

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

"Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники"

**ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЛИНИЙ СВЯЗИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ И
ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ**

2013

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

**"Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники"
(ТУСУР)**

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

Утверждаю
Зав. кафедрой СВЧиКР
_____ С.Н. Шарангович
" ____ " _____ 2013

**ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЛИНИЙ СВЯЗИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ И
ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ**

Руководство к лабораторной работе для подготовки бакалавров по направлению
210700.62 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи, профиль –
Системы радиосвязи и радиодоступа, дисциплина «Электромагнитная
совместимость и управление радиочастотным спектром»

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

Новая редакция:
проф. каф. СВЧиКР
_____ А.А. Тихомиров

Дополнил:
аспирант каф. СВЧиКР
_____ А.Ю. Попков

2013

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы	4
2. Введение.....	4
3. Математические модели линий связи.....	5
4. Экспериментальное определение волновых параметров линий связи...	9
5. Порядок выполнения работы.....	12
6. Содержание отчета.....	13
7. Контрольные вопросы.....	13
8. Список литературы.....	14
Приложение 1. Работа с измерителем неоднородностей линий передач P5-12.....	15

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 па-

раметры 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 линий связи

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]; α – коэффициент затухания (потери в проводнике – α_R , потери в ди-

электрике – α_n); β – 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_ϕ 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: $\hat{\alpha}$ – матрица потенциальных коэффициентов; $\hat{\beta}$ – матрица емкостных коэффициентов и \hat{N} – 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 находится проводники, однородна, то все v_q одинаковы.

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

$$\begin{aligned}\frac{\partial U_i}{\partial x} &= -L_{ii} \frac{\partial I_i}{\partial t} + \sum_{i \neq k} L_{ik} \frac{\partial I_k}{\partial t}; \\ \frac{\partial I_i}{\partial x} &= -\beta_{ii} \frac{\partial U_i}{\partial t} + \sum_{i \neq k} \beta_{ik} \frac{\partial U_k}{\partial t};\end{aligned}\quad (3.1)$$

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

Для нормальных волн уравнения (3.1) упрощаются и для волн, бегущих в $+x$ направлении, дают математическую модель вида

$$\begin{aligned}U_i &= v_\phi \sum_k L_{ik} I_k; \\ I_i &= v_\phi \sum_k \beta_{ik} U_k;\end{aligned}\quad (3.2)$$

Из (3.2) следует, что скорости нормальных волн могут быть найдены из равенства нулю определителя

$$\left| \left(\hat{L} \hat{\beta} \right)_{ik} - \frac{1}{v_\phi^2} \delta_{ik} \right| = 0, \quad (3.3)$$

где \hat{L} , $\hat{\beta}$ – матрицы взаимных индуктивностей и емкостей, δ_{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 (3.2), принимая на основу систему параметров $\hat{\alpha}$ или $\hat{\beta}$ 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 (3.1). Упрощение этих уравнений достигается тем, что при описании процессов в линии слагаемыми в (3.1), описывающими связь этой линии с другими пассивными линиями, пренебрегают. В результате система (3.1) 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

$$U_i = v_i L_{ii} I_i; \quad \bar{U}_i = \left(\frac{1}{v_i} \right) \alpha_{ii} I_i. \quad (3.4)$$

В силу идентичности двух уравнений в (3.4) для скорости распространения волны получим

$$v_i = \sqrt{\alpha_{ii} / L_{ii}}, \quad (3.5)$$

и входное сопротивление линии Z_i будет

$$Z_i = \sqrt{\alpha_{ii} L_{ii}}. \quad (3.6)$$

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

$$v_{ik} = \sqrt{\frac{\alpha_{ii} + \alpha_{kk} - 2\alpha_{ik}}{L_{ii} + L_{kk} - 2L_{ik}}}; \quad (3.7)$$

$$Z_{ik} = \sqrt{(\alpha_{ii} + \alpha_{kk} - 2\alpha_{ik})(L_{ii} + L_{kk} - 2L_{ik})}. \quad (3.8)$$

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

$$\alpha_{ii} = v_i Z_i; \quad (3.9)$$

$$L_{ii} = Z_i / v_i; \quad (3.10)$$

$$\alpha_{ik} = (1/2)(v_i Z_i + v_k Z_k - v_{ik} Z_{ik}); \quad (3.11)$$

$$L_{ik} = (1/2)(Z_i / v_i + Z_k / v_k - Z_{ik} / v_{ik}); \quad (3.12)$$

Используя полученные значения α_{ik} и L_{ik} , найдем коэффициенты емкостной и индуктивной связи

$$K_{ik}^C = \frac{\alpha_{ik}}{\sqrt{\alpha_{ii} \alpha_{kk}}}; \quad K_{ik}^L = \frac{L_{ik}}{\sqrt{L_{ii} L_{kk}}}. \quad (3.13)$$

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 $U_{отр}$ к амплитуде падающей волны $U_{пад}$ называется коэффициентом отражения Γ и определяется формулой

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}. \quad (4.1)$$

Так как амплитуды волн фиксируются на экране Р5-12, то величина Γ определяется как отношение

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

Тогда используя формулу (4.1), находим

$$Z = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}. \quad (4.2)$$

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

$$v_{\phi} = 2l / T_3, \quad (4.3)$$

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

$$\gamma = v_0 / v_{\phi} \quad (4.4)$$

называется коэффициентом укорочения электромагнитной волны в линии. В приборе Р5-12 предусмотрен непосредственный отсчет γ и, следовательно, сделав отсчет γ , далее по формуле (4.4) легко определим v_{ϕ} .

С методикой измерений Z и γ 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 условия измеренное волновое сопротивление $Z_i = Z_1$ и укорочение $\gamma_i = \gamma_1$ связываются с α_{11} и L_{11} соотношениями (3.5), (3.6), (4.4).

2-й опыт: повторяется опыт 1 с той разницей, что вместо линии 1 подключается линия 2 и измеряются Z_2 и γ_2 , связанные с α_{22} и L_{22} .

3-й опыт: те же измерения повторяются для линии, образованной сигнальными проводниками линий 1 и 2. Определяются Z_{12} и γ_{12} , связанные с α_{12} и L_{12} формулами (3.7) и (3.8).

Обработка результатов измерений состоит в определении первичных параметров линий и коэффициентов связи с помощью формул (3.9) – (3.13).

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.

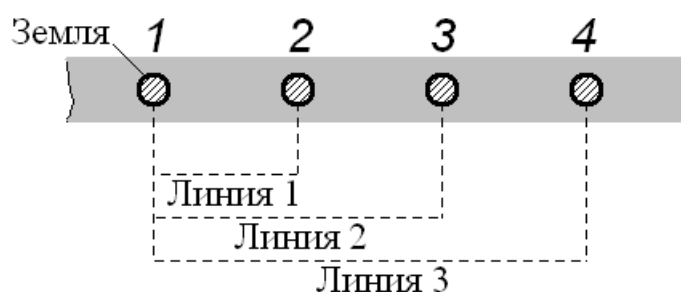


Рис. 1. Линии связи в плоском кабеле в устройствах низкого быстродействия



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 P5-12, 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 γ 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 α_{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. Краткий 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.

Работа с измерителем неоднородностей линий передач P5-12

Измеритель неоднородностей линий P5-12 является малогабаритным импульсным рефлектометром наносекундного диапазона. С его помощью можно измерить, в частности, расстояние до неоднородности линии передачи и ее длину в диапазоне частот до 500 МГц.

Метод импульсной рефлектометрии основан на посылке в измеряемую линию зондирующего импульса, который распространяется по линии с определенной скоростью, отражается от неоднородностей волнового сопротивления и возвращается к месту, откуда был послан.

Зондирующий импульс и отраженные сигналы воспроизводятся на индикаторе с временной разверткой луча.

Сигналы, отраженные от неоднородностей волнового сопротивления, будут смещены во времени относительно зондирующего в зависимости от расстояния до неоднородности.

По положению отраженных сигналов относительно фронта зондирующего сигнала определяют расстояние до неоднородностей:

$$l = \frac{vt_3}{2} = \frac{1}{2} \frac{c}{\gamma} t_3, \quad (\text{П.1})$$

где l – расстояние до неоднородности; v – скорость распространения электромагнитных волн (ЭМВ) в линии; t_3 – время распространения до неоднородности; c – скорость распространения ЭМВ в свободном пространстве; $\gamma = (c / v)$ – коэффициент укорочения ЭМВ в линии.

Неоднородностью волнового сопротивления является изменение какого-либо размера сечения линии или параметра диэлектрического заполнения.

Характер неоднородностей и коэффициент отражения от них определяют по форме и величине отраженных сигналов.

качестве зондирующего сигнала в современной импульсной рефлектометрии используются видеоимпульс и перепад напряжения.

Метод зондирования видеоимпульсом отличается высокой наглядностью при поиске и определении местоположения повреждений и отдельных крупных неоднородностей. При этом импульсная характеристика линии представляет собой производную распределения неоднородностей кабеля, т.е. отражения от начала и конца неоднородности.

Эффективность этого метода резко снижается при наличии в линии сложных неоднородностей – следующих друг за другом нескольких протяженных неоднородностей волнового сопротивления, плавного изменения волнового сопротивления вдоль линии, реактивных сопротивлений и др.

Метод зондирования линии перепадом напряжения дает полную картину изменения волнового сопротивления вдоль линии, импульсная характеристика получается тождественной фактическому распределению неоднородностей вдоль линии.

Под перепадом напряжения подразумевают видеоимпульс, длительность которого τ больше электрической длины измеряемой линии:

$$\tau > 2l / v, \quad (\text{П.2})$$

где l – длина линии; v – скорость распространения ЭМВ в линии.

На небольших длинах кабеля (линия без потерь) используют в качестве зондирующего сигнала перепад напряжения. На длинных линиях (с потерями) используют видеоимпульс.

Метод импульсной рефлектометрии позволяет определить КСВН линии по измеренному коэффициенту отражения для одной или нескольких (распределенных) неоднородностей на рабочих частотах линии с помощью выражения:

$$K_{\text{ст.}U} = \frac{1 + \rho}{1 - \rho}, \quad (\text{П.3})$$

где $K_{\text{ст.}U}$ – коэффициент стоячей волны по напряжению; ρ – коэффициент отражения; и с помощью круговой диаграммы.

Подготовка прибора к работе

Назначение органов управления приведено в табл. 1


Таблица 1

Обозначение органа управления	Назначение органа управления
<u>Передняя панель</u>	
1. Ручка КОЭФ.ОТРАЖ. (% ДЕЛ.)	Установка чувствительности индикатора
2. Ручка "▷"	Подстройка калибровки чувствительности индикатора
3. Кнопка ФИЛЬТР	Включение фильтра
4. Ручка "↕"	Перемещение линии развертки по вертикали
5. Ручка "☀"	Установка яркости луча индикатора
6. Кнопочный переключатель РАЗВЕРТКА: НОРМ. СГЛАЖ. ЗАПИСЬ "⚡"	Установка режима работы длительность развертки 0,1 с длительность развертки 1 с однократная развертка ручная развертка
7. Ручка РАССТОЯНИЕ (ВРЕМЯ)	Отсчет расстояния (времени)
8. Кнопка КОНТР. НУЛЯ	Проверка совмещения фронта зондирующего сигнала с отчетной риской в процессе измерения и калибровки в любом положении ручки РАССТОЯНИЕ (ВРЕМЯ)
9. Ручка УСТАН. ОТСЧЕТА	Совмещение фронта сигнала с отчетной риской шкалы ЭЛТ
10. Ручка УКРОЧЕНИЕ	Установка коэффициента укорочения в соответствии с типом диэлектрика

	испытуемой линии
Обозначение органа управления	Назначение органа управления
11. Переключатель М/ДЕЛ. ($\times 10 - ns / \text{ДЕЛ.}$)	Установка масштаба измерения по шкале индикатора
12. Кнопочный переключатель М ($\times 10 - ns$)	Установка диапазона измерения расстояния
13. Выведенные под шлиц потенциометры "20", "200", "2000"	Калибровка диапазонов расстояния (времени)
14. Ручка УСТАН. МЕТОК	Установка метки на отсчетную риску при калибровке
15. Сигнальный светодиод	Индикация включения питающей сети измерителя
16. Тумблер ПИТАНИЕ	Включение питающего напряжения
<u>Генератор К Р5-12</u>	
1. Переключатель ЗОНД.СИГНАЛ "┌" "┐" "└┐"	Установка зондирующего сигнала: перепада напряжения видеоимпульса суперпозиции перепада напряжения и видеоимпульса
2. Ручка ДЛИТ.	Плавная регулировка длительности видеоимпульса
3. Ручка СТАБИЛЬН.	Установка режима генератора перепада напряжения
4. Разъем ВХОД	Подключение исследуемой линии

1. Установите органы управления в исходное положение:

- | | |
|----------------------|------------------------------|
| КОЭФ.ОТРАЖ. (% ДЕЛ.) | - в крайнее левое положение, |
| "▷ " | - в среднее положение, |
| "↕ " | - в среднее положение, |
| УСТАН. ОТСЧЕТА | - в крайнее левое положение, |

"  "	- в крайнее левое положение,
РАЗВЕРТКА	- в положение НОРМ.,
РАССТОЯНИЕ	- в положение "0"
М ($\times 10 - ns$)	- в положение "200"
М/ДЕЛ. ($\times 10 - ns / \text{ДЕЛ.}$)	- в положение "20"
ПИТАНИЕ	- в нижнее положение

2. Перед включением прибора убедитесь, что он ЗАЗЕМЛЕН (К разъему заземления на задней панели подключен кабель заземления). После чего переключите тумблеры сначала на задней панели, затем на передней в положение «ВКЛ».

ВНИМАНИЕ!




НЕДОПУСТИМО ПОПАДАНИЕ НА ВХОД ИЗМЕРИТЕЛЯ ВНЕШНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ.



При случайном попадании на вход измерителя внешнего напряжения выше 2 В измеритель выйдет из строя.

Во избежание аварийного состояния измерителя все измерения необходимо производить на отключенной с обеих сторон и разряженной линии.

3. Установите ручки управления в следующие положения.

Передняя панель:

"  "	- в крайнее левое положение;
КОЭФ.ОТРАЖ. (% ДЕЛ.)	- в крайнее левое положение;
"  "	- в среднее положение;
РАССТОЯНИЕ	- в положение "0";
УСТАН. ОТСЧЕТА	- в крайнее правое положение;
УКОРОЧЕНИЕ	- в положение "1.5";
"  "	- в среднее положение;

4. Ручками "  ", "  " отрегулируйте яркость и положение луча на экране ЭЛТ.

5. В зависимости от длины измеряемых линий и желаемого масштаба изображения ручки М ($\times 10 - ns$), М/ДЕЛ. ($\times 10 - ns / \text{ДЕЛ.}$) установите в следующие

положения (табл. 2):

Длина измеряемой линии	Положение ручки переключателя	
	М ($\times 10 - ns$)	М/ДЕЛ. ($\times 10 - ns / \text{ДЕЛ.}$)
До 1 м	"20"	"0,1"
1 – 2 м	"20"	"0,2"
2 – 4 м	"20"	"0,4"
4 – 10 м	"20"	"1"

Результат измерения будет более точным, если отсчет производится в конце диапазона измерения.

6. Подключите измеряемую линию к разъему ВХОД генератора P5-12.
7. Установите ручку укорочения в положение, соответствующее значению коэффициента укорочения измеряемой линии.
8. Переключатель ЗОНД.СИГНАЛ установите в среднее положение.
9. Установите основной режим работы измерителя, нажав клавишу НОРМ.
10. Совместите ручкой УСТАН.ОТСЧЕТА передний фронт зондирующего сигнала с отсчетной риской шкалы ЭЛТ. Ручкой " \updownarrow " совместите плоскую вершину перепада (" \square ") с центральной горизонтальной риской ЭЛТ.
11. Ручку КОЭФ.ОТРАЖ. (% ДЕЛ.) установите в положение, удобное для отсчета.

12. Измерение расстояние до неоднородности волнового сопротивления.

Ручки УКРОЧЕНИЕ, М ($\times 10 - ns$), М/ДЕЛ. ($\times 10 - ns / \text{ДЕЛ.}$) установите в соответствующие положения, определяемые типом и длиной кабельной линии.

Отсчет измеряемого расстояния можно производить по шкале отсчетного устройства РАССТОЯНИЕ (ВРЕМЯ) и непосредственно по горизонтальной шкале ЭЛТ.

При точных измерениях ручкой РАССТОЯНИЕ (ВРЕМЯ) произведите совмещение начала фронта отраженного сигнала с отсчетной риской шкалы (с той, с которой производилось совмещение фронта зондирующего сигнала). По показаниям шкалы РАССТОЯНИЕ (ВРЕМЯ) и положению переключателя М ($\times 10 - ns$)

производите отсчет расстояния.

При снятии отсчета с экрана ЭЛТ необходимо подсчитать число делений горизонтальной шкалы ЭЛТ между фронтами зондирующего и отраженного сигналов и умножить это число на установленное значение масштаба на переключателе М/ДЕЛ. ($\times 10 - ns / \text{ДЕЛ.}$).

13. Измерение временной задержки.

Измерение временной задержки линий производится аналогично измерению расстояния до неоднородностей.

Ручку УКРОЧЕНИЕ установите в положение "1,5". Отсчет по шкале ЭЛТ в соответствии с установленными положениями переключателей М ($\times 10 - ns$), М/ДЕЛ. ($\times 10 - ns / \text{ДЕЛ.}$) или по шкале РАССТОЯНИЕ (ВРЕМЯ), увеличенный в 1,0 раз будет равен двойному времени в наносекундах.

Электрическая длина кабеля равна произведению времени задержки на частоту сигнала, передаваемого по линии.

14. Измерение коэффициента укорочения кабеля, диэлектрической проницаемости изоляции, скорости распространения ЭМВ.

Коэффициент укорочения γ может быть измерен в кабеле известной длины.

Установите ручки в положения:

УКРОЧЕНИЕ – "1",

РАССТОЯНИЕ – "0".

Выберите диапазон измерения, соответствующий известной длине измеряемого тракта переключателем М ($\times 10 - ns$).

Установите ручкой УСТАН.ОТСЧЕТА начало отсчета расстояния, совместив передний фронт зондирующего сигнала с отсчетной риской шкалы. Установите ручку РАССТОЯНИЕ (ВРЕМЯ) в положение, соответствующее известной длине измеряемого кабеля.

Совместите передний фронт отраженного сигнала с отсчетной риской шкалы ЭЛТ вращением ручки УКРОЧЕНИЕ.

Точность отсчета коэффициента укорочения по шкале УКРОЧЕНИЕ определяется с той точностью, с которой была установлена геометрическая длина ли-

нии.

Определите диэлектрическую проницаемость изоляции кабеля по формуле

$$\varepsilon = \gamma^2, \quad \gamma = c / v, \quad (\text{П.4})$$

где ε – диэлектрическая проницаемость кабеля; γ – коэффициент укорочения ЭМВ в кабеле.

Определите скорость распространения ЭМВ в кабеле по формуле

$$v = 3 \cdot 10^8 / \gamma \text{ (м/с)}.$$

15. Определение волнового сопротивления кабеля (линии) без потерь.

Ручкой СТАБИЛЬН. выберите такой режим генератора, чтобы изображение перепада напряжения было удобным для наблюдения.

Ручку КОЭФ.ОТРАЖ. (% ДЕЛ.) установите в положение, удобное для отсчета.

Отсчитайте число делений вертикальной шкалы ЭЛТ от вершины зондирующего перепада до вершины отраженного перепада.

Определите волновое сопротивление кабеля (линии) в зависимости от установленного положения переключателя КОЭФ.ОТРАЖ. (% ДЕЛ.) и отсчитанного числа делений вертикальной шкалы ЭЛТ или по формуле:

$$Z = 50 \frac{1 + 0,01nk}{1 - 0,01nk} = 50 \frac{1 + \rho}{1 - \rho}, \quad (\text{П.5})$$

где Z_k – волновое сопротивление измеряемого кабеля; n – число делений вертикальной шкалы ЭЛТ; k – установленное значение ручки КОЭФ.ОТРАЖ. (% ДЕЛ.); $\rho = 0,01 \cdot k \cdot n$ – коэффициент отражения.