

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

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

## **Кафедра теоретических основ радиотехники**

---

Д. М. Воскресенский, А. А. Данилин, С. И. Пышкин

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторной работы по дисциплине

“Основы метрологии и радиоизмерений”

(электронный вариант)

# **ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЦЕПЕЙ**

Санкт-Петербург

2025 г.



## 5. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЦЕПЕЙ

Цель работы – изучение методов измерения параметров линейных компонентов, а также основных технических характеристик, устройства и применения измерителя иммитансных параметров Е7-15.

Программа работы включает измерение параметров резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности. Предусмотрена статистическая обработка результатов измерений и расчет погрешностей измерений.

### 5.1. Метод измерения иммитансных параметров линейных компонентов

Низкочастотные электрические схемы включают в себя компоненты с сосредоточенными постоянными – резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы (*RLC*-элементы). Эти компоненты являются двухполюсниками (имеют 2 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

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

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

$$Z = |Z| \exp(j\theta), \text{ где}$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad \theta = \arctg\left(\frac{X}{R}\right); \quad R = |Z| \cos(\theta); \quad X = |Z| \sin(\theta).$$

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

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

Единица измерения импеданса – ом [Ом], адмиттанса – сименс [См]. В измерительной практике иногда используют общий термин «иммитанс» для объединения понятий «импеданс» и «адмиттанс».

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

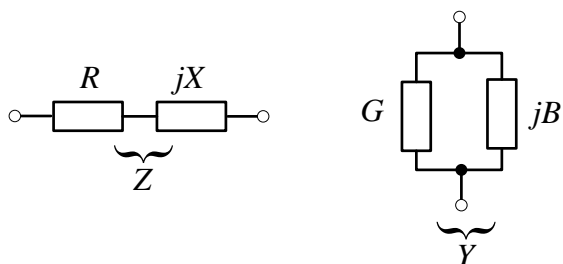


Рис. 5.1. Схемы замещения сосредоточенных элементов электрических цепей

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

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

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

Выделяют 2 типа реактивного импеданса – *индуктивный* и *емкостный*. Реактивное сопротивление импеданса индуктивного типа зависит от частоты  $f$  по закону  $X = 2\pi fL$ . Здесь  $L$  – индуктивность элемента, ее выражают в генри [Гн]. Фазовый угол сопротивления индуктивного типа положителен. Для емкостного типа импеданса  $X = \frac{-1}{2\pi fC}$ , где  $C$  – емкость элемента (единица измерения – фарад [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:

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

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

$$D = \text{tg } \delta = \frac{G}{B} = \frac{1}{2\pi fCR_p} = \frac{1}{Q}, \quad (5.3)$$

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 элемента. Рассмотрим схему замещения *резистора*, в которой, кроме активного сопротивления самого резистора  $R$ , учтены его паразитные реактивные параметры (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 наличие паразитной емкости  $C_R$ . Частотная характеристика модуля полного сопротивления  $|Z|$  резистора будет отклоняться от постоянного значения  $R$  на высоких частотах.

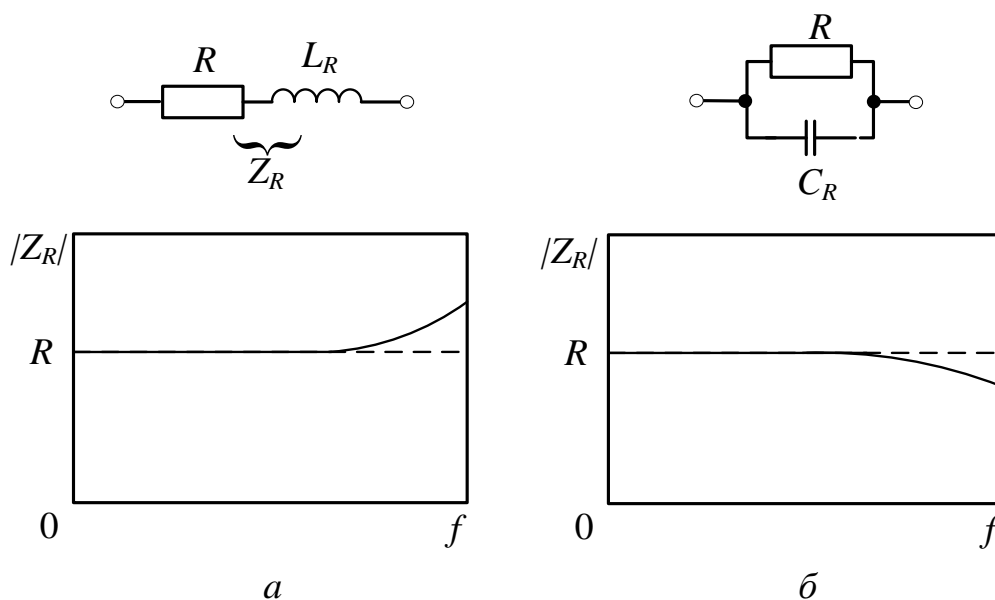


Рис. 5.2. Схема замещения резистора  $R$ :

$a$  – последовательная схема замещения проволочного резистора;

$b$  – параллельная схема замещения пленочного резистора

*Потери* в катушках индуктивности складываются из активных потерь в проводе, потерь в ферромагнитном сердечнике (который применяют в катушках с большой индуктивностью) и потерь в экране (для экранированных катушек). Схема замещения катушки индуктивности учитывает паразитную межвитковую емкость  $C_L$ , сопротивление потерь в проводе  $R_s$  для последовательной схемы замещения (рис. 5.3,  $a$ ) и сопротивление потерь в ферромагнитном сердечнике  $R_p$  для параллельной схемы (рис. 5.3,  $b$ ). Межвитко-

вая емкость особенно заметна в многослойных катушках с большим количеством витков. Она сказывается на высоких частотах и приводит к сильной зависимости эффективной (*действующей*) индуктивности от частоты.

Для конденсатора активные потери учитывают шунтирующим сопротивлением утечки  $R_p$  (потери в диэлектрике) и сопротивлением потерь в проводниках и обкладках  $R_s$  (рис. 5.4).

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.

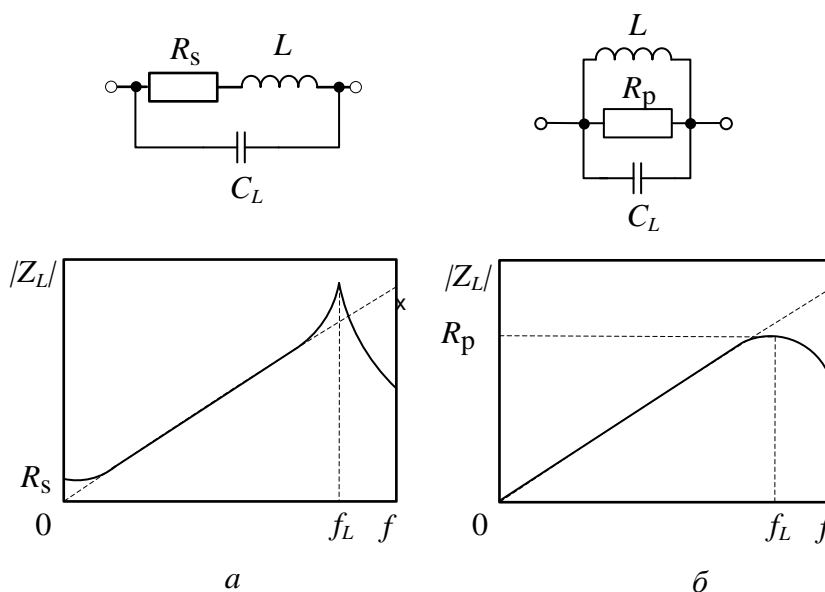


Рис. 5.3. Схемы замещения катушки индуктивности

Наличие паразитных реактивных параметров у реальных компонентов приводит к тому, что частотная зависимость реактивной составляющей импеданса индуктивности или адмиттанса конденсатора отличается 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, а 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 стремится к бесконечности. На частотах, больших  $f_L$ , действующее значение индуктивности отрицательно (преобладает паразитная емкость катушки).

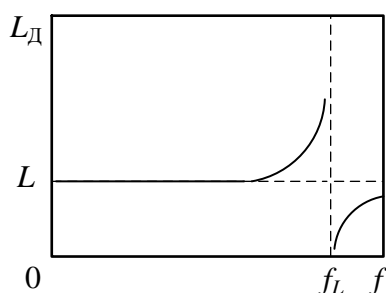


Рис. 5.5. Частотная зависимость действующего значения индуктивности катушки

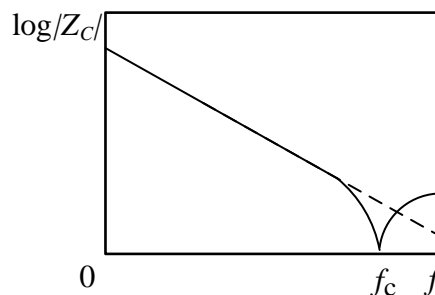
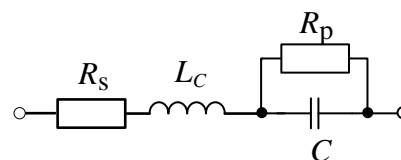


Рис. 5.4. Схема замещения реального конденсатора

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  $\left(R_p \gg \frac{1}{\omega C}\right)$  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.

Собственную индуктивность  $L$  и паразитную емкость катушки  $C_L$  измеряют следующим образом. Пусть  $L_{д1}$  и  $L_{д2}$  – действующие значения индуктивности катушки, измеренные на частотах  $f_1$  и  $f_2$  соответственно. В этом случае на основании эквивалентной схемы катушки (см. рис. 5.3, а) можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{j2\pi f_1 L_{д1}} = \frac{1}{j2\pi f_1 L} + j2\pi f_1 C_L \\ \frac{1}{j2\pi f_2 L_{д1}} = \frac{1}{j2\pi f_2 L} + j2\pi f_2 C_L \end{cases}, \quad (5.4)$$

где  $L$  и  $C_L$  – неизвестные значения собственной индуктивности и межвитковой емкости катушки. Решение системы (5.4) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} L = \frac{f_1^2 - f_2^2}{\left(f_1^2 / L_{д2}\right) - \left(f_2^2 / L_{д1}\right)} \\ C_L = \left(\frac{1}{L_{д2}} - \frac{1}{L_{д1}}\right) \cdot \left((2\pi f_1)^2 - (2\pi f_2)^2\right)^{-1} \end{cases}. \quad (5.5)$$

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

Из вышесказанного следует, что для определения свойств реальных катушек индуктивности, конденсаторов и резисторов требуется знать зависимость их параметров от частоты. Измерения необходимо проводить в диапазоне, соответствующем рабочим частотам исследуемого элемента. Значения паразитных реактивностей катушки и конденсатора находят затем расчетным

путем по результатам измерений действующих значений их индуктивностей (емкостей), как минимум, на двух частотах.

Режим измерения активного сопротивления, индуктивности и емкости на низкой частоте и постоянном токе предусматривают в многофункциональных аналоговых и цифровых мультиметрах. Диапазон измерений и точность таких приборов, как правило, ограничены. Они применяются, в основном, для оценки параметров компонентов электрических схем. Более сложные измерения частотных зависимостей, добротности и фактора потерь проводят специализированными приборами – измерителями иммитанса (импеданса) или измерителями RLC.

## 5.2. Измерение RLC параметров методом преобразования сопротивления в напряжение

Этот метод является развитием способа вольтметра-амперметра. На практике для построения омметров переменного тока используют преобразователи импеданса на основе операционного усилителя переменного тока, охваченного глубокой ООС (рис. 5.6).

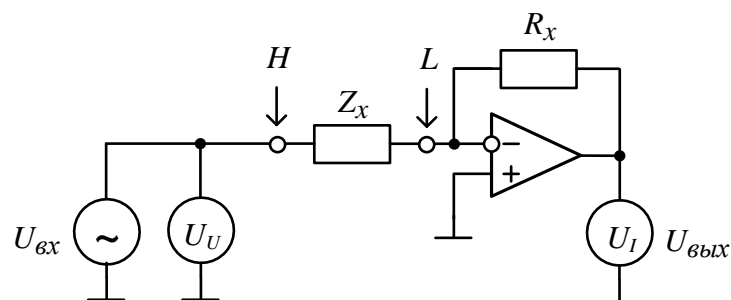


Рис. 5.6. Схема преобразования «Z-U»

Для определения импеданса исследуемого элемента методом «U-I» надо измерить отношение *комплексных* амплитуд напряжения и тока. В данной схеме ток через элемент преобразуется в выходное напряжение усилителя. Поэтому измерение импеданса  $Z_x$  сводится к измерению отношения комплексных амплитуд напряжений на входе и выходе усилителя. Такой способ измерения часто 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 первым векторным вольтметром. Напомним, что векторный вольтметр позволяет измерить не только ам-

плитуду, но и фазу гармонического напряжения. Ток через исследуемый элемент  $Z_x$  поступает на вход усилителя в точку низкого потенциала, обозначенную  $L$ . Усилитель имеет большой коэффициент передачи и охвачен обратной связью через резистор  $R_0$ . При этом выходное напряжение операционного усилителя  $U_{\text{ВЫХ}}$ , охваченного глубокой ООС, определяется отношением сопротивлений  $R_0 / Z_x$  и, следовательно, пропорционально току через исследуемый компонент  $\dot{U}_{\text{ВЫХ}} = \dot{U}_I$ . Комплексная амплитуда выходного напряжения  $\dot{U}_I$  фиксируется вторым векторным вольтметром. Отношение двух комплексных амплитуд напряжений дает величину искомого импеданса:

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

Образцовый резистор  $R_0$  определяет масштабный коэффициент преобразования « $Z-U$ ». С его помощью переключают диапазон измерения прибора.

Рассмотрим реализацию данного метода в отечественных микропроцессорных измерителях  $RLC$  типа Е7–15, Е7–20/21, Е7–24 позволяющих проводить измерения иммитанса в широком диапазоне значений с погрешностью не хуже 0.1%.

*Измеритель иммитанса* Е7-15 предназначен для измерения иммитансных параметров электро-радиокомпонентов: резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности.

Полная проводимость определяется выражением

$$Y = G + jB = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = k_Y \frac{\dot{U}_T}{\dot{U}_H} = k_Y \frac{\dot{U}_x}{\dot{U}_0} = k_Y \frac{E + jF}{S + jT}, \quad (5.6)$$

где  $G$  – активная проводимость;  $B$  – реактивная проводимость;  $\dot{I}$  и  $\dot{U}$  – комплексные амплитуды тока и напряжения на исследуемом элементе;  $k_Y$  – известный коэффициент, имеющий размерность проводимости;  $\dot{U}_x$  – числитель измеряемого отношения;  $\dot{U}_0$  – знаменатель измеряемого отношения;  $E = U_x \cos(\theta_T)$  и  $S = U_0 \cos(\theta_H)$  являются вещественными частями соответствующих комплексных амплитуд,  $F = U_x \sin(\theta_T)$  и  $T = U_0 \sin(\theta_H)$  – мнимыми. Из (5.6) следует

$$G = k_Y \frac{ES + jFT}{S^2 + T^2}, \quad B = k_Y \frac{FS - ET}{S^2 + T^2}. \quad (5.7)$$

Аналогичные соотношения имеют место для вычисления полного сопротивления

$$Z = R + jX = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = k_Z \frac{\dot{U}_H}{\dot{I}_T} = k_Z \frac{\dot{U}_x}{\dot{I}_0} = k_Z \frac{E + jF}{S + jT},$$

где  $R$  – активное сопротивление,  $X$  – реактивное сопротивление, вычисляемые по формулам,  $k_Z$  – известный коэффициент, имеющий размерность сопротивления

$$R = k_Z \frac{ES + FT}{S^2 + T^2}, \quad X = k_Z \frac{FS + ET}{S^2 + T^2}. \quad (5.8)$$

Таким образом, для определения полной проводимости или полного сопротивления необходимо измерить мнимые и вещественные части  $E$ ,  $S$ ,  $F$  и  $T$ .

Структурная схема прибора приведена на рис. 5.6. В приборе использована схема измерения комплексной амплитуды напряжения, состоящая из синхронного фазового детектора и цифрового вольтметра постоянного тока  $A_6$ . Напряжения  $U_U$  и  $U_I$ , пропорциональные напряжению и току, с помощью электронного коммутатора  $S_1$  по очереди подают на вход масштабного усилителя переменного тока  $A_3$ . Его используют для переключения диапазона измерения иммитанса. Напряжение с выхода усилителя  $A_3$   $U_m \sin(\omega t + \varphi)$ , пропорциональное напряжению  $U_U$  или току  $U_I$ , поступает на синхронный фазовый детектор, состоящий из перемножителя  $A_4$  и фильтра низкой частоты  $A_5$ . На второй вход перемножителя  $A_4$  с помощью электронного коммутатора  $S_2$  поочередно подают опорное напряжение с генератора: сначала  $U_0 \sin(\omega t)$ , затем  $U_0 \cos(\omega t)$  (эти сигналы сдвинуты друг относительно друга на  $90^\circ$ ). На выходе перемножителя последовательно получают напряжения:

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

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

Гармонические составляющие с удвоенной частотой подавляют фильтром нижних частот  $A_5$ , установленным на выходе перемножителя. Постоянные напряжения на его выходе, пропорциональные  $U_m \cos \varphi$  и  $U_m \sin \varphi$ , представляют собой вещественную и мнимую части соответствующих ком-

плексных амплитуд и являются квадратурными компонентами, пропорциональными напряжению  $U_U$  или току  $U_I$ . Эти напряжения измеряют цифровым вольтметром постоянного тока  $A_6$ . Результаты измерения (по 2 вещественных числа для каждого напряжения  $\dot{U}_U$  и  $\dot{U}_I$ ) передаются в микропроцессорную систему  $A_7$ , где производится расчет иммитанса, индуктивности и емкости, фактора потерь и добротности.

Такой способ измерения не требует стабильного источника переменного напряжения. При исследовании высокоомных цепей генератор работает как источник напряжения, а результат получают в виде составляющих комплексной проводимости. Для низкоомных объектов предпочтительнее измерять полное сопротивление при питании от генератора тока (генератор с большим выходным сопротивлением).

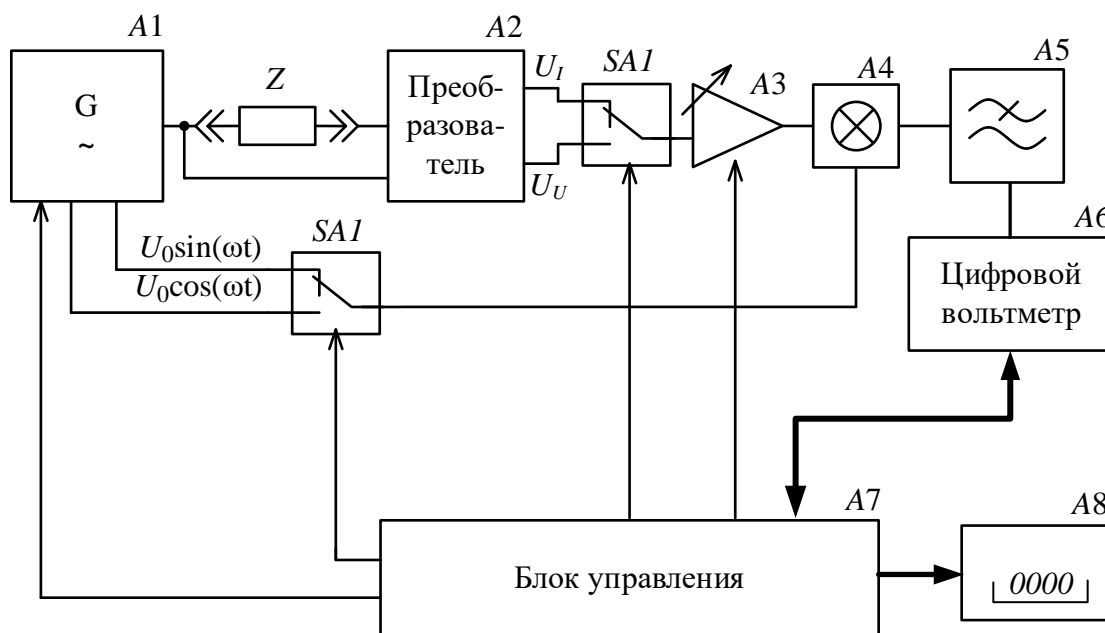


Рис. 5.7. Структурная схема измерителя иммитанса E7-15

### 5.3. Технические характеристики измерителя иммитанса E7-15

Прибор предназначен для автоматического измерения параметров конденсаторов, катушек индуктивности и резисторов на двух стандартных частотах 100 Гц и 1 кГц. Прибор E7-15 может измерять активные и реактивные параметры иммитансов измеряемых объектов по параллельной (на 1...4 пределах измерения) или последовательной (на 5...8 пределах измерения) эквивалентной схеме. Относительные параметры измеряются в форме фактора потерь  $D$  или добротности  $Q$ .

Основные измеряемые величины и пределы их измерений даны в табл. 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1

Предел измерения	Емкость $C$ на частотах, кГц		Проводимость $G$
	0,1	1	
1	1...1600 пФ	0,1...160,0 пФ	1...50 нСм
2	0,01...16,00 нФ	1...1600 пФ	0,01...1,00 мкСм
3	0,1...160,0 нФ	0,01...16,00 нФ	0,1...10,0 мкСм
4	1...1600 нФ	0,1...160,0 нФ	1...100 мкСм
5	1,600...16,00 мкФ	160,0...1600 нФ	—
6	16,00...160,0 мкФ	1,600...16,00 мкФ	—
7	160,0...1600 мкФ	1,600...16,00 мкФ	—
8	1,600...20,00 мФ	160,0...1600 мкФ	—

Таблица 5.2

Предел измерения	Индуктивность $L$ на частотах, кГц		Сопротивление, $R$
	0,1	1	
1	1,600...1600 кГн	160,0...1600 Гн	1,000...20,00 МОм
2	160,0...1600 Гн	16,00...160,0 Гн	100,0...1000 кОм
3	16,00...160,0 Гн	1,600...16,00 Гн	10,00...100,0 кОм
4	1,600...16,00 Гн	160,0...1600 мГн	1,000...10,00 кОм
5	1...1600 мГн	0,1...160,0 мГн	1...1000 Ом
6	0,1...160,0 мГн	0,01...16,00 мГн	0,1...100,0 Ом
7	0,01...16,00 мГн	1...1600 мкГн	0,01...10,00 Ом
8	1...160 мГн	0,1...160,0 мкГн	1...1000 МОм

Пределы основной допускаемой погрешности измерения иммитансных параметров на частотах 0,1 и 1 кГц должны быть равны значениям, указанным в табл. 5.3...5.10. Здесь  $C'$ ,  $L'$ ,  $R'$ ,  $G'$  – максимальные значения измеряемых на каждом из пределов величин (табл. 5.1 и 5.2).

Таблица 5.3

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
C	1	$[2,5(1+D)C + 1,3C']10^{-3}$
	2...4	$[2,5(1+D)C + 0,63C']10^{-3}$
	5...7	$\left[2,5(1+D) + 6,3\frac{C}{C'}\right]10^{-3}C$
	8	$\left[2,5(1+D) + 13\frac{C}{C'}\right]10^{-3}C$

Таблица 5.4

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
L	1	$\left[2,5(1+D) + 13\frac{L}{L'}\right]10^{-3}L$
	2...4	$\left[2,5(1+D) + 6,3\frac{L}{L'}\right]10^{-3}L$
	5...7	$[2,5(1+D)L + 0,63L']10^{-3}$
	8	$[2,5(1+D)L + 1,3L']10^{-3}$

Таблица 5.5

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
R	1	$\left[2,5(1+Q) + 40\frac{R}{R'}\right]10^{-3}R$
	2...4	$\left[2,5(1+Q) + 10\frac{R}{R'}\right]10^{-3}R$
	5...7	$[2,5(1+Q)R + R']10^{-3}$
	8	$[2,5(1+Q)R + 2R']10^{-3}$

Таблица 5.6

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
G	1	$[2,5(1+Q)G + 40G']10^{-3}$
	2...4	$[2,5(1+Q)G + 10G']10^{-3}$

Таблица 5.7

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
$D$ (для емкостей)	1	$2,5 \cdot 10^{-3}(1 + D^2) + 2 \cdot 10^{-3} \frac{C'}{C}(1 + D)$
	2...4	$2,5 \cdot 10^{-3}(1 + D^2) + 1 \cdot 10^{-3} \frac{C'}{C}(1 + D)$
	5...7	$2,5 \cdot 10^{-3}(1 + D^2) + 10 \cdot 10^{-3} \frac{C}{C'}(1 + D)$
	8	$2,5 \cdot 10^{-3}(1 + D^2) + 20 \cdot 10^{-3} \frac{C}{C'}(1 + D)$

Таблица 5.8

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
$D$ (для индуктивностей)	1	$2,5 \cdot 10^{-3}(1 + D^2) + 20 \cdot 10^{-3} \frac{L}{L'}(1 + D)$
	2...4	$2,5 \cdot 10^{-3}(1 + D^2) + 10 \cdot 10^{-3} \frac{L}{L'}(1 + D)$
	5...7	$2,5 \cdot 10^{-3}(1 + D^2) + 1 \cdot 10^{-3} \frac{L'}{L}(1 + D)$
	8	$2,5 \cdot 10^{-3}(1 + D^2) + 2 \cdot 10^{-3} \frac{L'}{L}(1 + D)$

Таблица 5.9

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
$Q$ (для емкостей)	1	$2,5 \cdot 10^{-3}(1 + Q^2) + 1,3 \cdot 10^{-3} \frac{C'}{C} Q(1 + Q)$
	2...4	$2,5 \cdot 10^{-3}(1 + Q^2) + 0,63 \cdot 10^{-3} \frac{C'}{C} Q(1 + Q)$
	5...7	$2,5 \cdot 10^{-3}(1 + Q^2) + 6,3 \cdot 10^{-3} \frac{C}{C'} Q(1 + Q)$
	8	$2,5 \cdot 10^{-3}(1 + Q^2) + 13 \cdot 10^{-3} \frac{C}{C'} Q(1 + Q)$

Таблица 5.10

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
$Q$ (для индуктивностей)	1	$2,5 \cdot 10^{-3}(1+Q^2) + 13 \cdot 10^{-3} \frac{L}{L'} Q(1+Q)$
	2...4	$2,5 \cdot 10^{-3}(1+Q^2) + 6,3 \cdot 10^{-3} \frac{L}{L'} Q(1+Q)$
	5...7	$2,5 \cdot 10^{-3}(1+Q^2) + 0,63 \cdot 10^{-3} \frac{L'}{L} Q(1+Q)$
	8	$2,5 \cdot 10^{-3}(1+Q^2) + 1,3 \cdot 10^{-3} \frac{L'}{L} Q(1+Q)$

#### 5.4. Описание лабораторного макета

Лабораторный макет используется для проведения измерений прибором Е7-15. Он содержит: 30 резисторов, любой из которых с помощью переключателей  $S1...S3$  можно подключить к гнездам  $R_x$ ; 30 конденсаторов, подключаемых теми же переключателями к гнездам  $C_x$ ; конденсатор с диэлектриком из сегнетокерамики, соединенный с гнездами «СЕГНЕТОКЕРАМИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР», а также катушку индуктивности с сердечником из феррита, подключенную к гнездам «КАТУШКА С ФЕРРОМАГН. СЕРДЕЧНИКОМ».

## 5.5. Задание и указания к выполнению работы

### Проведение измерений.

Включите прибор и перед началом измерений установите при помощи кнопок на передней панели прибора следующие режимы: *ПАРАМЕТР RG*, *ПРЕДЕЛ A* (автоматический выбор), *ЧАСТ 1 kHz*, *СМЕЩЕНИЕ ВЫКЛ.*

1. Для проведения измерений достаточно подключить измеряемый объект к зажимам и установить нужный режим измерения. Нажатием кнопки *ПАРАМЕТР* можно установить прибор в режим измерения реактивной ( $L$  или  $C$ ) либо активной ( $R$  или  $G$ ) составляющей иммитанса или в режим измерения относительного параметра ( $D$  или  $Q$ ).

2. Клавишей *ЧАСТ* установить требуемую частоту  $100 \text{ Hz}$  или  $1 \text{ kHz}$ .

3. При измерении емкости электролитических конденсаторов нажатием кнопки *СМЕЩЕНИЕ* можно подать поляризующее напряжение  $+ 4,8 \text{ В}$  (со стороны выводов  $I, U$ ).

4. При нажатии кнопки *ПРЕДЕЛ* прибор производит автоматическое переключение пределов с 1 по 8 и установку прибора в режим автоматического выбора предела измерения. Номер установленного предела и режим автоматического выбора индицируется при этом на дисплее прибора (1...8, A).

Для установки требуемого предела измерения необходимо отпустить кнопку *ПРЕДЕЛ* в тот момент времени, в который на дисплее высвечивается требуемый номер предела (или режим автоматического выбора предела).

При необходимости узнать номер установленного предела нужно нажать кнопку *ПРЕДЕЛ*, считать номер предела и отпустить кнопку до момента изменения предела (около 1,5 с). Нахождение прибора в режиме ручной установки предела индицируется зажиганием светодиодного указателя *ФИКС*.

Если установленный вручную предел приводит к перегрузке измерительной цепи, на дисплее прибора появляется символ *ПРГР*.

### 5.5.1. Измерение сопротивлений резисторов прибором E7-15

#### Подготовка прибора к работе.

1. Перед измерениями включите прибор.
2. Переключатели *ПАРАМЕТР* установите в положение  $RG$ , *ЧАСТ 1 kHz*, *ПРЕДЕЛ A*, *СМЕЩЕНИЕ ВЫКЛ.*

3. Одно из гнезд  $R_x$  лабораторного макета с помощью соединительного кабеля подключите к гнездам  $I, U$  прибора; другое – к гнездам  $I', U'$ .

### Измерение сопротивлений резисторов.

4. Изменяя положения переключателей  $S2$  (положения 1...3) и  $S3$  (положения 1...10), поочередно измерьте сопротивления 30 резисторов, запишите результаты измерений. Порядок измерения произвольный, важно измерить сопротивление всех 30 резисторов. Результаты измерений занесите в табл. 5.11.

5. Рассчитайте статистические параметры, характеризующие разброс их значений: среднее значение сопротивления  $\bar{R}$ , среднее значение отклонения  $\overline{\Delta R}$  от номинального значения  $R_{ном}$ , указанного на резисторе, и выборочную дисперсию  $\sigma^2$ :

$$\bar{R} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i; \quad \overline{\Delta R} = \bar{R} - R_{ном}; \quad \sigma^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (R_i - \bar{R})^2,$$

где  $m$  – объем выборки;  $R_i$  – измеренное значение;  $R_{ном} = 12$  кОм. При этом выполните расчеты для  $m = 10$  (первые десять измерений),  $m = 20$  (первые двадцать измерений) и  $m = 30$ .

Значения  $\overline{\Delta R}/R_{ном}$  лежат в интервале  $\delta_1 < \overline{\Delta R}/R_{ном} < \delta_2$  (доверительный интервал) с доверительной вероятностью  $\gamma$ . Для определения  $\delta_1$  и  $\delta_2$  необходимо знать закон распределения случайной величины  $\overline{\Delta R}/R_{ном}$ . При малом объеме выборки  $m$  он соответствует распределению Стьюдента, а при  $m \rightarrow \infty$  асимптотически приближается к нормальному.

6. Определите границы доверительного интервала для трех значений  $m$ , пользуясь коэффициентом Стьюдента  $t(\gamma, m)$ , представляющим собой табулированное значение интеграла Стьюдента, %:

$$\delta_{1,2} = \left[ \overline{\Delta R} \pm t(\gamma, m) \sqrt{\sigma^2/m} \right] 100/R_{ном}.$$

Задайте  $\gamma = 0,95$ . Тогда при  $m = 10$  значение  $t(0,95; 10) = 2,228$ ; для  $m = 20$  значение  $t(0,95; 20) = 2,086$ ; для  $m = 30$  значение  $t(0,95; 30) = 2,042$ . Результаты расчетов оформите в виде табл. 5.11.

Таблица 5.11

<i>I</i>					
Сопротивления	1	2	...	30	
$R_i$ , кОм			...		
$m = 10$	$\bar{R} =$	$\overline{\Delta R} =$	$\sigma^2 =$	$\delta_1 = \%$	$\delta_2 = \%$
$m = 20$	$\bar{R} =$	$\overline{\Delta R} =$	$\sigma^2 =$	$\delta_1 = \%$	$\delta_2 = \%$
$m = 30$	$\bar{R} =$	$\overline{\Delta R} =$	$\sigma^2 =$	$\delta_1 = \%$	$\delta_2 = \%$

*Примечание: не забывайте указывать во всех таблицах наряду с числовыми значениями единицы измерения физических величин.*

### 5.5.2. Измерение емкостей конденсаторов прибором E7-15

1. Переключатели ПАРАМЕТР установите в положение LC, ЧАСТ 1 kHz, ПРЕДЕЛ А, СМЕЩЕНИЕ ВЫКЛ.

2. Одно из гнезд  $C_x$  с помощью соединительного кабеля подключите к гнездам  $I, U$  прибора, другое – к  $I', U'$ .

3. Изменяя положения переключателей  $S2$  (положения 1...3) и  $S1$  (положения 1...10), поочередно измерьте емкости 30 конденсаторов. Порядок измерения произвольный, важно измерить емкость всех 30 конденсаторов.

4. Произведите статистическую обработку результатов измерений по методике 5.5.1 для трех значений объема измерений:  $m = 10$  (первые десять измерений),  $m = 20$  (первые двадцать измерений) и  $m = 30$ . Значения  $C_{ном} = 1200$  пФ. Результаты измерений расчетов оформите в виде табл. 5.12.

Таблица 5.12

<i>i</i>					
Емкости	1	2	...	30	
$C_i$ , пФ			...		
$m = 10$	$\bar{C} =$	$\overline{\Delta C} =$	$\sigma^2 =$	$\delta_1 = \%$	$\delta_2 = \%$
$m = 20$	$\bar{C} =$	$\overline{\Delta C} =$	$\sigma^2 =$	$\delta_1 = \%$	$\delta_2 = \%$
$m = 30$	$\bar{C} =$	$\overline{\Delta C} =$	$\sigma^2 =$	$\delta_1 = \%$	$\delta_2 = \%$

### 5.5.3. Измерение емкости и фактора потерь сегнетокерамического конденсатора

1. Переключатели ПАРАМЕТР установите в положение LC, ЧАСТ 1 kHz, ПРЕДЕЛ А, СМЕЩЕНИЕ ВЫКЛ.

2. Соедините гнезда  $I$ ,  $U$  и  $I'$ ,  $U'$  с гнездами *СЕГНЕТОКЕРАМИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР* лабораторного макета.

3. Запишите измеренное значение емкости конденсатора, схему измерения (последовательная или параллельная – в левом верхнем углу прибора Е7-15). Запишите также предел, на котором проводилось измерение. Для этого нажмите на короткий промежуток времени (менее 1,5 с) кнопку *ПРЕДЕЛ* и запишите показания индикатора (цифра в пределах 1...8). При длительном нажатии клавиши *ПРЕДЕЛ* происходит последовательное переключение предела измерения и для его восстановления нужно удерживать клавишу *ПРЕДЕЛ* до появления символа  $A$ . После этого нужный предел измерения будет установлен автоматически. Для проверки установленного предела вновь на короткий промежуток времени нажмите клавишу *ПРЕДЕЛ* и считайте установленное значение предела.

4. Установите клавишу *ПАРАМЕТР* в положение  $DQ$ . Измерьте значение фактора потерь и запишите значение предела измерения.

5. Повторите измерения емкости и фактора потерь конденсатора на частоте 100 Гц, для чего воспользуйтесь клавишей *ЧАСТ*. Не забывайте при этом записывать номер предела, на котором проводилось измерение и вид схемы измерения: последовательная или параллельная – в левом верхнем углу прибора Е7-15. Рассчитайте пределы допускаемого значения погрешности измерения емкости и фактора потерь на двух частотах. Для этого воспользуйтесь техническими характеристиками прибора, приведенными в п. 5.2. По измеренным значениям емкости и фактора потерь рассчитайте также значение сопротивления или проводимости потерь конденсатора для двух частот. Для этого воспользуйтесь материалами из п. 5.1.

6. Сегнетоэлектрический конденсатор является нелинейным элементом, его емкость зависит от приложенного к нему постоянного напряжения. Это объясняется изменением диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической керамики при ее поляризации. Повторите проведенные измерения при напряжении смещения, приложенном к конденсатору, равном 4,8 В. Для этого нажмите кнопку «*ВКЛ СМЕЩЕНИЕ*». При измерении емкости конденсатора с подачей напряжения смещения следует учитывать, что постоянная заряда измеряемого конденсатора составляет десятки секунд и требуется время для установления показаний прибора.

При записи результатов измерений и их погрешностей необходимо, чтобы их низшие разряды были одинаковы, а в числовых значениях показателей точности было не более двух значащих цифр. При этом, если значение погрешности начинается с цифр 1 или 2, то округление погрешности производится до двух значащих цифр, а в противном случае – до одной цифры.

Результаты сведите в табл. 5.13.

Таблица 5.13

Частота	$C$	Посл./ парал.	Предел	$D$	$C'$	$\Delta C$	$\Delta D$	$R/G$
1 кГц смещ. выкл.								
1 кГц смещ. вкл.								
100 Гц смещ. выкл.								
100 Гц смещ. вкл.								

#### 5.5.4. Измерение индуктивности и фактора потерь катушки с ферромагнитным сердечником

1. Переключатели *ПАРАМЕТР* установите в положение *LC*, *ЧАСТ 1 kHz*, *ПРЕДЕЛ А*, *СМЕЩЕНИЕ ВЫКЛ.*

2. Соедините гнезда  $I$ ,  $U$  и  $k I'$ ,  $U'$  прибора с гнездами «*КАТУШКА С ФЕРРОМАГН. СЕРДЕЧНИКОМ*» лабораторного макета.

3. Запишите измеренное значение индуктивности катушки, схему измерения (последовательная или параллельная – в левом верхнем углу прибора Е7-15). Запишите также предел, на котором проводилось измерение. Для этого нажмите на короткий промежуток времени (менее 1,5 с) кнопку *ПРЕДЕЛ* и запишите показания индикатора (цифра в пределах 1...8).

4. Установите клавишу *ПАРАМЕТР* в положение *DQ*. Измерьте значение фактора потерь и запишите значение предела измерения. Включите смещение и повторите измерение параметров.

5. Повторите измерения индуктивности и фактора потерь катушки на частоте 100 Гц при отключенном и включенном смещении, для чего воспользуйтесь клавишей *ЧАСТ*. Не забывайте при этом записывать номер предела, на котором проводилось измерение, и вид схемы измерения: последовательная или параллельная – в левом верхнем углу прибора Е7-15. Рассчитайте пределы допускаемого значения погрешности измерения индуктивности и

фактора потерь на двух частотах. Для этого воспользуйтесь техническими характеристиками прибора, приведенными в п. 5.2. По измеренным значениям индуктивности и фактора потерь рассчитайте также значение сопротивления потерь катушки, ее добротность. Воспользуйтесь для этого материалами из п. 5.1. Определите также погрешность определения добротности для двух частот по формуле  $\Delta Q = \Delta D / D^2$ .

Результаты сведите в табл. 5.14.

Таблица 5.14

Частота	$L$	Посл./ парал.	Предел	$D$	$L'$	$\Delta L$	$\Delta D$	$R$	$Q$	$\Delta Q$
1 кГц смещ. выкл.										
100 Гц смещ. выкл.										
1 кГц смещ. вкл.										
100 Гц смещ. вкл.										

### Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- структурную схему прибора;
- векторные диаграммы и основные расчетные соотношения;
- результаты измерений и расчетов по всем пунктам работы, оформленные в виде таблиц по установленной форме;
- краткие выводы и анализ полученных результатов.

## Контрольные вопросы

1. Перечислите иммитансные параметры компонентов цепей и приведите соответствующие эквивалентные схемы.
2. Поясните назначение элементов структурной схемы измерителя иммитанса E7-15.
3. Поясните принцип работы измерителя иммитанса E7-15.
4. Какими параметрами оценивают разброс значений при измерении большой партии однотипных элементов? Поясните смысл и методику определения этих параметров.
5. Как определяют погрешности измерения емкости конденсатора и фактора потерь?
6. Как определяют погрешности измерения индуктивности катушки и ее добротности?
7. Как формируются и измеряются квадратурные компоненты напряжений, пропорциональных току, протекающему через исследуемый элемент, и напряжению на нем?
8. Какую роль выполняет фильтр нижних частот, какой вид имеет напряжение на его входе и выходе?
9. В чем состоит разница при измерении параметров высокоомных и низкоомных объектов?
10. Какие функции выполняет блок управления прибора E7-15?