

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)

**ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ РЕАКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Отчёт по лабораторной работе №2  
по дисциплине «Метрология и технические измерения»

Вариант №ЛР22 Дистанционный

Студенты гр.169:

\_\_\_\_\_ Можаров Ю.И.

\_\_\_\_\_ Долженко А.Д.

«\_\_» июнь 2021г.

Руководитель:

Доцент каф. КСУП

\_\_\_\_\_ Отчалко В.Ф.

«\_\_» июнь 2021г

Томск 2021

## Оглавление

1 Введение.....	3
2 Ход работы.....	4
3 Заключение.....	11

## **1 Введение**

Целью работы является изучение способов определения погрешностей измерения физической величины различными методами на основе измерения электрических параметров катушки индуктивности и конденсаторов постоянной ёмкости.

## 2 Ход работы

1) Измерение индуктивности катушки прибором Е9 - 4 (Е4 - 4) методом непосредственного отсчёта.

$$f = 760 \text{ кГц} \quad L = 130 \text{ мкГн} \quad C = 346 \text{ нФ}$$

Индуктивность свободная от методической погрешности:

$$L_{0i} = L_i \cdot \frac{C_i}{C_i + C_0} \quad (2.1)$$

где значение  $C_0$  берется из п. 2.3

Относительная погрешность измерения индуктивности:

$$\delta L_{\max} = \frac{\Delta L_{\max}}{L_i} = \sqrt{\left(\frac{\Delta C_{\max}}{C}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta f_{\max}}{f}\right)^2}$$

где,  $\Delta C_{\max}/C$ ,  $\Delta f_{\max}/f$  – максимальные относительные погрешности определения емкости и частоты.

$$\delta L_{\max} = \sqrt{(0,01)^2 + (2 \cdot 0,01)^2} = 0,02236$$

Максимальная абсолютная погрешность измерения индуктивности:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\max} &= \delta L_{\max} \cdot L_{\text{изм}} \\ \Delta L_{\max} &= 131,63 \cdot 0,02236 = 2,94325 \end{aligned}$$

Результат измерения:

$$L = (131,63 \pm 2,94325) \text{ мкГн}$$

2) Измерение индуктивности катушки косвенным методом на различных частотах, равномерно устанавливая значения емкости конденсатора куметра. Результаты приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Обработка результатов измерений

$C_i, \text{нФ}$	$f_i, \text{кГц}$	$L_i, \text{мкГн}$	$L_{0i}, \text{мкГн}$	$\varepsilon_i, \text{мкГн}$	$\varepsilon_i^2, (\text{мкГн})^2$
25	2510	160,98	131,63	2,7	7.29
50	1907	139,4	125,42	-3,36	11.29
75	1584	134,7	125,38	-3,4	11.56
100	1243	164,1	155,44	3,278	10.75
150	1142	129,6	124,96	-3,82	14.59

175	1051	131,7	127,63	-1,15	1.32
200	986	130,4	126,86	-1,92	3.69
225	929	130,6	127,44	-1,15	1.32
250	882	130,4	127,56	-1,22	1.49
275	843	129,8	127,22	-1,56	2.43
300	807	129,8	127,43	-1,35	1.82
325	777	129,2	127,02	-1,58	2.5
375	723	129,4	127,5	-1,28	1.64
400	702	128,6	126,83	-1,95	3.8
425	683	127,9	126,24	-2,54	6.45
450	665	127,4	125,84	-1,94	3.76

Расчет катушки индуктивности:

$$L_i = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_i^2 \cdot C_i} \quad (2.2)$$

По формуле 2.2 были рассчитаны значения катушки индуктивности для таблицы (2.1).

Среднее арифметическое значение определяется следующим образом:

$$L_{cp} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n L_{oi} = \frac{131,63 + 125,42 + \dots + 125,84}{16} = 128,78 \text{ мкГн}$$

Отклонения отдельных результатов измерений от среднего арифметического (остаточная погрешность) рассчитываются по формуле:

$$\varepsilon_i = L_{oi} - L_{cp} \quad (2.3)$$

**3) Вычисление собственной емкости** производится 3 раза по формуле (2.4), подставляя в выражение значения емкости контура куметра  $C_1$  и  $C_2$  при его настройке на частоты  $f_1$  и  $f_2$ , взяты из таблицы (2.1).

$$C_0 = \frac{C_1 - C_2 \cdot \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2}{\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 - 1} \quad (2.4)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – значения емкости контура куметра при его настройке на частоты  $f_1$  и  $f_2$  соответственно.

$$C_{01} = \frac{C_1 - C_8 \cdot \left(\frac{f_8}{f_1}\right)^2}{\left(\frac{f_8}{f_1}\right)^2 - 1} = \frac{25 \cdot 10^{-12} - 225 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{929 \cdot 10^3}{2510 \cdot 10^3}\right)^2}{\left(\frac{929 \cdot 10^3}{2510 \cdot 10^3}\right)^2 - 1} = 6,747 \text{ нФ},$$

$$C_{02} = \frac{C_2 - C_{12} \cdot \left(\frac{f_{12}}{f_2}\right)^2}{\left(\frac{f_{12}}{f_2}\right)^2 - 1} = \frac{50 \cdot 10^{-12} - 325 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{777 \cdot 10^3}{1907 \cdot 10^3}\right)^2}{\left(\frac{777 \cdot 10^3}{1907 \cdot 10^3}\right)^2 - 1} = 4,741 \text{ нФ},$$

$$C_{03} = \frac{C_3 - C_{16} \cdot \left(\frac{f_{16}}{f_3}\right)^2}{\left(\frac{f_{16}}{f_3}\right)^2 - 1} = \frac{75 \cdot 10^{-12} - 450 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{665 \cdot 10^3}{1584 \cdot 10^3}\right)^2}{\left(\frac{665 \cdot 10^3}{1584 \cdot 10^3}\right)^2 - 1} = 5,236 \text{ нФ},$$

$$C_0 = \frac{C_{01} + C_{02} + C_{03}}{3} = 5,574 \text{ нФ}$$

За результат  $C_0$  взято среднее арифметическое из  $C_{01}$ ,  $C_{02}$ ,  $C_{03}$ .

Статистическая оценка  $S$  среднеквадратической погрешности отдельных результатов измерений индуктивности:

$$S = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \cdot \sqrt{\sum_n (L_{oi} - L_{cp})^2} = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i)^2} = 2,39$$

Оценка среднеквадратического отклонения результата измерения  $S_{L_{cp}}$  от истинного значения измеряемой величины (среднеквадратическое отклонение среднего):

$$S_{L_{cp}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_{oi} - L_{cp})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i)^2}{n(n-1)}} = 0,59756$$

Пусть  $P_0=0,95$ , соответственно коэффициент Стьюдента при  $n = 16$  будет равен  $t_\alpha=2,13$ . Таким образом, доверительный интервал:

$$L_D = \pm t_\alpha \cdot S_{L_{cp}} = \pm 2,13 \cdot 0,598 = \pm 1,27374$$

Окончательный результат косвенного измерения индуктивностей:

$$L = L_{cp} \pm L_D = (128,78 \pm 1,27374) \text{ мкГн}; P_0=0,95; n=16$$

#### 4) Измерение емкости конденсатора (малой и большой емкости) прибором Е9-4 (Е4-4). Оценка точности измерения.

Измерение **малых** емкостей, не превышающих диапазон изменения конденсатора переменной емкости куметра.

$$C_1 = 425 \text{ нФ}, C_2 = 146 \text{ нФ}$$

Емкость измеряемого конденсатора:

$$C_x = C_1 - C_2$$

$$C_x = 279 \text{ нФ}$$

Относительная погрешность измерения емкости:

$$\delta C = \sqrt{\left(\frac{\Delta C_1}{C_1 - C_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_2}{C_1 - C_2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{4,25}{279}\right)^2 + \left(\frac{1,46}{279}\right)^2} = 0,0161$$

Абсолютная погрешность измерения:

$$\Delta C = \delta C \cdot C_x = 0,0161 \cdot 279 = 4,4919 \text{ нФ}$$

Результат измерения:

$$C_x = (279 \pm 4,4919) \text{ нФ}$$

Измерение **больших** емкостей, превышающих диапазон изменения конденсатора переменной емкости.

$$C_1 = 200 \text{ нФ}, C_2 = 248 \text{ нФ}$$

Значение емкости измеряемого конденсатора:

$$C_x = \frac{C_1 C_2}{C_2 - C_1} = \frac{200 \cdot 248}{248 - 200} = 1033,333 \text{ нФ}$$

Относительной погрешности измерения при погрешности градуировки шкалы не превышающей:

$$\text{от } 100 \text{ до } 450 \pm 1\% \text{ нФ}$$

$$\delta C = \sqrt{\left(\frac{C_2}{C_2 - C_1} \cdot \delta C_1\right)^2 + \left(\frac{C_1}{C_2 - C_1} \cdot \delta C_2\right)^2}$$

где  $\delta C_1$  и  $\delta C_2$  - относительные погрешности определения емкостей  $C_1$  и  $C_2$  конденсатора куметра

$$\delta C = \sqrt{\left(\frac{248}{248-200} \cdot 0.01\right)^2 + \left(\frac{200}{248-200} \cdot 0.01\right)^2} = 0,0664$$

Абсолютная погрешность измерения:

$$\Delta C = \delta C \cdot C_{изм} = 0,0664 \cdot 1033,333 = 68,6133 \text{ нФ}$$

Результат измерения:

$$C_x = (1033,3 \pm 68,6133) \text{ нФ}$$

**5) Измерение индуктивности катушки, емкостей конденсаторов методом сравнения с мерой на приборе Е12-1 (Е12-1А).**

**5.1) Индуктивность катушки:**

Погрешность измерений свыше 10мкГн не превышает 1,5% от измеряемой величины, 0,2% от предела шкалы соответствующего диапазона

$$L = 127 \text{ мкГн}$$

$$\Delta L_{инст} = 0,015 \cdot 127 \cdot 0,002 \cdot 1000 = 3,81 \text{ мкГн}$$

$$L_x = (127 \pm 3,81) \text{ мкГн}$$

**5.2) Емкость не превышающая диапазон изменения конденсатора:**

Погрешность измерения в диапазоне (1 – 10) пФ составляет ( $\pm 5\% \pm 0,05$ ) пФ, в остальном диапазоне – ( $0,5\% \pm 0,4$ ) пФ.

**Для малой ёмкости:**

$$C_{мал} = 281,2 \text{ нФ}$$

$$\Delta C_{мал} = 0,005 \cdot 278,2 + 0,4 = 1,791 \text{ нФ}$$

$$C_x = (281,2 \pm 1,791) \text{ нФ}$$

**5.3) Емкость превышающая диапазон изменения конденсатора:**

**Для большой ёмкости:**

$$C_{бол} = 1035 \text{ нФ}$$

$$\Delta C_{бол} = 0,005 \cdot 1035 + 0,4 = 5,575 \text{ нФ}$$

$$C_x = (1035 \pm 5,575) \text{ нФ}$$

**б) Измерение индуктивности катушки, емкостей конденсаторов методом сравнения с мерой на приборе Е7-21 (АМ-3125)**

$$L = 127,5 \text{ мкГн};$$

$$C_{мал} = 278,2 \text{ нФ};$$

$$C_{бол} = 1033 \text{ нФ};$$

$$f = 1 \text{ кГц}.$$

**Предел допускаемой основной погрешности:**

$$\Delta L = (0,014 \cdot L + 0.00002) = 1.78502$$

$$L_x = (127,5 \pm 1.78502) \text{ мкГн}$$

**Для малой ёмкости:**

$$\Delta C_{мал} = (0.0025 \cdot C_{мал} + 0.002) = 0,6975 \text{ нФ}$$

$$C_x = (278,2 \pm 0,6975) \text{ нФ}$$

**Для большой ёмкости:**

$$\Delta C_{бол} = (0.0025 \cdot C_{бол} + 0.002) = 2,5845 \text{ нФ}$$

$$C_x = (1033 \pm 2,5845) \text{ нФ}$$

Результаты запишем в таблицу 2.2

Таблица 2.2 - Результаты измерений с указанием погрешностей

Параметр	Прибор Е9-4		Прибор Е12-1	Е7-21
	Метод непосредств. отсчета	Косвенный метод		
Индукт	131,63 ± 2,9	128,78 ± 1,27374 мкГн;	127 ± 3,81 мкГн	127,5 ± 1.78502 мкГн
Больша	1033,3 ± 68,6133 нФ		1035 ± 5,575 нФ	1033 ± 2,5845 нФ
Малая	279 ± 4,4919 нФ		281,2 ± 1,791 нФ	278,2 ± 0,6975 нФ

## 4 Заключение

В данной лабораторной работе был изучен резонансный контурный метод работы куметра и обнаружена следующая закономерность: с увеличением емкости уменьшается индуктивность, что свидетельствует о присутствии в результатах измерений систематической методической погрешности, обусловленной влиянием собственной ёмкости катушки.

Прибором Е9-4 (Е4-4) была измерена индуктивность и емкость катушки методом непосредственного отсчета на частоте  $f = 760 \text{ кГц}$ ;  $L = 130 \text{ мкГн}$ ;  $C = 346 \text{ нФ}$ , а также косвенным методом на различных частотах.

С помощью гетеродинного измерителя (малой и большой емкости) были измерены емкости конденсаторов.

Были оценены все точности измерений. Была вычислена собственная емкость катушки индуктивности, максимальная случайная погрешность измерения индуктивности косвенным методом. На приборах Е12-1 (Е12-1А) и на приборе АМ-3125 была измерена индуктивность катушки емкость конденсаторов методом сравнения с мерой.

На всех приборах значения емкости и индуктивности примерно равны, следовательно, лабораторная работа выполнена верно.