

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Лабораторная работа 5

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ЛИНЕЙНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЦЕПЕЙ**

Санкт-Петербург
2016

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

К иммитансным параметрам электро- и радиокомпонентов электрических цепей относятся: сопротивление R или проводимость $G = 1/R$, индуктивность L , емкость C . Кроме них иногда требуется измерять также относительные параметры: фактор потерь D (тангенс угла потерь) или добротность $Q = 1/D$.

Полное сопротивление $Z = R + jX$ содержит в общем случае активную R и реактивную X составляющие (рис. 5.1). Если реактивное сопротивление носит индуктивный характер, то $X = \omega L = 2\pi fL$, а если емкостной, то $X = -1/(\omega C) = -1/(2\pi fC)$, ω – круговая частота, а f – частота, на которой проводят измерения. При индуктивном характере сопротивления в последовательной эквивалентной схеме (рис. 5.1) $Q = \omega L/R = 1/D$, в случае емкостного характера сопротивления $D = \omega CR = 1/Q$.

Полная проводимость $Y = G + jB$ в общем случае состоит из активной G и реактивной B составляющих (рис. 5.2). Для проводимости емкостного характера $B = \omega C = 2\pi fC$, а при индуктивном характере $B = -1/\omega L = -1/2\pi fL$. В параллельной схеме (рис. 4.2) $D = 1/\omega CR = G/\omega C = 1/Q$.

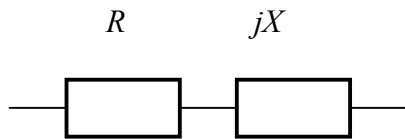


Рис. 5.1. Полное сопротивление

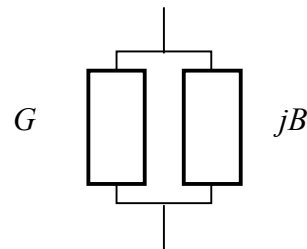


Рис. 5.2. Полная проводимость

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

Структурная схема прибора приведена на рис. 5.3. Напряжение рабочей частоты генератора подается на измеряемый объект, подключаемый к преобразователю $Y \rightarrow U_T, U_H$. Преобразователь формирует два напряжения, одно из которых U_T пропорционально току, протекающему через измеряемый объект, а другое U_H – напряжению на нем. Отношение комплексных амплитуд этих напряжений равно полной проводимости Y или полному сопротивлению Z .

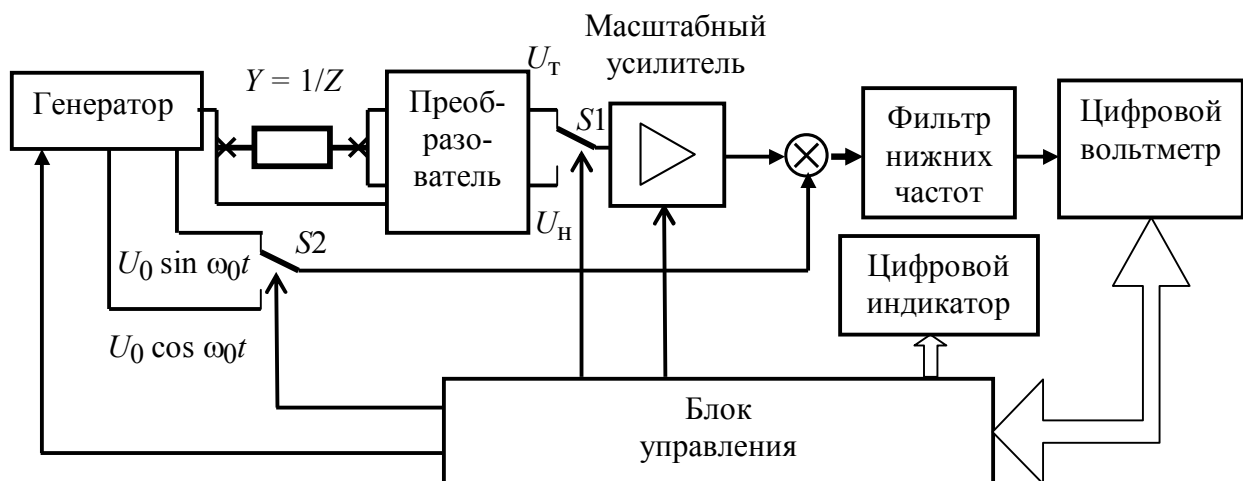


Рис. 5.3. Структурная схема измерителя иммитанса Е7-15

Измерение отношения напряжений проводится аппаратно-программным логометром. Его аппаратная часть состоит из двух коммутаторов $S1$ и $S2$, масштабного усилителя, перемножителя, фильтра нижних частот и цифрового вольтметра, использующего метод двойного интегрирования. Итогом работы программной части логометра является расчет отношения напряжений.

На рис. 5.4 изображены комплексные амплитуды \dot{U}_T и \dot{U}_H и опорные вспомогательные напряжения $U_{оп}$ и $jU_{оп}$.

Проекции комплексных амплитуд \dot{U}_T и \dot{U}_H на опорное напряжение $U_{оп}$ и $jU_{оп}$ выделяются с помощью перемножителя и фильтра нижних частот, после чего измеряются в некотором произвольном масштабе цифровым вольтметром. Полная проводимость определяется выражением

$$Y = G + jB = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = k_Y \frac{\dot{U}_T}{\dot{U}_H} = k_Y \frac{\dot{U}_x}{\dot{U}_0} = k_Y \frac{E + jF}{S + jT}, \quad (5.1)$$

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 , F , S , T – проекции \dot{U}_T и \dot{U}_H на оси опорных напряжений $U_{оп}$ и $jU_{оп}$. Из (5.1) следует

$$G = k_Y \frac{ES + FT}{S^2 + T^2}, \quad B = k_Y \frac{FS - ET}{S^2 + T^2}. \quad (5.2)$$

Аналогичные соотношения имеют место для вычисления полного сопротивления

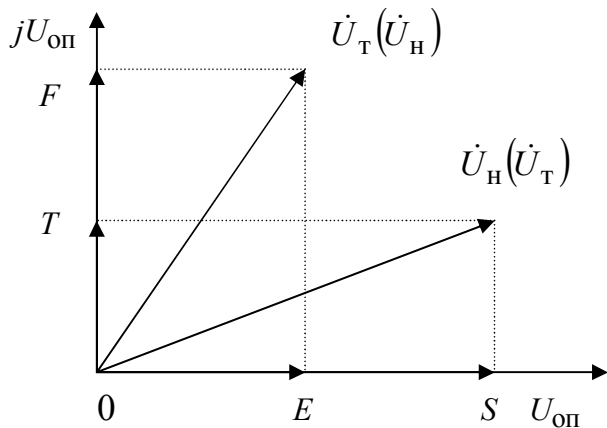


Рис. 5.4. Векторная диаграмма напряжений

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

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

$$R = k_Z \frac{ES + FT}{S^2 + T^2}, \quad X = k_Z \frac{FS - ET}{S^2 + T^2}. \quad (5.3)$$

Таким образом, для определения полной проводимости или полного сопротивления необходимо измерить проекции векторов E , S , F и T .

При измерении высокоомных объектов (1–4 пределы измерения), когда генератор сигнала является источником напряжения, предпочтительнее осу-

осуществлять измерения в виде составляющих полной проводимости ($\dot{U}_x = \dot{U}_T$, $\dot{U}_0 = \dot{U}_H$).

В случае измерения низкоомных объектов источник сигнала работает как генератор тока (5-й – 8-й пределы измерения) и более удобным является измерение в форме составляющих полного сопротивления ($\dot{U}_x = \dot{U}_H$, $\dot{U}_0 = \dot{U}_T$). Требуемая форма иммитанса достигается пересчетом из первичной формы (G , B или R , X) и осуществляется контроллером. Расширение пределов измерения достигается за счет изменения коэффициента передачи усилительного тракта логометра при измерении составляющей \dot{U}_x в 10, 100 и 1000 раз.

С выхода усилителя гармоническое напряжение $U_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$, пропорциональное току U_T или напряжению U_H в зависимости от состояния переключателя $S1$, поступает на перемножитель. На второй вход перемножителя поступает опорное напряжение с генератора: $U_0 \sin(\omega_0 t)$ либо $U_0 \cos(\omega_0 t)$ в зависимости от состояния переключателя $S2$. При этом на выходе перемножителя получают, соответственно, напряжения

$$U_m \sin(\omega_0 t + \varphi) U_0 \cos(\omega_0 t) = \frac{U_0}{2} U_m \sin \varphi + \frac{U_0}{2} U_m \sin(2\omega_0 t + \varphi);$$

$$U_m \sin(\omega_0 t + \varphi) U_0 \sin(\omega_0 t) = \frac{U_0}{2} U_m \cos \varphi - \frac{U_0}{2} U_m \cos(2\omega_0 t + \varphi).$$

Переменные составляющие с удвоенной частотой подавляются фильтром нижних частот. Постоянные составляющие напряжения, пропорциональные $U_m \cos \varphi$ и $U_m \sin \varphi$ и называемые квадратурными компонентами, измеряются поочередно цифровым вольтметром. Косинусные составляющие позволяют определить компоненты E и S , а синусные – компоненты F и T (рис. 5.4). Измеренные значения вводятся в блок управления, после чего производятся вычисления по формулам (5.2) или (5.3).

5.2. Краткое описание характеристик измерителя иммитанса Е7-15

Прибор предназначен для автоматического измерения параметров конденсаторов, катушек индуктивности и резисторов на частотах 100 Гц и 1 кГц. Основные измеряемые величины и пределы 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...1600 мГн	0,1...160,0 мкГн	1...1000 мОм

Пределы допускаемого значения основной погрешности измерения иммитансных параметров на частотах 0,1 и 1 кГц должны быть равны значениям, указанным в табл. 5.3...5.10. 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	$2,5 \cdot 10^{-3}(1+Q^2)+0,63 \cdot 10^{-3}\frac{C'}{C}Q(1+Q)$

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
Q (для емкостей)	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	$2,5 \cdot 10^{-3}(1+Q^2) + 1,3 \cdot 10^{-3} \frac{L'}{L} Q(1+Q)$

5.3. Описание лабораторного макета

Лабораторный макет используют для 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*.

5.4. Задание и указания к выполнению работы

Проведение измерений. Прибор Е7-15 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 .

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*.

Для проведения измерений достаточно подключить измеряемый объект к зажимам и установить нужный режим измерения. Нажатием кнопки *ПА-*

ПАМЕТР пользователь может 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).

Клавишей *ЧАСТ* установить требуемую частоту 100 Hz или 1 kHz .

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

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, А). 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*.

5.4.1. Измерение сопротивлений резисторов прибором E7-15

Подготовка прибора к работе. Перед измерениями включите прибор. Переключатели *ПАРАМЕТР* установите в положение RG , *ЧАСТ* 1 kHz , *ПРЕДЕЛ* А, *СМЕЩЕНИЕ* ВЫКЛ. 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. Изменяя положения переключателей $S2$ (положения 1...3) и $S3$ (положения 1...10), поочередно измерьте сопротивления 30 резисторов, запишите результаты измерений. Рассчитайте статистические параметры, характеризующие разброс их значений: среднее значение сопротивления \bar{R} , среднее значение отклонения $\overline{\Delta R}$ от номинального значения $R_{\text{ном}}$, указанного на резисторе, и выборочную дисперсию σ^2 :

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

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

Значения $\Delta R / R_{\text{НОМ}}$ лежат в интервале $\delta_1 \leq \Delta R / R_{\text{НОМ}} \leq \delta_2$ (доверительный интервал) с доверительной вероятностью γ . Для определения δ_1 и δ_2 необходимо знать закон распределения случайной величины $\Delta R / R_{\text{НОМ}}$. При малом объеме выборки m он соответствует распределению Стьюдента, а при $m \rightarrow \infty$ асимптотически приближается к нормальному.

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

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

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 измерений и расчетов оформите в виде табл. 5.11.

5.4.2. Измерение емкостей конденсаторов прибором Е7-15

Переключатели *ПАРАМЕТР* установите в положение *LC*, *ЧАСТ 1 kHz*, *ПРЕДЕЛ А*, *СМЕЩЕНИЕ ВЫКЛ*. Одно из гнезд C_x с помощью соединительного кабеля подключите к гнездам I , U прибора, другое – к I' , U' .

Изменяя положения переключателей $S2$ (положения 1...3) и $S1$ (положения 1...10), поочередно измерьте емкости 30 конденсаторов. Произведите статистическую обработку результатов измерений по методике 5.4.1 для трех значений объема измерений: $m = 10$ (первые десять измерений), $m = 20$ (первые двадцать измерений) и $m = 30$. Значения $C_{\text{НОМ}} = 1200$ пФ. Результаты измерений расчетов оформите в виде табл. 5.12.

5.4.3. Измерение емкости и фактора потерь сегнетокерамического конденсатора

Соедините гнезда I , U и I' , U' с гнездами *СЕГНЕТОКЕРАМИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР* лабораторного макета. Переключатели *ПАРАМЕТР* установите в положение *LC*, *ЧАСТ 1 kHz*, *ПРЕДЕЛ А*, *СМЕЩЕНИЕ ВЫКЛ*. Запишите измеренное значение емкости конденсатора, схему измерения (последовательная или параллельная – в левом верхнем углу прибора Е7-15). Спи-

шите также предел, на котором проводилось измерение. Для этого нажмите на короткий промежуток времени (менее 1,5 с) клавишу *ПРЕДЕЛ* и спишите 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.

Установите клавишу *ПАРАМЕТР* в положение *DQ*. Измерьте значение фактора потерь и спишите значение предела измерения.

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 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 5.1.

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.

5.4.4. Измерение индуктивности и фактора потерь катушки с ферромагнитным сердечником

Соедините гнезда I , U и к I' , U' прибора с гнездами *КАТУШКА С ФЕРРОМАГН. СЕРДЕЧНИКОМ* лабораторного макета. Переключатели *ПАРАМЕТР* установите в положение *LC*, *ЧАСТ 1 kHz*, *ПРЕДЕЛ A*, *СМЕЩЕНИЕ ВЫКЛ.* Запишите измеренное значение индуктивности катушки, схему измерения (последовательная или параллельная – в левом верхнем углу прибора Е7-15). Спишите также предел, на котором проводилось измерение. Для этого нажмите на короткий промежуток времени (менее 1,5 с) кнопку *ПРЕДЕЛ* и спишите показания индикатора (цифра в пределах 1...8).

Установите клавишу *ПАРАМЕТР* в положение *DQ*. Измерьте значение фактора потерь и спишите значение предела измерения.

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

Результаты сведите в табл. 5.14.

5.5. 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.

5.6. Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 5.11

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

Таблица 5.12

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

Таблица 5.13

Частота	C	Посл./ парал.	Предел	D	C'	ΔC	ΔD	R/G
1 кГц Смещ. выкл.								
1 кГц Смещ. вкл.								
100 Гц Смещ. выкл.								
100 Гц Смещ. вкл.								

Таблица 5.14

Частота	L	Посл./ парал.	Предел	D	L'	ΔL	ΔD	R	Q	ΔQ
1 кГц										
100 Гц										

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

5.7. Контрольные вопросы

1. Перечислите иммитансные параметры компонентов цепей и приведите соответствующие эквивалентные схемы.

2. Поясните назначение элементов структурной схемы измерителя иммитанса Е7-15.
3. Поясните принцип работы измерителя иммитанса Е7-15.
4. Какими параметрами оценивают разброс значений при измерении большой партии однотипных элементов? Поясните смысл и методику определения этих параметров.
5. Как определяются погрешности измерения емкости конденсатора и фактора потерь?
6. Как определяются 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?
11. Выведите формулу для определения погрешности косвенного измерения добротности катушки ΔQ по измеренному фактору потерь D и рассчитанной погрешности его измерения ΔD .
12. Как зависят границы доверительного интервала от количества измерений и доверительной вероятности?
13. Изобразите эквивалентную схему сегнетоэлектрического конденсатора и объясните, почему его емкость зависит от приложенного к нему постоянного напряжения смещения.