

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Государственное образовательное учреждение высшего профес-
сионального образования
“Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет “ЛЭТИ”
им. В.И. Ульянова (Ленина)” (СПбГЭТУ)

Кафедра теоретических основ радиотехники

А.А.ДАНИЛИН

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы по дисциплине
“Приборы и техника радиоизмерений”

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ RLC-КОМПОНЕНТОВ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Санкт-Петербург

2022 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

4. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ RLC-КОМПОНЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ	2
4.1. Параметры сосредоточенных элементов электрических схем	2
4.2. Параметры распределенных линий передачи	8
4.3. Принцип действия и структурная схема измерителя LCR-821	10
4.4. Технические характеристики измерителя LCR-821	14
4.5. Описание лабораторной установки	16
4.6. Задание и указания к выполнению работы	18
4.6.1. Установка режима и калибровка измерителя	18
4.6.2. Измерение параметров катушки индуктивности в диапазоне частот	19
4.6.3. Измерение параметров электролитического конденсатора	20
4.6.4. Измерение параметров варикапа	21
4.6.5. Измерение параметров коаксиального кабеля	21
4.6.6. Измерение импеданса электродинамического громкоговорителя (по указанию преподавателя)	22
4.7. Содержание отчета	22
4.8. Контрольные вопросы	22

4. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ RLC-КОМПОНЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

В работе изучаются методы измерения параметров пассивных компонентов радиоэлектронных схем в диапазоне частот с помощью автоматизированного прибора LCR -821. Также измеряются параметры коаксиального кабеля (волновое сопротивление, затухание и постоянная распространения), исследуются частотные свойства электродинамического громкоговорителя.

4.1. Параметры сосредоточенных элементов электрических схем

Низкочастотные электрические схемы включают в себя компоненты с сосредоточенными постоянными – резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы (RLC элементы). Эти компоненты являются двухполюсниками (имеют два вывода). Более сложные компоненты (с тремя, четырьмя и более выводами) часто описывают схемами замещения, состоящими из двухполюсных элементов.

При работе с гармоническими сигналами свойства двухполюсников описывают с помощью *полного комплексного сопротивления (импеданса) Z*. Оно равно отношению комплексных амплитуд напряжения $\dot{U}$ и тока $\dot{I}$ на элементе. В нем выделяют активное R и реактивное X сопротивления RLC элемента

$$Z = \dot{U} / \dot{I} = R + jX \quad (5.1)$$

В полярных координатах полное сопротивление выражают через модуль и фазовый угол:

$$Z = |Z| \exp(j\theta), \text{ где } |Z| = \sqrt{R^2 + X^2}, \theta = \arctg\left(\frac{X}{R}\right), R = |Z| \cos(\theta), X = |Z| \sin(\theta).$$

В ряде случаев удобнее использовать *полную комплексную проводимость (адмиттанс) Y*, обратную полному сопротивлению:

$$Y = G + jB = \dot{I} / \dot{U} = Z^{-1}.$$

Размерность импеданса - Ом, адмиттанса - Сименс (См). В измерительной практике иногда используют общий термин «иммитанс» для объединения понятий "импеданс" и "адмиттанс».

Двухполюсники обычно представляют в виде последовательной или параллельной схемы замещения (рис. 5.1).

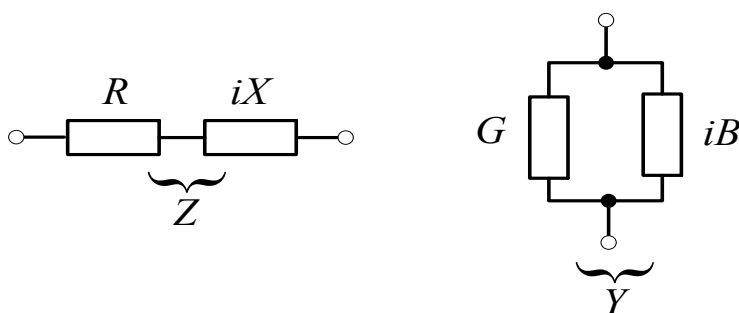


Рис. 5.1. Схемы замещения сосредоточенных элементов электрических цепей

При последовательной схеме элемент характеризуют активным R и реактивным X сопротивлениями, а при параллельной схеме – активной G и реактивной B проводимостями. Эти схемы замещения эквивалентны при условии, что параметры элементов связаны формулами

$$R = \frac{G}{G^2 + B^2}; \quad X = \frac{B}{G^2 + B^2},$$

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2}; \quad B = \frac{X}{R^2 + X^2}.$$

Выбор той или иной схемы замещения определяется методом измерения, удобством представления результата и др.

Выделяют два типа реактивного импеданса – *индуктивный* и *емкостной*. Реактивное сопротивление импеданса индуктивного типа зависит от частоты f по закону $X = 2\pi f L$. Здесь L – индуктивность элемента, ее выражают в Генри - [Гн]. Фазовый угол сопротивления индуктивного типа положителен. Для емкостного типа импеданса $X = \frac{-1}{2\pi f C}$, где C - емкость элемента, размерность ее – Фарада [Ф], фазовый угол - отрицателен.

Для оценки качества реактивных элементов с малыми потерями используют отношение реактивных и активных сопротивлений (или проводимостей) схемы замещения. Так, качество катушек индуктивности обычно характеризуют *добротностью*, которая для последовательной схемы замещения равна:

$$Q_L = \frac{X}{R} = \frac{2\pi f L}{R_s}. \quad (5.2)$$

Качество конденсаторов чаще оценивают обратной величиной - *тангенсом угла потерь* $\operatorname{tg} \delta$ или *фактором потерь* D :

$$D = \operatorname{tg} \delta = \frac{G}{B} = \frac{1}{2\pi f C R_p} = \frac{1}{Q}. \quad (5.3)$$

где R_p - активное сопротивление потерь в параллельной схеме замещения конденсатора (обратное активной проводимости конденсатора G).

Реальные элементы цепей (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивностей) представляют в виде более сложных схем замещения, в которых учитывают активные потери разного вида и паразитные реактивные параметры

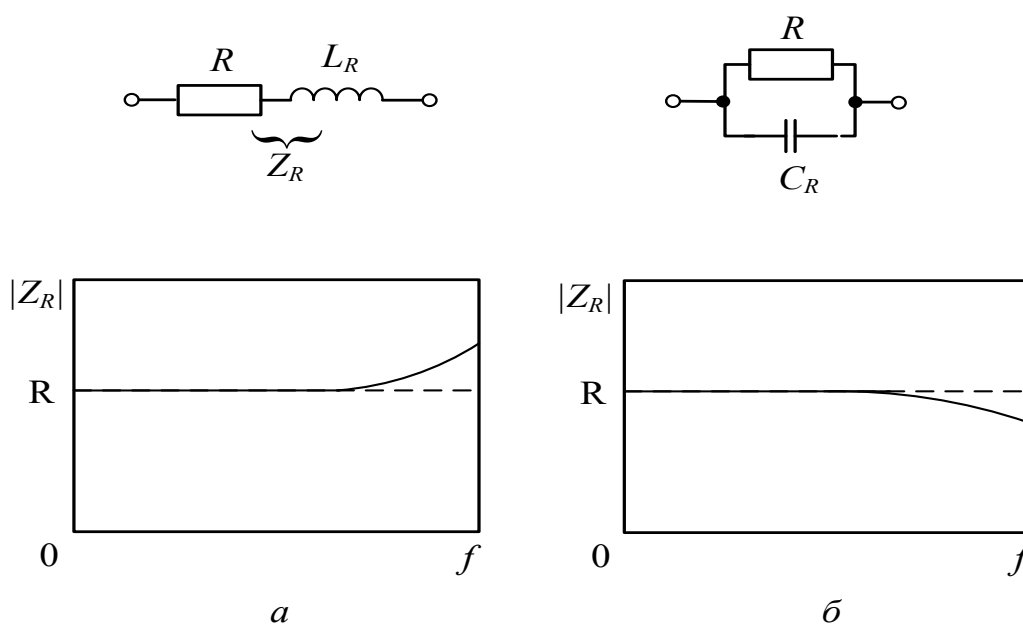


Рис. 5.2.. Схема замещения резистора R :

a – последовательная схема замещения проволочного резистора,

б – параллельная схема замещения пленочного резистора

элемента. Рассмотрим схему замещения *резистора*, в которой, кроме активно-го сопротивления самого резистора R , учтены его паразитные реактивные па-раметры (рис.5.2). Если резистор сделан из отрезка проволоки с высоким удельным сопротивлением, то он обычно имеет паразитную индуктивность L_R . Для пленочных резисторов с высоким сопротивлением характерно нали-чие паразитной емкости C_R . Частотная характеристика модуля полного сопро-тивления $|Z|$ резистора будет иметь отклонение от постоянного значения R на высоких частотах.

Потери в *катушках индуктивности* складываются из активных потерь в проводе, потерь в ферромагнитном сердечнике (который применяют в катуш-ках с большой индуктивностью) и потерь в экране (для экранированных кату-шек). Схема замещения катушки индуктивности учитывает паразитную меж-

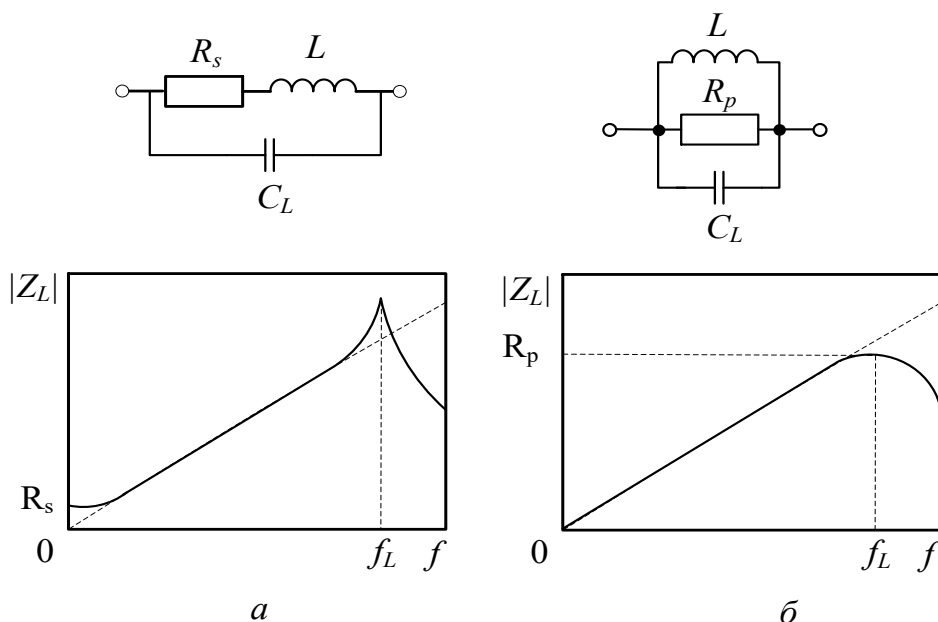


Рис. 5.3. Схемы замещения катушки индуктивности

витковую емкость C_L , сопротивление потерь в проводе R_s для последователь-ной схемы замещения (рис.5.3а) и сопротивление потерь в ферромагнитном сердечнике R_p для параллельной схемы (рис.5.3б). Межвитковая емкость осо-бенно заметна в многослойных катушках с большим количеством витков. Она сказывается на высоких частотах и приводит к сильной зависимости эффек-тивной (*действующей*) индуктивности от частоты.

Для *конденсатора* активные потери учитывают шунтирующим сопро-тивлением утечки R_p (потери в диэлектрике) и сопротивлением потерь в про-водниках и обкладках R_s (рис.5.4).

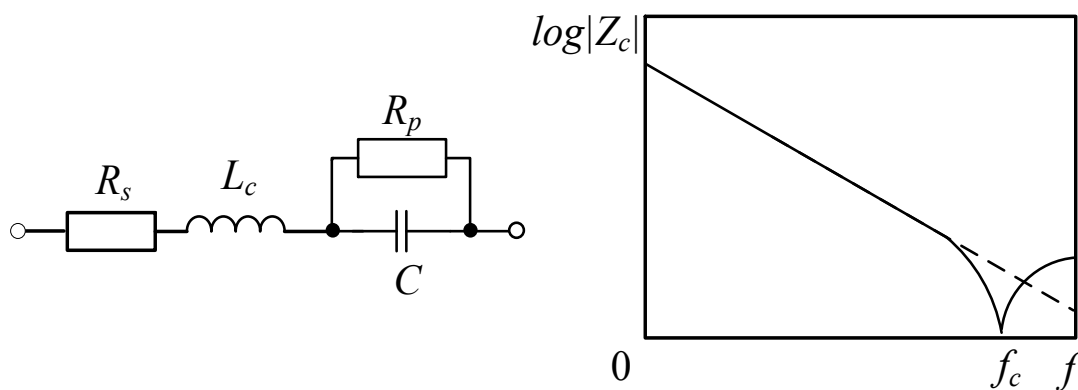


Рис. 5.4.. Схема замещения реального конденсатора

На высоких частотах необходимо учитывать также индуктивность выводов конденсатора L_c . У высокочастотных керамических конденсаторов основным паразитным параметром является параллельное сопротивление утечки. Для конденсаторов большой емкости сильнее сказывается последовательное сопротивление потерь R_s . Особенно это проявляется у электролитических конденсаторов, у которых эквивалентное последовательное сопротивление (его обозначают ESR – Equivalent Series Resistance) в ряде случаев соизмеримо с емкостным сопротивлением конденсатора. Параметр ESR является для таких конденсаторов важнейшим показателем его качества.

Наличие паразитных реактивных параметров у реальных компонентов приводит к тому, что частотная зависимость реактивной составляющей импеданса индуктивности или адмиттанса конденсатора отличаются от линейной. Поэтому при измерениях определяют *действующие* значения индуктивности и емкости. Их вводят из условия равенства реактивных сопротивлений (проводимостей) реального элемента и эквивалентной индуктивности (емкости) на частоте измерения. Как видно на рис. 5.3, частотная зависимость модуля полного сопротивления катушки отличается от линейной в области малых частот из-за последовательного сопротивления потерь и - в области больших частот, - из-за межвитковой емкости. Действующее значение индуктивности L_d в предположении малых потерь ($R_s \ll \omega L$) задают формулой

$$L_d = \frac{L}{1 - 2\pi f LC} = \frac{L}{1 - (f/f_L)^2},$$

где $f_L = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ – собственная резонансная частота катушки. Частотная зависимость действующего значения катушки индуктивности представлена на рис.5.5. На резонансной частоте действующее значение индуктивности стре-

мится к бесконечности. На частотах, больших f_L , действующая индуктивность отрицательна (преобладает паразитная емкость катушки).

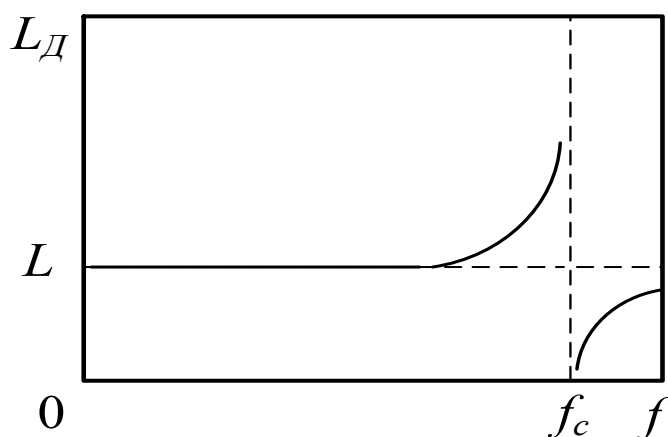


Рис. 5.5.. Частотная зависимость действующего значения индуктивности катушки

Для трехэлементной схемы замещения конденсатора частотная зависимость модуля полного импеданса в логарифмическом масштабе линейна практически до частоты собственного резонанса конденсатора (см. рис. 5.4). При малых потерях ($R_p \gg \frac{1}{\omega C}$) действующее значение емкости конденсатора определяется формулой

$$C_d = \frac{C}{1 - 2\pi f LC} = \frac{C}{1 - (f/f_c)^2},$$

где $f_c = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ — собственная резонансная частота конденсатора.

Для измерения параметров схемы замещения катушки и конденсатора недостаточно определить вещественную и мнимую части полного иммитанса — требуется знать их зависимость от частоты. Значения паразитных параметров катушки и конденсатора можно найти по результатам измерений действующих значений их индуктивностей (емкостей), как минимум, на двух частотах.

Измерение собственной индуктивности L и паразитной емкости катушки C_L проводят таким образом. Пусть L_{d1} и L_{d2} — действующие значения индуктивности катушки, измеренные на частотах f_1 и f_2 соответственно. В этом случае на основании эквивалентной схемы катушки (рис. 5.3, а), можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{j2\pi f_1 L_{Д_1}} = \frac{1}{j2\pi f_1 L} + j2\pi f_1 C_L, \\ \frac{1}{j2\pi f_2 L_{Д_2}} = \frac{1}{j2\pi f_2 L} + j2\pi f_2 C_L, \end{cases} \quad (5.4)$$

где L и C_L – неизвестные значения собственной индуктивности и межвитковой емкости катушки. Решение системы (5.1) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} L = \frac{f_1^2 - f_2^2}{(f_1^2/L_{Д_2}) - (f_2^2/L_{Д_1})}, \\ C_L = \left(\frac{1}{L_{Д_2}} - \frac{1}{L_{Д_1}} \right) \cdot \left((2\pi f_1)^2 - (2\pi f_2)^2 \right)^{-1}. \end{cases} \quad (5.5)$$

Аналогичные соотношения можно получить и для расчета собственной емкости и паразитных параметров конденсатора.

4.2. Параметры распределенных линий передачи

На высоких частотах в схемах применяют распределенные компоненты – отрезки линий передачи. Эквивалентная схема таких элементов – «длинная линия». Она представляет собой бесконечную цепочку погонных индуктивностей L_{Π} и емкостей C_{Π} . Отношение погонных параметров определяет *волновое* (или *характеристическое*) *сопротивление* линии передачи ρ :

$$\rho = \sqrt{\frac{L_{\Pi}}{C_{\Pi}}},$$

а их произведение – *коэффициент распространения* волны вдоль длинной линии $\beta = 2\pi \cdot f \sqrt{L_{\Pi} C_{\Pi}}$. Этот коэффициент определяет фазовую скорость распространения волны в линии передачи и, следовательно, фазовый набег сигнала на единицу длины. Его часто называют *электрической длиной* θ линии передачи с геометрической длиной l : $\theta = \beta \cdot l$. Для реальной линии передачи с потерями (например, для коаксиального кабеля) погонные параметры включают также последовательное и параллельное сопротивления потерь. Коэффициент распространения при этом будет комплексным $\gamma = \alpha + i \cdot \beta$. Его вещественная часть – *коэффициент затухания* α , мнимая часть – *коэффициент фазы* β .

Измеритель параметров RLC можно использовать для определения волнового сопротивления и постоянной распространения в коаксиальном кабеле. Для этого несколько раз измеряют комплексное входное сопротивление отрезка кабеля при различных нагрузках на его конце. Наиболее часто используют короткозамкнутую нагрузку (КЗ) и нагрузку холостого хода (ХХ). Теория длинных линий дает следующие формулы для расчета входных сопротивлений в этих случаях:

$$Z_{\text{кз}} = \rho \cdot \text{th}(\gamma l) = |Z_{\text{кз}}| \exp(\theta_{\text{кз}}), \quad Z_{\text{хх}} = \frac{\rho}{\text{th}(\gamma l)} = |Z_{\text{хх}}| \exp(\theta_{\text{хх}}).$$

Здесь l – геометрическая длина отрезка линии, $\text{th}(\gamma l)$ – гиперболический тангенс от комплексного аргумента γl , θ – фазовый угол (аргумент) входного импеданса. Отсюда определяют волновое сопротивление $\rho = \sqrt{|Z_{\text{кз}}| \cdot |Z_{\text{хх}}|}$ и величину гиперболического тангенса $\text{th}(\gamma \cdot l) = \sqrt{Z_{\text{кз}} / Z_{\text{хх}}}$. Расчетные формулы для коэффициента затухания отрезка линии длиной l выглядят так:

$$\alpha = \frac{1}{2l} \cdot \ln \left(\sqrt{\frac{(1 + \text{th}R)^2 + (\text{th}X)^2}{(1 - \text{th}R)^2 + (\text{th}X)^2}} \right), \text{ дБ/м}, \quad (5.6)$$

и коэффициента фазы

$$\beta = \frac{1}{2l} \cdot (\arctg(\frac{\text{th}X}{\text{th}R + 1}) + \arctg(\frac{\text{th}X}{1 - \text{th}R})), \quad \text{рад/м}. \quad (5.7).$$

В литературе используют также другую форму этого выражения

$$\beta = \frac{1}{2l} \cdot (\pi - \arctg(\frac{\text{th}R + 1}{\text{th}X}) + \arctg(\frac{\text{th}R - 1}{\text{th}X})), \quad \text{рад/м}.$$

Здесь использованы обозначения вещественной $\text{th}R$ и мнимой части $\text{th}X$
 $\text{th}(\gamma \cdot l) = \text{th}R + i \cdot \text{th}X$:

$$\text{th}R = \sqrt{\frac{|Z_{\text{кз}}|}{|Z_{\text{хх}}|}} \cos(\frac{\theta_{\text{кз}} - \theta_{\text{хх}}}{2}), \quad \text{th}X = \sqrt{\frac{|Z_{\text{кз}}|}{|Z_{\text{хх}}|}} \sin(\frac{\theta_{\text{кз}} - \theta_{\text{хх}}}{2}) \quad (5.8)$$

Ослабление (потери) на единицу длины кабеля равны

$$A = 20 \lg(e^\alpha) = 8.6859 \cdot \frac{1}{2l} \cdot \ln \left(\sqrt{\frac{(1 + \text{th}R)^2 + (\text{th}X)^2}{(1 - \text{th}R)^2 + (\text{th}X)^2}} \right), \text{ дБ/м} \quad (5.9)$$

Важным параметром коаксиального кабеля является *коэффициент укорочения* K_y . Он показывает, во сколько раз фазовая скорость в кабеле меньше скорости света в свободном пространстве:

$$K_y = 3 \cdot 10^8 \frac{\beta}{2\pi \cdot f} \quad (5.10)$$

Коэффициент укорочения определяет соотношение между электрической длиной исследуемого кабеля и электрической длиной линии передачи с воздушным заполнением. Его величина зависит от параметров диэлектрического заполнения кабеля. Так, коаксиальные кабели, применяемые для передачи телевизионных сигналов, имеют волновое сопротивление 75 Ом, коэффициент укорочения в пределах 1,4...1,7 и постоянную затухания порядка дБ/м.

4.3. Принцип действия и структурная схема измерителя LCR-821

Для измерения активного сопротивления на постоянном и переменном токе, индуктивности и емкости на низких частотах используют многофункциональные аналоговые и цифровые мультиметры. Рабочий диапазон и точность таких приборов, как правило, ограничены. Более сложные измерения - получение частотных зависимостей, определение добротности и фактора потерь проводят специализированными приборами – *измерителями иммитанса* (импеданса и адмиттанса) или измерителями RLC.

Принцип действия используемого в работе измерителя основан на модифицированном варианте *метода вольтметра-амперметра*. Он состоит в измерении отношения *комплексных* амплитуд напряжения и тока на исследуемом компоненте. На практике для его реализации используют преобразователи импеданса на основе операционного усилителя переменного тока, охваченного глубокой ООС (рис. 5.6).

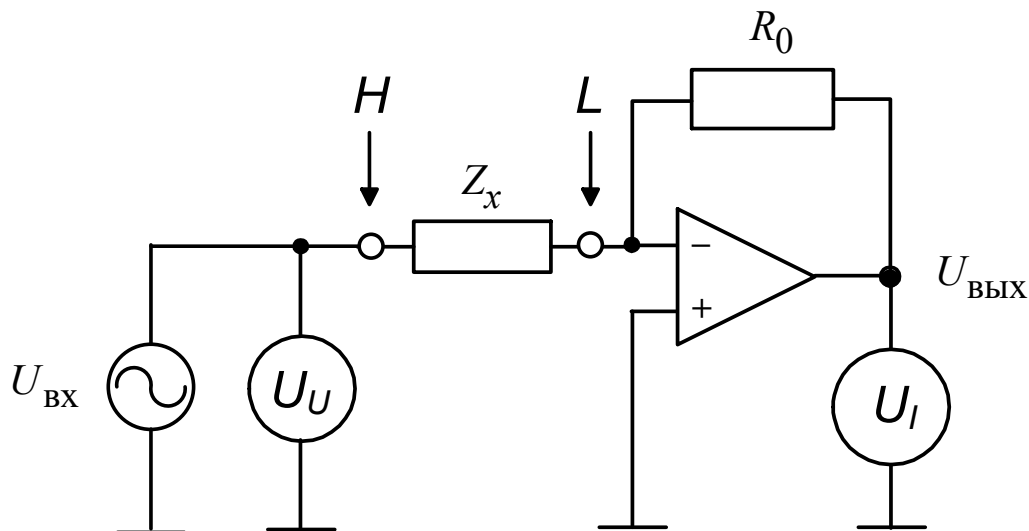


Рис. 5.6. Схема преобразования «Z-U»

В данной схеме ток через измеряемый элемент преобразуют в напряжение на выходе усилителя. Поэтому измерение импеданса Z_x сводится к измерению отношения комплексных амплитуд напряжений на входе и выходе усилителя. Такой способ измерения называют *методом преобразования сопротивления в напряжение «Z - U»*.

Комплексную амплитуду напряжения $\dot{U}_U = \dot{U}_{ВХ}$ на входном зажиме, обозначенном «H» (высокий потенциал), измеряют *векторным вольтметром* U_U , который измеряет не только амплитуду, но и фазу входного напряжения. Ток через исследуемый элемент Z_x поступает на вход усилителя в точку, обозначенную «L» (низкий потенциал). Усилитель имеет большой коэффициент передачи и охвачен обратной связью через образцовый резистор R_0 . При этом амплитуда выходного напряжения операционного усилителя $U_{ВЫХ}$, охваченного глубокой ООС, определяется практически только отношением сопротивлений R_0 / Z_x и, следовательно, пропорциональна току через исследуемый компонент $\dot{U}_{ВЫХ} = \dot{U}_I$. Ее измеряют векторным вольтметром U_I . Отношение двух комплексных амплитуд напряжений дает величину искомого импеданса:

$$Z_x = R_0 \frac{\dot{U}_U}{\dot{U}_I}.$$

Образцовый резистор R_0 определяет масштаб преобразования «Z - U». С его помощью устанавливают диапазон измерения прибора.

Рассмотрим реализацию данного метода в микропроцессорном измерителе LCR-821, упрощенная схема которого представлена на рис. 5.7 :

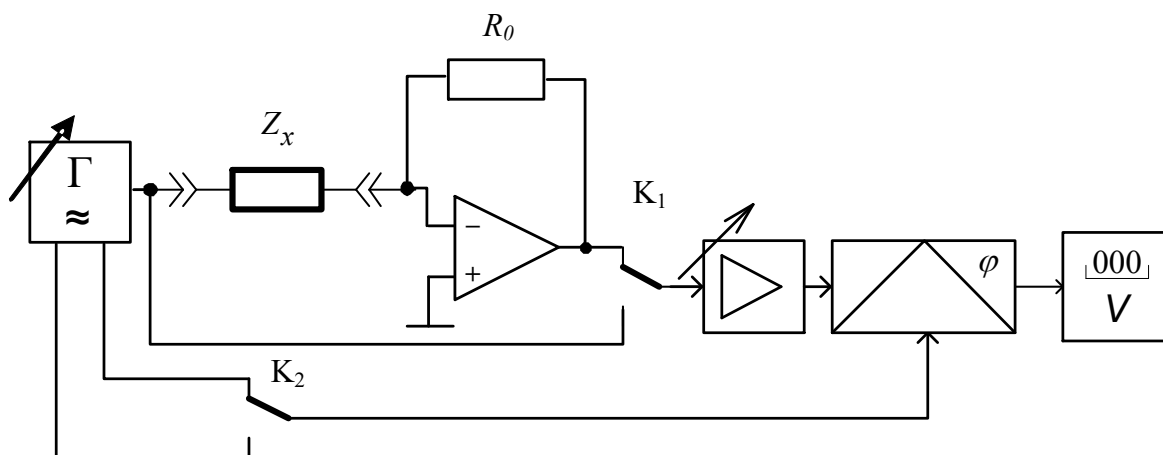


Рис. 5.7. Микропроцессорный измеритель параметров RLC компонентов

В приборе использована схема измерения комплексных амплитуд напряжения, состоящая из синхронного фазового детектора и цифрового вольтметра постоянного тока. Напряжения $\dot{U}_U$ и $\dot{U}_I$, пропорциональные напряжению и току на исследуемого элементе, с помощью электронного коммутатора K_1 по очереди подают на вход масштабного усилителя переменного тока. Его используют для переключения диапазона измерения иммитанса. Напряжение с выхода усилителя $U_m \sin(\omega t + \theta)$, пропорциональное $\dot{U}_U$ или $\dot{U}_I$, поступает на синхронный фазовый детектор, состоящий из перемножителя напряжений и фильтра низкой частоты. На второй вход перемножителя через электронный коммутатор K_2 с генератора поочередно подают опорные сигналы: сначала $U_0 \sin(\omega t)$, затем $U_0 \cos(\omega t)$ (эти сигналы сдвинуты друг относительно друга на 90°). На выходе перемножителя последовательно получают напряжения:

$$U_m \sin(\omega t + \theta) \cdot U_0 \cos(\omega t) = \frac{U_0}{2} U_m \sin \theta + \frac{U_0}{2} U_m \sin(2\omega t + \theta)$$

$$U_m \sin(\omega t + \theta) \cdot U_0 \sin(\omega t) = \frac{U_0}{2} U_m \cos \theta - \frac{U_0}{2} U_m \cos(2\omega t + \theta).$$

Гармонические составляющие с удвоенной частотой подавляют фильтром нижних частот. Постоянные напряжения на выходе фазового детектора, пропорциональные $U_m \cos \theta$ и $U_m \sin \theta$, представляют собой вещественную и мнимую части соответствующих комплексных амплитуд. Эти напряжения

измеряют цифровым вольтметром постоянного тока. Результаты измерения (два вещественных числа для напряжения $\dot{U}_U$ и два - для $\dot{U}_I$) передаются в микропроцессорную систему, где производится расчет иммитанса, индуктивности и емкости, фактора потерь и добротности по формулам (5.1)...(5.3).

Такой способ измерения не требует источника переменного напряжения с точно установленной амплитудой. Для низкоомных объектов измеряют полное сопротивление Z_x , используя генератор с большим выходным сопротивлением (генератор тока). Это уменьшает влияние генератора на результат измерения. При исследовании высокоомных цепей удобнее использовать генератор напряжения с малым выходным сопротивлением. Результат получают в виде составляющих комплексной проводимости Y_x .

Для уменьшения влияния соединительных проводов в измерителях RLC используют *четырёхпроводную схему* подключения исследуемого элемента (рис. 5.8).

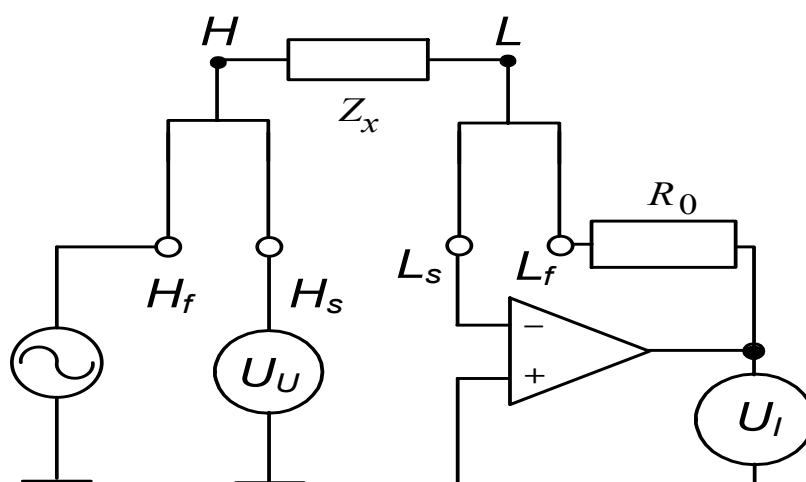


Рис. 5.8. Четырёхзажимная схема подключения RLC элемента

Входные клеммы прибора разделяют на две пары – пара входов высокого потенциала H_f и H_s и пара входов низкого потенциала L_f и L_s . Их обозначение идет от слов «force» - «усиленный» и «sense» - «чувствительный». Пары проводников соединяют в одной точке на разъемах типа «крокодил» (рис. 5.9). Исследуемый элемент подключают к этим разъемам. Соединение проводников $H_f - H_s$ и $L_f - L_s$ происходит непосредственно на его выводах H и L.

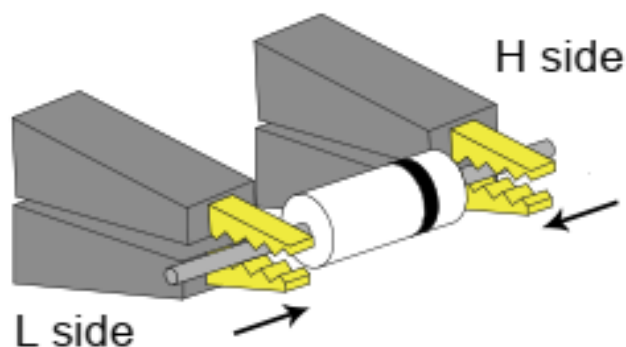


Рис. 5.9. Подключение резистора к клеммам Н и L

Поскольку входное сопротивление операционного усилителя велико, то ток в проводнике L-Ls мал. Точка входа операционного усилителя Ls и точка подключения элемента L практически эквипотенциальны. Аналогично при таком соединении минимизируется падение напряжения на проводнике H-Hs, соединяющем высокоомный вольтметр U_U и точку подключения элемента H. Таким образом, в четырехпроводной схеме исключается влияние сопротивления соединительных проводов на результат измерения.

В приборе LCR-821 предусмотрена возможность подачи на исследуемый элемент постоянного напряжения и тока смещения как от внутреннего, так и от внешнего источника питания. Это позволяет исследовать зависимость измеряемых параметров от режима работы компонента. Например, можно измерить зависимость индуктивности катушки катушки с ферромагнитным сердечником от постоянного тока подмагничивания, зависимость емкости сегнетоэлектрического конденсатора от напряжения смещения, снять вольт-фарадную характеристику варикапа и пр.

4.4. Технические характеристики измерителя LCR-821

Прибор предназначен для измерения сопротивления, ёмкости, индуктивности, тангенса угла потерь, добротности, эквивалентного последовательного или параллельного сопротивления, модуля комплексного сопротивления ($|Z|$) и фазового сдвига между током и напряжением (θ). Запуск измерений - автоматический или ручной. В автоматическом режиме предусмотрено три скорости измерений – SLOW (примерно 1 измерение/с), MEDIUM – 3 измерения/с и FAST – более 7 измерений /с. В приборе обычно используют автома-

тический выбор предела измерения. Это несколько замедляет работу, поэтому при исследовании однотипных элементов (например, партии резисторов) удобно фиксировать предел измерения (режим RANGE HOLD).

Базовая погрешность прибора не хуже: по R, L, C, Z: 0.05%, при измерении D, Q: 0.0005; погрешность измерения фазы θ : 0.03° . Частота тест-сигнала генератора может устанавливаться в пределах 12 Гц - 200 кГц на 504 фиксированных частотах. Рабочая сетка частот устанавливается в приборе по следующему правилу

$$f = \begin{cases} \frac{3\text{кГц}}{n}, & n = 13...250 & (12 \text{ Гц}...230 \text{ Гц}) \\ \frac{60\text{кГц}}{n}, & n = 4...256 & (230 \text{ Гц}...15 \text{ кГц}) \\ \frac{200\text{кГц}}{n}, & n = 1..13 & (15 \text{ кГц}...200 \text{ рУв}) \end{cases},$$

где n- целое число. При наборе требуемой частоты с панели управления прибор округляет ее до ближайшего значения собственной сетки частот.

Уровень тест-сигнала, подаваемого на исследуемый компонент, регулируется в пределах 0.005... 1.275 В с шагом 5 мВ. Выбор разного уровня сигнала необходим при измерении компонентов, параметры которых зависят от его амплитуды. Предусмотрен режим постоянного уровня тест-сигнала (C.V.), при котором на выходных зажимах поддерживается амплитуда сигнала, мало зависящая от импеданса исследуемого компонента.

Результаты выводятся на табло (5 значащих цифр) в абсолютных или относительных единицах (Δ -измерения). Режим усреднения результатов позволяет проводить многократные измерения для снижения случайной погрешности. Установленные предварительно параметры прибора могут быть сохранены в энергонезависимой памяти прибора и вызваны при его следующем включении. Прибор допускает полное управление с компьютера и вывод на компьютер результатов измерения через последовательный интерфейс RS-232C.

Основные технические параметры прибора LCR-821 приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

ХАРАКТЕРИСТИКИ	ПАРАМЕТРЫ	ЗНАЧЕНИЯ
Диапазон измерения RLC	Сопротивление (R, ESR, Z)	0.00001 Ом - 99999 кОм

	Емкость (C)	0.00001 пФ - 99999 мкФ
	Индуктивность (L)	0.00001 мГн - 99999 Гн
	Добротность (Q)	0,0001 - 9999
	Тангенс угла потерь (D)	0,0001 - 9999
	Фазовый сдвиг (θ)	-180,00...180,00°
	Режимы измерения	R/Q, C/D, C/R, L/Q, L/R, Z/ θ
	Запуск измерений	Автоматический или ручной
	Схема измерения	Параллельная/последовательная
	Частота тест-сигнала	12 Гц - 200 кГц , 504 фиксированные частотные точки
СКОРОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ	Время одиночного измерения в режиме FAST	≤ 68 мс
ПОСТОЯННОЕ СМЕЩЕНИЕ	Внутренний источник	2 В
	Внешний источник	0 - 35 В (максимальный ток 200 мА)
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ	Режим усреднения	1...255 измерений
ДИСПЛЕЙ	Тип индикатора	ЖКИ матрица (240 x 128 точек) с подсветкой и регулировкой контрастности.
	Формат индикации	5 разрядов на основной шкале, 4 разряда на дополнительной шкале

4.5. Описание лабораторной установки

В состав установки входит измеритель LCR -821, набор исследуемых компонентов, персональный компьютер, связанный с прибором

последовательным интерфейсом. Прибор управляется кнопочной панелью (цифры [0]...[9], знак [-] и кнопки [START],[ENTER]), а также с помощью экранного меню. Кнопочная панель имеет второй регистр для установки режима смещения [BIAS ON/OFF], режима постоянной амплитуды тест-сигнала [C.V], режима фиксации диапазона измерения [R.H]. Установка частоты тест-сигнала производится нажатием кнопки [FREQ], набором требуемого значения (в кГц) и подтверждением ввода кнопкой [ENTER]. Ручной запуск измерений производится кнопкой [START]. Перевод в автоматический режим (непрерывные измерения) производят длительным нажатием этой кнопки.

Экранное меню управляется функциональными кнопками [F1]...[F5], расположенными справа от экрана. В меню предусмотрено переключение скорости измерений [F1], вида индикации результата [F2] : абсолютный формат – [VALUE], относительный [DELTA%], [DELTA]. Кнопкой [F3] производится выбор режима измерений, кнопка [F4] позволяет задать схему замещения – параллельную или последовательную. Установки более сложных опций прибора (режимы памяти, усреднения, калибровки и пр.) производится в пункте MENU, выбираемым по кнопке [F5].

В приборе предусмотрена возможность связи с персональным компьютером. Для этого используется последовательный интерфейс RS-232C с фиксированной скоростью 38400 бит/с. Длина пакета данных 8 бит, 1 стоповый бит, контроль четности отключен. Эти параметры необходимо установить в свойствах последовательного порта COM1 компьютера.

Фирменное программное обеспечение включает программу управления прибором LCR-viewer (файл LCR800.exe). Программа позволяет полностью дублировать все кнопочные команды управления прибором. При этом органы управления и дисплей блокируются. Результаты измерения с дисплея выводятся в текстовый файл вида LCR_XXXX.txt, где XXXX – номер файла по порядку.

Для измерения частотных характеристик точечный режим измерения неудобен, так как ввод частоты с помощью кнопочной панели занимает довольно много времени. Упростить работу с прибором и автоматизировать измерение частотных характеристик позволяет программа LCR-meter, написанная на графическом языке среды LabVIEW. В ней предусмотрен выбор режима работы прибора и измерение параметров компонента в диапазоне частот 20Гц ...200 кГц. Полученные результаты выводятся в

таблицу и в виде графиков частотных зависимостей. Их можно экспортировать в электронную таблицу Excel, а также в буфер обмена с целью последующей обработки.

4.6. Задание и указания к выполнению работы

4.6.1. Установка режима и калибровка измерителя

Проверьте установку режима, используемого в данной лабораторной работе:

- [SPEED] = MEDI (длительность измерения порядка 300 мс);
- [DISPLAY] = VALUE (режим вывода значения результата измерения).
- [MODE] = L/Q.
- [CURCUIT] = SERIES (схема замещения –последовательная).
- [C.V] = OFF (режим постоянного уровня выходного напряжения отключен);
- [R.H] = OFF – поддержка режима RANGE HOLD -фиксированного диапазона измерения - отключена);
- [INT.B] = OFF - внутренний источник смещения отключен (источник выбирается кнопкой [BIAS] и включается/выключается кнопкой [ON/OFF]).

Для исключения систематической погрешности перед проведением измерений прибор необходимо откалибровать. Калибровка прибора производится в ручном режиме управления (MANU). Если в приборе установлен автоматический режим измерений AUTO, для перехода в ручной необходимо длительно нажать кнопку [START].

Для калибровки разомкните клеммы L и H соединительного кабеля и включите режим калибровки холостого хода OPEN TEST (пункт [MENU] => [OFFSET] = CAP OFFSET). Дождитесь завершения процесса калибровки по слайд-индикатору на экране. Затем замкните клеммы L и H и проведите калибровку в режиме короткого замыкания SHORT TEST ([MENU] => [OFFSET] = R/L OFFSET). Выйдите из режима калибровки, нажав кнопку [EXIT]. Перейдите в автоматический режим измерений (AUTO), для чего необходимо длительно нажать кнопку [START].

Прибор откалиброван и готов к измерениям.

4.6.2. Измерение параметров катушки индуктивности в диапазоне частот

Исследуемая катушка представляет собой соленоид на ферромагнитном сердечнике и имеет большую индуктивность, значительное активное сопротивление и заметную межвитковую емкость. Резонансная частота катушки лежит в диапазоне рабочих частот прибора.

Для измерения частотных параметров катушки запустите программу LCR-meter. Прибор при этом перейдет в режим полного управления от компьютера. Установите вид измерения полного сопротивления («Режим» => Z/Teta) и запустите программу кнопкой «СТАРТ».

Данные измерения выводятся в окна программы и в таблицу в поля <Data1>, <Data2>, где первый и второй параметры соответствуют обозначению выбранного режима. Например, для режима Z/Teta <Data1> - это модуль полного сопротивления, Ом, <Data2> - его аргумент, градусы.

Просмотрите зависимость фазового угла полного сопротивления катушки в диапазоне частот 20 Гц - 200 кГц и с помощью курсора «Data 2» приблизительно определите частоту резонанса катушки f_L . На этой частоте фазовый угол близок к нулю.

Измерьте частотные характеристики действующего значения индуктивности катушки и ее добротности («Режим» => L/Q), а также ее последовательного сопротивления («Режим» => L/R). Сохраните полученные диаграммы в графическом формате ([Export] => [Export Simplified Image]). Для сохранения численных результатов измерения L,Q,R в файл используйте режим экспорта данных: по правой кнопке мыши на соответствующем графике выберите пункт [Export] => [Export Data to Excel]. Можно экспортировать всю таблицу данных: щелчок правой кнопкой на таблице и выбор пункта выпадающего меню [Copy Data] позволяют скопировать в буфер обмена всю таблицу, которую затем надо вставить в пустую книгу Excel.

Результаты измерений частотных характеристик катушки оформите в виде таблицы 5.2.

Таблица 5.2

Частота, кГц	Параметр
--------------	----------

	L, мГн	Q	Rs, Ом (кОм)

Постройте графики частотных зависимостей измеренных параметров. Определите собственную индуктивность и межвитковую емкость катушки. Для этого выберите слева от точки собственного резонанса катушки две частоты f_1 и f_2 , на которых действующие значения индуктивности катушки $L_{Д1}$ и $L_{Д2}$ отличаются достаточно заметно. Рассчитайте собственную индуктивность катушки L , собственную емкость катушки C_L по формулам (5.5) и резонансную частоту катушки

$$f_L = 1 / (2\pi\sqrt{LC_L}).$$

4.6.3. Измерение параметров электролитического конденсатора

Исследуемый конденсатор имеет номинальную емкость 500 нФ. Исследуйте частотную зависимость его параметров во всем частотном диапазоне прибора с помощью программы LCR-meter. На первом этапе используйте режим измерения модуля и фазы полного сопротивления конденсатора Z/θ («Режим» => $Z/Teta$). Сохраните полученные данные в Excel-файл. Затем измерьте емкость C и эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора в режиме C/R и также сохраните данные в файл. Занесите результаты в таблицу 5.3. Постройте зависимости параметров конденсатора от частоты.

Таблица 5.3

Частота, кГц	Параметр			
	C, нФ	Rs, Ом	Z , Ом	θ, град

4.6.4. Измерение параметров варикапа

В лабораторной работе измеряются параметры *варикапа*. Так называют запертый отрицательным напряжением смещения полупроводниковый диод. Для переменного тока он представляет собой конденсатор, емкость которого зависит от напряжения смещения.

Проведите измерение вольтфарадной характеристики варикапа в ручном режиме работы прибора, для чего необходимо выйти из программы LCR-meter (кнопка [ВЫХОД]). В ручном режиме можно использовать программу LCR800.exe или управлять работой прибора с его передней панели.

Установите рабочую частоту 200 кГц [FREQ] => 200, режим измерения – AUTO (устанавливается длительным нажатием кнопки [START]). Проведите измерение емкости и фактора потерь варикапа (режим работы C/D) при разном напряжении смещения, подаваемого от внешнего блока питания на разъемы на задней панели прибора. Установите на блоке питания ограничение тока порядка 5 мА, напряжение 1 В. Для подачи смещения на варикап установите режим прибора [EXT.B] = ON (выбирается кнопкой 7 – [BIAS] и включается/выключается кнопкой 8 - [ON/OFF]).

Измерьте емкость и добротность варикапа при различном напряжении смещения в пределах 1...29 В с шагом 2 В. Занесите результаты в таблицу 5.4. Постройте график вольт-фарадной характеристики варикапа.

Таблица 5.4

Напряжение смещения, В					
C, пФ					
D					

Выключите режим внешнего смещения кнопкой [BIAS]=INT.B, отключите внутренний источник смещения [INT.B] = OFF (кнопкой [ON/OFF]).

4.6.5. Измерение параметров коаксиального кабеля

В лабораторной работе измеряются параметры отрезка стандартного коаксиального кабеля длиной 4 м на частоте 200 кГц. Установите режим измерения Z/θ . Подключите к прибору кабель, разомкнутый на конце (переключатель в положении XX), и измерьте его входное сопротивление Z_{xx} . Затем закоротите конец кабеля (переключатель в положении КЗ) и измерьте полное

входное сопротивление $Z_{кз}$. Рассчитайте волновое сопротивление кабеля $\rho = \sqrt{|Z_{кз}| \cdot |Z_{xx}|}$, его постоянную затухания α , коэффициент фазы β , потери A , дБ, и коэффициент укорочения кабеля K_y (формулы (5.6)...(5.10)). Занесите результаты измерений и расчетов в таблицу 5.5.

Таблица 5.5

f , кГц	$ Z_{xx} $, Ом	θ_{xx} , град	$ Z_{кз} $, Ом	$\theta_{кз}$, град	ρ , Ом	α , 1/м	A , дБ/м	β , рад/м	K_y
200									

4.6.6. Измерение импеданса электродинамического громкоговорителя (по указанию преподавателя)

Важной характеристикой электродинамического громкоговорителя («динамика») является зависимость его полного сопротивления от частоты. По ней определяют собственную резонансную частоту подвижной части устройства, на которой и ниже ее использовать динамик не рекомендуется из-за сильных нелинейных искажений.

Исследуйте частотную зависимость модуля и фазы сопротивления динамика («Режим» => Z/θ) с использованием программы LCR-meter по методике п.5.6.1. Определите резонансную частоту динамика по нулевому значению фазового угла. Экспортируйте данные частотной характеристики и занесите результаты в таблицу по форме 5.2. Постройте зависимости параметров динамика от частоты.

4.7. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать структурную схему прибора, расчетные формулы, таблицы и графики данных измерений и расчетов, краткие выводы по лабораторной работе.

4.8. Контрольные вопросы

1. Чем отличаются импедансы катушки индуктивности и конденсатора?
2. Что такое добротность и фактор потерь катушки индуктивности и конденсатора? В каких случаях используют тот или иной параметр?

3. Что такое «действующее» значение индуктивности катушки? В каком случае действующее значение индуктивности отрицательно? На какой частоте ее действующее значение стремится к бесконечности?
4. Как строят измерители иммитанса, использующие преобразование сопротивления в напряжение?
5. Укажите составляющие погрешности измерителя иммитанса, использующего преобразование сопротивления в напряжение.
6. Для чего в измерителе иммитанса переключают коэффициент передачи масштабного усилителя?
7. Каков принцип действия векторного вольтметра в измерителе иммитанса?
8. Какие требования предъявляют к цифровому вольтметру в измерителе иммитанса? Что он должен измерять?
9. Для чего в измерителях иммитанса предусматривают подачу постоянного напряжения (или тока) на исследуемый элемент?
10. Для чего используют четырехпроводную схему подключения исследуемого элемента к измерителю иммитанса? Какую погрешность при этом исключают?