

Министерство РФ по связи и информатизации  
ПГАТИ  
КАФЕДРА ЛИНИИ СВЯЗИ И ИТС

Одобрено советом ФЭС  
20 июня 2001г.

МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА

К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКРАНИРУЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОЛОЧЕК И  
ЭКРАНОВ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

Составил к.т.н., доцент Воронков А.А.  
Редактор д.т.н., профессор Андреев В.А.  
Рецензент к.т.н., доцент Корнилов И.И.

Самара 2001

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение конструкций экранов и оболочек кабелей связи, исследование их экранирующих свойств при воздействии внутреннего и внешнего электромагнитного поля.

## 2. ЛИТЕРАТУРА

1. Кочановский Л.Н., Верник С.М. Линии связи. М.: Радио и связь, 1995., с.365 - 387.
2. Гроднев И.И. Экранирование в широком диапазоне частот. М.: Связь, 1986.
3. Ионон А.Д., Попов Б.В. Линии связи. М.: Радио и связь, 1996. с.98, 115 - 117.

## 2. ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1. По рекомендуемой литературе изучить принцип действия электростатических, магнитостатических и электромагнитных экранов.

2. Ознакомиться на стендах образцов кабелей связи с конструкциями сплошных цилиндрических экранов, экранов из спирально наложенных лент и другими конструкциями экранов.

3. Изучить теорию электромагнитного экранирования и основные параметры экранов.

4. Провести анализ основных закономерностей изменения в зависимости от частоты коэффициента экранирования и экранного затухания отражением и поглощением для немагнитных и магнитных экранов.

5. Изучить физические процессы, происходящие в заземлённом экране при воздействии внешнего электромагнитного поля и сущность защитного действия экрана.

6. Рассмотреть зависимость коэффициента защитного действия экрана (КЗД) от материала и конструкции экрана, наличия защитных броневых покровов и частоты тока.

## 4. СОСТАВ ОБОРУДОВАНИЯ

1. Макет лабораторной работы для измерения КЗД, коэффициента экранирования и экранного затухания различных экранов.

2. Комплект измерительных приборов для измерения напряжения и токов, возникающих в жилах и экране при определении параметров экранирования, состоящий из генератора и измерителей уровня напряжения или тока.

3. Комплекты соединительных шнуров и переключателей.

4. Вместо макета можно воспользоваться ПЭВМ с программным обеспечением для выполнения лабораторной работы №14.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с макетом работы, который состоит из двух образцов кабелей связи и схемой измерения КЗД оболочки кабеля. Используя справочную литературу и стенды с образцами кабелей, установить по обозначенной на макете марке кабеля материал и конструктивные размеры экрана исследуемых образцов. С помощью переключателей, расположенных на макете выбрать исследуемую марку кабеля и произвести измерения напряжений, действующих в экране и кабельной цепи. Измерения проводятся на заданных преподавателем частотах по схеме рис.1.

2. Выполнить исследование взаимного влияния между двумя кабелями представленными на макете. Измерения производятся аналогично по схеме рис.1, при этом влияющий и подверженный влиянию кабели определяются положением переключателей. Измерения проводятся для одной из заданных частот при изменении выходного напряжения генератора от 5 до 25 Вольт.

3. Исследования КЗД и взаимного влияния между кабелями можно выполнить с использованием соответствующей программы на ПЭВМ. Для этого загрузите программу лабораторной работы, пройдите тест для допуска к работе, выполните исследования КЗД и взаимного влияния между кабелями на заданных преподавателем частотах не менее чем для трех марок кабелей.

3. Результаты исследований заносятся в таблицы и рассчитываются значения КЗД и затухания экранирования, которые также представляется в виде графиков частотной зависимости. Полученные данные для различных экранов сравниваются между собой, в отчёте приводятся выводы и анализ эффективности экранов и соответствия результатов измерений теоретическим зависимостям.

## 6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать и подготовить к работе схему измерения КЗД согласно рис. 1:

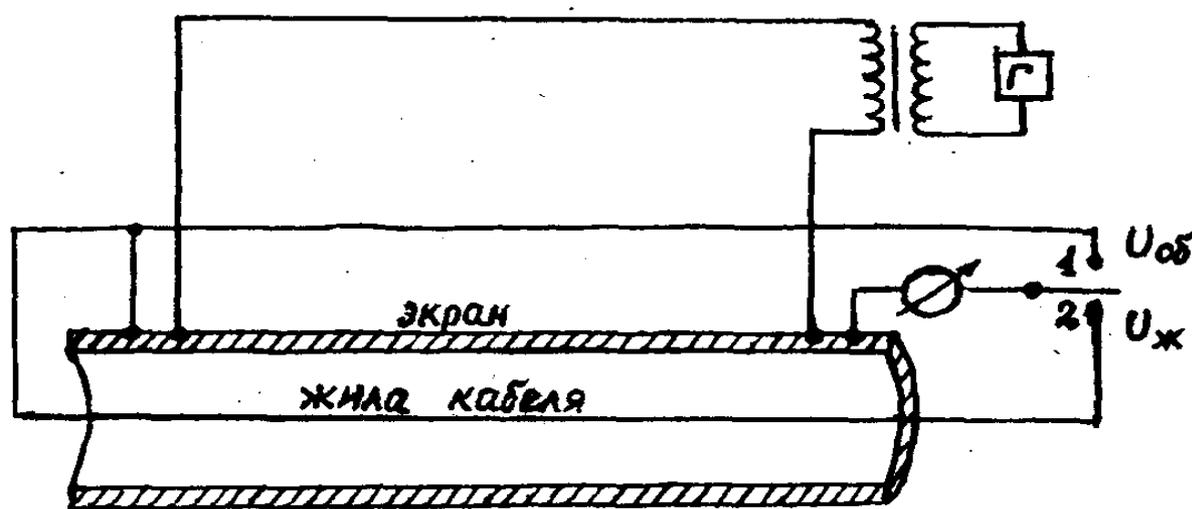


Рис.1. Схема, измерений для определения КЗД оболочки кабеля

2.Верхнее положение всех трёх ключей переключателя на макете соответствует одному образцу кабеля, нижнее положение ключей встроенного переключателя – другому. Генератор и измерительный вольтметр подключить к обозначенным на макете гнездам.

3.Измерить на заданных преподавателем частотах напряжения в жиле кабеля и оболочке, результаты измерений записать в табл.1:

Таблица I Результаты исследования КЗД и затухания экранирования.

Исследуемый кабель	Параметр	Частота, Гц.				
1. Кабель марки:	$U_{об}$ , Вольт					
	$U_{ж}$ , Вольт					
	S					
	$A_{э}$ , дБ.					
2. Кабель марки:	$U_{об}$ , Вольт					
	$U_{ж}$ , Вольт					
	S					
	$A_{э}$ , дБ.					

4.Аналогично провести измерения напряжений в жиле и оболочке другого образца кабеля, представленного на макете, и данные занести в табл.1.

5.Провести исследования взаимного влияния между кабелями при изменении выходного напряжения генератора от 5 до 25 Вольт на одной из частот по заданию преподавателя, при этом положение первого ключа встроенного переключателя указывает влияющий кабель, а второй и третий ключ этого переключателя указывает кабель, подверженный влиянию. На этом кабеле измеряется только напряжение на оболочке (экране). Результаты измерений заносятся в табл.2.

Марка кабеля	Измеряемый параметр	Напряжение на выходе генератора и оболочки, Вольт.				
Влияющий кабель марки:	$U_{вых. ген.}$ , В.					
Подверженный влиянию кабель марки:	$U_{об.}$ , В.					

6. Рассчитать КЗД и затухание экранирования двух представленных на макете экранов на заданных преподавателем частотах.
7. При проведении исследований на ПЭВМ заполнить таблицы 1 и 2.
8. Построить графики частотной зависимости КЗД и затухания экранирования.

## 7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА.

Отчёт должен содержать:

1. Цель и задачи работы.
2. Схему макета работы.
3. Таблицы результатов измерений, вычислений КЗД и затухания экранирования выполненных на макете или таблицы результатов исследований на ПЭВМ.
4. Графики зависимостей КЗД и затухания экранирования от частоты для заданных кабелей.
5. Выводы по результатам исследований о характере частотной зависимости КЗД и затухания экранирования, анализ эффективности экранирования заданных марок кабелей.

## 8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Физическая сущность электростатического и магнитостатического экранирования.
2. Физическая сущность электромагнитного экранирования.
3. Физическая сущность экранирования продольными токами в экране при внешнем воздействии электромагнитного поля.
4. Понятие о коэффициенте защитного действия экрана: идеальный и реальный КЗД.
5. Понятие о коэффициенте и затухании экранирования.
6. Составляющая экранирования отражением, частотная зависимость волновых сопротивлений диэлектрика и различных металлов.
8. Составляющая экранирования поглощением, её основные зависимости.
9. Частотные зависимости параметров экранирования магнитных и немагнитных экранов.
10. Принцип действия многослойных экранов и их эффективность в различных диапазонах частот.
11. Понятие об электрически тонких и толстых экранах.
12. Влияние экрана на параметры передачи кабельных цепей.
13. Зависимость эффективности экранирования от конструкции экрана.
14. Параметры экранирования в области низких частот, их частотная зависимость.
15. Особенность волнового режима экранирования, основные процессы в экранах при этом режиме.

## ПРИНЦИПЫ ЭКРАНИРОВАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКРАНОВ

Экраны в кабелях связи используются как для защиты цепей связи от влияния внешних электромагнитных полей, так и для уменьшения взаимных влияния между цепями. По своей конструкции в кабелях связи применяются преимущественно цилиндрические сплошные экраны (металлические оболочки) и экраны из алюминиевых и стальных лент, наложенных спирально.

По принципу работы экраны могут быть электростатические, магнитостатические и электромагнитные.

Электростатические экраны основаны на принципе разделения зарядов вследствие электростатической индукции. Обычно они изготавливаются из металлизированной бумаги и предназначены для экранирования низкочастотных цепей с высоким уровнем передачи с целью уменьшения их влияния на соседние цепи.

Магнитостатические экраны выполняются из металла с большим значением относительной магнитной проницаемости материала экрана.

Применяются они для экранирования аппаратуры или её блоков от воздействия внешних магнитных полей и основаны на том, что магнитный поток вследствие повышенной магнитопроводности экрана проходит в его толще и не попадает в заэкранированное пространство. Эти экраны, как и электростатические, пригодны только для низкочастотного диапазона.

С увеличением частоты в экране будут наводиться вихревые токи и магнитостатический режим переходит в электромагнитный, при котором воздействие экрана на электромагнитную волну проявляется в её частичном отражении от границ раздела двух сред: "диэлектрик - металл" и "металл - диэлектрик", а также в затухании волны в толще экрана. В области сверхвысоких частот, при которых длина волны становится соизмеримой с поперечными размерами экрана, наступает волновой режим экранирования. Для экранов кабелей связи, которые не используются на столь высоких частотах, этот режим практически не представляет интереса.

Эффективность электростатического экрана практически не зависит от материала экрана и его толщины: в любом технологически возможном слое металла происходит разделение зарядов. При этом важным условием является хорошее заземление экрана. С повышением частоты эффективность снижается, так как не успевает происходить "стекание" зарядов на землю. Чем выше частота, тем ниже эффективность электростатического экранирования.

Магнитостатические экраны изготавливаются из магнитных материалов. Чем больше величина относительной магнитной проницаемости, тем выше эффект магнитостатических экранов. Он возрастает с увеличением толщины экрана и уменьшении его радиуса, так как при этом уменьшается длина пути магнитного потока.

Одним из основных параметров, характеризующих эффективность экранирования, является коэффициент экранирования  $S$ , представляющий собою отношение напряжённости электрического или магнитного поля в какой-либо точке при наличии экрана ( $E_{\text{э}}, H_{\text{э}}$ ) к напряженности в этой же точке, если экран отсутствует ( $E, H$ ):

$$S = \frac{E_{\text{э}}}{E}; \quad S = \frac{H_{\text{э}}}{H}; \quad 0 \leq S \leq 1$$

Величина  $S = 0$  характеризует наивысший эффект экранирования, при  $S = 1$  - экранирующий эффект отсутствует.

Для электромагнитных экранов коэффициент экранирования имеет составляющие поглощения ( $S_{\text{п}}$ ) и отражения ( $S_{\text{о}}$ ) и для цилиндрической поперечно-электромагнитной волны  $T$  определяется по формуле:

$$S = S_{\text{п}} * S_{\text{о}} = \frac{1}{chK_{\text{м}}t} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left( \frac{Z_{\text{д}}}{Z_{\text{м}}} + \frac{Z_{\text{м}}}{Z_{\text{д}}} \right) \cdot thK_{\text{м}}t}$$

Где:  $K_{\text{м}} = \sqrt{i\omega\mu_a\sigma}$  - коэффициент распространения волны в экране;

$t$  - толщина экрана, мм;

$Z_{\text{д}}$  - волновое сопротивление диэлектрика, Ом;

$Z_{\text{м}}$  - волновое сопротивление металла, Ом.

Эта формула может быть применена для любых частотных диапазонов и режимов экранирования, а также для электрического и магнитного полей. Коэффициент экранирования поглощением зависит от электрической толщины экрана  $Kt$ .

При  $Kt < 0,3$  - электрически тонкий экран;

$Kt > 5$  - электрически толстый экран.

В электрически тонких экранах затухание поглощения мало, электрически толстые экраны являются практически непрозрачными.

Эффект экранирования отражением зависит в основном от соотношения величин волновых сопротивлений металла и диэлектрика. Волновое сопротивление диэлектрика для электрической и магнитной волны различно, определяется оно через цилиндрические функции и их производные по довольно сложным и громоздким выражениям. Однако в диапазоне частот до  $10^9$  Гц для основной волны ( $n=1$ ) волновые сопротивления можно определить по упрощенной формуле:

$$Z_D^E = \frac{1}{i\omega\epsilon_a r_3}; \quad Z_D^H = i\omega\mu_a r_3; \quad Z_M = \sqrt{i\omega\mu_a / \sigma}.$$

где:  $r_3$  – внутренний радиус экрана.

Графики частотной зависимости волновых сопротивлений диэлектрика и металла в электромагнитном режиме представлены на рис.2.

Волновое сопротивление диэлектрика для электрической волны больше, чем для магнитной, поэтому эффективность экранирования электрического поля выше, чем магнитного за счёт составляющей экранирования отражением. Поэтому обычно исследуют экраны по составляющей магнитного поля.

Эффективность применения экранов из магнитных и немагнитных материалов зависит от диапазона частот, в котором используется экран. На рис.3 показана частотная зависимость затухания экранирования магнитных и немагнитных экранов, рассчитываемая по формуле:

$$A_3 = 20 \lg 1/S, \text{ дБ.}$$

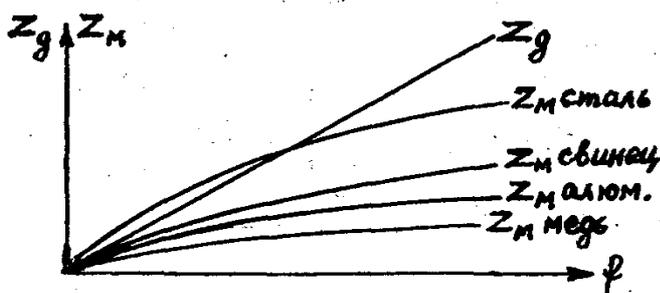


Рис.2. Волновые сопротивления диэлектриков и металлов для магнитной волны.

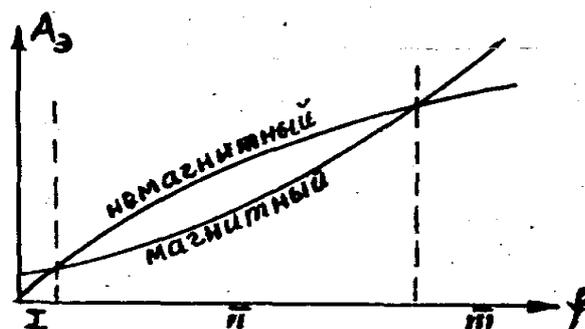


Рис.3. Эффективность экранов в разных диапазонах частот

Составляющая экранирования поглощением у магнитного экрана всегда выше, чем у немагнитного из-за преобладания вихревых токов в магнитном экране. Эффект отражения выше у немагнитных экранов, так как различие волновых сопротивлений между металлом и диэлектриком больше у немагнитных экранов,

чем у немагнитных. В низкочастотной области I, когда экраны работают в электро- и магнитоэлектростатическом режиме, эффективнее магнитные экраны.

При заземлении электростатического экрана и соединении корпуса источника помех через землю с экраном (металлизация) его эффективность по электрической составляющей поля бесконечно велика и он полностью экранирует от электрической составляющей.

В области сравнительно высоких частот ( $10^3 - 10^6$  Гц) экранирование отражением играет более существенное влияние, чем составляющая поглощения.

В этом режиме немагнитные экраны эффективнее магнитных. По мере увеличения частоты (свыше  $10^6$  Гц) различие между волновыми сопротивлениями диэлектрика и металла приводит к уменьшению экранирования отражением, но при этом возрастают потери в экране на вихревые токи и затухание экранирования поглощением будет преобладать над экранированием за счёт отражения. В этом диапазоне частот магнитные материалы для экранов более эффективны.

Следует иметь в виду, что экран, изменяя внешнее электромагнитное поле, тем самым изменяет и параметры цепи. Отраженное от экрана электрическое поле увеличивает напряжённость действующего поля, поэтому ёмкость экранированной цепи больше, чем не экранированной. Магнитное поле отражается от экрана с изменением фазы на  $180^\circ$ , напряжённость суммарного магнитного поля уменьшается, поэтому индуктивность экранированной цепи меньше, чем неэкранированной.

Из-за дополнительных потерь на вихревые токи в экране возрастает активное сопротивление цепи. Так как в области высоких частот при электрически толстых экранах потери, вносимые экраном в цепь передачи, определяются лишь тонким внутренним слоем, обращенным к цепи передачи, то при чисто стальном экране (рис.3, область III) с целью уменьшения потерь, вносимых экраном, первый слой у такого экрана делают из алюминиевой ленты, например, у кабелей со стальной гофрированной оболочкой.

При использовании экранов в области средних и высоких частот (рис.3, область II), когда превалирует эффект отражения, применяют многослойные экраны с чередованием тонких слоев из немагнитных и магнитных металлов.

Кроме экранирующего действия отражением и поглощением, оказываемого экраном на поперечные составляющие электромагнитного поля, в реальных условиях следует учитывать также экранирующий эффект, вызываемый продольными токами, возникающими в третьей цепи "экран--земля" (рис.4). Особенно существенное значение имеет экранирующий эффект от продольных токов при влиянии внешних электромагнитных полей.

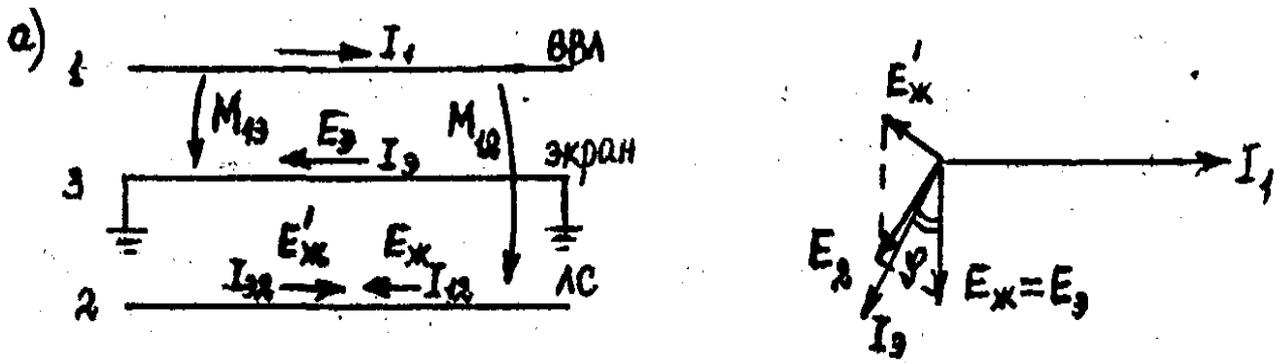


Рис. 4. Экранирующее действие продольных токов в цепи "экран-земля"

а) схема влияния; б) векторная диаграмма

Суммарное экранирующее действие экрана будет определяться составляющими поглощения и отражения, а также дополнительной составляющей затухания экранирования от продольных токов. Особое значение приобретает эта составляющая при защите цепей кабеля от внешних влияний в низкочастотном диапазоне (влияние высоковольтных линий, контактных сетей электрифицированных железных дорог и др.). В этом диапазоне составляющие поглощения и отражения очень малы и экранирующий эффект будет определяться лишь коэффициентом экранирования от продольных токов, называемым коэффициентом защитного действия оболочки (экрана) кабеля (КЗД) и обозначаемым как и коэффициент экранирования  $S$ . Различают идеальный и реальный КЗД. Идеальный КЗД рассчитывается при значениях величины сопротивления заземления оболочки (экрана), равных нулю. В реальных условиях практически равных нулю сопротивлений заземлений не бывает, поэтому с учетом значения сопротивления заземления оболочки рассчитывают реальный КЗД, который всегда больше идеального. Величина КЗД рассчитывается по формуле:

$$S = U_{ж} / U_{об}, B.$$

Эффект экранирования продольными токами увеличивается при уменьшении активного сопротивления цепи "экран-земля", которое включает в себя продольное сопротивление экрана и сопротивление заземлений и при увеличении индуктивности цепи, состоящей из внутренней индуктивности экрана и внешней индуктивности цепи "экран-земля".

При протекании тока во влияющей линии  $I_1$  (рис.4) магнитное поле наводит продольные ЭДС в оболочке кабеля (экране)  $E_3$ - и жиле кабеля  $E_{ж}$ . Под действием ЭДС наведенной в экране, в цепи образованной заземлениями экрана потечет ток  $I_3$ ,

наводящий в жиле ЭДС  $E'_{\text{ж}}$  направленную встречно ЭДС  $E_{\text{ж}}$ , при этом происходит их взаимокompенсация. Чем больше угол  $\varphi$ , тем выше экранирующий эффект. С ростом частоты эффективность экранирования за счёт продольных токов уменьшается и диапазон частот, в котором рассматривается КЗД, обычно не превышает 10 кГц для оболочек из немагнитных материалов, а для магнитных - до 1 кГц.

Корректор Вяткина С.С.  
Подписано к печати 27.06.01  
Печ. лист 0,8., тир. 100 экз.  
Зак.249, ПГАТИ, ул. Л. Толстого, 23.