

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

Лабораторная работа №3. Методы измерения емкости, индуктивности, тангенса угла потерь и добротности

Цель работы - изучение основных методов измерения емкости, индуктивности, тангенса угла потерь и добротности.

Краткие теоретические сведения

Измерение емкости C , индуктивности L , тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ и добротности Q осуществляется прямыми, косвенными и резонансными методами.

Косвенные методы (амперметра – вольтметра)

Среди косвенных методов наиболее просто измерение емкости и индуктивности возможно методом двух приборов (методом амперметра - вольтметра). Для этого емкость (индуктивность) включают в схему рис. 1а или рис. 1б.

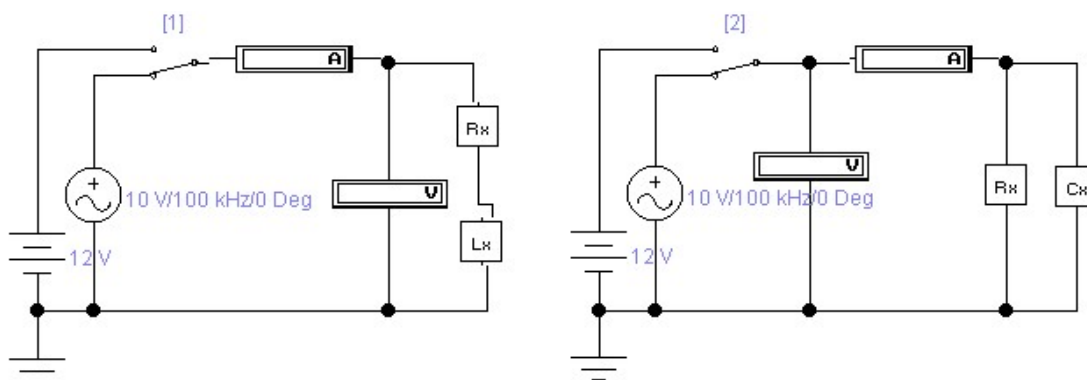


Рис. 1. Метод амперметра – вольтметра

Сначала измеряют сопротивление конденсатора (катушки) постоянному току $R_x = \frac{U_V}{I_A}$. Затем схему включают в цепь питания переменного синусоидального тока частотой $f = 100\text{кГц} - 1\text{мГц}$ и

определяют полное сопротивление $Z = \frac{U_{\sim}}{I_{\sim}}$ катушки (Z_L) или конденсатора (Z_C). Так как

$$Z_C = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{R_x}\right)^2 + (\omega C_c)^2}}, \quad Z_L = \sqrt{(R_x)^2 + (\omega L_x)^2}, \text{ то}$$

$$C_x = \frac{\sqrt{\frac{1}{Z_C^2} - \frac{1}{R_x^2}}}{\omega} \quad (1)$$

$$L_x = \frac{\sqrt{Z_L^2 - R_x^2}}{\omega}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$.

Прямые методы (нулевой метод измерения емкости и индуктивности)

Для измерения емкости и индуктивности прямыми методами наибольшее распространение получили мосты переменного тока. Мостовые схемы измерения емкости с малыми ($\text{tg}\delta \leq 0,01$) и большими ($\text{tg}\delta \geq 0,01$) потерями представлены на рис. 2а и рис. 2б.

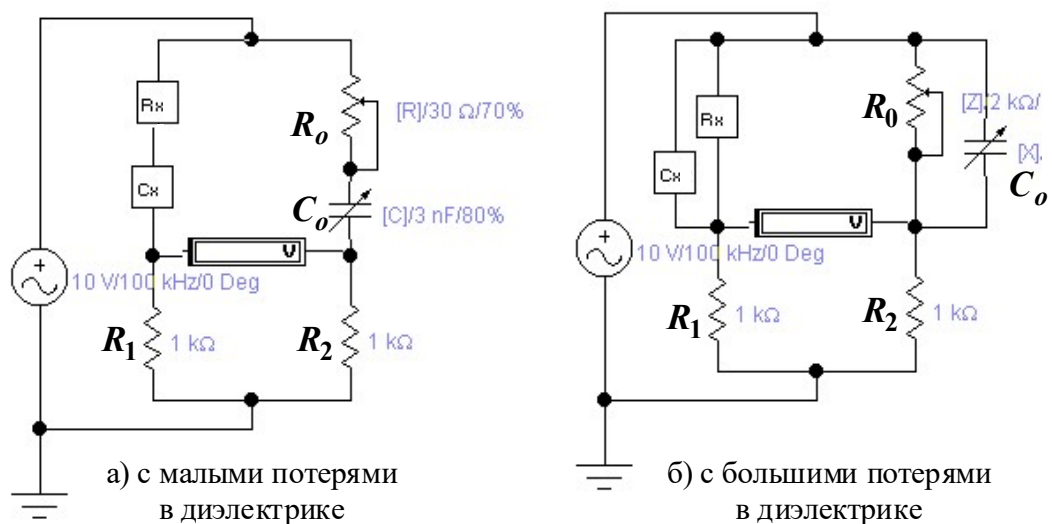


Рис. 2. Мостовая схема измерения емкости

Мосты относятся к наиболее точным приборам и их погрешности могут составлять тысячные доли процента. Сущность мостового метода

измерения заключается в том, что неизвестный конденсатор включают в одно из плеч моста и производят изменение параметров образцовых мер моста R_0 и C_0 до достижения равновесия схемы, характеризуемого равенством нулю показаний вольтметра. Для равновесного состояния моста переменного тока справедливо соотношение

$$\dot{Z}_x \cdot \dot{Z}_2 = \dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_0,$$

где $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_x, \dot{Z}_0$ - полные сопротивления плеч моста.

Если сопротивления R_1 и R_2 равны, то при равновесии моста равны и полные сопротивления рабочего и образцового плеч моста.

Тогда для схемы на рис. 2а можно записать

$$R_x + \frac{1}{j\omega C_x} = R_0 + \frac{1}{j\omega C_0}.$$

Откуда $R_x = R_0, C_x = C_0$.

Для схемы на рис. 2б получим

$$\frac{1}{\frac{1}{R_x} + j\omega C_x} = \frac{1}{\frac{1}{R_0} + j\omega C_0}.$$

Откуда $R_x = R_0, C_x = C_0$.

Тангенсом угла потерь $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора называется отношение активного сопротивления R_x к реактивному $\frac{1}{j\omega C_x}$ для последовательной схемы замещения конденсатора и отношение активной проводимости к реактивной в случае параллельной схемы замещения. Тогда для моста на рис. 2а $\operatorname{tg}\delta = \omega R_x C_x$, а для моста на рис. 2б $\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{\omega R_x C_x}$.

Измерение индуктивности мостовым методом аналогично измерению емкости (рис.3).

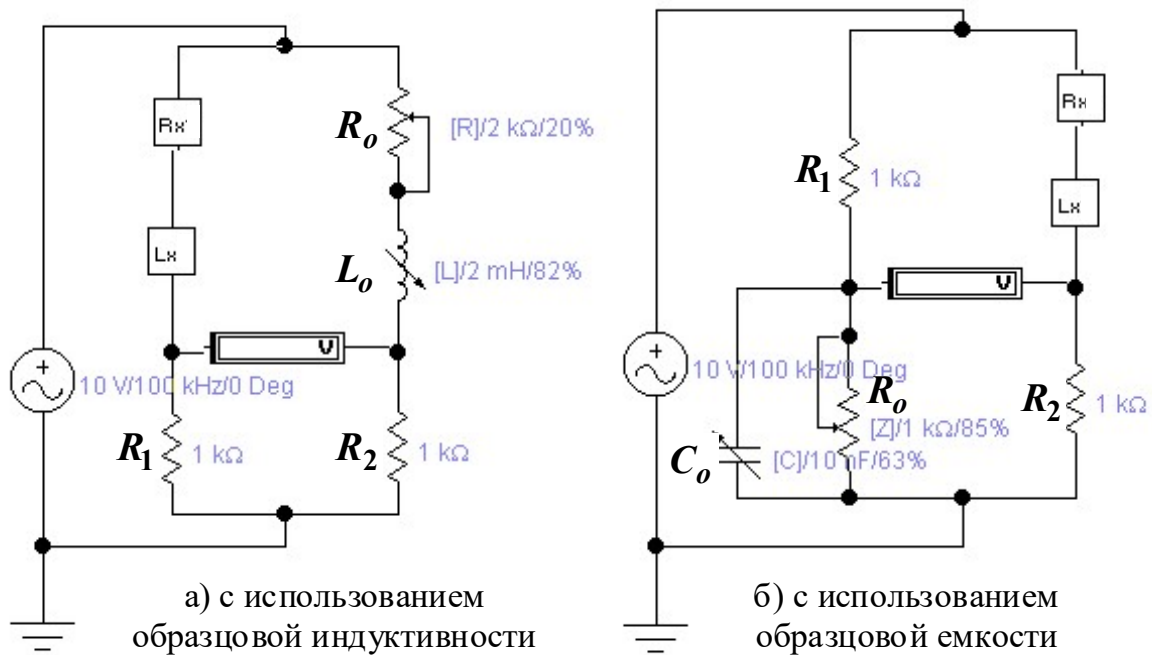


Рис. 3. Мостовая схема измерения индуктивности

Изменением параметров L_0 и R_0 образцовых мер добиваются равновесия моста (вольтметр, включенный в диагональ моста, показывает ноль), откуда при $R_1 = R_2$ получим

$$j\omega L_x + R_x = j\omega L_0 + R_0.$$

Тогда $L_x = L_0$ и $R_x = R_0$.

Добротность же может быть определена как отношение реактивного сопротивления ωL_x катушки к активному R_x :

$$Q_x = \frac{\omega L_x}{R_x}.$$

На практике образцовые переменные индуктивности изготовить очень трудно, а активные сопротивления катушки довольно велики. Поэтому в основном распространены мостовые схемы измерения индуктивностей (имеющих малую добротность $Q_x < 30$) с использованием образцовых емкостей (рис. 3б). Если в схеме $R_1 = R_2$, то исходя из условия равновесия моста $\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_2 = \dot{Z}_x \cdot \dot{Z}_0$, можно записать

$$R_1 \cdot R_2 \cdot \frac{1}{\dot{Z}_0} = \dot{Z}_x.$$

Поскольку R_1 и R_2 чисто активные сопротивления, то последнее равенство переписывается как

$$R_1 \cdot R_2 \left(j\omega C_0 + \frac{1}{R_0} \right) = j\omega L_x + R_x$$

Откуда

$$L_x = R_1 \cdot R_2 \cdot C_0, \quad R_x = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_0}.$$

Резонансный метод

Резонансные методы измерения нашли широкое распространение за счет простоты. Они используются, как правило, на высоких частотах при последовательной $R-L$ и параллельной $R-C$ схемах замещения элементов. В этом случае активное сопротивление индуктивностей и емкостей будет приводить к пренебрежимо малой погрешности измерения. Суть метода заключается в том, что создается резонансный контур и измеряется частота, на которой наблюдается резонанс в исследуемой цепи. При этом резонансная частота связана с параметрами цепи известным соотношением

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

В случае измерения индуктивности L_x в резонансный контур параллельно ей включают образцовую емкость C_0 . Если же измеряют емкость C_x , то ее включают параллельно образцовой катушке L_0 . В качестве индикатора резонанса можно использовать вольтметр. При этом показания вольтметра в момент резонанса максимальны. Схема измерения резонансным методом представлена на рис. 4.

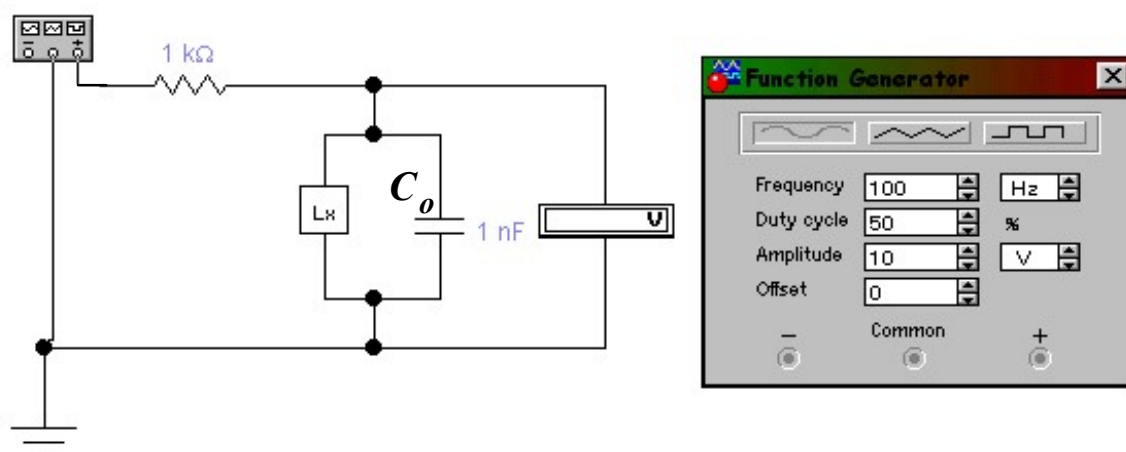


Рис. 4. Резонансный метод измерения емкости или индуктивности

Порядок выполнения работы

Значения измеряемого сопротивления R_x , индуктивности L_x или емкости C_x во всех схемах данной лабораторной работы устанавливаются по вариантам, приведенным в таблице:

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Рис.1а	R_x , кОм	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
	L_x , мГн	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Рис.1б	R_x , кОм	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
	C_x , нФ	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Рис.2а	R_x , Ом	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	C_x , нФ	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Рис.2б	R_x , кОм	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10
	C_x ,	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10

	МКФ										
Рис.3а	R_x , кОм	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10
	L_x , мГн	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10
Рис.3б	R_x , кОм	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
	L_x , мГн	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
Рис.4	L_x , мГн	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

1. Собрать схему рис. 1а: $E_{on} = 12 В$, $R_A = 10 Ом$, $R_V = 100 кОм$. Подключить ко входу схемы источник опорного постоянного напряжения $E_{on} = 12 В$. Записать показания вольтметра и амперметра и рассчитать значения $R_x = U/I$.

2. Вместо источника опорного напряжения подключить источник переменного синусоидального напряжения $U = 10В$ частотой $f = 100 кГц$. Записать показания приборов и рассчитать полное сопротивление $Z_L = \frac{U_{\sim}}{I_{\sim}}$.

(Для измерений переменных токов и напряжений переключить амперметр и вольтметр в режим АС!)

3. Рассчитать значение неизвестной индуктивности L_x по формуле (2):

$$L_x = \frac{\sqrt{Z_L^2 - R_x^2}}{\omega},$$

где $\omega = 2\pi f$.

4. Рассчитать относительную погрешность измерения:

$$\gamma = \frac{L_{xp} - L_{xu}}{L_{xu}},$$

где L_{xp} - рассчитанное в п.4 значение индуктивности; L_{xu} - установленное по своему варианту значение индуктивности.

5. Собрать схему рис. 1б. $E_{on} = 12 В$, $R_A = 10 Ом$, $R_V = 100 кОм$.

6. Повторить п.п. 2 - 4 для емкости. Рассчитать емкость и погрешность измерения (по аналогии с индуктивностью):

$$C_x = \frac{\sqrt{\frac{1}{Z_C^2} - \frac{1}{R_x^2}}}{\omega}$$

7. Собрать схему рис. 2а: $U_{\sim} = 10 В$, $f = 100 кГц$, $R_1 = R_2 = 1 кОм$, $C_0 = 3 нФ$, $R_0 = 30 Ом$.

8. Уравновесить мостовую схему, изменяя C_0 и R_0 до достижения показаний вольтметра, равных либо существенно приближенных к нулю.

9. Определить C_x и R_x по показаниям C_0 и R_0 . Рассчитать погрешности измерения C_x , R_x и тангенс угла потерь.

10. Собрать схему рис. 2б. $U_{\sim} = 10 В$, $f = 100 кГц$, $R_1 = R_2 = 1 кОм$, $C_0 = 2 мкФ$, $R_0 = 2 кОм$.

11. Уравновесить схему, изменяя C_0 и R_0 , и определить C_x и R_x по показаниям C_0 и R_0 .

12. Рассчитать погрешности измерения C_x и R_x , тангенс угла потерь.

13. Собрать схему рис. 3а: $U_{\sim} = 10 В$, $f = 100 кГц$, $R_0 = 1 кОм$, $C_0 = 10 нФ$, $R_1 = R_2 = 1 кОм$, $L_0 = 2 мН$, $R_0 = 2 кОм$.

14. Уравновесить мостовую схему, изменяя L_0 и R_0 . Записать значения R_x и L_x по показаниям L_0 и R_0 .

15. Рассчитать погрешность измерения R_x и L_x , а также добротность катушки индуктивности.

16. Собрать схему рис. 3б: $U_{\sim} = 10 В$, $f = 100 кГц$, $R_0 = 1 кОм$, $C_0 = 10 нФ$, $R_1 = R_2 = 1 кОм$.

17. Уравновесить мостовую схему. Рассчитать значения R_x , L_x и добротность катушки по формулам, приведенным в описании схемы, а также погрешность измерения R_x и L_x .

18. Собрать схему рис. 4 для измерения L_x резонансным методом. $U_{\sim} = 10 В$, $R_0 = 1 кОм$, $C_0 = 1 нФ$.

19. Изменяя частоту генератора (начать можно с 50 кГц) найти резонансную частоту, соответствующую максимуму показаний вольтметра. Вычислить L_x по формуле

$$L_x = \frac{1}{(2\pi f)^2 \cdot C_0}.$$

20. Рассчитать относительную погрешность в определении L_x .

Требования к оформлению отчета

Отчет по работе должен включать:

- титульный лист с указанием названия и номера варианта работы.
- наименование работы;
- цель работы;
- задание на выполнение работы (вариант);
- экспериментальную часть, включающую результаты измерений, представленные в виде распечаток схем измерений с включенными приборами. Качество скриншотов должно обеспечивать читабельность основных параметров схемы.
- аналитическую часть (расчетные значения измеряемых величин и погрешностей);
- выводы (оценка результатов выполненной работы). Выводы должны отражать результаты сопоставления схем по сложности реализации, широте области применения (диапазон измеряемых значений), а так же по обеспечиваемой точности измерений.