

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Томский государственный университет систем управления и радио-  
электроники"  
ТУСУР**

**Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧиКР)**

**Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств**

**ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ЛИНИЙ СВЯЗИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ И ЭЛЕК-  
ТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ**

**Руководство к лабораторной работе для студентов специальности  
210302**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Томский государственный университет систем управления и радио-  
электроники"  
ТУСУР**

**Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧиКР)**

**Утверждаю  
Зав. кафедрой СВЧиКР  
\_\_\_\_\_ С.Н. Шарангович  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2011**

**Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств**

**ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ЛИНИЙ СВЯЗИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ И ЭЛЕК-  
ТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ**

**Руководство к лабораторной работе для студентов специальности  
210302**

**Разработчики:  
проф. каф. СВЧиКР  
Е.С. Коваленко**

**Новая редакция:  
проф. каф. СВЧиКР  
\_\_\_\_\_ А.А. Тихомиров**

**2011**

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы	4
2. Введение.....	4
3. Математические модели линий передачи.....	5
4. Экспериментальное определение волновых параметров линий связи...	8
5. Порядок выполнения работы.....	10
6. Содержание отчета.....	11
7. Контрольные вопросы.....	11
8. Список литературы.....	12

## 1. Цель работы

Целью работы является ознакомление с методикой измерения волновых параметров линий связи с помощью измерителя неоднородностей линий P5-12; получение экспериментальных данных о скорости распространения и волновом сопротивлении коаксиального кабеля, витой пары и плоского кабеля; экспериментальное исследование процесса согласования линии связи.

## 2. Введение

Для обеспечения связи электрорадиоизделий (ЭРИ), размещаемых на плате и представляющих собой сосредоточенные элементы радиоэлектронных схем, используются монтажные соединения. ЭРИ включают в свой состав резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, трансформаторы, микросхемы, диоды, транзисторы и другие элементы. Монтажные соединения используются также для соединения плат, панелей, субблоков и блоков в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) и электронно-вычислительной аппаратуре (ЭВА). С точки зрения электродинамики и теории цепей эти соединения являются линиями связи (ЛС). По своей конструкции ЛС могут быть весьма разнообразными. Среди широко используемых монтажных соединений можно отметить проводной монтаж, при котором связь осуществляется с помощью многопроводных линий. Примером таких линий могут быть как многопроводные жгуты, состоящие из отдельных проводников (два и более) с изоляцией различного вида и формы, так и витые пары и плоский кабель (также состоящий из нескольких изолированных друг от друга проводников, располагаемых параллельно друг к другу). Важнейшим типом монтажных соединений является также печатный монтаж. Кроме того, соединения удаленных друг от друга ЭРИ, плат, блоков РЭА и ЭВА осуществляются коаксиальными кабелями.

Все эти виды ЛС отличаются конструкторской реализацией, техническими и экономическими показателями, а также *параметрами электромагнитной совместимости (ЭМС)* [1]. К параметрам ЭМС относятся: скорость распространения волны в линии, волновое сопротивление, эффективность экранирования. Эти параметры определяются *электрофизическими параметрами (ЭФП)* ЛС. Для решения вопросов внутриаппаратурной ЭМС необходимо уяснить роль, которую играют электрические соединения в конструкции аппаратуры, и их влияние на такие основные параметры изделия, как

чувствительность, быстродействие, уровень генерируемых помех, восприимчивость к ним и т.п.

### 3. Математические модели ЛС

С позиций ЭМС основными этапами конструирования монтажных соединений при системном подходе к проектированию аппаратуры являются [1, 4]:

1. Расчет ЭПФ одиночных линий связи.
2. Расчет ЭПФ, определяющих электромагнитное взаимодействие между линиями связи.
3. Построение математических моделей линий связи, плат, элементной базы, узлов и аппаратуры в целом, пригодных для компьютерного анализа.
4. Оценка помехозащищенности узлов с помощью расчета помех в линиях связи коммутационных плат и в межблочных соединениях и сопоставление рассчитанных значений помех с допустимыми значениями.

Решение перечисленных задач возможно только при использовании моделей линий и конструкции аппаратуры, обоснованных с позиции электродинамики. В случаях, представляющих практический интерес, при расчете параметров линий связи исходят из квазистатического приближения, что позволяет упростить решаемую задачу, сводя ее к статическому режиму. Это упрощает этап определения первичных электрических параметров линий связи: электрической емкости, индуктивности, активного сопротивления.

Линия с распределенными параметрами описывается следующими характеристиками:  $C_0$ ,  $L_0$  – собственные емкость и индуктивность на единицу длины линии, [Ф/м] и [Гн/м], соответственно;  $R_0$ ,  $G_0$  – сопротивление проводника и проводимость изоляции на единицу длины линии [Ом/м] и [См/м], соответственно;  $Z_0$  – волновое сопротивление линии [Ом];  $\gamma = \alpha + i\beta$  – постоянная распространения линии [1/м];  $\alpha$  – коэффициент затухания (потери в проводнике –  $\alpha_R$ , потери в диэлектрике –  $\alpha_D$ );  $\beta$  – фазовая постоянная;  $v_\phi = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$  – фазовая скорость [м/с];  $t_{з.р.л.} = 1/v_\phi = \sqrt{\mu\epsilon}$  – удельное время задержки распространения сигнала в линии, [с/м].

В ЛС с малыми потерями величины  $R_0$  и  $G_0$  – малы, и в первом приближении (когда исследователя не интересуют потери в ЛС) ими обычно пренебрегают. Величины  $Z_0$  и  $v_\phi$  являются вторичными параметрами ЛС, и для линии без потерь их можно выразить через собственные индуктивность  $L_0$  и емкость  $C_0$ :

$$Z_0 = \sqrt{L_0/C_0},$$

$$v_{\phi} = \sqrt{1/L_0 C_0}.$$

В системе связанных линий в качестве первичных параметров ЛС используют матрицу собственных  $L_{ii}$  и взаимных  $L_{ik}$  ( $i \neq k$ ) индуктивностей, а также одну из трех матриц:  $\alpha$  – матрица потенциальных коэффициентов;  $\beta$  – матрица емкостных коэффициентов и  $\epsilon$  – матрица частичных емкостей [4, 5]. Первичные параметры ЛС определяют скорости распространения нормальных волн, каждая из которых характеризуется некоторым распределением токов и напряжений проводников в линии. Кроме того, для каждой из нормальных волн может быть найдена матрица волновых сопротивлений, описывающая связи между напряжениями и токами линий.

Электрическое состояние линии передачи из  $N$  проводников характеризуется распределением потенциалов и токов по проводникам линии. Соотношение между ними, в общем случае, меняется при перемещении вдоль линии. Исключение составляет лишь нормальные волны ЛС. Это волны, бегущие вдоль линии, с определенным, заданным конструкцией линии передачи, распределением по проводникам токов и напряжений, одинаковым в любом поперечном сечении линии. Нормальных волн ровно столько, сколько сигнальных проводников образуют многопроводную линию. Каждая из нормальных волн характеризуется определенной скоростью распространения волны  $v_q$ , где  $q$  – номер нормальной волны. Если среда, в которой находятся проводники, однородна, то все  $v_q$  одинаковы.

Математическая модель нормальных волн многопроводной линии следует из основных уравнений длинных линий (телеграфных уравнений)

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i}{\partial x} &= -L_{ii} \frac{\partial I_i}{\partial t} + \sum_{i \neq k} L_{ik} \frac{\partial I_k}{\partial t}; \\ \frac{\partial I_i}{\partial x} &= -\beta_{ii} \frac{\partial U_i}{\partial t} + \sum_{i \neq k} \beta_{ik} \frac{\partial U_k}{\partial t}; \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $U_k$  – потенциал  $k$ -го проводника линии  $I_k$  – ток в проводнике.

Для нормальных волн уравнения (2.1) упрощаются и для волн, бегущих в  $+x$  направлении, дают математическую модель вида

$$\begin{aligned} U_i &= v_{\phi} \sum_k L_{ik} I_k; \\ I_i &= v_{\phi} \sum_k \beta_{ik} U_k; \end{aligned} \quad (2.2)$$

Из (2.2) следует, что скорости нормальных волн могут быть найдены из равенства нулю определителя

$$\left| \left( \begin{matrix} \mathcal{L} & \mathcal{C} \\ \mathcal{C} & \mathcal{L} \end{matrix} \right)_{ik} - \frac{1}{v_{\Phi}^2} \delta_{ik} \right| = 0, \quad (2.3)$$

где  $\mathcal{L}$ ,  $\mathcal{C}$  – матрицы взаимных индуктивностей и емкостей,  $\delta_{ik}$  – матричный элемент единичной матрицы.

Описание распространения волн в линиях связи на основе концепции нормальных волн является точным и полным. Однако оно очень громоздко. Поэтому в теории ЭМС используют более простые, но приближенные модели. Так для оценки наводок и помех от рассогласования полагают, что на генераторном конце возбуждение осуществляется только одной ЛС, образованной, например  $i$ -ым проводником и земляной шиной, и при рассмотрении волн в этой линии вторичным влиянием токов и напряжений в других линиях можно пренебречь. Тогда при описании процессов в этой линии можно использовать уравнения вида (2.2), принимая на основу систему параметров  $\mathcal{C}$  или  $\mathcal{L}$  в зависимости от того, являются ли все остальные линии с  $k \neq i$  близкими к режиму холостого хода или к режиму короткого замыкания. Описание работы пассивных линий в одноволновом приближении будет неправильным. Кроме вынужденных колебаний, распространяющихся со скоростью  $v_i$   $i$ -ой активной линии, необходимо учесть еще собственную волну пассивной линии, скорость которой  $v_k \neq v_i$ . При этом полное поле  $k$ -ой линии не имеет определенной скорости и для описания этого поля необходимо пользоваться не алгебраическими, а дифференциальными уравнениями (2.1.). Упрощение этих уравнений достигается тем, что при описании процессов в линии слагаемыми в (2.1), описывающими связь этой линии с другими пассивными линиями, пренебрегают. В результате система (2.1) распадается на уравнение, включающее в себя только токи и напряжения активной линии, и систему  $N - 1$  несвязанных друг с другом неоднородных уравнений для пассивных линий. Это существенно упрощает модель системы.

В соответствии с изложенным опишем два типа экспериментов. В первом из них будем возбуждать только линию  $i$ , а все остальные линии пусть будут разомкнуты с обоих концов. Тогда, при допущениях указанных выше, математической моделью для линии  $i$  будут уравнения

$$U_i = v_i L_{ii} I_i; \quad \bar{U}_i = \left( \frac{1}{v_i} \right) \alpha_{ii} I_i. \quad (2.4)$$

В силу идентичности двух уравнений в (2.4) для скорости распространения волны получим

$$v_i = \sqrt{\alpha_{ii}/L_{ii}}, \quad (2.5)$$

и входное сопротивление линии  $Z_i$  будет

$$Z_i = \sqrt{\alpha_{ii}L_{ii}}. \quad (2.6)$$

Эти соотношения определяют волновые параметры  $i$ -ой линии. Аналогично, заменив здесь  $i$  на  $k$ , получим параметры  $v_k$  и  $Z_k$  линии с номером  $k$ .

Проведем теперь следующий опыт. Подключим источник сигналов между сигнальными проводниками линий  $i$  и  $k$ . Тогда  $I_k = I_i$ , а все остальные токи можно не учитывать. В результате для волновых параметров такой линии получим выражения

$$v_{ik} = \sqrt{\frac{\alpha_{ii} + \alpha_{kk} - 2\alpha_{ik}}{L_{ii} + L_{kk} - 2L_{ik}}}; \quad (2.7)$$

$$Z_{ik} = \sqrt{(\alpha_{ii} + \alpha_{kk} - 2\alpha_{ik})(L_{ii} + L_{kk} - 2L_{ik})}. \quad (2.8)$$

Величины  $v_i$ ,  $v_k$ ,  $v_{ik}$  и  $Z_i$ ,  $Z_k$ ,  $Z_{ik}$  легко измеряются с помощью прибора Р5-12. Зная их, из приведенных соотношений найдем первичные параметры линий

$$\alpha_{ii} = v_i Z_i; \quad (2.9)$$

$$L_{ii} = Z_i / v_i; \quad (2.10)$$

$$\alpha_{ik} = (1/2)(v_i Z_i + v_k Z_k - v_{ik} Z_{ik}); \quad (2.11)$$

$$L_{ik} = (1/2)(Z_i/v_i + Z_k/v_k - Z_{ik}/v_{ik}); \quad (2.12)$$

Используя полученные значения  $\alpha_{ik}$  и  $L_{ik}$ , найдем коэффициенты емкостной и индуктивной связи

$$K_{ik}^C = \frac{\alpha_{ik}}{\sqrt{\alpha_{ii}\alpha_{kk}}}; \quad K_{ik}^L = \frac{L_{ik}}{\sqrt{L_{ii}L_{kk}}}. \quad (2.13)$$

В однородной среде  $v_i = v_k = v_{ik}$  и коэффициенты емкостной и индуктивной связи одинаковы, в неоднородной среде они различны.

#### 4. Экспериментальное определение волновых параметров линий связи

Для определения скорости распространения волн в линии связи, ее волнового сопротивления и коэффициентов индуктивной и емкостной связи с другими линиями используется измеритель неоднородностей линий Р5-12, являющийся импульсным рефлектометром наносекундного диапазона.

Суть метода импульсной рефлектомерии состоит в посылке в исследуемую линию зондирующего импульса с длительностью фронта около 1 нс и

наблюдении затем отраженных сигналов. Амплитуда отраженного сигнала от входа исследуемой линии зависит от разности волнового сопротивления  $Z_0$  подводящей сигнал линии и волнового сопротивления  $Z$  исследуемой линии. Отношение амплитуды отраженной волны  $U_{\text{отр}}$  к амплитуде падающей волны  $U_{\text{пад}}$  называется коэффициентом отражения  $\Gamma$  и определяется формулой

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}. \quad (3.1)$$

Так как амплитуды волн фиксируются на экране Р5-12, то величина  $\Gamma$  определяется как отношение

$$\Gamma = \frac{U_{\text{отр}}}{U_{\text{пад}}}.$$

Тогда используя формулу (3.1), находим

$$Z = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}. \quad (3.2)$$

В нашем случае величина  $Z_0 = 50$  Ом. Фиксируя далее разность моментов прихода волн отраженных от входа и выхода исследуемой линии, получим скорость волн в линии

$$v_{\text{ф}} = 2l / T_3, \quad (3.3)$$

где  $l$  – длина линии,  $T_3$  – разность времен прихода волн.

Пусть  $v_0$  – скорость волн в вакууме ( $v_0 = 3 \cdot 10^8$  м/с). Тогда отношение

$$\gamma = v_0 / v_{\text{ф}} \quad (3.4)$$

называется коэффициентом укорочения электромагнитной волны в линии. В приборе Р5-12 предусмотрен непосредственный отсчет  $\gamma$  и, следовательно, сделав отсчет  $\gamma$ , далее по формуле (3.4) легко определим  $v_{\text{ф}}$ .

С методикой измерений  $Z$  и  $\gamma$  необходимо более подробно ознакомиться по описанию прибора Р5-12.

Для определения параметров линий связи  $i$  и  $k$ , а также коэффициента связи между ними, следует провести три опыта.

1-й опыт: линия 1 ( $i = 1$ ) подключается с помощью кабеля РК-50 длиной 1 метр к выходу Р5-12. Все остальные линии разомкнуты. При этом условии измеренное волновое сопротивление  $Z_i = Z_1$  и укорочение  $\gamma_i = \gamma_1$  связываются с  $\alpha_{11}$  и  $L_{11}$  соотношениями (2.5), (2.6), (3.4).

2-й опыт: повторяется опыт 1 с той разницей, что вместо линии 1 подключается линия 2 и измеряются  $Z_2$  и  $\gamma_2$ , связанные с  $\alpha_{22}$  и  $L_{22}$ .

3-й опыт: те же измерения повторяются для линии, образованной сигнальными проводниками линий 1 и 2. Определяются  $Z_{12}$  и  $\gamma_{12}$ , связанные с  $\alpha_{12}$  и  $L_{12}$  формулами (2.7) и (2.8).

Обработка результатов измерений состоит в определении первичных параметров линий и коэффициентов связи с помощью формул (2.9) – (2.13).

Подобные измерения можно провести для любой пары линий.

Экспериментальные макеты для исследований размещены на двух платах. На одной плате размещен плоский кабель с разделанными 7-ю жилами, которые припаяны на монтажные лепестки и позволяют образовывать конфигурации ЛС в соответствии с рис. 1 и 2.

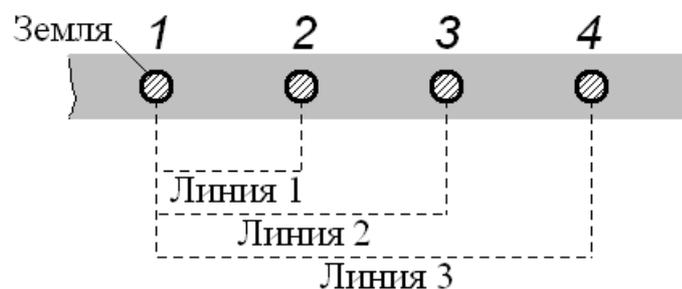


Рис. 1. Линии связи в плоском кабеле в устройствах низкого быстродействия



Рис. 2. Линии связи в плоском кабеле в устройствах повышенного быстродействия

На второй плате к монтажным лепесткам припаяны коаксиальные кабели с разными волновыми сопротивлениями и имеющие различную длину, а также экранированная витая пара.

## 5. Порядок выполнения работы

5.1. Ознакомьтесь с теоретической частью работы (разделы 3-4 данного описания).

5.2. Ознакомьтесь с описанием рефлектометра Р5-12, его характеристиками, устройством, назначением элементов управления и регистрации, расположенных на передней панели прибора, а также с порядком проведения измерений (п.10.4 описания прибора).

5.3. Проведите измерения для одиночной линии связи типа коаксиальный кабель. Определите волновое сопротивление  $Z$ , коэффициент укорочения  $\gamma$  и скорость распространения волны  $v$ . Согласуйте эту линию связи.

5.4. Проведите измерения параметров трех линий связи и определите их волновые сопротивления и коэффициенты укорочения в соответствии с методикой, изложенной в разделе 4. Измерения провести для случаев:

1) трех линий плоского кабеля, образованных общей земляной шиной (первый проводник кабеля) и сигнальными проводниками (2, 3, 4 проводники кабеля, рис. 1);

2) трех линий плоского кабеля, в которых проводники “земли” и сигнальные проводники чередуются.

5.5. Провести измерения параметров двух соседних витых пар в кабельной линии связи. Земляные проводники объединить.

5.6. Провести обработку результатов измерений по пп. 4.4 – 4.5. Определить коэффициенты  $\alpha_{ik}$ ,  $L_{ik}$ ,  $K_{ik}^C$  и  $K_{ik}^L$ . При проведении вычислений воспользоваться микрокалькулятором. Результаты свести в таблицу.

5.7. Провести сравнение полученных данных и сделать выводы.

## 6. Содержание отчета

6.1. Цель работы

6.2. Краткие сведения из теории многопроводных линий

6.3. Типы линий связи, их конструкции и способы включения.

6.4. Описание методики измерений

6.5. Таблицы измеренных значений параметров

6.6. Таблицы расчетных значений емкостных и индуктивных параметров, коэффициентов связи.

6.7. Общие выводы по проделанной работе.

## 7. Контрольные вопросы

7.1. Что такое нормальные волны многопроводной линии?

7.2. Каковы основные допущения при приближенном описании процессов в многопроводных линиях в теории ЭМС?

7.3. Какие основные величины являются волновыми параметрами многопроводных линий?

7.4. Приведите примеры линий связи, используемых в ЭВМ.

- 7.5. Как измеряется волновое сопротивление линии связи с помощью измерителя неоднородностей P5-12?
- 7.6. Как измеряется коэффициент укорочения линии связи?
- 7.7. Как определяется из экспериментальных данных скорость волн в линии?
- 7.8. Как определяются коэффициенты связи линий?
- 7.9. Как провести согласование линии связи по ее выходу?
- 7.10. Как должны различаться волновые параметры линий связи на рис. 1 и рис. 2.

## 8. Список литературы

1. Ефанов В.И., Тихомиров А.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем: Учеб. пособие. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2004. – 298 с.
2. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / Пер. с англ. В.С. Кармышев, Л.Н. Кечиев. М.: Издательский Дом "Технологии", 2003. – 540 с.
3. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие. – Томск: "ТМЛ-Пресс", 2007. – 256 с.
4. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учётом ЭМС. – М.: Радио и связь, 1989. – 224 с.
5. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / Под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 308 с.
6. Барнс Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. – 238 с.