

## СОДЕРЖАНИЕ

<u>1. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ</u>	2
<u>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1</u>	4
<u>1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ</u>	4
<u>2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ</u>	9
<u>2.1. УСТРОЙСТВО ПРИБОРА П-321</u>	9
<u>2.2. ПОДГОТОВКА ПРИБОРА П – 321 К РАБОТЕ</u>	13
<u>2.3. ПОРЯДОК РАБОТЫ С ПРИБОРОМ</u>	14
<u>3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА</u>	14
<u>4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ</u>	15
<u>5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА</u>	15
<u>6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ</u>	16
<u>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2</u>	17
<u>1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ</u>	17
<u>2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ЭКРАНИРОВАНИЯ</u>	17
<u>2.1. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ</u>	18
<u>2.2. МАГНИТОСТАТИЧЕСКОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ</u>	19
<u>2.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ</u>	21
<u>3. РАСЧЁТ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРА- НОВ</u>	22
<u>4. МАГНИТНЫЙ И НЕМАГНИТНЫЙ ЭКРАНЫ</u>	24
<u>5. МНОГОСЛОЙНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ</u>	24
<u>6. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ</u>	25
<u>7. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ</u>	26
<u>8. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА</u>	28
<u>9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ</u>	28

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
“Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники”

Кафедра систем телекоммуникаций

**В.Н. Мищенко**

*Измерение параметров передачи электрических кабелей*

**Лабораторный практикум  
по дисциплинам**

“Направляющие системы телекоммуникаций” и  
“Направляющие системы и пассивные компоненты”  
для студентов специальностей

I–45 01 01 “Многоканальные системы телекоммуникаций”,

I–45 01 02 “Радиосвязь, радиовещание и телевидение”,

I–45 01 03 “Сети и устройства телекоммуникаций”

**Минск 2005**

УДК 621.395.126(075.8)

ББК 32.889 я 7

М 71

**Мищенко В.Н.**

М 71 Измерение параметров передачи электрических кабелей: Лаб. практикум по дисц. "Направляющие системы телекоммуникаций" и "Направляющие системы и пассивные компоненты" для студ. спец. I-45 01 01 "Многоканальные системы телекоммуникаций", I-45 01 02 "Радиосвязь, радиовещание и телевидение", I-45 01 03 "Сети и устройства телекоммуникаций". Мн.: БГУИР, 2005. – 30 с.: ил.

ISBN 985-444-886-X

Лабораторный практикум объединяет две лабораторные работы, связанные с измерением затухания кабелей и с исследованием способов и методов экранирования электрических кабелей.

**УДК 621.395.126(075.8)**

**ББК 32.889 я 7**

ISBN 985-444-886-X

© Мищенко В.Н., 2005

© БГУИР, 2005

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ИЗМЕРЕНИЕ СОБСТВЕННОГО И РАБОЧЕГО ЗАТУХАНИЯ ЦЕПЕЙ СВЯЗИ ПРИБОРОМ П - 321

*Цель работы:* получить практические навыки в измерении собственного и рабочего затухания сигналов с помощью прибора П - 321.

*Задания к работе:*

1. Изучить устройство, принцип работы и правила пользования прибором П - 321.
2. Произвести измерения собственного и рабочего затухания в цепях связи различной длины на различных частотах.
3. Построить графики зависимостей затухания цепи связи от её длины и частоты.
4. Дать анализ полученных результатов в выводах по работе.

#### 1. Краткие теоретические сведения

Электромагнитная энергия, распространяясь вдоль кабельной линии, затухает к концу линии. Это объясняется потерями в цепи передачи. Эти потери в основном складываются из потерь в металлических элементах кабеля (токопроводящие жилы, экран, броня, оболочка) и потерь в диэлектрике (изоляции). В области очень высоких частот возникают потери на излучение.

Потери в цепи передачи учитываются через коэффициент распространения  $\gamma$ , который является комплексной величиной и может быть представлен как

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta, \quad (1.1)$$

где  $R, G, L, C$  – первичные параметры передачи кабельной цепи,  $\omega$  – частота, а параметры  $\alpha$  и  $\beta$  характеризуют соответственно затухание и изменение фазы напряжения или тока на участке кабельной цепи длиной  $l$  км и называются коэффициентом затухания  $\alpha$  и коэффициентом фазы  $\beta$ . Таким образом, коэффициент распространения  $\gamma$  одновременно определяет изменение сигнала как по абсолютной величине, так и по фазе на 1 км длины кабеля.

В соответствии с изложенным выше коэффициент затухания  $\alpha$  может быть представлен в виде суммы трех слагаемых:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_\delta + \alpha_u, \quad (1.2)$$

где  $\alpha_m \sim \sqrt{f}$  – затухание за счет потерь в металле,  $\alpha_\delta \sim f$  – затухание за счет потерь в диэлектрике и  $\alpha_u \sim f^2$  – затухание за счет потерь на излучение, причем для симметричной цепи

$$\alpha_m = 8,69(R/2)\sqrt{C/L} = 2,6\sqrt{f\varepsilon_r}(1/2r + r/a^2)/\lg[(a-r)/r], \quad (1.3)$$

$$\alpha_\delta = 8,69(G/2)\sqrt{L/C} = 9,08f\sqrt{\varepsilon_r}\operatorname{tg}\delta 10^{-5}, \text{ дБ/км.} \quad (1.4)$$

В формулах (1.3), (1.4) параметры  $r$  – радиус проводника, мм;  $a$  – расстояние между осями проводников, мм;  $f$  – частота, Гц;  $\varepsilon_r$  – эффективная диэлектрическая проницаемость изоляции проводников,  $\operatorname{tg}\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь изоляции.

В практически используемом спектре частот передачи (до 1 МГц в случае симметричных кабелей) и с учетом экранирующего действия металлической оболочки кабеля составляющей  $\alpha_u$  можно пренебречь. В этом же спектре частот для современных высококачественных кабельных диэлектриков типа полиэтилен, полистирол, имеющих малый  $\operatorname{tg}\delta$ , величина  $\alpha_\delta$  незначительна по сравнению с  $\alpha_m$ , и поэтому затухание  $\alpha$  увеличивается пропорционально  $\sim \sqrt{f}$ .

Если в начале цепи длиной  $l$  включен генератор с внутренним сопротивлением  $Z_0$ , в конце цепи имеется нагрузка  $Z_l$  и обеспечен согласованный режим (т.е.  $Z_0 = Z_l = Z_в$ , где  $Z_в$  – волновое сопротивление цепи), то основные уравнения однородной кабельной цепи упрощаются и принимают вид:

$$U_l = U_0 \cdot e^{-\gamma l}, I_l = I_0 \cdot e^{-\gamma l}, P_l = P_0 \cdot e^{-2\gamma l}, \quad (1.5)$$

где  $U_0, I_0, P_0$  – напряжение, ток и мощность в начале, а  $U_l, I_l, P_l$  – в конце цепи. Используя формулу (1.5), можно написать

$$U_0 / U_l = I_0 / I_l = e^{(\alpha + j\beta)l} = e^{\alpha l} \cdot e^{j\beta l} = M \cdot e^{j\varphi}. \quad (1.6)$$

Модуль этого выражения  $M$  показывает уменьшение абсолютного значения тока или напряжения при прохождении сигнала по линии длиной  $l$ . Аргумент  $\varphi = \beta l$  показывает изменение угла (фазы) вектора тока или напряжения на этом же участке линии длиной  $l$ .

Величина  $a_c = \alpha l$  называется собственным затуханием цепи и оценивается в неперах

$$a_c = \alpha l = \ln|U_0/U_l| = \ln|I_0/I_l| = (1/2) * \ln|P_0/P_l|, \text{ Нп} \quad (1.7)$$

или децибелах

$$a_c = \alpha l = 20 \lg|U_0/U_l| = 20 \lg|I_0/I_l| = 10 * \lg|P_0/P_l|, \text{ дБ}. \quad (1.8)$$

Однако в реальной линии связи вследствие несогласованности сопротивлений  $Z_0$  и  $Z_l$  с волновым сопротивлением цепи  $Z_в$ , а также наличия внутренних (в пределах строительной длины кабеля) и стыковых (в соединительных муфтах) неоднородностей, дальность связи будет определяться не собственным затуханием линии  $a_c = \alpha l$ , а ее рабочим затуханием  $a_p$ . Если не учитывать стыковые и внутренние неоднородности кабеля, то

$$a_p = a_c + a_n + a_k + a_в, \quad (1.9)$$

где  $a_c$  – собственное затухания цепи;  $a_n$  – дополнительное затухание вследствие несогласованности сопротивлений генератора и кабеля ( $Z_0 \neq Z_e$ );  $a_k$  – дополнительное затухание вследствие несогласованности сопротивлений нагрузки и кабеля ( $Z_l \neq Z_e$ );  $a_e$  – дополнительное затухание от взаимодействия неоднородностей в начале и в конце цепи вследствие повторных отражений на передающем и приемном концах цепи, причем

$$a_n = \ln \left| (Z_0 + Z_e) / (2 \cdot \sqrt{Z_0 \cdot Z_e}) \right| ; \quad (1.10)$$

$$a_n = \ln \left| (Z_l + Z_e) / (2 \cdot \sqrt{Z_l \cdot Z_e}) \right| ; \quad (1.11)$$

$$a_e = \ln |1 - P_0 \cdot P_l \cdot \exp(-2 \cdot \gamma \cdot l)| ; \quad (1.12)$$

$$P_0 = (Z_0 - Z_e) / (Z_0 + Z_e) ; \quad (1.13)$$

$$P_l = (Z_l - Z_e) / (Z_l + Z_e). \quad (1.14)$$

В (1.12)  $P_0$  и  $P_l$  – коэффициенты отражения на стыках "генератор–кабель" и "приёмник–кабель". Появление слагаемого  $a_e$  в (1.9) объясняется тем, что волна, отраженная от конца линии, приходит к ее началу и, взаимодействуя с падающей волной, изменяет соотношение напряжения  $U_0$  и тока  $I_0$  в начале линии, что равносильно изменению входного сопротивления линии  $Z_{вх} = U_0/I_0$ . Для  $Z_{вх}$  существует выражение

$$Z_{вх} = Z_e \operatorname{th} [\gamma l + 0,5 \ln(1/P_l)], \quad (1.15)$$

из которого следует, что в случае согласованной нагрузки  $Z_l = Z_e$  коэффициент отражения  $P_l = 0$  и  $Z_{вх} = Z_e$ ,  $a_k = 0$ ,  $a_e = 0$ ,  $a_p = a_c + a_n$ . Для электрически длинной линии, когда справедливо соотношение  $|\gamma l| \gg 1$ , при любой нагрузке на ее конце  $Z_{вх} = Z_e$ ,  $a_e = 0$  и  $a_p = a_c + a_n + a_k$ .

Обычно необходимо знать затухание усилительного участка. При высокочастотной связи собственное затухание цепи  $a l$  на длине усилительного участка доходит до 6–7 Нп, и в этом случае  $a_e$  можно считать равным нулю, по-

сколькx волна, отраженная от нагрузки, при распространении к генератору практически полностью затухает и не влияет на входное сопротивление кабеля, подключенного к генератору.

В общем случае в (1.9) появятся два дополнительных слагаемых  $a_{вн}$  и  $a_{ст}$ , учитывающих потери на внутренних и стыковых неоднородностях линии связи.

Если на обоих концах цепи включены согласованные нагрузки, а отражение на внутренних и стыковых неоднородностях пренебрежимо мало, то рабочее затухание будет равно собственному затуханию, т.е.  $a_p = a_c = \alpha l$ .

Из (1.9) и физической картины явлений следует, что рабочее затухание в общем случае всегда больше собственного затухания ( $a_p > a_c = \alpha l$ ). Однако в некоторых случаях дополнительные слагаемые в (1.9) могут оказаться отрицательными и рабочее затухание будет меньше собственного ( $a_p < a_c = \alpha l$ ). Это может произойти на сравнительно низких частотах, когда волновое сопротивление  $Z_в$  линии комплексно, а сопротивление нагрузки ( $Z_0$  или  $Z_l$ ) и волновое сопротивление  $Z_в$  имеют фазы разных знаков, т.е. в случае сочетания сопротивлений емкостного и индуктивного характера.

Следует отметить, что передача сигналов связи по неоднородным линиям находится в неблагоприятных условиях и качество связи по ним может быть совершенно неудовлетворительным. Поэтому на практике всегда стремятся создать в линии связи согласованный режим, что является условием неискаженной передачи сигналов.

Для измерения собственного и рабочего затухания цепей связи существуют различные типы приборов, являющихся по существу измерителями уровня. Они, как правило, содержат генератор с фиксированной и/или плавной настройкой и указатель уровня и подразделяются на диапазонные и селективные. В диапазонных приборах указатель уровня является широкополосным с полосой пропускания, равной диапазону частот генератора.



Проведение измерений с помощью диапазонных измерителей уровня требует прекращения передачи сигналов связи по кабелю, поскольку в противном случае указатель уровня будет принимать не только сигнал измерительного генератора, но и сигналы связи и его показания будут не правильными. Можно, конечно, выбрать уровень сигнала генератора много большим уровня сигналов связи и с помощью пороговых устройств осуществить в указателе уровня выделение сигнала генератора, однако при этом не будет обеспечено необходимое качество связи, т.к. мощный сигнал измерительного генератора будет забивать относительно слабый сигнал связи. Примером диапазонных измерителей уровня являются отечественные приборы П-321, НУ-1С и др.

В селективных приборах используется перестраиваемый резонансный указатель уровня с полосой пропускания 100...200 Гц, что позволяет измерять уровень сигнала измерительного генератора, а значит и затухания цепей связи, без перерыва действия связей. Селективные измерители уровня являются более универсальными приборами, чем диапазонные измерители уровня, полностью заменяют последние и получили наибольшее распространение в организациях, осуществляющих эксплуатационно-техническое обслуживание линий связи. Примером селективных измерителей уровня являются отечественные приборы ИП-300, КС-25 и зарубежные ЕТ-70, ЕТ-90 (переносные), ЕТ-100, ЕТ-110 производства Венгрии (стационарные для линейно-аппаратных цехов), стационарные MV-61, MV-62, PVA-60 производства Германии.

## **2. Методические указания для выполнения работы**

### **2.1. Устройство прибора П-321**

Прибор П-321 предназначен для измерения остаточного затухания каналов связи в диапазоне частот от 0,3 до 3,4 кГц, а также рабочего затухания линии связи в диапазоне частот от 0,3 до 30 кГц. Прибор состоит из трех основных частей: генератора синусоидальных колебаний, указателя уровня и устрой-

ства питания. Генератор и указатель уровня при измерении могут использоваться совместно или независимо один от другого.

Структурная и функциональная схемы прибора приведены на рис. 1.1 и 1.2.

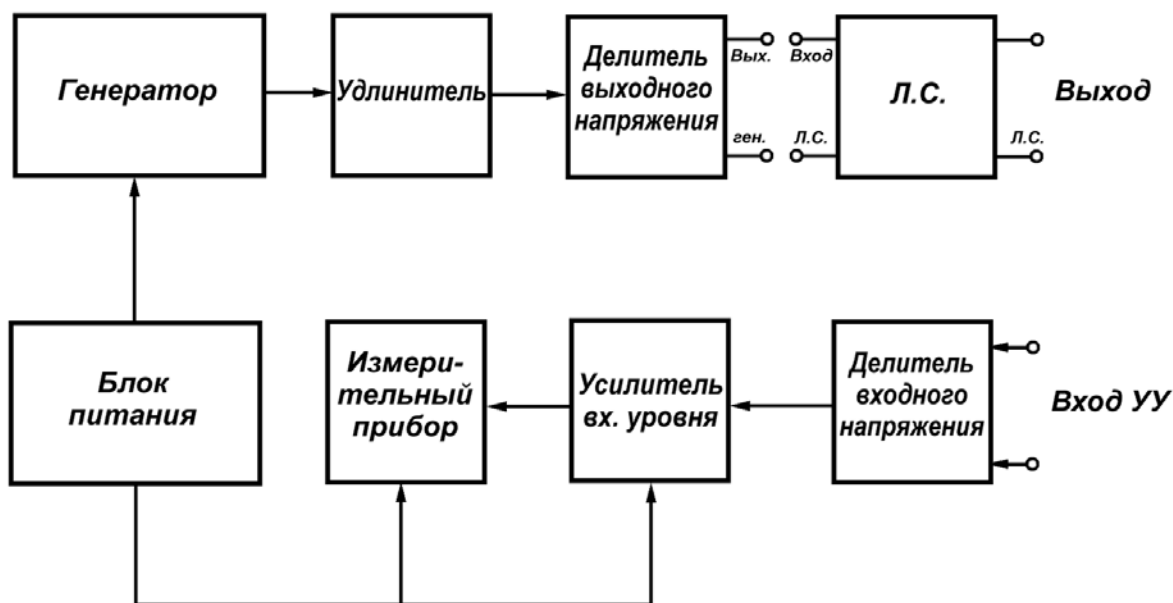


Рис. 1.1. Структурная схема прибора П-321

## Генератор

Генератор синусоидальных колебаний прибора работает на основной частоте, примерно равной резонансной частоте колебательного контура. Генератор служит для подачи в линию связи градуированных по уровню и частоте немодулированных сигналов. Генератор собран на транзисторе VT1 типа МП14Б, включенном по схеме с общим эмиттером, с трансформаторной обратной связью (см. рис. 1.2). Генератор имеет 24 фиксированные частоты от 0,3 до 30 кГц.

Колебательный контур включен в коллекторную цепь транзистора. Изменение частоты генератора производится изменением индуктивности катушки колебательного контура, имеющей отводы для каждой из генерируемых частот, а также изменением емкости контура.

Колебательный контур состоит из двух тороидальных катушек индуктивности с отводами, одна из которых включается на частотах 0,3...3,4 кГц, а другая – на частотах 4...30 кГц, и из соответствующих конденсаторов. По емкости весь диапазон частот делится на 7 поддиапазонов.

В генератор входит также усилитель мощности, который состоит из двух каскадов усиления: предварительного и выходного. Предварительный каскад усилителя собран на транзисторе типа МП14Б, включенном по схеме с общим коллектором. Такая схема имеет высокое входное и низкое выходное сопротивление, позволяет снять сигнал с генератора и подать его на сравнительно низкоомный вход выходного усилителя. Для того чтобы регулировка уровня генератора была частотно-независимой, в схеме каскада предварительного усиления используется высокочастотный транзистор, не вносящий частотной погрешности на рабочих частотах генератора.

Выходной каскад усилителя собран на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером. Выход усилителя – трансформаторный.

Выходной каскад обеспечивает без существенных частотных и нелинейных искажений уровень более 2 Нп во всем диапазоне рабочих частот. Для этой цели каскад ставится в режим работы класса А.

Между выходом усилителя мощности и магазином затухания включается симметричный удлинитель с затуханием  $a = 0,5$  Нп для приближения выходного сопротивления к 600 Ом при любом положении магазина затухания.

На выходе генератора включен магазин затухания для изменения выходного уровня от +1,5 до - 4,0 Нп. Магазин затухания собран по П-образной перекрытой схеме.

### **Указатель уровня**

Указатель уровня состоит из трех основных частей:

- а) входного устройства;
- б) усилительного устройства;
- в) детекторного устройства.

Входное устройство содержит входной трансформатор, делитель напряжения и входной согласующий каскад, входное сопротивление указателя уровня с помощью тумблера В4, размещенного на передней панели прибора, устанавливается равным 600 Ом или 10 кОм на любой рабочей частоте указателя уровня. Повышение входного сопротивления обеспечивается следующими путями:

1. Транзистор первого каскада VT4 включается по схеме с общим коллектором, имеющей наибольшее входное сопротивление в сравнении с другими схемами включения.

2. Входной трансформатор включается на понижение.

3. Делитель напряжения ( $R57, R58, R59-R62$ ) для переключения шкал в указателе уровня включается лишь на часть вторичной обмотки трансформатора. Значение шкал -4 Нп и -3 Нп достигается подключением базы входного транзистора на отводы вторичной обмотки входного трансформатора.

Сохранение высокого входного сопротивления указателя уровня на верхних частотах рабочего диапазона достигается применением в первом каскаде транзистора с высокой предельной частотой. Высокое входное сопротивление на низких частотах достигается выполнением входного трансформатора на сердечнике с большим значением магнитной проницаемости. При этом индуктивность первичной обмотки трансформатора составляет более 11 мГн.

Усилительное устройство состоит из трех каскадов (исключая 1-й каскад, не дающий усиления по напряжению, относимого ко входному устройству).

Два усилительных каскада включены по схеме с общим эмиттером, дающей наибольшее усиление по напряжению, а между ними включается каскад по схеме эмиттерного повторителя. Последний не дает усиления по напряжению, но включение его между каскадами с общим эмиттером очень выгодно, т.к. такой каскад согласовывает высокое выходное сопротивление предыдущего каскада со сравнительно низким входным сопротивлением последующего, обеспечивая высокий коэффициент передачи напряжения между каскадами.

При необходимости указатель уровня может быть использован как усилитель с коэффициентом усиления более 4,5 Нп на нагрузку 10 кОм. Этот усилитель может использоваться в широком диапазоне частот (от 0,3 до 36,0 кГц).

Детекторное устройство представляет собой выпрямитель, собранный по мостовой схеме на точечных полупроводниковых диодах типа Д2В, на выходе которого включается измерительный прибор типа М-263, проградуированный в Нп. Деления на шкале прибора нанесены от 0,1 Нп до -3,1 Нп, причем от +0,1 до -1,0 Нп через каждые 0,05 Нп, а от -1,0 до -3,1 Нп – через 0,1 Нп. Ток полного отклонения прибора 100 мкА. Класс точности 1,5. Внутреннее сопротивление прибора не более 900 Ом.

Катушка прибора при переноске шунтируется кнопкой КН, замыкающей цепь при закрытии крышки изделия.

## **2.2. Подготовка прибора П – 321 к работе**

1. Подключить питание соответствующим шнуром, находящимся на крышке прибора.
2. Корректором стрелочного прибора установить стрелку на отметку "-∞".
3. Переключатель "НЕП.УУ" поставить в положение "ГРАД ПИТ".
4. Включить тумблеры питания генератора и указателя уровня.
5. По шкале стрелочного прибора убедиться в соответствии напряжения источника питания установленной норме. При выходе стрелки за пределы синего сектора, поворотом шлица регулятора "ГРАД. ПИТ." ввести стрелку в пределы сектора.
6. Поставить переключатель "кГц" в положение "1,0".
7. Поставить переключатель "НЕП.УУ" в положение "ГРАД. ГЕН".
8. Поворотом ручки регулятора "ГРАД. ГЕН" установить стрелку прибора на красную риску (нулевую точку шкалы).
9. Поставить переключатель "НЕП.УУ" в положение "ГРАД.УУ".

10. Поворотом ручки регулятора "ГРАД. УУ" установить стрелку прибора на красную риску шкалы.

### **2.3. Порядок работы с прибором**

#### **Передача уровня**

1. Переключателем "кГц" установить требуемую частоту, а переключателем "НЕП. ГЕН" установить требуемый уровень.

2. Подключить цепи связи на клеммы "ВЫХ. ГЕН" прибора.

#### **Измерение уровня приема**

1. Поставить тумблер "600 Ом - ВЫСОКООМН." в положение, требуемое по условиям измерения.

2. Подать измеряемый уровень на клеммы "ВХОД. УУ". Если примерная величина измеряемого уровня неизвестна, следует предварительно установить переключатель "НЕП. УУ" в положение "+3". Затем, вращая этот переключатель, установить стрелку прибора в удобную для отсчета часть шкалы (от +0,1 до -1,0 Нп).

3. Отсчёт измеряемого уровня производится алгебраическим суммированием показаний стрелки прибора и величины, соответствующей положению переключателя "НЕП. УУ".

### **3. Описание лабораторного макета**

Лабораторный макет представляет собой набор искусственных линий, эквивалентных по параметрам передачи отрезкам симметричных кабелей связи различной длины, и корректоров, рассчитанных на различную величину затухания. Искусственные линии и корректоры, построены из Т-образных звеньев.

Путем коммутации искусственных линий и корректоров можно имитировать широкий набор кабелей различной длины и различного погонного затухания.

#### 4. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить устройство и принцип действия прибора П-321.
2. Произвести градуировку прибора П-321 (см. п. "Подготовка прибора к работе", "Порядок работы с прибором").
3. Установить на выходе генератора уровень сигнала, равный -1 Нп. С выхода генератора П-321 градуированный по частоте и уровню сигнал подается на вход измеряемой линии связи.
4. Произвести измерение собственных затуханий в линиях связи различной длины ( $l = 0,5; 1; 2; 5; 10; 20$  км) на различных частотах в диапазоне от 0,3 до 30 кГц, т.е. для 24 фиксированных значений при согласованном режиме на входе и выходе линии связи. Этот режим обеспечивается установкой переключателей, расположенных в нижней части макета, в нижнее положение. При этом обеспечивается равенство сопротивлений  $Z_0 = Z_l = Z_g$ .
5. Определить погонное (километрическое) затухание кабелей по известной длине и измеренному общему собственному затуханию и сравнить с известными табличными данными распространенных кабелей связи.
6. Снять зависимость рабочего затухания линии связи различной длины ( $l = 0,5; 1; 2; 5; 10; 20$  км) на различных частотах в диапазоне от 0,3 до 30 кГц, установив переключатели, расположенные в нижней части макета, в верхнее положение. При этом обеспечивается несогласованный режим работы линий связи и  $Z_0 \neq Z_l \neq Z_g$ .
7. Сравнить полученные значения результатов измерения по пп. 4 и 6.
8. Сделать выводы.

#### 5. Содержание отчета

Отчёт должен содержать:

1. Назначение, технические данные и структурную схему прибора П–321.
2. Таблицы с данными измерений затухания.
3. Экспериментальные графики зависимости собственного и рабочего затухания от частоты и длины линии связи.
4. Выводы по проделанной работе.

## **6. Контрольные вопросы**

1. Каковы физические причины затухания электромагнитной волны при ее распространении по линии связи?
2. Из каких слагаемых состоит коэффициент затухания и какова их зависимость от частоты?
3. Каково влияние затухания сигналов в линии связи на качество, экономичность и дальность связи?
4. В чём состоит разница между рабочим и собственным затуханиями и каково их соотношение друг с другом?
5. Какие виды неоднородностей существуют в линиях связи и каково их влияние на передачу сигналов?
6. Расскажите о существующих приборах для измерения затухания в линиях связи.

## **Литература**

1. Гроднев И.И., Курбатов Н.Д., Кочановский Л.Н. Линии связи. – М.: Радио и связь, 1995.
2. Гроднев И.И., Курбатов Н.Д. Линейные сооружения связи. – М.: Связь, 1974.
3. Гроднев И.И. Кабели связи. – М.: Энергия, 1985.



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N2

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

*Цель работы:*

1. Изучение принципа действия экранов при различных режимах экранирования.
2. Изучение методики расчёта и измерения параметров экранирования.
3. Практическое измерение параметров экранирования.

### 1. Краткие теоретические сведения

Помехозащищённость кабельных линий связи является необходимым условием для обеспечения надёжной и качественной связи и имеет особо важное значение при высокочастотной передаче информации. Качество и дальность связи зависят не только и не столько от затухания в линии, сколько от различного рода мешающих влияний.

Для защиты кабельных цепей от помех применяются такие методы, как скрутка, скрещивание и симметрирование, но наиболее радикальным способом является экранирование.

Экранирование предназначено для разделения влияющих и подверженных влиянию цепей металлическими перегородками (экранами). Экраны в кабельных цепях имеют, как правило, цилиндрическую конструкцию и выполняются из свинца, алюминия или стали. На рис. 2.1 показаны основные типы металлических экранов. Они могут выполняться либо из сплошного материала (рис. 2.1, а,б), либо иметь ленточную конструкцию или в виде металлической оплетки (рис. 2.1, в,г).

### 2. Основные принципы экранирования

Электромагнитное поле источника энергии, пересекая цепи, подверженные влиянию, наводит в них токи помех.

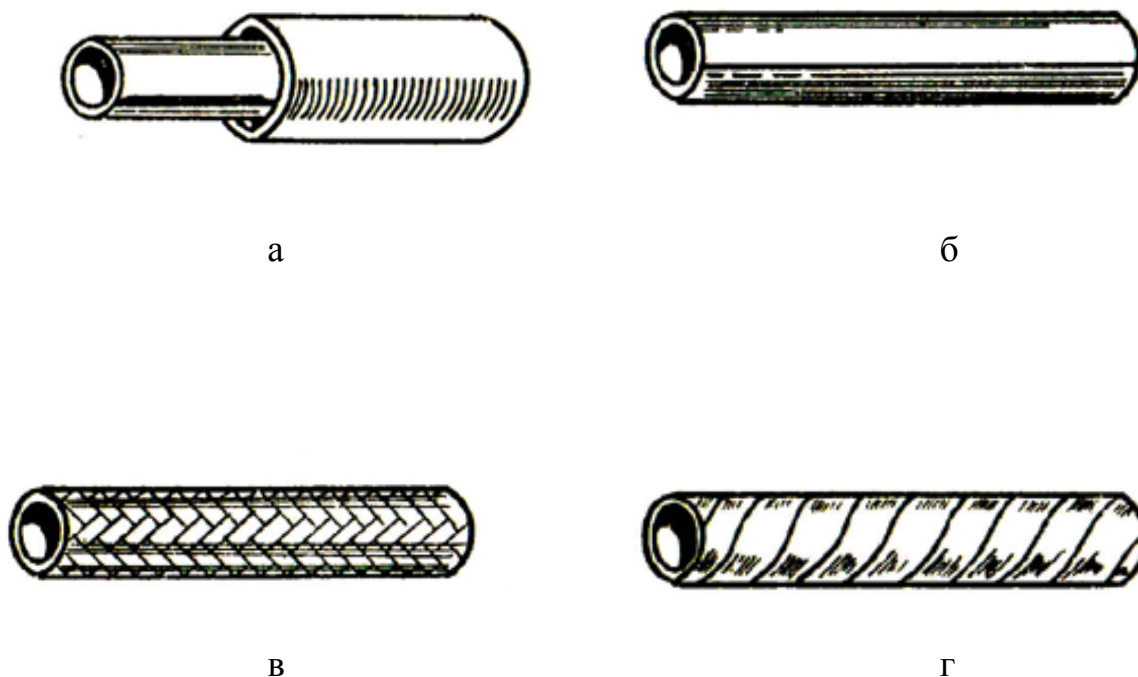


Рис. 2.1. Типы металлических экранов кабелей: а, б – сплошные; в - оплёточные, г – ленточные.

Экран оказывает защитное действие, локализуя электромагнитное поле, создаваемое источником помех, и предохраняет цепи связи от взаимного влияния, а также от посторонних источников электромагнитной энергии.

## 2.1. Электростатическое экранирование

Электростатическое экранирование сводится к замыканию электрического поля на поверхности металлического корпуса экрана, с которого электрические заряды стекают на землю. На рис. 2.2, а,б показан принцип электростатического экранирования.

Между влияющим проводом "а", несущим помеху, и проводом "б", подверженным влиянию, помещается экран, соединённый с землёй, который пере-

хватывает силовые линии электрического поля, защищая провод "б" от помех. Электростатическим экраном может служить любая заземлённая металлическая оболочка.

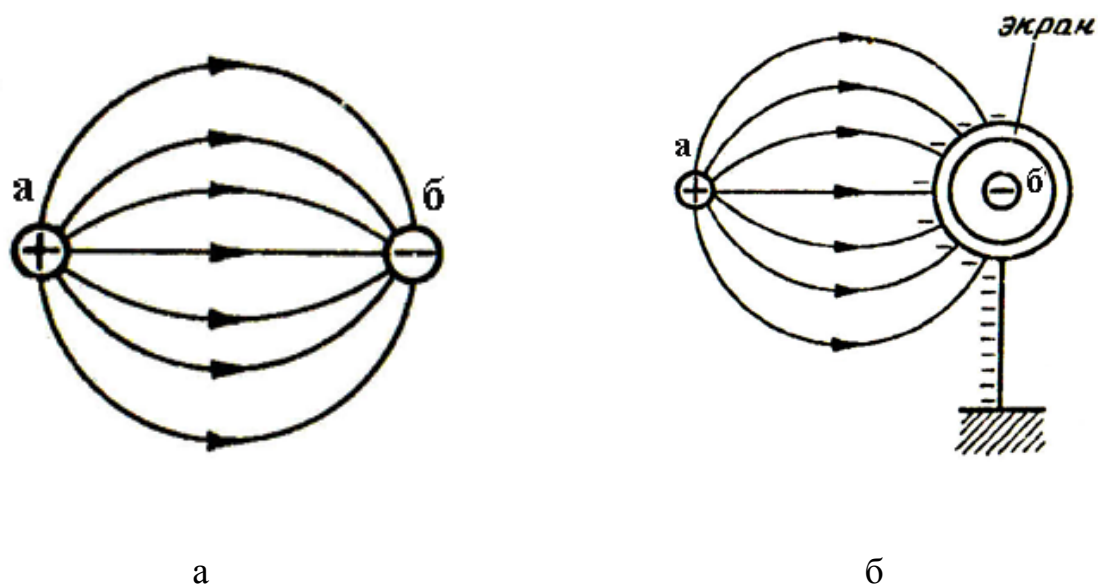


Рис. 2.2. Электростатическое экранирование: а – цепь без экрана, б – цепь с экраном

Данный тип экранирования обеспечивает идеальный экранирующий эффект при постоянном токе ( $f = 0$ ), с увеличением частоты его эффект уменьшается. Это объясняется природой экранирования статического поля и частотной зависимостью волнового сопротивления для электрической компоненты поля в диэлектрике

$Z_D^E = \frac{1}{i \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot r_э}$ , где  $\omega$  – частота,  $r_э$  – радиус экрана.

## 2.2. Магнитоэстатическое экранирование

Магнитоэстатическое экранирование проявляется в замыкании силовых линий магнитного поля в толще экрана, обладающего повышенной магнитопроводностью. Роль магнитоэстатического экрана могут выполнять лишь магнитные материалы, обладающие высокой магнитной проницаемостью, обычно это сталь или сталеникелевые сплавы (пермаллой).

На рис. 2.3, а показан принцип действия магнитоэкрана. Магнитные силовые линии, создаваемые проводом "а", замыкаются в толще магнитного экрана, обладающего малым магнитным сопротивлением, и не оказывают, таким образом, воздействия на провод "б". Эффективность магнитоэкранирования повышается с увеличением толщины экрана. Как всякая металлическая оболочка, магнитоэкранный экран может выполнять функции электростатического экрана. Немагнитные металлы (медь, алюминий, свинец) не могут выполнять функции магнитоэкрана, т.к. не способны концентрировать магнитные силовые линии.

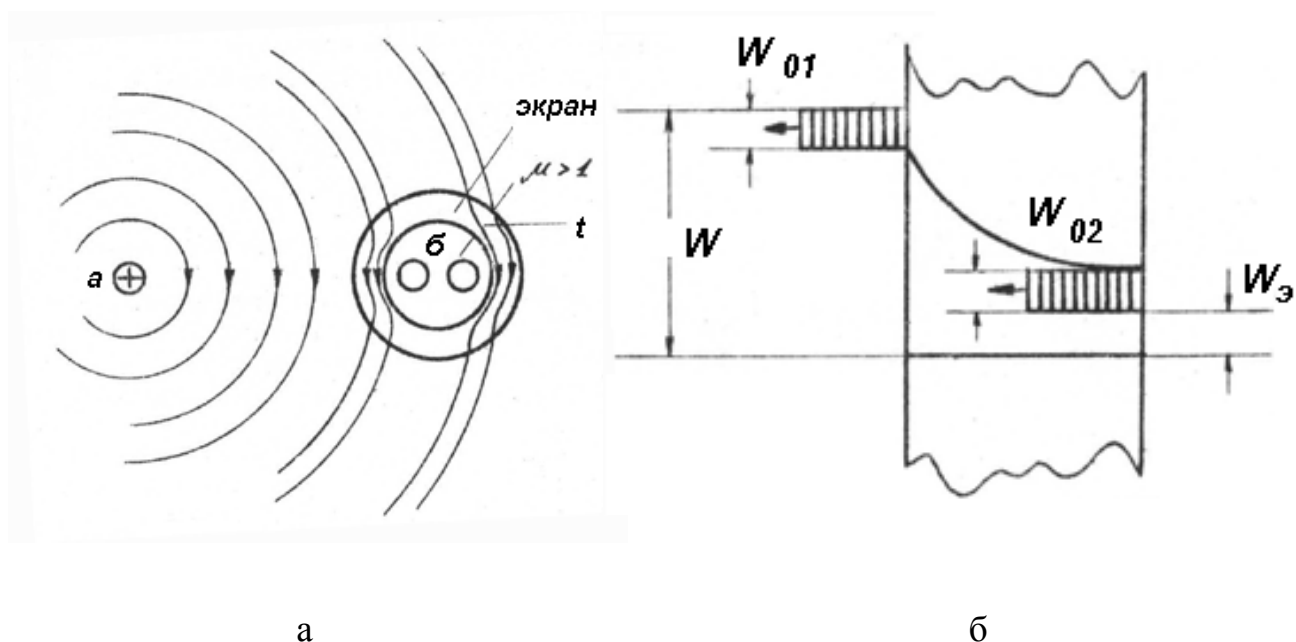


Рис. 2.3 Особенности различных видов экранирования: а – магнитоэкранирование, б – электромагнитное

Магнитоэкранные экраны так же, как и электрические, эффективны при постоянном токе и на низких частотах. С увеличением частоты возрастает роль вихревых токов в экране, магнитное поле вытесняется из толщины экрана и его повышенная магнитопроводность теряет своё значение.

Обобщая, можно сказать, что как электростатическое, так и магнитоэкранирование характеризуют стационарные и статические поля, которые действуют в диапазоне частот до 4 кГц.

### 2.3. Электромагнитное экранирование

Обособленный характер электрического или магнитного поля проявляется на малых расстояниях от источника – порядка длины волны  $\lambda$ . Так, для частоты  $10^9$  Гц  $\lambda = 0,3$  м, для  $f = 10^6$  Гц –  $\lambda = 300$  м. Вот почему зачастую решается задача экранирования какого-то одного поля. Преобладание электрических или магнитных составляющих электромагнитного поля обусловлено различными условиями.

Как правило, сильные магнитные поля характерны для цепей, которые имеют малое волновое сопротивление, сильные токи и малую разность потенциалов. Электрические поля, напротив, создаются в цепях с большим волновым сопротивлением, малыми токами и высоким напряжением.

Если электромагнитостатическое экранирование эффективно на низких частотах, то на высоких частотах экранирование возможно в электромагнитном режиме.

Действие электромагнитного экранирования основано на отражении электромагнитной волны от поверхности металлического экрана и затухании высокочастотной энергии в его толще. Затухание энергии в экране обусловлено тепловыми потерями на вихревые токи в металле. Отражение определяется несоответствием волновых сопротивлений различных соприкасающихся сред (в частности металла и диэлектрика).

Волновое сопротивление электромагнитной волны в свободном пространстве равно

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = 376,7 \text{ , Ом.} \quad (2.1)$$

Значения волновых сопротивлений диэлектриков и металлов, естественно, отличаются от этого значения. Чем больше различаются волновые сопротивления диэлектрика и металла, тем больше отражение электромагнитной волны и, следовательно, тем больше эффект экранирования.

На рис. 2.3, б показан принцип электромагнитного экранирования. Электромагнитная волна с энергией  $W$ , падая на экран (граница диэлектрик–металл), частично отражается ( $W_{01}$ ), частично проникает в толщу экрана, где постепенно затухает. Попадая на следующую границу металл–диэлектрик, она снова отражается ( $W_{02}$ ), и за пределы экрана попадает лишь незначительная часть энергии  $W_{03}$ .

Электромагнитное экранирование может осуществляться как с помощью немагнитных, так и магнитных экранов. Но из-за повышенных потерь, вносимых магнитными материалами в цепь передачи, немагнитные экраны являются более предпочтительными. Частотный диапазон электромагнитного экранирования лежит в области от  $10^3$ – $10^4$  до  $10^8$ – $10^9$  Гц.

### 3. Расчёт и характеристики электромагнитных экранов

Действие экрана определяется коэффициентом экранирования  $S$ , представляющим собой отношение напряжённости электромагнитного поля в какой-либо точке пространства при наличии экрана ( $E_{\text{э}}, H_{\text{э}}$ ) к напряжённости поля в этой же точке без экрана ( $E, H$ ):

$$S = \frac{E_{\text{э}}}{E} = \frac{H_{\text{э}}}{H} \quad (2.2)$$

Коэффициент экранирования изменяется от 1 до 0. Нуль означает идеальный экранирующий эффект.

В технике связи экранирующий эффект принято выражать не коэффициентом экранирования  $S$ , а экраным затуханием  $A$ , которое характеризует величину затухания, вносимого экраном, и выражается в децибелах или неперах.

$$A_{\text{э}} = 20 \lg \left| \frac{1}{S} \right| = 20 \lg \left| \frac{E}{E_{\text{э}}} \right| = 20 \lg \frac{H}{H_{\text{э}}} \quad , \text{ дБ.} \quad (2.3)$$

Очевидно, что, чем меньше коэффициент экранирования  $S$ , тем больше затухание экранирования  $A_{\text{э}}$ .

Расчёт параметров электромагнитного экрана осуществляется по формуле

$$S = \frac{1}{ch(k_m \cdot t)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left( \frac{Z_D}{Z_M} + \frac{Z_M}{Z_D} \right) \cdot th(k_m \cdot t)}, \quad (2.4)$$

где  $\frac{1}{ch(k_m \cdot t)}$  – коэффициент экранирования поглощения;

$\frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left( \frac{Z_D}{Z_M} + \frac{Z_M}{Z_D} \right) \cdot th(k_m \cdot t)}$  – коэффициент экранирования отражения;

$t$  – толщина экрана;

$Z_D^E = \frac{1}{i \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot r_s}$  – волновое сопротивления для электрической компоненты

поля в диэлектрике в диапазоне частот до  $10^8 - 10^9$  Гц;

$Z_D^H = i \cdot \omega \cdot \mu \cdot r_s$  – волновое сопротивления для магнитной компоненты поля в диэлектрике в диапазоне частот до  $10^8 - 10^9$  Гц;

$Z_M = \sqrt{\frac{i \cdot \omega \cdot \mu}{\sigma}}$  – волновое сопротивление металла.

Экранное затухание определяется по формуле

$$A_э = \ln \left| \frac{1}{S} \right| = A_n + A_0, \quad \text{Нп}, \quad (2.5)$$

где  $A_n = \ln \left| \frac{1}{S_n} \right| = \ln |ch \cdot (k_m \cdot t)|$  – затухание поглощения;

$A_0 = \ln \left| \frac{1}{S_0} \right| = \ln \left| 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{Z_D}{Z_M} + \frac{Z_M}{Z_D} \right) \cdot th(k_m \cdot t) \right|$  – затухание отражения.

Приведённые уравнения свидетельствуют о том, что с увеличением магнитной проницаемости  $\mu$  и проводимости экрана  $\sigma$  увеличивается экранирующий эффект.

#### 4. Магнитный и немагнитный экраны

Для режима электромагнитного экранирования могут использоваться как магнитные, так и немагнитные экраны. Однако эффективность их различна на разных частотах. На рис. 2.4 показаны характерные зависимости затухания экранирования немагнитного и магнитного экранов. В первой зоне при частотах от 0 до  $f = 3-10$  кГц магнитный экран действует как магнитостатический и обладает лучшими экранирующими свойствами, вторая и третья зоны соответст-

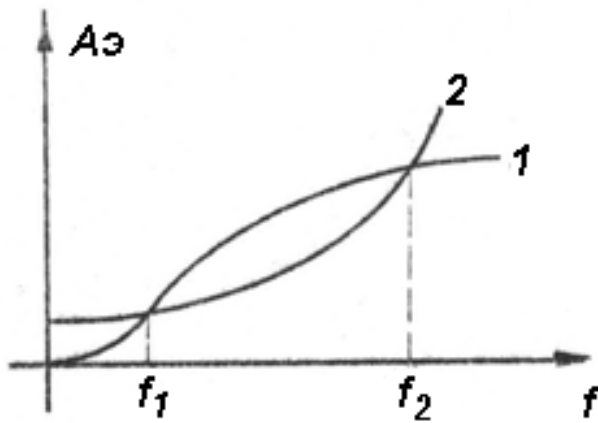


Рис. 2.4. Частотная зависимость экранирования немагнитных (1) и магнитных экранов (2).

ует электромагнитному режиму. Немагнитный материал, в сравнении с магнитным, обладает лучшими экранирующими свойствами во второй зоне (от  $f_1$  до  $f_2 \cong 10^6$  Гц) и худшими – в третьей (выше  $f_2$ ).

Это объясняется тем, что эффект поглощения волн у магнитных материалов преобладает над эффектом отражения, а у немагнитных – наоборот. Частота  $f \cong 10^6$  Гц является границей, ниже которой преобладает затухание отражения ( $A_o > A_n$ ), а выше – наоборот ( $A_n > A_o$ ).

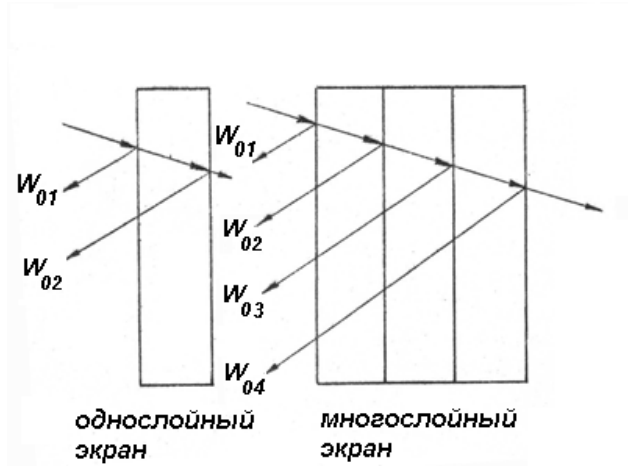


Рис. 2.5. Отражения энергии на границах однослойного и трёхслойного экрана.

#### 6. Многослойное экранирование



Для повышения эффективности экранирования можно увеличить толщину экрана, однако при этом возрастает потребление металла, утяжеляется конструкция кабеля и затрудняется эксплуатация. Аналогичного эффекта можно достичь, применив многослойное экранирование. Многослойный экран состоит из последовательно чередующихся магнитных и немагнитных материалов. На рис. 2.5 показан принцип многослойного экранирования. Особенностью его является то, что основной экранирующий эффект достигается за счёт многократного отражения электромагнитной энергии от границ между слоями, обладающими различными волновыми характеристиками:  $Z_D \neq Z_{M1} \neq Z_{M2} \neq Z_{M3} \neq Z_D$ . Экранирующий эффект за счёт поглощения невелик. Следует отметить также и то, что эффект экранирования зависит от порядка расположения различных металлов, так, например, сочетание сталь–медь–алюминий значительно уступает экрану типа медь–сталь–алюминий.

## 7. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для исследования эффективности экранирования состоит из внешнего генератора гармонических сигналов, милливольтметра ВЗ-38, а также лабораторного макета. На переднюю панель лабораторного макета выведены входные гнезда Г1 (для подключения внешнего генератора сигналов), а также гнезда Г2 – Г11 для подключения милливольтметра ВЗ-38, которым измеряются напряжение, приложенное к внешней оболочке кабеля –  $U$  и наведённое на проводниках кабеля, помещенного в экран –  $U_{\text{Э}}$ .

Работа лабораторной установки основана на измерении продольной ЭДС, наведенной в проводниках за счёт электромагнитного поля, созданного источником помех. В качестве источника помех служит генератор сигналов, создающий внешнее электромагнитное поле. Электромагнитное поле, создаваемое источником помех (генератором), пересекая экран, наводит во внутренних проводниках напряжение, которое измеряется милливольтметром. На переднюю

панель лабораторного макета выведены гнезда Г2 и Г3, которые предназначены для контроля напряжения, подаваемого от внешнего генератора. Измеренные значения напряжений на гнездах Г3 – Г11 используются для определения коэффициента экранирования ( $S$ ) и экранного затухания ( $A_{\text{э}}$ ) по формулам

$$A_{\text{э}} = \ln \left| \frac{1}{S} \right| = \ln \left| \frac{U}{U_{\text{э}}} \right|, \text{ Нп.} \quad (2.6)$$

Переключатель П1 служит для коммутации внешнего приложенного напряжения при выборе образца кабеля для измерений.

## 7. Порядок выполнения работы

1. Подготовить к работе генератор ГЗ-118 и милливольтметр ВЗ-38 в соответствии с инструкциями по эксплуатации. Включить милливольтметр ВЗ-38 и генератор ГЗ-118 и дать им прогреться в течение 5 минут. На передней панели генератора ГЗ-118 установить переключатели и тумблеры в следующие положения:

- переключатель "Множитель-частота" – в положение  $10^3$ ,
- переключатель "Расстройка + -" – в среднее положение,
- плавный регулятор уровня – в произвольное положение,
- трёхразрядный переключатель частоты – в положение "10,0 кГц", что обеспечивает установку частоту колебаний равной 10 кГц, с учётом значения декадно-го множителя частоты, установленного ранее.

2. Провести измерения коэффициентов экранирования и экранного затухания для кабелей по методике, изложенной ниже. Ручку переключателя П1, расположенную на передней панели лабораторного макета, поставить в положение "1". Подключить выход генератора, обозначенный символом " $\rightarrow 1$ ", к гнезду Г1 лабораторного макета. При этом корпус генератора соединяется с корпусом лабораторной установки при подсоединении штекера, обозначенного символом " $\perp$ " к нижнему контакту гнезда Г1.

3. Подключить милливольтметр ВЗ-38 к гнезду Г3. Измерить величину напряжения  $U$ , размерность [В], и записать это значение в таблицу. После этого милливольтметр ВЗ-38 подключить к клеммам Г5, при этом сигнальный вход этого прибора должен быть подключен к левой клемме гнезда Г5. Соединить гнездо Г2 с гнездом Г4 (первый исследуемый кабель) внешними соединительными проводниками. При этом нижняя клемма гнезда Г2 (корпус установки) должна быть соединена с правой клеммой гнезда Г4. Измерить величину напряжения  $U_{\text{Э}}$  с помощью прибора ВЗ-38. Полученное значение записать в таблицу. Аналогичные измерения с шагом 10 кГц провести и для других контрольных точек в диапазоне до 90 кГц. Все данные измерений для первого кабеля записать в таблицу.

4. Повторить измерения, описанные в пунктах 1 – 4, для других типов кабелей, устанавливая переключатель П1 соответственно в положения 2 – 4 и соединяя гнезда Г2 с гнездами Г6, Г8, Г10, выбирая тем самым другие образцы кабелей. При этом величина напряжения  $U_{\text{Э}}$  измеряется на гнездах Г7, Г9, Г11 соответственно. Занести в таблицу все значения измеренных параметров  $U_{\text{Э}}$  и  $U$ .

5. Рассчитать значения  $S$  и  $A_{\text{Э}}$  по формуле (2.6) и занести данные в таблицу.

6. По данным измерений построить графики зависимости:  $S = \varphi(f)$ ;  
 $A_{\text{Э}} = \varphi(f)$  для всех образцов кабелей.

7. По окончании измерений выключить генератор и милливольтметр ВЗ-38, сделать выводы по проделанной работе, оформить отчёт.

## Результаты измерений

$f$ , кГц	10				20				—//—	90			
Параметры	$U_{\text{Э}}$	$U$	$S$	$A_{\text{Э}}$	-	-	-	-//-	—//—	-	-	-	-//-
	В	В		дБ	//	/	//		—	//	//	//-	
					-	-	-			-	-		
№ ка- беля									—//—				
									—				

## 8. Содержание отчёта

1. Цель работы и задание по лабораторной работе.
2. Типы исследуемых кабелей.
3. Таблица и графики с результатами измерений.
4. Заключение в виде выводов.

## 9. Контрольные вопросы

1. Для каких целей используется экранирование?
2. В чем заключается принцип действия электростатического экрана?
3. В чем заключается принцип действия магнитостатического экрана?
4. В чем заключается принцип действия электромагнитного экрана?
5. Магнитные и немагнитные экраны.
6. Как влияет частота на эффективность действия магнитных и немагнитных экранов?
7. В чем суть многослойного экранирования?
8. Как определяется коэффициент экранирования?
9. Как определяется экранное затухание?

## Литература

1. Гроднев И.И., Курбатов Н.Д., Кочановский Л.Н. Линии связи. – М.: Радио и связь, 1995.
2. Гроднев И.И., Курбатов Н.Д. Линейные сооружения связи. – М.: Связь, 1974.
3. Гроднев И.И. Кабели связи. – М.: Энергия, 1985.

**Учебное издание**

**Мищенко Валерий Николаевич**

**Измерение параметров передачи электрических кабелей**

**Лабораторный практикум  
по дисциплинам "Направляющие системы телекоммуникаций"  
и "Направляющие системы и пассивные компоненты"  
для студентов специальностей  
I-45 01 01 "Многоканальные системы телекоммуникаций",  
I-45 01 02 "Радиосвязь, радиовещание и телевидение",  
I-45 01 03 "Сети и устройства телекоммуникаций"  
всех форм обучения**

**Редактор Е. Н.Мирошниченко**

Корректор

---

Подписано в печать

Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная.

**Печать ризографическая.  
Усл. печ. л. 1,2.**

**Гарнитура Таймс  
Тираж 150 экз.**

**Уч. изд. л. 1,5.  
Заказ 566**

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
"Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"  
Лицензия на осуществление издательской деятельности N02330/0056964 от 01.04.2004  
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности N02330/0131518 от 30.04.2004  
220013, Минск, П. Бровка, 6