принцип и определить эффективность экранирования электромагнитного поля излучения.
8. Пояснить принцип фильтрации и определить эффективность фильтрации фильтра.

Учебное издание

Галузо Валерий Евгеньевич
Мельничук Виталий Витальевич
Пинаев Александр Иванович

ТЕОРИЯ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ

Методическое пособие
для студентов специальности I-38 02 03
«Техническое обеспечение безопасности»
заочной формы обучения

Редактор Е. Н. Батурчик
Корректор М. В. Тезина
Компьютерная верстка Е. Г. Реут

Подписано в печать 02.11.2007.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,28.
Уч.-изд. л. 0,8.	Тираж 150 экз.	Заказ 34.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6