

# Отчет о выполнении лабораторной работы 3.2.3 Резонанс токов в параллельном контуре

Выполнил: Голубович Тимур, группа Б01-108  
26.11.2022

## Цель работы

Исследование резонанса токов в параллельном колебательном контуре с изменяемой ёмкостью, включающее получение амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик, а так- же определение основных параметров контура.

## Оборудование и приборы

генератор сигналов, источник тока; нагруженный на параллельный колебательный контур с переменной ёмкостью; двухлучевой осциллограф; цифровые вольтметры.

## Теоретическое введение

В данной работе изучаются резонансные явления в параллельном колебательном контуре (резонанс токов). Синусоидальный сигнал от генератора поступает на вход управляемого напряжением источника напряжения, собранного на операционном усилителе.

В колебательный контур установки добавлен постоянный резистор  $R$ , снижающий его добротность. Это сделано для упрощения процедур получения и обработки резонансных кривых. Таким образом, суммарное активное сопротивление контура принимается равным

$$R_{\Sigma} = R + R_L + R_S \quad (1)$$

Добротность контуров тем не менее остаётся достаточно высокой, чтобы можно было пользоваться классическими формулами:

$$\mathcal{Q} = \frac{\rho}{R_{\Sigma}} = \frac{\omega_0 L}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{\omega_0 C R_{\Sigma}} \gg 1 \quad (2)$$

При резонансе, когда для высокодобротного контура можно положить  $\omega = \omega_0$ , выражения для модулей комплексных амплитуд тока и напряжения на ёмкости и их фаз принимают простой вид:

$$I(\omega_0) = \frac{\mathcal{E}}{R_{\Sigma}}, \quad U_C(\omega_0) = \mathcal{Q}\mathcal{E}, \quad U_L(\omega_0) = \mathcal{Q}\mathcal{E}. \quad (3)$$

## Экспериментальная установка

Схема экспериментального стенда показана на рис. 1.

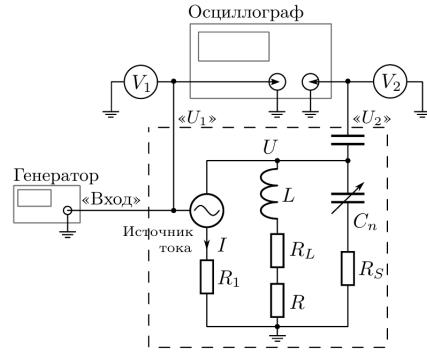


Рис. 1: Схема экспериментального стенда

## Ход работы

### Измерение параметров контура

Вначале зафиксируем сопротивления установки  $R = 3.5 \text{ Ом}$   $R_1 = 1008 \text{ Ом}$ . Для контуров с различными ёмкостями  $C_n$ , меняя их с помощью переключателя на блоке, измерим резонансные частоты  $f_0$  и напряжения  $U_C$  при установленном в напряжении  $\mathcal{E}$  на выходе генератора. Для каждого значения  $C_n$  по данным эксперимента проведем расчёт параметров стенда (см. таблицу 1):

$$L = \frac{1}{C \cdot (2\pi f)^2},$$

$$\rho = \frac{1}{C \cdot 2\pi f},$$

Работа 3.2.3

---

$$\begin{aligned}
 Z_{\text{рез}} &= \frac{U_C}{\mathcal{E}} R_1, \\
 \mathcal{Q} &= \frac{Z_{\text{рез}}}{\rho}, \\
 R_{\Sigma} &= \frac{\rho^2}{Z_{\text{рез}}}, \\
 R_{S_{\max}} &= \delta \cdot \rho, \\
 R_L &= R_{\Sigma} - R - R_{S_{\max}}.
 \end{aligned}$$

$C_n$ , нФ	$f_{0_n}$ , кГц	$U_C$ , В	$\mathcal{E}$ , В	$L$ , мГн	$\rho$ , Ом	$Z_{\text{рез}}$ , Ом	$\mathcal{Q}$	$R_{\Sigma}$ , Ом	$R_{S_{\max}}$ , Ом	$R_L$ , Ом
25.1	32.100	1.1526	0.2	0.980	197.6	5809.1	29.4	6.72	0.20	3.02
33.2	27.812	0.9140	0.2	0.987	172.4	4606.6	26.7	6.45	0.17	2.78
47.3	23.217	0.6690	0.2	0.994	145.0	3371.8	23.3	6.23	0.14	2.59
57.4	21.243	0.5697	0.2	0.978	130.5	2871.3	22.0	5.94	0.13	2.31
67.5	19.458	0.4818	0.2	0.992	121.2	2428.3	20.0	6.05	0.12	2.43
82.7	17.703	0.4010	0.2	0.978	108.7	2021.0	18.6	5.85	0.11	2.24
101.6	16.033	0.3290	0.2	0.970	97.7	1658.2	17.0	5.76	0.10	2.16

Таблица 1: Параметры контура

Рассчитаем средние значения  $L$  и  $R_L$  и их случайные погрешности для использования в дальнейшем:

$$L = 983 \pm 7 \text{ мкГн} \quad \varepsilon_L = 0.7\%,$$

$$R_L = 2.5 \pm 0.3 \text{ Ом} \quad \varepsilon_{R_L} = 10\%.$$

## Измерение АЧХ

Проведём измерения АЧХ для двух различных ёмкостей  $C_2 = 33.2$  нФ и  $C_5 = 67.5$  нФ. Результаты измерений занесём в таблицу 2 и отобразим на графике 2. Также вычислим резонансную частоту  $f_0$  и амплитуду  $U_0$  с помощью экстраполяции полиномом 4 степени (таблица 3), после чего перейдём к безразмерным параметрам  $\frac{f}{f_0} \left( \frac{U}{U_0} \right)$ . Построим соответствующий график 3. Определим добротность  $\mathcal{Q}$  контуров по уровню  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ :

$$\mathcal{Q}_2 = 25.6 \pm 0.6 \quad \varepsilon_{\mathcal{Q}_2} = 2\%$$

$$\mathcal{Q}_5 = 19.4 \pm 0.4 \quad \varepsilon_{\mathcal{Q}_5} = 2\%.$$

Работа 3.2.3

---

$f, \text{ кГц}$	$U_C, \text{ В}$	$f, \text{ кГц}$	$U_C, \text{ В}$
$C_2 = 33.2 \text{ нФ}$			$C_5 = 67.5 \text{ нФ}$
26.996	0.4713	18.801	0.2691
27.183	0.5630	18.856	0.2842
27.261	0.6071	18.883	0.2924
27.307	0.6380	19.038	0.3445
27.438	0.7250	19.083	0.3613
27.536	0.7883	19.126	0.3781
27.638	0.8510	19.196	0.4050
27.913	0.9000	19.322	0.4470
27.998	0.8660	19.558	0.4662
28.086	0.8168	19.693	0.4336
28.144	0.7800	19.737	0.4190
28.160	0.7720	19.844	0.3808
28.202	0.7460	19.923	0.3520
28.325	0.6650	19.964	0.3340
28.462	0.5844	20.141	0.2830
28.634	0.5010	20.206	0.2680

Таблица 2: Измерения АЧХ

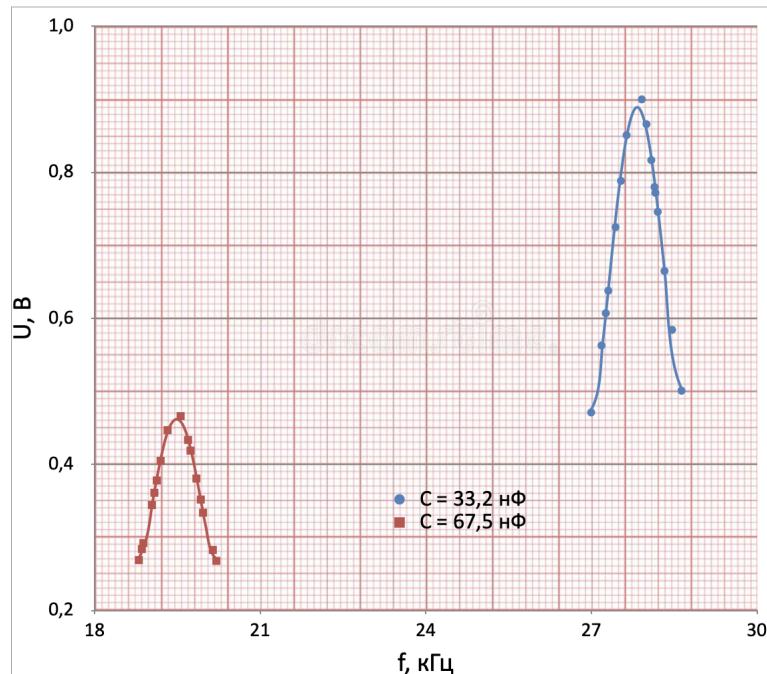


Рис. 2: График АЧХ

### Работа 3.2.3

---

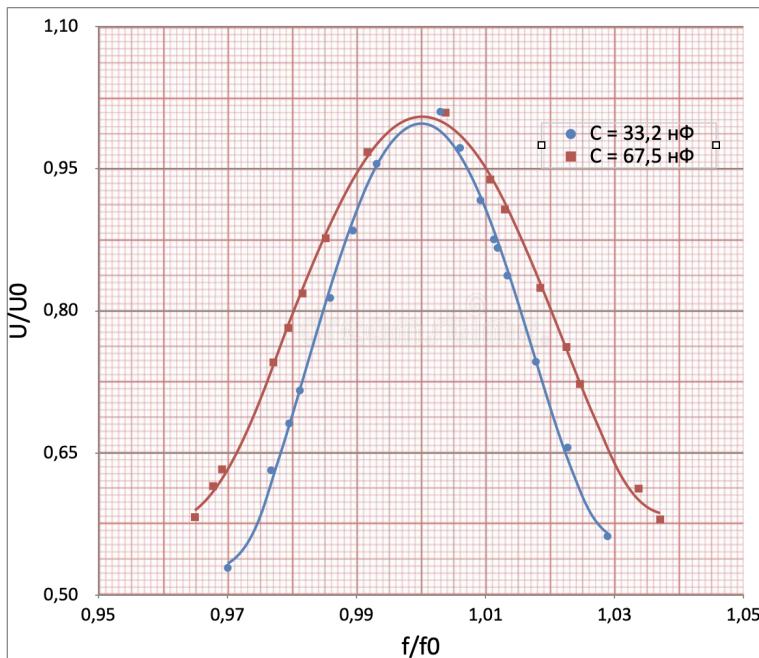


Рис. 3: График АЧХ в обезразмеренных координатах

	$f_0, \text{ кГц}$	$U_0, \text{ В}$
$C_2$	27.830	0.891
$C_5$	19.484	0.462

Таблица 3: Резонансные параметры

### Измерение ФЧХ

Аналогично проведём измерения для ФЧХ. Занесём их в таблицу 4 и построим график ФЧХ 4 в обезразмеренных координатах  $\frac{f}{f_0} \left( \frac{\Delta\phi}{\pi} \right)$ . Определим добротность контура по расстоянию между точками оси  $Ox$ , в которых  $y$  меняется от  $-\frac{1}{4}$  до  $\frac{1}{4}$ :

$$Q_2 = 26.1 \pm 0.7 \quad \varepsilon_{Q_2} = 1.9\%$$

$$Q_5 = 20.0 \pm 0.4 \quad \varepsilon_{Q_5} = 1.8\%.$$

### Работа 3.2.3

---

$x$ , дел	$x_0$ , дел	$f$ , кГц	$\Delta\varphi$				
				$x$ , дел	$x_0$ , дел	$f$ , кГц	$\Delta\varphi$
$C_2 = 33.2 \text{ нФ}$				$C_5 = 67.5 \text{ нФ}$			
-10.5	27.2	18.200	-1.213	-8.0	18.9	26.025	-1.330
-10.0	26.8	18.474	-1.172	-7.7	18.8	26.350	-1.286
-9.0	26.7	18.648	-1.059	-7.1	18.6	26.554	-1.199
-8.0	26.3	18.824	-0.955	-6.5	18.3	26.895	-1.116
-7.5	26.2	18.909	-0.899	-6.2	18.3	27.021	-1.064
-6.3	26.2	19.057	-0.755	-5.0	18.2	27.285	-0.863
-5.0	25.8	19.171	-0.609	-4.0	18.1	27.408	-0.694
1.5	25.2	19.591	0.187	-2.4	17.9	27.626	-0.421
4.3	25.0	19.786	0.540	-1.2	17.8	27.723	-0.212
5.0	24.9	19.845	0.631	1.8	17.7	27.988	0.319
6.1	24.8	19.969	0.773	2.1	17.5	28.053	0.377
6.5	24.7	20.024	0.827	3.5	17.2	28.238	0.639
6.9	24.5	20.090	0.885	4.2	17.5	28.337	0.754
7.3	24.4	20.167	0.940	5.2	17.3	28.597	0.944
8.0	24.2	20.334	1.038	6.0	16.9	28.893	1.115
9.0	23.7	20.761	1.193	6.6	16.8	29.461	1.234

Таблица 4: Измерения ФЧХ

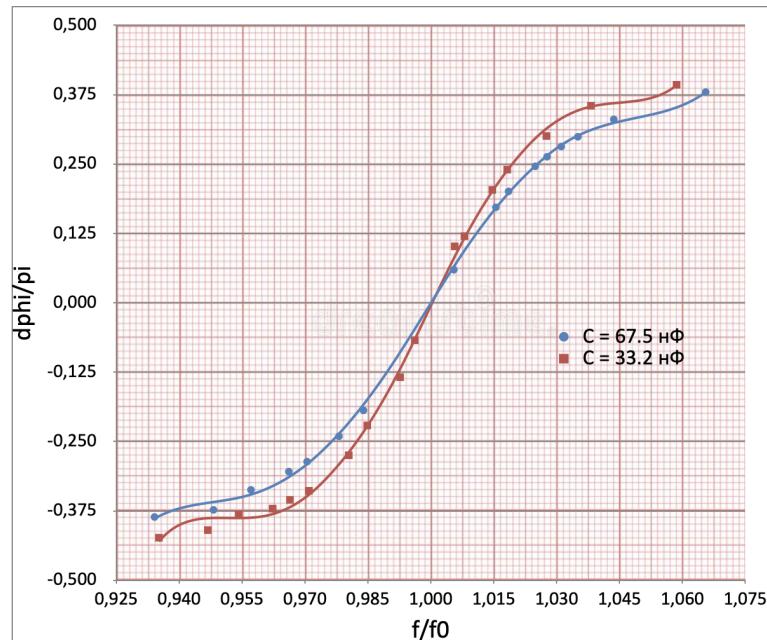


Рис. 4: График ФЧХ в обезразмеренных координатах

## Работа 3.2.3

---

### Зависимость $R_L$ от $f$

Построим график зависимости  $R_L(f)$  и нанесём на него среднее значение  $R_L$ , вычисленное вначале. Как видно из графика 5, сопротивление катушки увеличивается с частотой.

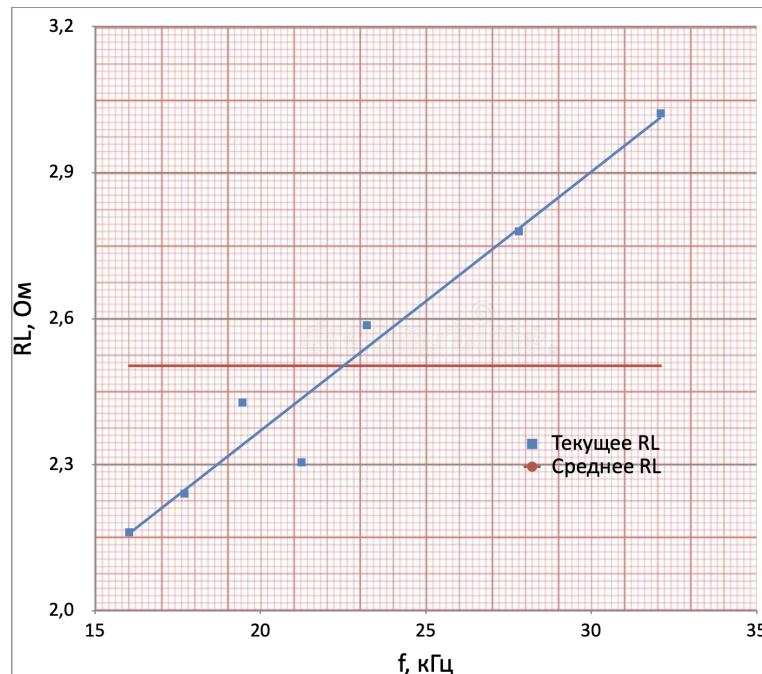


Рис. 5: График зависимости  $R_L$  от резонансной частоты

### Векторная диаграмма

Теперь построим векторную диаграмму для контура с наименьшей добротностью, т.е. для последнего —  $Q_7 = 17.0$ .

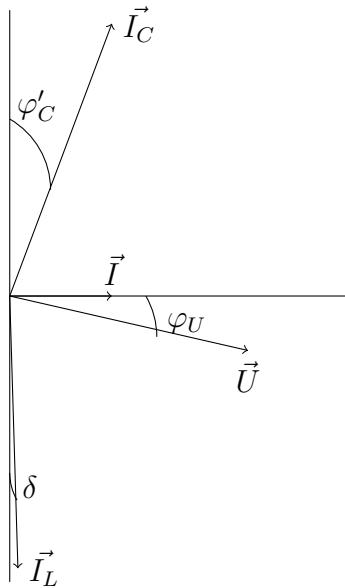


Рис. 6: Векторная диаграмма

Посчитаем ток  $I = \frac{\mathcal{E}}{R_1} = \frac{0.2}{1008} \approx 0.1$  мА. Его вектор равен сумме:  $\vec{I} = \vec{I}_L + \vec{I}_C$ , причем сам  $\vec{I}$  расположен на оси абсцисс, а его компоненты расположены к нему под углами

$$\varphi_C = \frac{\pi}{2} - \frac{R + R_l}{\rho}, \quad \varphi_L = -\frac{\pi}{2} + \delta \quad (4)$$

Здесь  $\delta \simeq 10^{-3}$  — очень малый параметр установки, которым допустимо пренебречь при расчёте, однако можно изобразить для наглядности. Подсчитаем угол  $\varphi'_C = \frac{R + R_l}{\rho} \approx 0.0562$ .

Аналогичный угол у напряжения  $\vec{U}$ :  $\varphi_U = -\frac{R + R_l}{\rho}$ . Т.е. оно незначительно отклоняется от оси абсцисс на отрицательный угол.

Изобразим это на рисунке 6.

## Вывод

Вначале работы были рассчитаны некоторые характерные параметры контуров для различных ёмкостей. Далее с помощью АЧХ и ФЧХ были получены значения добротностей для двух различных ёмкостей  $C_2$  и  $C_5$ . Был построен график  $R_L(f)$  и векторная диаграмма.

## Список литературы

- [1] Сивухин Д. В. *Общий курс физики. Том 3 Электричество и магнетизм*, 2004
- [2] Кириченко Н.А. *Электричество и магнетизм.*, 2011
- [3] *Лабораторный практикум по общей физике. В 3 томах. Том 2. Электричество и магнетизм: учебное пособие* под ред. А. В. Максимычева, М. Г. Никулина