

## ЭКРАНИРОВАНИЕ И ЗАЩИТА

### Как исключить влияние наводок? Как добиться рациональных решений?

Назначением этой статьи является описание корректного использования экранирования как одного из средств уменьшения влияния источников помех, возникающих из-за емкостной или магнитной связи, и реализация экранирования и защиты. В статье описано, что надо и что не надо делать при этом.

С самого начала отметим, что проблемы, возникающие при влиянии наводок всегда объяснимы, однако они порой вызывают затруднения при реализации экранирования. Каждый трудный случай должен быть тщательно проанализирован. Это важно, главным образом, для того, чтобы определить источник наводок, их приемник и характер взаимодействия между ними. Неправильное экранирование и заземление, созданные при неверном определении этих элементов, могут только ухудшить ситуацию и привести к новым проблемам.

Экранирование может принести пользу в двух случаях. Во-первых, оно может использоваться для подавления излучения источника в небольшом объеме; это предотвратит распространение помех и их воздействие на близлежащие критичные компоненты схемы. Однако, такое экранирование может привести к тому, что при недостаточно тщательной разработке и размещении шин земли либо при некорректном подключении, сам экран будет являться источником дополнительных помех, что усугубит проблему.

Во-вторых, экраны могут быть размещены вокруг критичных элементов схемы для предотвращения воздействия помех на них. В данном случае, экраном может служить металлический кожух или кабель с металлической оплеткой вокруг центрального проводника. Повторим еще раз, очень важно, где и как подключен экран.

### ВЛИЯНИЕ ПОМЕХ ИЗ-ЗА НАЛИЧИЯ ЕМКОСТНОЙ СВЯЗИ

Если помехи являются результатом воздействия электрического поля, то экран будет выполнять свою работу, потому что заряд Q2, созданный внешним потенциалом V, не может существовать внутри замкнутой проводящей поверхности (рис. 1).

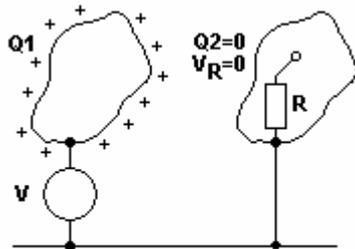


Рис.1. Заряд Q1 не создает заряд внутри замкнутой металлической оболочки

Влияние через паразитную емкость может смоделировано, как показано на рис. 2. Здесь  $V_n$  – источник помех (переключающий транзистор, логический элемент и т.п.),  $C_s$  – паразитная емкость,  $Z$  – входной импеданс приемника (например, резистор, включенный между входом усилителя и общим проводом) и  $V_{no}$  – выходной шум, возникающий на сопротивлении  $Z$ .



Рис.2. Эквивалентная схема емкостной связи между источником и ближайшим сопротивлением

Шумовой ток, равный  $i_n = V_n / (Z + Z_{Cs})$ , будет создавать шумовое напряжение  $V_{no} = V_n / (1 + Z_{Cs} / Z)$ . Например, если  $C_s = 2,5$  пФ,  $Z = 10$  кОм и  $V_n = 100$  мВ на частоте 1,3 МГц, то выходное напряжение шума будет равно около 20 мВ (или 0,2% от 10 В, т.е. 8 из 12 разрядов при аналого-цифровом преобразовании).

Важно понимать воздействие очень небольшой паразитной емкости на чувствительные элементы схемы. Это воздействие становится в большей степени критичным для систем, сочетающих малое потребление (большие значения импедансов), высокое быстродействие (малые паразитные емкости, крутые фронты сигналов и высокие частоты) и высокое разрешение (низкий уровень собственных шумов).

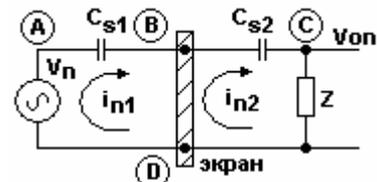


Рис.3. Эквивалентная схема с экраном, размещенным между источником и сопротивлением

При добавлении экрана распределение токов (рис. 2) изменяется, что проиллюстрировано на рис. 3. Предполагая, что импеданс экрана равен нулю, шумовой ток в контуре A-B-D-A будет равен  $V_n / Z_{Cs1}$ , а в контуре D-B-C-D этот ток будет отсутствовать, поскольку там нет источника помех. И, следовательно, на сопротивлении  $Z$  не будет присутствовать напряжение шумов, а чувствительные элементы схемы будут защищены экраном от помех.

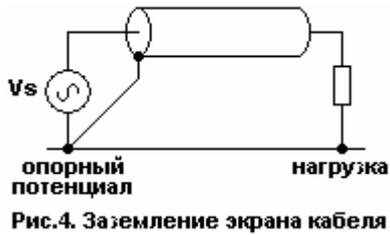
### ПРАВИЛА ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ

- Чтобы электростатический экран работал эффективно, он должен быть подключен к общему потенциалу экранируемой схемы. Если

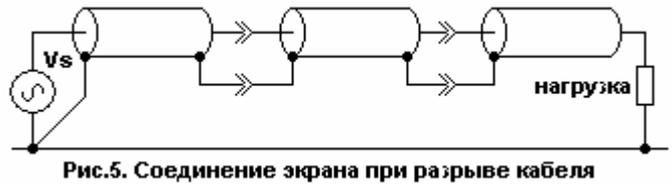
общим потенциалом для схемы является корпус устройства или земля, то экран должен быть также соединен с корпусом или землей соответственно. Но

заземление экрана становится бесполезным, если сигнал передается не относительно земли.

- **Оплетка экранированного кабеля должна быть подключена к общему выводу (опорному потенциалу) источника сигнала** (рис. 4).

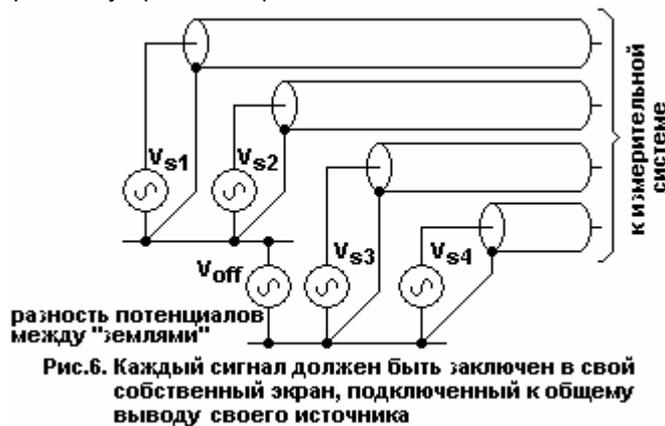


- Если экранированный кабель состоит из нескольких частей (допустим, через разъемные соединения), то **оплетки соседних сегментов должны быть соединены вместе и, в конечном счете, подключены только к общему выводу источника сигнала** (рис. 5).



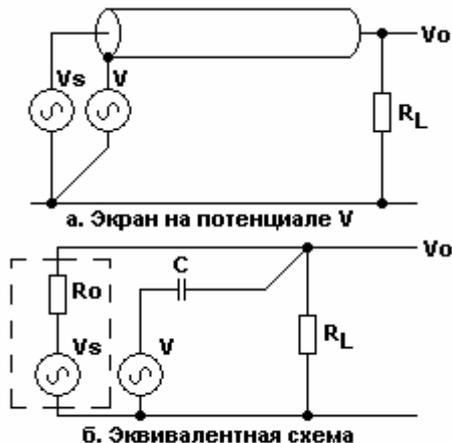
- **Количество отдельных экранов, требующихся в устройстве, должно быть равно количеству независимых измеряемых сигналов.** Каждый сигнал должен иметь свой собственный экран, не соединенный с другими экранами устройства, кроме

как в объединенной точке общих выводов источников (сигнальная земля). **Если в схеме присутствуют несколько сигнальных земель, то каждый экран должен быть подключен к опорному потенциалу своего источника** (рис. 6).



- **Не подсоединяйте оба конца оплетки к земле.** Разность потенциалов между двумя землями вызовет протекание дополнительного тока по экрану (рис. 7). Этот ток будет создавать шумовое напряжение в центральном проводнике посредством магнитного взаимодействия.

проводником посредством емкостной связи и создавать помехи (рис. 8).



- **Не допускайте протекания тока по экрану** (за исключением случая, описанного далее). Протекающий по экрану ток будет наводить паразитные сигналы на центральный проводник.
- **Не подавайте на экран напряжение относительно опорного потенциала источника** (исключение составляет случай защитного экранирования, описанный далее). Потенциал экрана V будет взаимодействовать с центральным

В этом случае на выходе появится только часть напряжения Vs:

$$V_o = \frac{V_s}{\sqrt{1 + \frac{1}{(2\pi f R_{eq} C_{sc})^2}}} \quad (1)$$

где  $V_s$  – напряжение ненагруженного источника сигнала,  $R_0$  – выходной импеданс источника,  $C_{sc}$  – емкость кабеля и  $R_{eq}$  – эквивалентное параллельное сопротивление  $R_0$  и  $R_L$ . Например, если  $V_s=1$  В на частоте 1,5 МГц,  $C_{sc}=200$  пФ (3 м кабеля),  $R_0=1000$  Ом и  $R_L=10$  кОм, то выходное напряжение составит 0,86 В.

Это правило часто игнорируют; серьезные шумовые проблемы возникают при невнимательном подключении паразитных потенциалов к экрану.

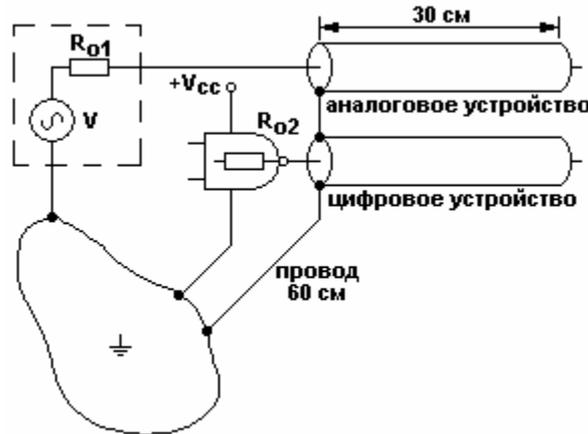


Рис.9. Ситуация, при которой создаются переходные напряжения в экране

Рассмотрим схему с ошибочно созданным экраном, в которой прецизионный источник напряжения  $V$  и логический элемент совместно используют подключение к экрану. Этот случай может возникнуть в больших системах, где аналоговые и цифровые сигналы передаются вместе. Изменение напряжения на выходе логической схемы взаимодействует с экраном через емкостную связь, создавая возвратный ток в проводнике длиной 60 см. Это, в свою очередь, создает напряжение на экране, который является общим для цифровой и аналоговой частей схемы.

Эквивалентная схема такого соединения приведена на рисунке 10, где  $V(t)$  – пятивольтовое изменение выходного напряжения логического элемента,  $R_{o2}$  – его выходной импеданс,  $C_{ws}$  – емкость экранированного кабеля,  $R_s$  и  $L_s$  – сопротивление и индуктивность провода, соединяющего экран с землей.

- Возвратные токи по земляным шинам могут быть “захвачены” шумовым током. Неправильно созданная цепь подсоединения экрана создает напряжение на экране, которое может оказывать влияние на элементы схемы или другие экраны. **Проводник подключения экрана должен быть достаточно коротким для минимизации возникающей индуктивности.**

Рисунок 9 иллюстрирует ситуации, которые могут возникнуть при соблюдении последних двух правил.

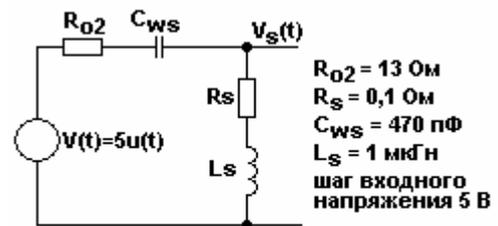


Рис.10. Эквивалентная схема при возникновении напряжения на экране

Напряжение на экране  $V_S(t)$  может быть рассчитано традиционными аналитическими методами или аккуратно измерено в реальной схеме с приведенными на рисунках параметрами. На рисунке 11 продемонстрирован отклик схемы на скачок напряжения в 5 вольт (резонансная частота – 7,3 МГц, постоянная времени затухания – 0,15 мкс). Это напряжение возникает на экране и взаимодействует посредством емкостной связи с аналоговым входом.

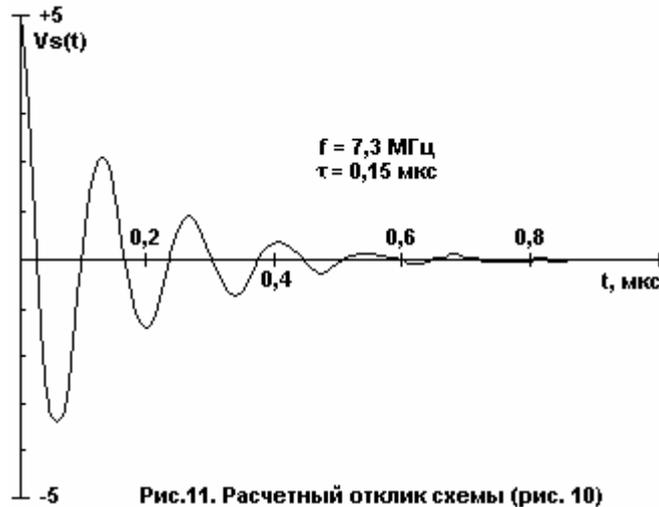


Рис.11. Расчетный отклик схемы (рис. 10)

При наблюдении этого напряжения на широкополосном осциллографе помехи будут выглядеть в виде шумоподобных выбросов, а сам переходной процесс будет взаимодействовать с аналоговым сигналом.

Даже в исключительно цифровых системах такие выбросы могут создавать определенные проблемы и часто приводят к необъяснимым сбоям.

Во многих случаях правильное подключение экрана может не быть очевидным сразу, и выполнение правил может не привести к единственно правильному решению.

В этом случае, только анализ различных возможных подключений даст правильный выбор по минимизации привносимого шума.

Для примера рассмотрим случай, показанный на рисунке 12, в котором измерительное устройство и источник сигнала имеют различные земли. Экран можно подключить к точке А – нижний вход измерительной системы, к точке В – земля измерительной системы, к точке С – земля источника сигнала или к точке D – нижний вывод источника сигнала. Какой из этих возможных вариантов правильный?

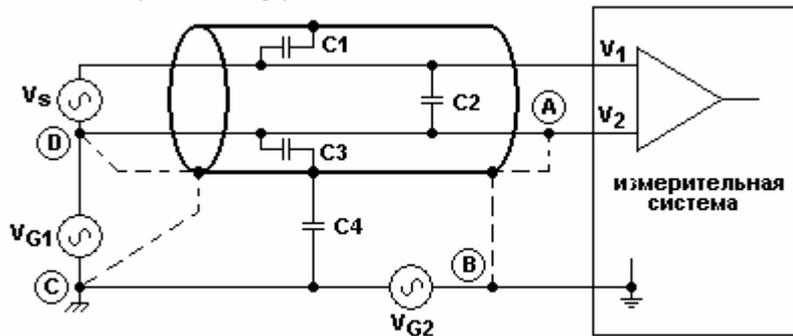


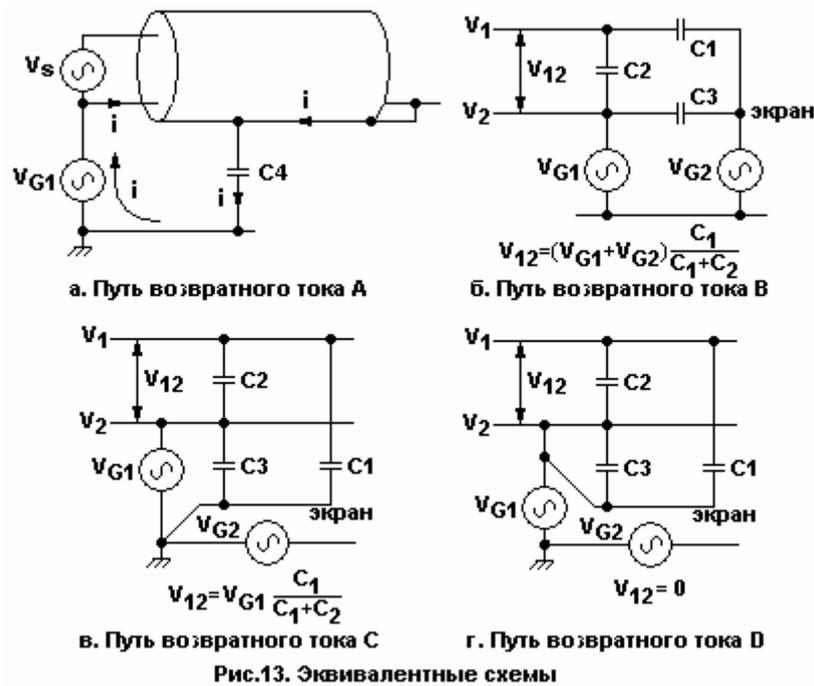
Рис.12. Возможные точки заземления экрана в случае, когда источник и приемник имеют различные земляные потенциалы

Вариант А плох, поскольку шумовой ток от источника  $V_{G1}$  будет протекать в сигнальном проводнике и возвращаться через емкость  $C4$ , как показано на рисунке 13а.

Вариант В – также плох, поскольку два последовательно соединенных источника шума  $V_{G1}$  и  $V_{G2}$  подключены параллельно обоим сигналам через емкость  $C1$ , как показано на рисунке 13б.

Вариант С – плох тоже, поскольку источник  $V_{G1}$  создает напряжение на сигнальных проводах также, как и в варианте В (рис. 13в).

Вариант D – лучший из рассмотренных при предложенных допущениях (рис. 13г). Этот вариант подтверждает одно из правил заземления – подключать экран к опорному потенциалу источника сигнала.



**ПОМЕХИ ИЗ-ЗА ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Помехи из-за воздействия магнитного поля создают напряжение в проводниках и контурах. Этого вида помехи значительно труднее поддаются экранировке, чем помехи, создаваемые электрическим полем, поскольку линии магнитного поля проходят сквозь проводящие материалы. Типичный экран, расположенный вокруг проводника и заземленный на одном его конце, обладает небольшим эффектом подавления магнитно-наведенного напряжения на этот проводник.

Пронизывая проводник, интенсивность магнитного поля убывает по экспоненциальному закону (рис. 14). Глубина поверхностного слоя материала экрана определяется как глубина проникновения магнитного поля, на которой происходит его ослабление до 37% ( $e^{-1}$ ) по сравнению со значением в воздушной среде.



В таблице 1 приведены типовые значения глубины поверхностного слоя некоторых материалов для разных частот магнитного поля. Одни материалы более эффективно выполняют роль магнитного экрана на

высокой частоте, чем другие. Например, стальной экран, по крайней мере, на порядок более эффективен, чем такой же экран, выполненный из меди или алюминия.

Таблица 1.

Частота	медь, мм	алюминий, мм	сталь, мм
60 Гц	8,5	10,9	0,86
100 Гц	6,6	8,5	0,66
1 кГц	2,1	2,7	0,2
10 кГц	0,66	0,84	0,08
100 кГц	0,2	0,3	0,02
1 МГц	0,08	0,08	0,008

Графики, приведенные на рисунке 15, позволяют сравнить потери при поглощении магнитного поля для стали и меди при двух значениях толщины экрана. Трехмиллиметровый стальной экран достаточно эффективен на частотах выше 200 Гц, а полумиллиметровый медный экран хорошо работает на частотах выше 1 МГц. Слабое место экранирования проявляется на более низких частотах, включая 50-60 Гц сетевого напряжения – основной источник наводок, связанный с влиянием магнитного поля.

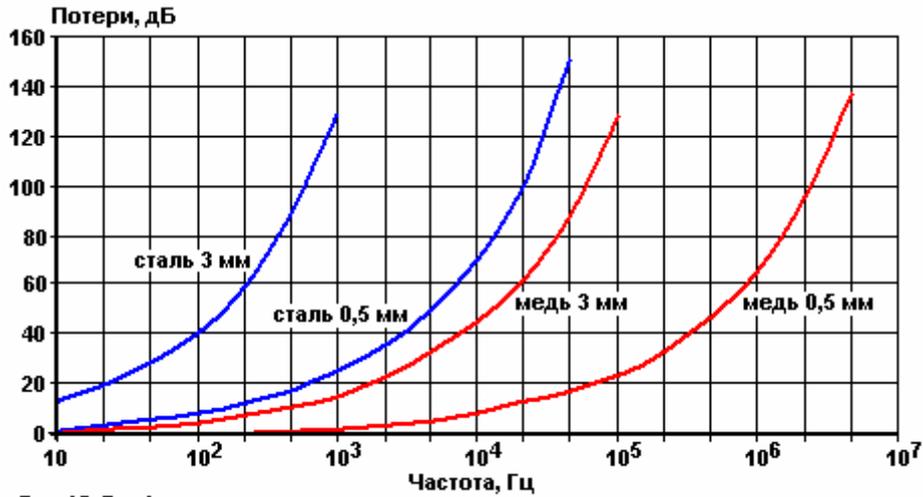
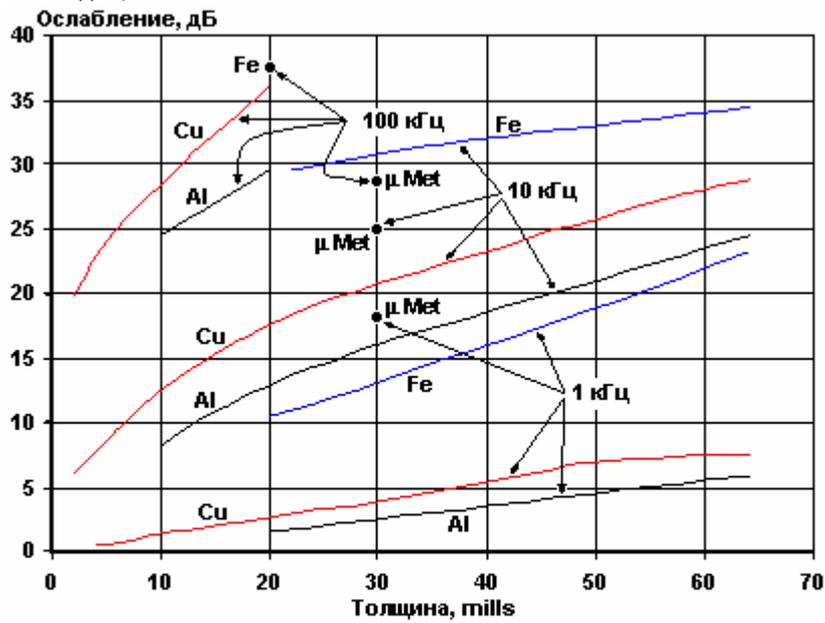


Рис.15. График зависимости потерь поглощения от частоты для меди и стали при различной толщине

Если необходимо качественное экранирование низкочастотного магнитного поля, то в качестве материала экрана используется металл с высокой магнитной проницаемостью (так называемый  $\mu$ -металл). На рисунке 16 приведены графики зависимости ослабления магнитного поля от толщины при разных частотах. Из этих графиков видно, что на частотах ниже 1

кГц  $\mu$ -металл более эффективен, чем другие материалы, а на частоте 100 кГц – менее. К сожалению, при использовании  $\mu$ -металла возникают некоторые сложности – после насыщения под воздействием очень сильного поля экран из  $\mu$ -металла теряет свои положительные качества.



Cu – медь, Fe – сталь, Al – алюминий,  
 $\mu$  Met – мю-металл (75%Ni, 18%Fe, 5%Cu, 2%Cr)  
 mill – 1/1000 часть дюйма (1 mill = 0,0254 мм)

Рис.16. Ослабление экрана из разных металлов на различных частотах

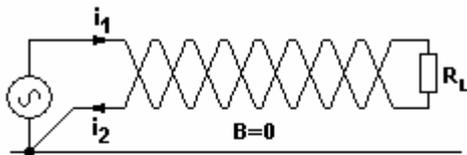
Таблица 1 и рисунки 15 и 16 – Ott, H.W., Noise Reduction Techniques in Electronic Systems (New York: John Wiley & Sons, © 1976)

Как можно видеть, достаточно трудно защитить какую-либо схему от воздействия магнитного поля изменением способа экранировки. Поэтому наиболее эффективными решениями экранировки на низких частотах являются уменьшение интенсивности мешающего магнитного излучения, уменьшение области приемного контура и минимизация связи посредством оптимального размещения и конфигурации. Ниже

приведены правила, использование которых позволит уменьшить помехи от магнитного поля.

- **Располагайте чувствительные к магнитным наводкам компоненты схемы как можно дальше от источника магнитного поля.**
- **Избегайте прокладывать шины и проводники параллельно линиям магнитного поля;** наилучший вариант – пересечение под прямым углом.

- **Материал экрана должен соответствовать частоте и интенсивности поля.**
- **Используйте витые пары для передачи большого переменного тока.** Если токи в проводниках витой пары равны и противоположны по знаку, магнитные поля создаваемые этими проводниками будут компенсировать друг друга (рис. 17а). В этом случае ни один из токов не должен быть ответвлен на какой-либо проводник, например, на землю. На рисунке 17б показано, что может произойти при создании земляного контура; часть тока, зависящая от соотношения сопротивлений проводника и шины земли, будет протекать по земляному проводнику, что, в свою очередь, создаст замкнутую петлю тока  $i_3 = i_1 - i_2$  и приведет к появлению магнитного поля.



а. Правильное подключение с сбалансированными токами



б. Неправильное подключение, создающее "земляную" петлю  
Рис.17. Подключение витой пары

Соединение между точками А и В приведет к несбалансированности токов протекающих по проводникам витой пары. По этой же причине витую пару следует располагать над земляным полигоном, возможно ближе к нему, для уравнивания емкостной связи между

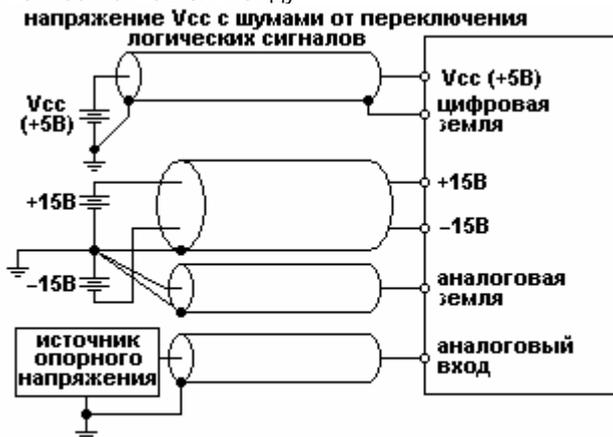


Рис.19. Использование схемы (рис. 18) в испытательной системе

Поскольку шум, наведенный магнитным полем, зависит от площади приемного контура, а создаваемое в этом контуре напряжение определяется магнитной связью, то **уменьшение площади контура приведет к уменьшению наводимого шума.** Что подразумевается под приемным контуром? На рисунке 20 источник сигнала и его нагрузка подключены между собой парой проводников длиной L, расстояние между которыми равно D. В этой схеме (для упрощения показана прямоугольная конфигурация) формируется контур с площадью D×L.

каждым из проводников и полигоном и уменьшения площади контура.

- **Используйте экранированный провод для передачи большого переменного тока, используя оплетку как проводник возвратного тока** (рис. 18). Если ток экрана  $i_2$  равен по величине, но противоположен по направлению току центрального проводника  $i_1$ , то поля создаваемые этими токами будут взаимно компенсировать друг друга. В этом случае, который, как может показаться, вступает в противоречие с правилом отсутствия тока, протекающего по экрану, для экранирования центрального проводника не обязательно использовать строго концентрический кабель.

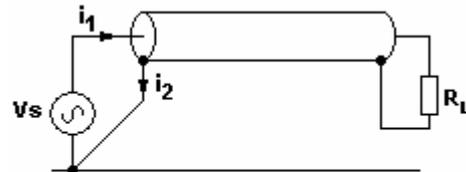
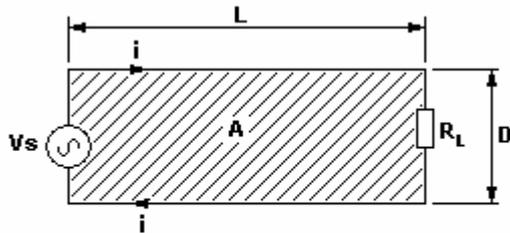


Рис.18. Использование экрана для возвратного тока источника с шумом

Такое подключение может быть полезным при создании систем автоматического испытательного оборудования, где точные измерения производятся устройствами, потребляющими большие токи, которые могут быть недостаточно чистыми. На рисунке 19 приведен пример, показывающий применение этого способа подключения питания логической части измерительной схемы.



**Рис.20. Петлевая область, в которой наводится шум, связанный с магнитным полем**

Напряжение, индуцированное магнитным полем, пропорционально площади контура и косинусу угла между плоскостью контура и линиями поля. Поэтому для минимизации шума контур должен быть ориентирован под углом 90° к линиям поля, а его площадь максимально уменьшена.

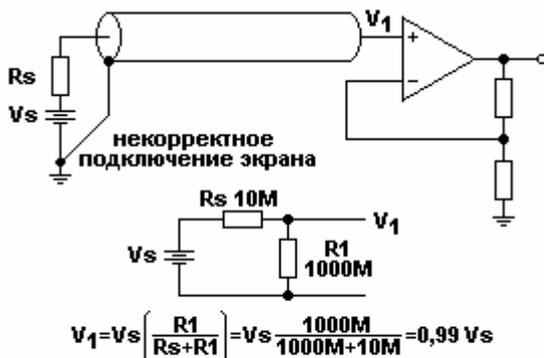
Площадь контура может быть сокращена уменьшением длины проводников и/или уменьшением

**УПРАВЛЕНИЕ ЭКРАНАМИ И ЗАЩИТА**

Мы обсудили роль экрана, по которому течет ток, равный по величине, но противоположный по направлению току центрального проводника. При этом магнитные поля компенсируют друг друга.

Защита создается достаточно просто: потенциал на экране задается от источника с низким выходным импедансом; этот потенциал должен быть практически таким же, что и потенциал экранируемого сигнала, т.е. сигнальное и экранное напряжения синфазны и равны. Защита имеет много положительных качеств: она уменьшает синфазную емкость (поскольку потенциалы сигнала и экрана одинаковы), улучшает подавление синфазной составляющей и уменьшает токи утечки в высокоомных схемах.

На рисунке 21 показан пример использования операционного усилителя с малым током смещения в неинвертирующем включении. Кабель в данном случае используется для экранирования от наводок из-за емкостной связи высокоимпедансного сигнального проводника и уменьшения токов утечки. Сигнал поступает от источника с очень высоким выходным сопротивлением (10 МОм), а сопротивление утечки кабеля (которое зависит от температуры, влажности и т.п.) составляет 1000 МОм.



**Рис.21. Операционный усилитель с экранированным высокоомным входом**

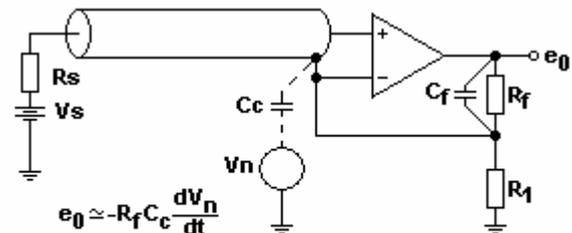
Если подключение произведено так, как показано на рисунке, то входная схема будет представлять собой делитель, на котором потеряется 1% от сигнала. Кроме того, емкость кабеля вызовет существенную задержку,

дистанции между ними. Это легко реализуется при использовании витой пары либо при расположении проводников вплотную друг к другу. Хорошим тоном считается объединение проводников – сигнального и его возвратного тока – в один кабель. В этом случае можно быть уверенным в том, что возвратный ток вернется к источнику сигнала. Довольно часто можно встретить ситуацию, когда путь возвратного тока располагается не так, как было задумано при правильной начальной разработке.

Если происходит перемещение проводников (например, при выявлении неисправностей), площадь контура и его ориентация относительно поля может измениться, а приемлемый уровень шума завтра может оказаться повышенным. Определяйте контуры и их ориентации, делайте то, что должно быть сделано для минимизации шума и надолго сохраняйте разводку проводов.

определяющуюся выходным сопротивлением источника сигнала и этой емкостью.

На рисунке 22 показана та же самая ситуация, но экран подключен к цепи обратной связи (инвертирующий вход ОУ), которая обычно имеет малое сопротивление. В этом случае, экран находится под таким же потенциалом, что и неинвертирующий вход. Поэтому не образуется разность потенциалов между экраном и центральным проводником, следовательно, не будет тока утечки, а сопротивление утечки кабеля не будет играть никакой роли. Значит, напряжение на входе операционного усилителя V1 будет равно выходному напряжению источника сигнала Vs, поскольку, мы договорились, что током смещения можно пренебречь.



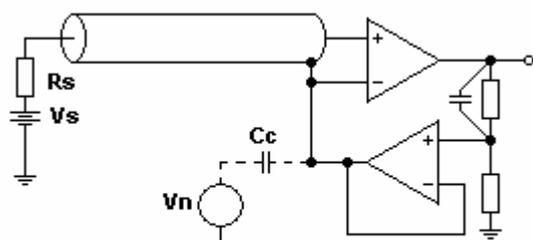
**Рис.22. Схема, аналогичная приведенной на рис. 21, но с экраном, выполняющим защитную функцию**

Также не будет протекать ток через емкость кабеля, т.е. не будет ее перезарядки, а время задержки сигнала будет определяться главным образом паразитными воздействиями и входной емкостью усилителя. Для того, чтобы схема работала стабильно, в цепь обратной связи (между выходом ОУ и его инвертирующим входом) необходимо добавить конденсатор так, чтобы выполнялось равенство  $C_f \times R_f = C_s \times R_1$ , где  $C_s$  – сумма емкости кабеля и входной емкости ОУ.

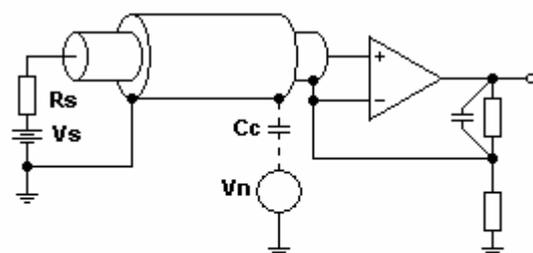
На экране должен присутствовать только чистый (без шумов) потенциал. Напряжение источника помех Vn (рис. 22) через емкостную связь будет видоизменять полезный сигнал, внося искажения в работу высокочастотных компонентов. Влияние через такую связь может быть устранено либо при использовании высокочастотного буфера с малым выходным сопротивлением для управления потенциалом экрана

(рис. 23а), либо вторым экраном, соединенным с общим выводом источника сигнала (рис. 23б).

соединяться непосредственно с неинвертирующим входом, а второй, внешний экран должен быть подключен к общему выводу источника сигнала.



а. Управляемая охрана



б. Экранированная охрана

**Рис.23. Устранение шумовой наводки с использованием охранных элементов**

В инвертирующей конфигурации с токовым считыванием, когда экранированный провод используется как защита инвертирующего входа ОУ, экран должен либо управляться через буфер, подключенный к такому же потенциалу, что и инвертирующий вход (в этом случае экран не должен быть подключен куда-либо еще), либо

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В таблице 2 приведены важнейшие пункты, освещенные в этой статье. Их соблюдение поможет обеспечить целостность сигналов при их экранировании. Тем не менее, нельзя не остановиться на двух предметах, которые часто игнорируются: возникновение помех на экране и специфический характер шумовых токов экрана. **Шумовое напряжение не должно присутствовать на**

**экране**; емкостная связь между экраном и центральным проводником в этом случае будет приводить к возникновению помех в сигнале. **Экранные токи должны возвращаться надлежащим образом**, иначе они могут проявляться в удаленных частях устройства и, возможно, создавать дополнительные проблемы.

Таблица 2

Предпринимаемые действия	Тип помех		
	Комбинированные	Электрические	Магнитные
Определение источника шума, характера связи и приемника	+	+	+
Применение различных способов экранирования для разных источников шума, разных видов связи и разных приемников	+	+	+
Анализ используемых сосредоточенных компонентов	+	+	+
Подключение экрана только к общему выводу источника сигнала		+	
Прохождение экрана через разъемные соединения		+	
Индивидуальные экраны не должны быть соединены вместе		+	
Отсутствие подключения обоих выводов оплетки экрана		+	
Отсутствие тока экрана, исключая управляемые экраны для подавления магнитных полей		+	+
Отсутствие напряжения на экране, за исключением применения защитного метода		+	
Знание точного пути прохождения шумового тока экрана		+	
Использование короткого соединения экрана		+	
Малое влияние электростатических экранов для подавления магнитных помех			+
Уменьшение влияния магнитных полей пространственным удалением компонентов, их ориентацией, использованием витых пар и/или управляемых экранов			+
Определение приемного контура и его ориентации относительно линий магнитного поля			+
Использование защиты в высокоимпедансных схемах	+	+	