

Лабораторная работа № 3

Измерение сосредоточенных параметров R , L , C электрических цепей

Цель работы: ознакомиться с методами и средствами измерения сосредоточенных параметров R , L , C электрических цепей и способами оценки погрешности таких измерений.

Аппаратура: универсальный лабораторный стенд, лабораторный модуль №4 универсального лабораторного стенда, цифровой измеритель R , L , C Е7-8, мультиметр (омметр) любого типа.

1 Предварительная подготовка к работе

Изучить материал по литературе и техническим описаниям применяемых приборов и ответить на контрольные вопросы.

[1] – с. 251-263; [2] – с. 51-61, 116-121, 191-203, 385-394, 420-429; [3] – с. 249-263.

2 Содержание лабораторной работы

2.1 Измерить сопротивления резисторов $R1 - R6$ лабораторного модуля №4 с помощью цифрового измерителя Е7-8.

2.2 Измерить сопротивления резисторов $R1$ и $R2$ способом амперметра и вольтметра.

2.3 Измерить сопротивления резисторов $R3$ и $R4$ методом замещения с использованием вольтамперметра универсального лабораторного стенда.

2.4 Измерить ёмкости и тангенсы углов потерь конденсаторов $C1 - C6$ лабораторного модуля №4 с помощью цифрового измерителя Е7-8.

2.5 Измерить индуктивности катушек индуктивности $L1 - L4$ и взаимную индуктивность трансформатора $T1$, находящихся в лабораторном модуле №4, определить добротность катушек индуктивности.

3 Методические указания к работе

3.1 Общие сведения.

Методы измерения электрических параметров цепей с сосредоточенными параметрами R , L , C очень разнообразны, а приборный состав включает в себя в основном электронные приборы.

В зависимости от вида измеряемой величины, требуемой точности результата, диапазона рабочих частот и других условий для измерения параметров элементов применяют метод амперметра-вольтметра, мостовой метод, метод замещения, резонансный и цифровой.

Для измерения сопротивления R используют метод амперметра-вольтметра, замещения и измерительные мосты на постоянном токе. В этом случае в одно из плеч включается исследуемый элемент, а в другое смежное плечо моста включается образцовый элемент, представляющий собой набор квантованных образцовых мер, соответствующих весовым коэффициентам разрядов используемого цифрового кода.

Как известно, исследуемые элементы R , L , C характеризуются основными и паразитными (сопутствующими) параметрами.

Для резистора (рис. 3.1) основным параметром является сопротивление электрическому току R , а паразитными - индуктивность L_R выводов и емкость C_R между выводами. Для конденсаторов основным параметром является ёмкость C , а паразитными служат индуктивность L_C пластин и выводов и сопротивление R_C - сопротивление потерь в диэлектрике. У большинства конденсаторов L_C пренебрежимо мала. В этом случае эквивалентная схема упрощается и может быть представлена как последовательное или параллельное соединение R_C и C (рис.3.2).

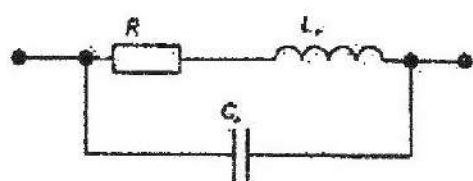


Рис.3.1. Эквивалентная схема замещения резистора

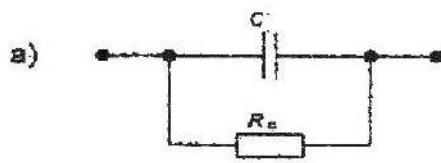


Рис.3.2. Эквивалентная схема замещения конденсатора: а - параллельная; б - последовательная

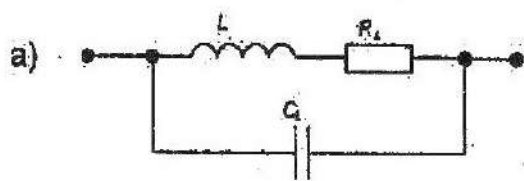


Рис.3.3. Эквивалентная схема замещения катушки: а - полная; б - на низких частотах

При параллельной схеме комплексное сопротивление конденсатора:

$$\dot{Z}_C = \frac{R_C}{1 + j\omega R_C C}, \text{ а тангенс угла потерь: } \operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega R_C C}.$$

При последовательной схеме замещения:

$$r_C = \frac{1}{\omega^2 C^2 R_C}, \quad Z_C = r_C + \frac{1}{j\omega C}, \quad \operatorname{tg} \delta = r_C \omega C.$$

Комплексное сопротивление катушки индуктивности $\dot{Z}_L = R_L + j\omega L$. Для катушки индуктивности (рис. 3.3, а) основным параметром является индуктивность L , паразитными – сопротивление потерь R_L и собственная ёмкость C_L . Важными характеристиками катушки являются: её

собственная резонансная частота $f_L = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_L}}$ и добротность

$$Q = X_L / R.$$

3.2 При измерении сопротивления комбинированным прибором мультиметром или омметром требуется, как правило, предварительная регулировка «0» или «чувствительности», либо того и другого.

3.3 Цифровой измеритель R, L, C Е7-8 служит для автоматического измерения параметров конденсаторов, катушек индуктивности и резисторов с цифровым отсчётом измеряемых величин. Так как прибор работает на частоте 1кГц, то физическая структура конденсаторов соответствует параллельной схеме замещения, а катушек индуктивностей – последовательной.

В основе измерения прибором Е7-8 лежит мостовой метод с фазочувствительными детекторами уравнивания. Структурная схема прибора показана на рис. 3.4.

Питание моста осуществляется от генератора 1000 Гц. Напряжение разбаланса мостовой схемы через усилитель сигнала поступает на входы фазовых детекторов активной (АС) и реактивной (РС) составляющих. Опорные напряжения фазовых детекторов снимаются с мостовой схемы и выбираются такими, чтобы связь контуров уравнивания была минимальной. Выходные напряжения разбаланса с фазовых детекторов подаются на ревер-

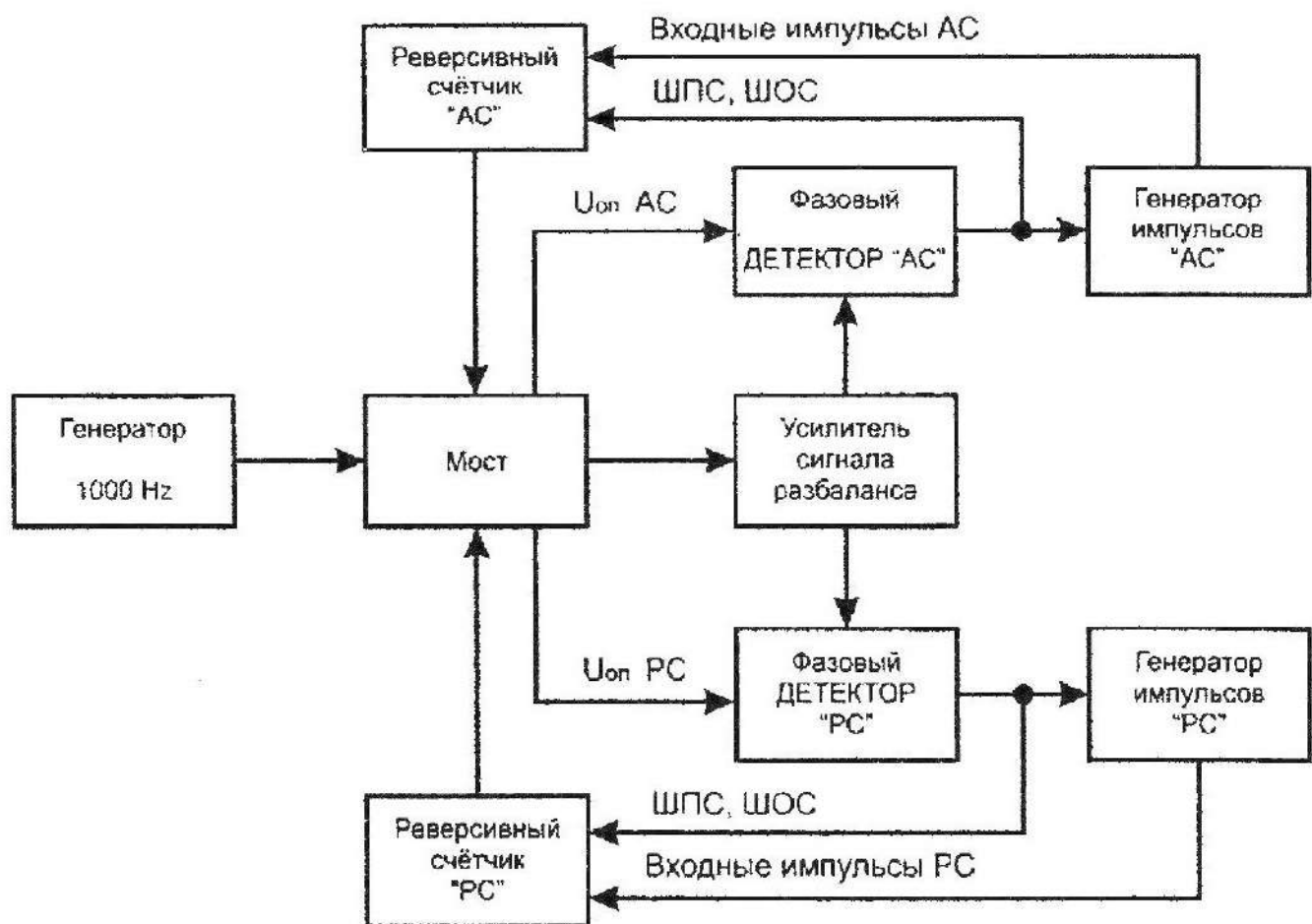


Рис. 3.4. Структурная схема прибора Е7-8

сивные счётчики, управляющие состоянием органов уравнивания мостовой схемы, и на генераторы импульсов, задающие скорость счёта реверсивных счётчиков. Направление счёта реверсивных счётчиков определяется знаком напряжения разбаланса фазового детектора, скорость счёта – величиной этого напряжения. Чем дальше мост от состояния равновесия, то есть больше напряжение разбаланса, тем больше частота следования импульсов от генераторов АС и РС, тем больше скорость счёта реверсивного счётчика и, следовательно, быстрее процесс уравнивания моста. По мере приближения к балансу напряжение разбаланса уменьшается, вследствие чего замедляется скорость уравнивания моста. Для пуска и остановки системы дискретного уравнивания имеется вспомогательная система аналогового уравнивания (САУ), плавно уравнивающая мост в пределах $\pm 0,6$ единицы дискретности. При наличии разбаланса большего 0,5 единицы дискретности, САУ находится в состоянии ограничения и происходит дискретное уравнивание моста. По достижении разбаланса, не превышающего $\pm 0,6$ единицы дискретности, САУ выходит из состояния ограничения и останавливает работу схемы дискретного уравнивания моста.

Более подробные сведения о приборе Е7-8 приведены в техническом описании и инструкции по эксплуатации [4], либо в приложении №3 методических указаний.

Погрешности измерения прибором Е7-8 следует определять по формулам и таблицам, приведённым в техническом описании Е7-8.

3.4 В качестве примера определим погрешность измерения индуктивности, значение которой по данным измерения равно $L_{ИЗМ} = 3001,2 \mu H$. Значение тангенса угла потерь $tg\delta = 2793 \cdot 10^{-4}$. Для определения погрешности измерения ΔL используем формулу пункта 2.7 технического описания:

$$\Delta L = \pm \left[1 \cdot 10^{-3} (1 + tg\delta) L_{ИЗМ} + 0,1 \mu H + 1 \cdot 10^{-4} L_K \right],$$
 где $L_{ИЗМ}$ - измеренное значение индуктивности, L_K - предел измерения. Тогда

$$\Delta L = \pm \left[1 \cdot 10^{-3} (1 + 2793 \cdot 10^{-4}) 3001,2 + 0,1 + 0,001 \right] = 3,94 \mu H.$$

Аналогичные расчёты проводятся при определении погрешности измерения сопротивления R . Результаты измерения $R_{ИЗМ} = 9,99$ Ом, $L_{ИЗМ} = 0,001 mH$.

Определим тангенс угла потерь:

$$tg\varphi = \frac{\omega L_{ИЗМ}}{R_{ИЗМ}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{10} = 6 \cdot 10^{-4}.$$

Погрешность измерения ΔR составит:

$$\begin{aligned} \Delta R &= \pm \left[1 \cdot 10^{-3} (1 + tg\varphi) R_{ИЗМ} + 1 \cdot 10^{-4} R_K \right] = \\ &= \pm \left[1 \cdot 10^{-3} (1 + 6 \cdot 10^{-4}) 9,99 + 1 \cdot 10^{-3} \right] = \pm 0,01 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

3.5 Измерение сопротивления способом амперметра и вольтметра можно выполнять по двум схемам включения: в одном случае измеряется сумма напряжений на объекте и амперметре, в другом – измеряется ток через объект и вольтметр (см. рис. 3.5).

Данный способ относится к косвенным методам измерения, при которых получение результата требует вычислений по принятой модели физической связи искомой величины с величинами, измеренными прямым методом. Модель связи может учитывать или игнорировать влияние приборов

на результат измерения. Игнорирование влияния приборов упрощает расчёт, но требует контроля возникающей при этом погрешности и учёта её в виде поправки результата (в случае необходимости).

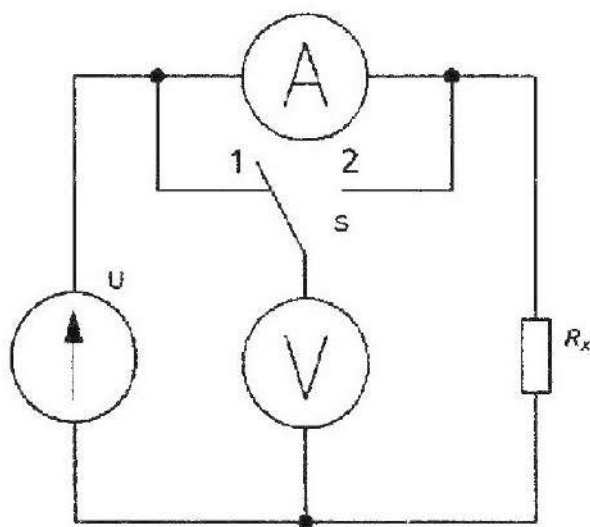


Рис. 3.5. Схема для измерения сопротивления методом амперметра-вольтметра

При включении переключателя S в положение 1 результат измерения R_x определяется по формуле:

$$R_x = U_x / I_x \text{ с методической погрешностью } \delta_M = 100 R_A / R_x (\%),$$

$$\text{либо } R_x = U_x / I_x - R_A \text{ с методической погрешностью } \delta_M = 0,$$

где U_x и I_x показания соответственно вольтметра (V) и амперметра (A),

R_A - сопротивление амперметра.

При включении переключателя S в положение 2 результат измерения R_x определяется по формулам:

$$R_x = U_x / I_x \text{ с методической погрешностью}$$

$$\delta_M = -100 \left[R_x / (R_x + R_V) \right] (\%)$$

$$\text{либо } R_x = U_x / (I_x - U_x / R_V) \text{ с методической погрешностью } \delta_M = 0,$$

где R_V - сопротивление вольтметра.

Значение входного сопротивления вольтметра $R_V = 1 \text{ МОм}$, а значение входного сопротивления амперметра R_A зависит от предела измерения, определяется из табл. 3.1.

Таблица 3.1. Значения сопротивления амперметра

Предел измерения	2 А	200 мА	20 мА	2 мА	0,2 мА
Значение входного сопротивления	0,2 Ом	1 Ом	10 Ом	100 Ом	1000 Ом

При необходимости в результат измерения вносят поправку, равную абсолютной методической погрешности с обратным знаком. Скорректированный результат при этом:

$$R_{XC} = R_X + c, \text{ где } c = \delta_M \cdot R_X / 100.$$

Окончательный результат измерения записывается в виде:

$R_{изм} = R_{XC} \pm \Delta R_X$, где ΔR_X – абсолютная погрешность измерения сопротивления. Значение этой погрешности находится следующим образом.

Так как измерения косвенные и $R_X = U_X / I_X$, то

$$\Delta R_X = \sqrt{\left(\frac{\partial R_X}{\partial U_X} \Delta U_X \right)^2 + \left(\frac{\partial R_X}{\partial I_X} \Delta I_X \right)^2}, \quad \text{где } \Delta U_X = \frac{\gamma_V U_M}{100},$$

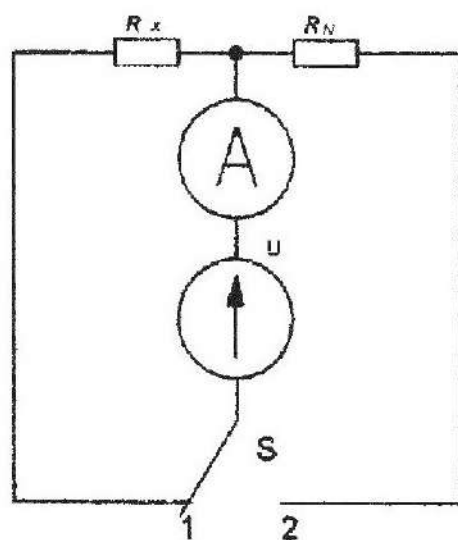
$\Delta I_X = \frac{\gamma_A I_M}{100}$. Здесь γ_A, γ_V – класс точности амперметра и вольтметра, равный 0,5, а I_M, U_M – пределы измерения амперметра и вольтметра соответственно.

Если при выполнении измерений поправки в результат R_X не вводились, то $R_{изм} = R_X \pm \Delta R_X$, где ΔR_X находится по той же формуле, но ΔU_X и ΔI_X определяются как сумма инструментальной погрешности прибора $\Delta U_X, \Delta I_X$ и методической ΔU_M и ΔI_M . Последние можно найти по формулам:

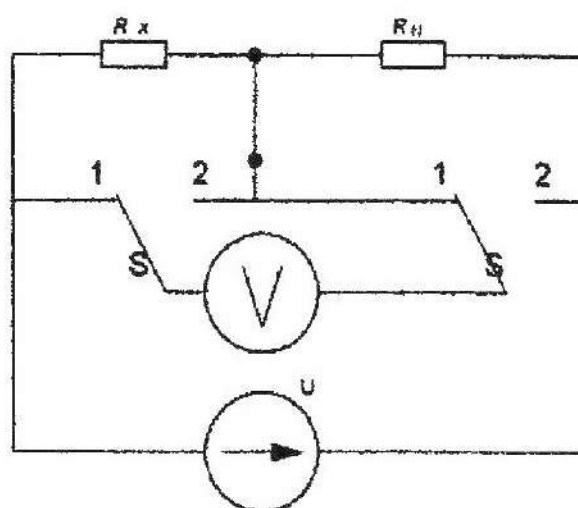
$$\Delta U_M = I_X R_A, \quad \Delta I_M = U_X / R_V.$$

3.6 Метод замещения – метод измерения, при котором объект измерения и известная величина поочерёдно измеряются одним и тем же средством. Результат измерения рассчитывается по паре измеренных значений. Метод позволяет существенно повысить точность измерений при линейной характеристике преобразования измерительного средства.

Измерение сопротивления методом замещения может быть выполнено по схемам, приведённым на рис. 3.6, а, б.



а)



б)

Рис.3.6. Измерение сопротивления методом замещения

В качестве образцовых сопротивлений применить резисторы из набора элементов R_{N1}, R_{N2}, R_{N3} , имеющих разброс в 0,5%.

Результаты измерений вычисляются по формулам:

для схемы а): $R_X = R_N I_N / I_X$, где I_N и I_X – токи в образцовом и измеряемом сопротивлениях соответственно;

для схемы б): $R_X = R_N U_X / U_N$, где U_N и U_X – напряжения на образцовом и измеряемом сопротивлениях соответственно.

Предельное значение основной относительной погрешности измерения при неизвестной форме статической характеристики преобразования измерительного средства:

для схемы а): $\delta_X = \sqrt{\delta_N^2 + [\delta_{I0} (1 - I_N / I_X)]^2}$, %, где δ_N – относительная погрешность значения образцового сопротивления (в процентах),

$\delta_{I0} = k I_K / I_N$, % – относительная погрешность измерения тока в образцовом сопротивлении, k – класс точности прибора;

для схемы б): $\delta_X = \sqrt{\delta_N^2 + [\delta_{U0} (U_N / U_X - 1)]^2}$, %; δ_{U0} – относительная погрешность измерения напряжения на образцовом сопротивлении (в процентах) – определяется аналогично величине δ_{I0} .

При известной статистической характеристике преобразования, в частности при использовании встроенных в лабораторную установку цифровых приборов, предел относительной погрешности результата можно оценить по формуле:

$$\delta_X = \sqrt{\delta_N^2 + [\delta_{ИН} Y_K / Y_N | Y_N / Y_X - 1 |]^2 + 2\delta_{ДН}^2 + 2\delta_{КВ}^2},$$

где $\delta_{ИН} = 0,15\%$ – интегральная нелинейность цифрового преобразователя, встроенного в установку; $\delta_{ДН} = 0,05\%$ – его дифференциальная нелинейность; $\delta_{КВ} = 0,05\%$ – погрешность квантования; Y – символ, обозначающий ток или напряжение.

3.7 Измерение параметров реактивных элементов

3.7.1 Измерение ёмкости и тангенса угла потерь производить с помощью универсального моста Е7-8. Перед измерением мост необходимо подготовить к работе в соответствии с инструкцией по его применению.

3.7.2 Процесс измерения индуктивности катушек индуктивности, их добротности, взаимной индуктивности трансформатора с помощью универсального моста схож с измерением величин пункта 3.7.1.

Измерение взаимной индуктивности M трансформатора способом согласного и встречного включения двух обмоток (начало каждой обмотки помечено звёздочкой). В этом случае измеряется индуктивность согласно включённым обмоткам L_C и индуктивность встречно включённых обмоток L_B . Взаимная индуктивность $M = (L_C - L_B) / 4$. Абсолютная погрешность измерения взаимной индуктивности $\Delta M = (\Delta L_C - \Delta L_B) / 4$, где ΔL_C и ΔL_B – абсолютные погрешности измерения L_C и L_B .

Определение погрешностей измерений по пунктам 3.7.1 и 3.7.2 производить в соответствии с рекомендациями нормативно-технической документации применённого средства измерения.

4 Содержание эксперимента

4.1 Перед включением приборов в сеть необходимо ознакомиться с их техническим описанием, инструкцией по эксплуатации, расположением и назначением органов управления. Лабораторный модуль №4 показан на рис. 3.7.

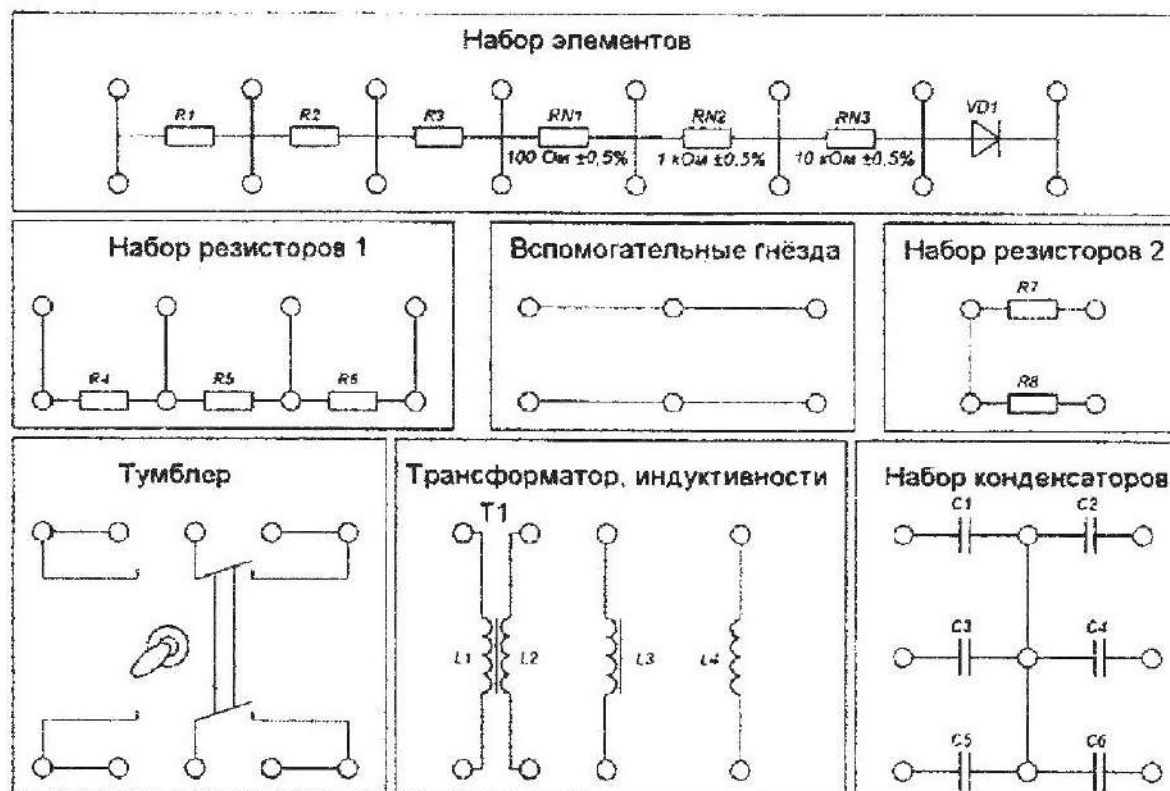


Рис. 3.7. Лабораторный модуль №4

4.2 Для измерения сопротивлений $R1 - R6$ лабораторного модуля №4 (см. рис. 3.7) с помощью цифрового измерителя Е7-8 выполнить:

4.2.1 Подключить к прибору кабель питания.

4.2.2 Заземлить прибор с помощью клеммы защитного заземления.

4.2.3 Установить тумблер СЕТЬ в нижнее положение и включить в сеть кабель питания прибора.

4.2.4 Установить переключатель $U_{\text{поляр}} I_{\text{подм}}$ в положение ВЫКЛ, переключатель ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ – в АВТ., переключатель ЗНАК L, C – в положение АВТ.

4.2.5 Включить тумблер СЕТЬ и дать прибору прогреться в течение 1 минуты.

4.3 Проведение измерений.

4.3.1 При измерении параметров двухполюсников, какими являются R , L , C выводы соединительного кабеля прибора Е7-8 присоединяются к выводам измеряемого элемента модуля №4 с помощью переходных штекеров. Если измеряемый элемент заключён в экран, соединённый с одним из его выводов, то этот вывод должен быть присоединён к выводу кабеля прибора Е7-8, включённому в гнезда I , U (рис. 3.8).

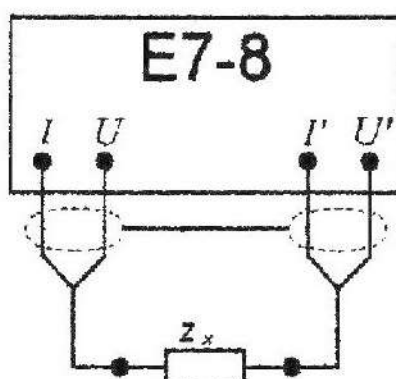


Рис. 3.8. Схема подсоединения исследуемых элементов

4.3.2 При измерении сопротивления резистора R установить переключатель ЗНАК L, C в положение АВТ, переключатели ВИД ИЗМЕРЕНИЯ в положение YR для $YR \leftrightarrow tg\delta$; CY или LR для переключателя C, $Y \leftrightarrow L, R$. Следует помнить что при измерении проводимости Y реактивная составляющая будет измерена прибором в виде параллельной «+» или «-» ёмкости, а при измерениях сопротивления в форме «+» или «-» индуктивности. Провести измерения $R1 - R6$ модуля №4.

4.3.3 Определение погрешности измерения сопротивлений $R_1 - R_6$ производить согласно указаниям инструкции по эксплуатации Е7-8 либо пункта 3.4 методических указаний.

4.4 Измерение параметров реактивных элементов L, C .

4.4.1 При измерении значения параметров реактивных элементов $C1 - C6, L1 - L4$ и взаимной индуктивности трансформатора $T1$ модуля №4 положения переключателей прибора Е7-8 можно оставить в том же состоянии, что и в пункте 4.3.2. Для получения желаемой формы результата измерения установить переключатели ВИД ИЗМЕРЕНИЯ и ЗНАК C, L в соответствии с табл. 3.2.

Таблица 3.2. Положение переключателей при измерении

Характер измеряемой реактивности	Желаемая форма результата измерения	Положение переключателей		
		ЗНАК L, C	$C, Y \leftrightarrow L, R$	$YR \leftrightarrow tg\delta$
Ёмкость, C	C, Y	(+) или АВТ	C, Y	Y, R
	$C, tg\delta$	(+)	C, Y	$tg\delta$
	$-L, R$	(-) или АВТ	L, R	Y, R
	$-L, tg\delta$	(-)	L, R	$tg\delta$
Индуктивность, L	L, R	(+) или АВТ	L, R	Y, R
	$L, tg\delta$	(+)	L, R	$tg\delta$
	$-C, Y$	(-) или АВТ	C, Y	Y, R
	$-C, tg\delta$	(-)	C, Y	$tg\delta$

4.4.2 Оценку погрешностей измерения L и C произвести аналогично п. 4.3.3.

4.5 Измерить значения сопротивлений R_1 и R_2 способом амперметра и вольтметра.

4.5.1 Собрать схему согласно рис. 3.5, где роль амперметра A , вольтметра V и источника напряжения U играют встроенные в универсальный лабораторный стенд вольтметры и блок питания.

4.5.2 Включить стенд и провести измерения согласно указаниям п. 3.5.

4.5.3 Оценить погрешность измерений.

4.6 Измерить сопротивления R_3 и R_4 модуля №4 методом замещения.

4.6.1 Собрать схему (рис. 3.6) для проведения эксперимента. Здесь сопротивления R_X , R_N , переключатель S расположены в модуле №4, а источник напряжения и измерительные приборы - в лабораторном стенде.

4.6.2 Провести измерения согласно указаниям п. 3.6 по схемам рис.3.6,а и 3.6, б и оценить погрешности измерений.

4.6.3 Сопоставить результаты оценки точности измерений сопротивлений различными методами.

5 Требования к отчёту

Отчёт должен содержать:

- Краткое задание.
- Спецификацию применённых средств измерений.
- Схемы включения средств измерений и объектов.
- Примеры расчётов.
- Результаты измерений.
- Выводы по полученным результатам.

6 Контрольные вопросы

1. Какие параметры электрических цепей считаются сосредоточенными, а какие распределёнными?
2. Перечислить методы измерения активных сопротивлений и дать краткую характеристику этим методам.
3. Мостовые методы измерения на переменном и постоянном токе. Чем отличаются условия равновесия четырёхплечего моста на переменном токе от условий равновесия на постоянном?
4. Приведите схемы мостов для измерения параметров R , L , C и $tg\delta$.
5. Как строятся цифровые мостовые измерители R , L , C ?

6. Нарисуйте структурную схему измерителя *RLC* E7-8 и объясните его работу.
7. Как оцениваются погрешности измерения сопротивления:
- а) мостовым методом с помощью E7-8?
 - б) методом амперметра и вольтметра?
 - в) методом замещения?
8. Как оцениваются погрешности измерения параметров реактивных элементов *L*, *C* с помощью измерителя *RLC* E7-8?

Список литературы

1. Кушнир, Ф.В. Электрорадиоизмерения: учеб. пособие для вузов / Ф.В. Кушнир. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1983. – 320с.
2. Основы метрологии и электрические измерения / под ред. Е.М. Душина. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Метрология и радиоизмерения: учебник для вузов / В.И. Нефёдов, В.И. Ханин, В.К. Бирюков [и др.]; под ред. проф. В.И. Нефёдова. – М.: Высш. шк., 2003. – 526с.
4. Измеритель *RLC* E7-8. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, 1988.