

## **Раздел 6. Измерение параметров цепей с сосредоточенными и рассредоточенными постоянными**

### **6.1. Измерение параметров двухполюсников. Исследование амплитудно-частотных и переходных характеристик**

#### **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВУХ- И ЧЕТЫРЕХ –ПОЛЮСНИКОВ**

Радиоэлектронные цепи, размеры которых гораздо меньше рабочей длины волны, называются цепями **с сосредоточенными параметрами**. Их свойства практически не зависят от конфигурации выводов (электродов) активных и пассивных элементов и размеров соединительных проводов.

Радиоэлектронные цепи, физические размеры которых соизмеримы с рабочей длиной волны колебаний, относятся к цепям **с распределенными параметрами**. Каждый элемент или соединительный провод такой цепи обладает сопротивлением, индуктивностью и емкостью. Такие цепи часто называют длинными линиями или СВЧ – трактами.

В электрических цепях с сосредоточенными параметрами широко применяются линейные компоненты общего назначения: резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы. При определенных допущениях эти элементы можно рассматривать как линейные пассивные двухполюсники (двухполюсник представляет собой цепь с двумя внешними узлами), характеризующиеся некими идеальными параметрами:

- активным сопротивлением  $R$ ;
- емкостью  $C$ ;
- индуктивностью  $L$ .

При измерении не всегда удается определить значение того или иного параметра, соответствующее идеальному, совершенному виду элемента. Поэтому требуется знать ряд вторичных параметров элементов. Для оценки качества конденсатора пользуются величиной тангенса угла потерь, а для оценки качества катушки индуктивности – величиной добротности ( $Q$ ), которая также характеризует и колебательный контур.

В зависимости от вида измеряемой величины, требуемой точности результата, диапазона рабочих частот и др. условий для измерения параметров элементов с сосредоточенными постоянными применяют различные средства и **методы измерений**:

- 1) метод амперметра – вольтметра;
- 2) метод непосредственной оценки;
- 3) мостовой метод;
- 4) резонансный метод;
- 5) метод дискретного счета (цифровой).

Измерители параметров двухполюсников относятся к подгруппе Е:

- Е2- измерители полных сопротивлений и полных проводимостей;
- Е3 – измерители индуктивности;
- Е4 – измерители добротности;
- Е6 – измерители сопротивлений;
- Е7 – измерители параметров универсальные;
- Е8 – измерители емкостей;
- Е9 – преобразователи параметров цепей.

Основными параметрами длинных линий, по аналогии с цепями с сосредоточенными постоянными, являются погонные: активное сопротивление, индуктивность и емкость. Однако, они не имеют четкого физического смысла и поэтому не измеряются. Все основные элементы СВЧ – трактов являются аналогами двух- и четырехполюсников, из которых состоят цепи с сосредоточенными постоянными. Приборы, предназначенные для измерения параметров цепей с распределенными постоянными, классифицируются в зависимости от характера конкретных измерений и вида измеряемых величин.

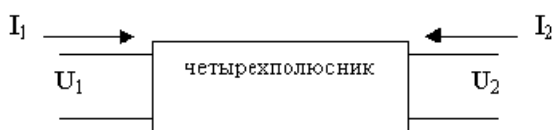


Рисунок 2.7.1- Эквивалентная схема четырехполюсника

Измерители параметров четырехполюсников образуют подгруппу Х:

- Х1 – приборы для исследования АЧХ;
- Х2 – приборы для исследования переходных характеристик;
- Х3 – приборы для исследования фазо–частотных характеристик;
- Х4 – приборы для исследования амплитудных характеристик;
- Х5 – измерители коэффициента шума.

Вопросы для самопроверки:

1. Что представляют собой параметры цепей с сосредоточенными и распределенными постоянными?
2. Что такое Е2....Е9?
3. Какие параметры цепей относят к идеальным, а какие – к вторичным?
4. Что такое Х1....Х5?
5. Какие существуют методы для измерения параметров элементов с сосредоточенными постоянными?

## МОСТОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ

Измерительные мосты, применяемые в измерителях параметров двухполюсников (ДП), имеют достаточно обширную классификацию по целому ряду признаков.

По типу источника питания различают мосты постоянного и переменного тока.

Для мостов переменного тока важным дополнительным классификационным признаком является структура ДП, образующих плечи. С этой точки зрения выделяют мосты типов:

- МЕ (для измерения С),
- МИ (для измерения L),
- МИЕ (для измерения С и L),
- МЕП (для измерения С и угла потерь),
- МИП (для измерения L и Q)
- МИЕП (универсальные).

Далее выделяют мосты с индуктивно-связанными плечами (трансформаторные мосты), Т – образные мосты и компенсационно-мостовые измерительные схемы, объединяющие в себе функции измерительных мостов и компенсаторов.

Для расширения пределов измерений, кроме обычных (одинарных) мостов постоянного и переменного тока, применяют так называемые двойные и одинарно-двойные мосты.

В зависимости от способа уравнивания измерительные мосты могут быть с ручным уравниванием и автоматические.

Принципиальным достоинством измерительных мостов всех перечисленных видов является высокая точность измерения параметров ДП, характерная для приборов сравнения. В частности, мосты постоянного тока могут иметь классы точности от 0,001 до 5, а мосты переменного тока – от 0,01 до 5.

### 1. Мост постоянного тока

Упрощенная структурная схема моста применяется для измерения активных сопротивлений. Магнитоэлектрический, электронный или цифровой нуль – индикатор включается в диагональ моста, ток в которой в момент измерения должен быть установлен равным нулю. Пределы измеряемых сопротивления для таких мостов от  $10^{-2}$  до  $10^7$  Ом.

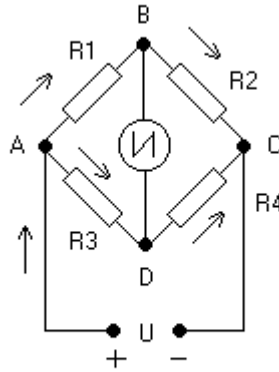


Рисунок 2.7.2- Мост постоянного тока,  
 где: АВ, ВС, CD, DA – плечи моста, И – индикатор нуля.

Уравновешенный (сбалансированный) мост – когда напряжение между точками В и D = 0, ток в диагонали индикатора отсутствует (благодаря подбору сопротивлений).

Состояние равновесия наступит, когда:

$$I_1 R_1 = I_3 R_3 \quad \text{и} \quad I_2 R_2 = I_4 R_4$$

Т. к. в уравновешенном мосте:  $I_1 = I_2$  и  $I_3 = I_4$ , то:

$I_1 R_1 = I_3 R_3$  и  $I_1 R_2 = I_3 R_4$ , следовательно,  $R_1 / R_2 = R_3 / R_4$ , значит

$$\boxed{R_1 R_4 = R_2 R_3.}$$

## 2. Мост переменного тока

Применяют для измерения ёмкости, индуктивности, тангенса угла потерь, добротности, частоты.

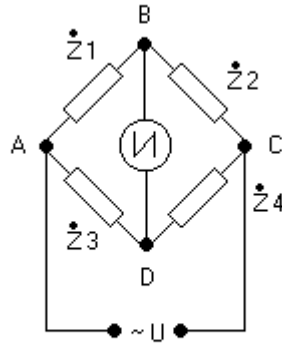


Рисунок 2.7.3- Мост переменного тока,

где  $\dot{Z}$  – комплексное сопротивление  $\dot{Z} = Z \cdot e^{j\varphi}$ ,

$Z$  – модуль полных сопротивлений плеч  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$  ;

$\varphi = \arctg \frac{X}{R}$  – угол сдвига фаз между током и напряжением каждого плеча.

**Условие равновесия моста:**

- 1)  $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$ ;
- 2)  $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$ .

**2.1. Мостовой метод измерения  $C$  и  $\text{tg } \delta$**

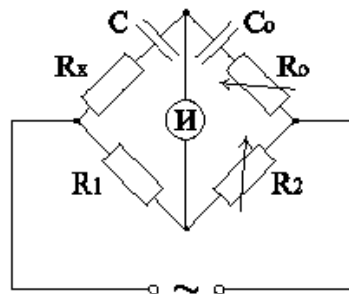


Рисунок 2.7.4 - Мостовой метод измерения  $C$  и  $\text{tg } \delta$

$$\{R_x - j[1/(\omega \cdot C_x)]\} \cdot R_2 = \{R_0 - j[1/(\omega \cdot C_0)]\} \cdot R_1$$

$$R_x \cdot R_2 = R_1 \cdot R_0$$

$$R_2 / C_x = R_1 / C_0$$

$$C_x = C_0 \cdot (R_2 / R_1)$$

$$R_x = (R_1 / R_2) \cdot R_0$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_x \cdot R_x = \omega \cdot C_0 \cdot R_0 \ll 1$$

## 2.2. Мостовой метод измерения L и Q

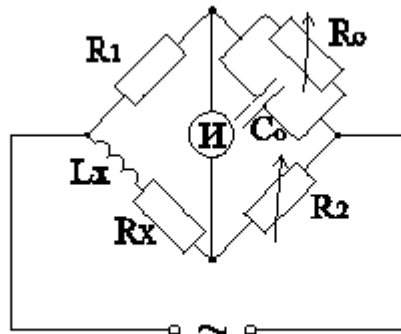


Рисунок 2.7.5 - Мостовой метод измерения L и Q

$$R_1 \cdot R_2 = [R_x + j \cdot \omega \cdot L_x] \cdot \{1 / [(1/R_0) + j \cdot \omega \cdot C_0]\}$$

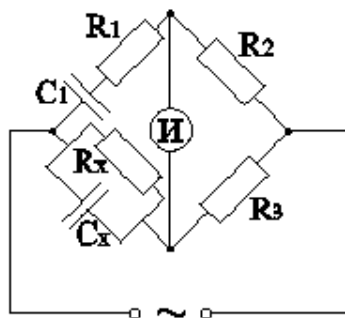
$$R_1 \cdot R_2 \cdot (1/R_0 + j \cdot \omega \cdot C_0) = R_x + j \cdot \omega \cdot L_x$$

$$L_x = C_0 \cdot R_2 \cdot R_1$$

$$R_x = (R_1 \cdot R_2) / R_0$$

$$Q = (\omega \cdot L_x) / R_x = \omega \cdot C_0 \cdot R_0$$

## 2.3. Мост Вина (применяется для измерения $C_x$ , $R_x$ , $f_x$ )



## Рисунок 2.7.6 - Мост Вина

Условие равновесия моста:

$$\begin{cases} C_x/C_1 = R_2/R_3 - R_1/R_x \\ C_1 C_x = 1/(\omega^2 R_1 R_x) \end{cases}$$

Решая их, можно найти  $f = 1/(2\pi\sqrt{C_1 C_x R_1 R_x})$ .

В применяемых на практике мостах  $C_1$  и  $C_x$  фиксированы;  $R_1$  и  $R_x$  – известные переменные, которые регулируются общей ручкой, т.е.  $R_1 = R_x$ . Значение  $R_2$  выбирают равным  $2R_3$ , тогда  $f = 1/(2\pi C_1 R_1)$ . Таким образом, мост уравнивается изменением одного лишь сопротивления  $R_1$ . Калибровка осуществляется непосредственно в значениях частоты. Т.к. мост Вина чувствителен к изменениям частоты, его трудно уравновесить, если сигнал содержит гармоники, поэтому такой сигнал необходимо сначала отфильтровать. Мост Вина является распространенным типом режекторного фильтра, используемого в измерителе нелинейных искажений.

Неуравновешенный мост – в момент измерений ток через индикатор не равен 0. В качестве его примера можно привести термисторный мост измерителя мощности СВЧ.

Вопросы для самопроверки:

1. Классификация измерительных мостов.
2. Мосты постоянного тока. Условие равновесия.
3. Мосты переменного тока. Условие равновесия.
4. Мост для измерения емкости.
5. Мост для измерения индуктивности. Мост Вина.