

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИБОРОВ И МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВУХПОЛЮСНИКОВ

Цель работы

Изучить мостовой и резонансный методы измерения параметров двухполюсников; ознакомиться с техническими характеристиками и схемами универсального моста и измерителя добротности

Используемые приборы

Измерительный мост (измеритель R, L, C универсальный) Е7-11.

Измеритель добротности (куметр) Е4-11.

Лабораторное задание.

1. Измерить с помощью измерителя добротности Е4-11 индуктивность, добротность и собственную емкость катушки индуктивности, емкость, эквивалентное шунтирующее сопротивление и тангенс угла потерь конденсатора, сопротивление резистора и его паразитную емкость. Оценить погрешности измерений, используя нормируемые метрологические характеристики прибора для параметров, измеряемых непосредственно (прямые измерения) и формулы для погрешностей косвенных измерений для параметров, измеряемых косвенно.

2. Сравнить достоинства и недостатки мостового и резонансного методов измерений параметров двухполюсников.

Подготовка к работе (домашнее задание)

1. Изучить теоретический материал, относящийся к данной работе [1,2], конспект лекций и методические указания к настоящей работе.

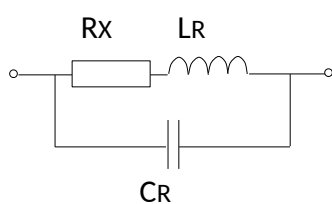
2. Ознакомиться с метрологическими характеристиками исследуемых приборов (заполнив табл. 2.1). Сопоставить эти характеристики.

Таблица 2.1

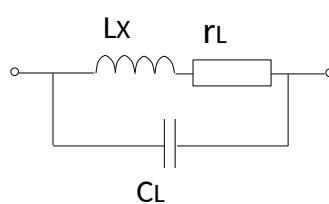
Основные метрологические характеристики приборов

Название и тип прибора	Диапазон рабочих частот, Гц	Измеряемые величины	Пределы измерения	Нормируемая основная погрешность
Универсальный мост (измеритель R, L, C) E7-11		R		
		L		
		C		
		$\text{tg}\delta$		
		Q		
Измеритель добротности E4-11		Q		
		f		
		Lx		-
		C0		
		Cx		-

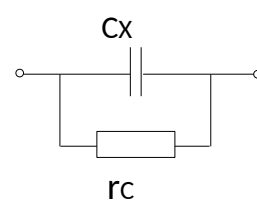
Указание. Двухполусником называют элемент схемы, имеющий две точки для подключения в электрическую цепь. В лабораторной работе исследуются измерения параметров простейших (элементарных) пассивных двухполусников: резистора R_x , катушки индуктивности L_x и конденсатора C_x . Однако на достаточно высоких частотах на свойства этих элементов электрических схем начинают влиять паразитные параметры, поэтому эквивалентные схемы таких двухполусников следует представить следующим образом:



Резистор



Катушка индуктивности



Конденсатор

На частотах, меньших собственной резонансной частоты катушки индуктивности, ее можно представить в виде эквивалентной схемы, состоящей из последовательно включенных индуктивности с действующим значением L_D и резистора с действующим сопротивлением потерь R_D .

Качество катушки индуктивности принято оценивать ее добротностью

$$Q = \frac{\omega L_x}{r_L},$$

а качество конденсатора - тангенсом угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_x r_c}.$$

1. Измерение параметров двухполюсников с помощью измерителя добротности

Указание. Измеритель добротности (куметр) реализует резонансный метод измерения параметров двухполюсников (рис. 2.3).

В измерительный контур, образованный $L_{обр}$ и $C_{обр}$ через емкостной делитель $C1, C2$ вводится напряжение U_0 , контролируемое вольтметром $V1$. Вольтметр $V2$ служит индикатором резонанса.

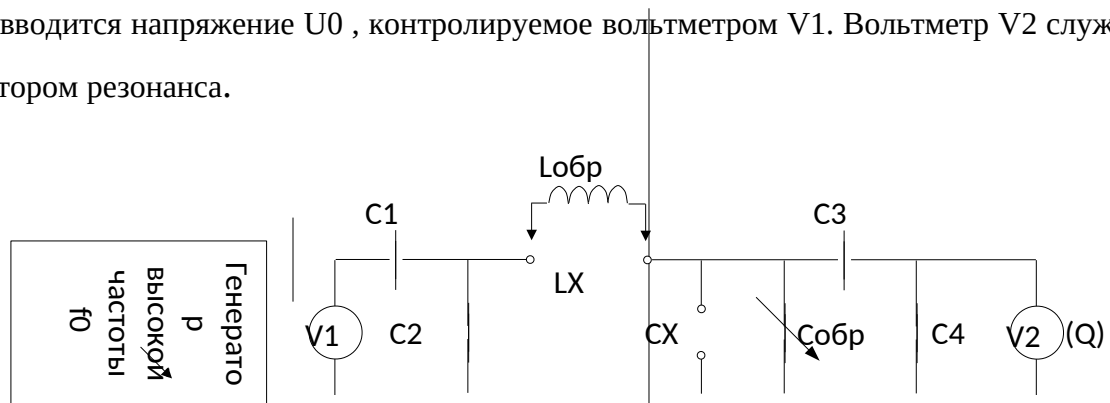


Рис. 2.3. Упрощенная структурная схема измерителя добротности

Поскольку при резонансе если $Q > 10$, имеет место равенство

$$Q = \frac{U_{c\text{обр}}}{U_0}, \quad (2.4)$$

а величина U_0 поддерживается постоянной, то можно проградуировать шкалу вольтметра $V2$ в единицах Q . В результате получим прямые измерения добротности.

При резонансе справедливо соотношение

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}, \quad (2.5)$$

поэтому, зная частоту генератора f_0 и емкость колебательного контура C_0 , можно оценить неизвестное значение индуктивности L . Такие измерения называют косвенными.

С помощью куметра можно реализовать на заданной и достаточно высокой частоте также косвенные измерения емкости C_x , сопротивления потерь конденсаторов RC , $\operatorname{tg} \delta$, R_x и т.п. Такие измерения, как правило, проводятся в два этапа. Сначала колебательный контур прибора настраивают в резонанс и оценивают его характеристики в исходном состоянии. Затем в контур подключают исследуемый двухполюсник и по изменению характеристик контура оценивают параметры подключенного двухполюсника, используя формулы (2.6) - (2.16).

1.1 Измерить действующие значения индуктивности L_d и добротности Q_d катушки индуктивности.

Подключить измеряемую катушку к зажимам L_x , расположенным на верхней панели измерителя добротности. Установить частоту генератора измерителя добротности, значение которой f_1 указано на корпусе измеряемой катушки индуктивности. Настроить измерительный контур в резонанс на частоте f_1 регулировкой емкости образцового конденсатора по максимуму показания вольтметра, градуированного в значениях Q .

Записать значения установленной частоты f_1 , емкости образцового конденсатора $C_{об1}$ и добротности $Q_{д1}$ на частоте f_1 в табл. 2.3. ($C_{об1} = C_{об}(f_1)$, $Q_{д1} = Q_d(f_1)$). Значение $C_{об1}$ следует записать с учетом разрешающей способности шкалы образцового конденсатора 0,01 пФ.

Таблица 2.3

Результаты оценки параметров катушки индуктивности

Частота, МГц	Q_d	$C_{об},$ пФ	$L_d,$ мкГн	$R_d,$ Ом	$C_L,$ пФ	$L_x,$ мкГн	Q_x	$R_L,$ Ом	$f_L,$ МГц
$f_1 = 100 \text{ МГц}$									
$f_2 = 200 \text{ МГц}$									

Вычислить и записать в табл. 2.3 действующее значение индуктивности

$$L_d = \frac{1}{4\pi^2 f_1^2 C_{об1}} \quad (2.6)$$

и действующее сопротивление потерь в измеряемой катушке

$$R_d = \frac{X_{д1}}{Q_{д1}} = \frac{2\pi f_1 L_d}{Q_{д1}} \quad (2.7)$$

3.3. Оценить паразитную емкость, которую катушка индуктивности вносит в колебательный контур.

Установить частоту генератора $f_2 = 2f_1$. Настроить измерительный контур в резонанс и записать в табл. 2.3 полученные значения f_2 , $C_{об2}$ и $Q_{д2}$.

Вычислить собственную емкость катушки C_L из (2.9) или (2.10), результат внести в табл. 2.3. Оценить истинное значение индуктивности по формуле (2.11) и ее собственную резонансную частоту по формуле (2.12).

Указание. Истинное значение индуктивности отличается от действующего вследствие того, что катушка вносит в контур паразитную емкость C_L , которую можно оценить по результатам настройки измерительного контура в резонанс на двух частотах путем решения системы двух уравнений с двумя неизвестными

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_x(C_{об1} + C_L)}}, \quad (2.8)$$

$$f_2 = n f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_x(C_{об2} + C_L)}},$$

где $C_{об1}$, $C_{об2}$ - показания шкалы образцового конденсатора при резонансе на частотах f_1 и f_2 , соответственно. Решая систему уравнений относительно C_L , получаем:

$$C_L = \frac{f_1^2 C_{об1} - f_2^2 C_{об2}}{f_2^2 - f_1^2} = \frac{C_{об1} - n^2 C_{об2}}{n^2 - 1}. \quad (2.9)$$

Удобно выбрать $n = 2$, тогда (2.9) упрощается:

$$C_L = \frac{C_{об1} - 4 C_{об2}}{3}. \quad (2.10)$$

Теперь можно оценить истинное значение индуктивности

$$L_x = \frac{1}{4\pi^2 f_1^2 (C_{об1} + C_L)}. \quad (2.11)$$

Для проверки корректности этого результата следует повторить расчет L_x , подставив в (2.11) значения f_2 и $C_{об2}$. Два полученных значения L_x должны совпадать в пределах погрешностей косвенных измерений индуктивности (п.1.2.).

Полученное значение C_L позволяет оценить собственную резонансную частоту исследуемой катушки индуктивности

$$f_L = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_x C_L}} . \quad (2.12)$$

1.2. Измерить емкость конденсатора C_x и тангенс угла потерь.

Подключить к зажимам L_x штатную катушку индуктивности, входящую в комплект прибора Е4-11. Установить частоту генератора измерителя добротности, значение которой f_1 указано на корпусе измеряемой катушки индуктивности. Настроить измерительный контур в резонанс на частоте f_1 регулировкой емкости образцового конденсатора по максимуму показания вольтметра, градуированного в значениях Q . Записать значения установленной емкости $C_{об1}$, резонансной частоты f , и добротности Q_1 в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Результаты измерений параметров конденсатора и резистора

Объект измерения	f , МГц	$C_{об1}$, пФ	Q_1	$C_{об2}$, пФ	Q_2	C_x , пФ	$\text{tg}\delta$	R_x , Ом	C_R , пФ
Конденсатор								-	-
Резистор						-	-		

Подключить к зажимам C_x измеряемый конденсатор (параллельно образцовому конденсатору) и изменением емкости образцового конденсатора восстановить резонанс на частоте f . Записать новые значения $C_{об2}$ и Q_2 в табл.2.4. Вычислить и поместить в табл. 2.4 результаты косвенных измерений емкости конденсатора

$$C_x = C_{об1} - C_{об2} \quad (2.13)$$

$$\text{tg}\delta = \frac{C_{об1}(Q_1 - Q_2)}{C_x Q_1 Q_2} .$$

и тангенса угла потерь

(2.14)

Указание. Чем больше установленное значение начальной емкости $C_{об1}$, тем шире диапазон измерения неизвестной емкости C_x . Поскольку нормируемая погрешность образцового конденсатора имеет существенную мультипликативную составляющую, при

измерении емкости C_x целесообразно устанавливать минимально возможное значение начальной емкости $C_{об1}$.

1.3. Измерить сопротивление резистора и его паразитную емкость.

Указание. Эквивалентные схемы конденсатора и резистора на высоких частотах одинаковы, поэтому процедура измерения параметров резистора не отличается от процедуры измерения параметров конденсатора.

После выполнения двух настроек в резонанс (без измеряемого резистора и при его подключении) записать полученные значения f , $C_{об1}$, Q_1 , $C_{об2}$ и Q_2 в табл. 2.4 и вычислить сопротивление резистора

$$R_x = \frac{Q_1 Q_2}{2\pi f C_{об1} (Q_1 - Q_2)} \quad (2.15)$$

и его паразитную емкость $C_R = C_{об1} - C_{об2}$.
(2.16)

1.4. Вывести формулы для оценки абсолютных ΔL_x , ΔC_x , ΔR_x или относительных δ_L , δ_C , δ_R погрешностей косвенных измерений индуктивности катушки, емкости конденсатора и сопротивления резистора с помощью измерителя добротности на основе функциональных зависимостей (2.6), (2.13), (2.15), определяющих измеряемые параметры (результаты расчета поместить в табл. 2.5).

Таблица 2.5

Оценка основной абсолютной погрешности
измерения параметров двухполюсников с помощью измерителя добротности

Измеряемая величина	Полученное значение	Относительная погрешность, %	Абсолютная погрешность	Результат измерения
L_x , нГн				
Q				
C_x , пФ				
R_C , кОм				
R_x , кОм				
C_R , пФ				

Указание. Главными источниками погрешностей косвенных измерений параметров двухполюсников с помощью куметра являются погрешности входящих в соответствующие формулы аргументов, которые оценивают с помощью прямых измерений - по шкалам Q , f и C_0 этого прибора:

- погрешность измерения добротности Δ_Q ,
- погрешность установки частоты генератора Δ_f ,
- погрешность градуировки образцового конденсатора Δ_C .

Эти погрешности указаны в метрологических характеристиках прибора.

Если Y - искомая величина, связанная функциональной зависимостью

$$Y = F(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$$

с величинами x_i ($i=1, \dots, n$), которые измеряют непосредственно, то соотношение

$$\Delta_i = \frac{\partial F}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (2.17)$$

позволяет оценить частную абсолютную погрешность косвенного измерения величины Y , обусловленную погрешностью Δx_i аргумента x_i .

Выражение для абсолютной погрешности косвенного измерения, полученное путем дифференцирования, в некоторых случаях может получиться достаточно громоздким. Тогда целесообразно использовать выражение для частной относительной погрешности косвенного измерения

$$\delta_i = \frac{\partial F}{\partial x_i} \frac{\Delta x_i}{Y} . \quad (2.18)$$

При этом формулы значительно упрощаются (сокращаются постоянные коэффициенты).

Способ оценки результирующей (суммарной) погрешности косвенного измерения при наличии нескольких аргументов зависит от свойств исходных погрешностей Δx_i .

Если это систематические погрешности, то частные погрешности косвенных измерений складывают алгебраически с учетом знака. При этом отдельные систематические погрешности косвенных измерений могут друг друга частично компенсировать.

Если погрешности исходных величин носят случайный характер, взаимонезависимы и известны их средние квадратические отклонения, то абсолютная средняя квадратическая погрешность косвенного измерения определяется соотношением

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{x_n}^2} . \quad (2.19)$$

Погрешности прямых измерений с помощью куметра (Δ_Q , Δ_f , Δ_C) обычно задают симметричными интервалами как пределы неисключенных систематических погрешностей. В этом случае предельную погрешность косвенного измерения при

количестве составляющих не более 3 принято определять путем суммирования модулей соответствующих частных абсолютных или относительных погрешностей

$$\Delta_y = \pm \left(\left| \frac{\partial F}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial x_3} \Delta x_3 \right| \right). \quad (2.20)$$

$$\delta_y = \pm \left(\left| \frac{\partial F}{\partial x_1} \frac{\Delta x_1}{Y} \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial x_2} \frac{\Delta x_2}{Y} \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial x_3} \frac{\Delta x_3}{Y} \right| \right). \quad (2.21)$$

Например, если частная относительная составляют, соответственно, $\delta_1 = \pm 1\%$, $\delta_2 = \pm 2\%$, $\delta_3 = \pm 3\%$ то результирующая предельная погрешность косвенного измерения будет находиться в пределах $\pm 6\%$.