

# Резонанс токов в параллельном контуре

## Цель работы

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

## Оборудование

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

## Экспериментальная установка

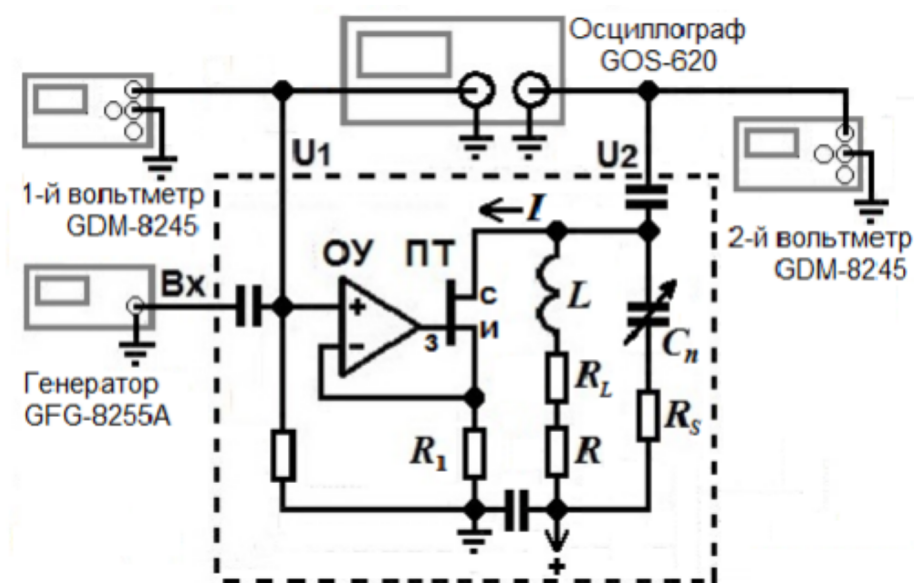


Рис. 1: Схема экспериментального стенда.

## Теоретическая часть

Схема экспериментального стенда для изучения резонанса токов в параллельном колебательном контуре показана на рисунке 1. Синусоидальный сигнал от генератора поступает на вход источника тока, собранного на операционном усилителе ОУ с полевым транзистором ПТ, питание которых

осуществляется встроенным блоком-выпрямителем от сети переменного тока 220 вольт. Цепи питания на схеме не показаны, представлен только резистор  $R_1$ , переменное напряжение на котором в используемой схеме равно напряжению на входе «+» операционного усилителя. Источник тока, обладающий по определению бесконечным внутренним сопротивлением, фактически обеспечивает постоянство амплитуды тока  $I$  на меняющейся по величине нагрузке — параллельном контуре, изображенном на рисунке 1 в виде эквивалентной схемы. Источник тока, колебательный контур и блок питания заключены в отдельный корпус с названием «Резонанс токов» на верхней крышке, отмеченный на рисунке штриховой линией.

На корпусе имеются коаксиальные разъёмы «Вход», « $U_1$ » и « $U_2$ », а также переключатель магазина ёмкостей  $C_n$  с указанием номера  $n = 1, 2, \dots 7$ . Величины ёмкостей  $C_n$  и сопротивления  $R_1$ , указаны в табличке на крышке корпуса. Напряжение  $E = E_0 \cos(\omega t + \phi_0)$  поступает на вход «+» операционного усилителя от генератора через согласующую  $RC$ -цепочку. Это же напряжение через разъём « $U_1$ » подаётся одновременно на канал 1 осциллографа GOS-620 и вход 1-го цифрового вольтметра GDM-8245. Переменное напряжение на резисторе  $R_1$ , как отмечалось выше, при этом также равно  $E$ . Напряжение на контуре  $U$ , совпадающее с напряжением на конденсаторе, подаётся со знаком «-» через разъём « $U_2$ » на канал 2 осциллографа и вход 2-го цифрового вольтметра GDM-8245. Как видно из схемы,

$$I = E/R_1 = I_0 \cos(\omega t + \varphi_0), \quad I_0 = E_0/R_1.$$

Активные потери в конденсаторе, пропорциональные, как известно, косинусу угла  $\varphi$  сдвига фаз между током и напряжением на ёмкости, убывают с ростом  $\varphi$  и, соответственно, с уменьшением угла  $\delta = 90^\circ - \varphi$ . Потери в конденсаторе принято характеризовать величиной  $\operatorname{tg} \delta$ , обычно приводимой в документации к изделию. Из закона Ома получаем выражение для эквивалентного последовательного напряжения (ЭПС) на циклической частоте  $\omega = 2\pi f$  в виде

$$R_S = \frac{U_{RS}}{I} = \frac{U_{RS}}{\omega C U_{CS}} = \frac{1}{\omega C} \operatorname{tg} \delta.$$

В индуктивную ветвь параллельного колебательного контура нашей установки добавлен постоянный резистор  $R$ , несколько снижающий его добротность. Это сделано для упрощения

процедур получения и обработки резонансных кривых. Таким образом, суммарное активное сопротивление контура при его последовательном обходе принимается равным

$$R_{\Sigma} = R_L + R + R_S.$$

Далее будем пользоваться методом комплексных амплитуд. Для импедансов Ёмкостной  $Z_C$  и индуктивной  $Z_L$  ветвей контура получаем формулы:

$$Z_C = R_S - \frac{i}{\omega C}, \quad Z_L = R + R_L + i\omega L.$$

Комплексные амплитуды токов в ёмкостной  $\vec{I}_C$  и индуктивной  $\vec{I}_L$  ветвях контура, а также напряжения  $\vec{U}$  на контуре при нулевой начальной фазе  $\varphi_0$  внешнего тока  $\vec{I} = I_0 e^{i\varphi_0}$  удобно переписать в виде:

$$\vec{I}_C = \vec{I} \frac{Z_L}{Z_C + Z_L} = iQ I_0 \frac{\omega}{\omega_0} \frac{1 - i \frac{R+R_L}{\rho} \frac{\omega_0}{\omega}}{1 + iQ(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})},$$

$$\vec{I}_L = \vec{I} \frac{Z_C}{Z_C + Z_L} = -iQ I_0 \frac{\omega_0}{\omega} \frac{1 + i \operatorname{tg} \delta}{1 + iQ(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})},$$

Здесь использованы стандартные обозначения характеристик колебательного контура:  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  — собственная частота, определяемая из условия  $\operatorname{Im}(Z_C + Z_L) = 0$ , то есть из условия действительности импеданса контура при его последовательном обходе,  $\rho = \sqrt{LC}$  — реактивное, или волновое, сопротивление,  $Q$  — добротность колебательного контура, связанная с его параметрами соотношениями

$$Q = \rho/R_{\Sigma} = \omega_0 L/R_{\Sigma} = 1/\omega_0 C R_{\Sigma} \gg 1.$$

## Обработка результатов измерений

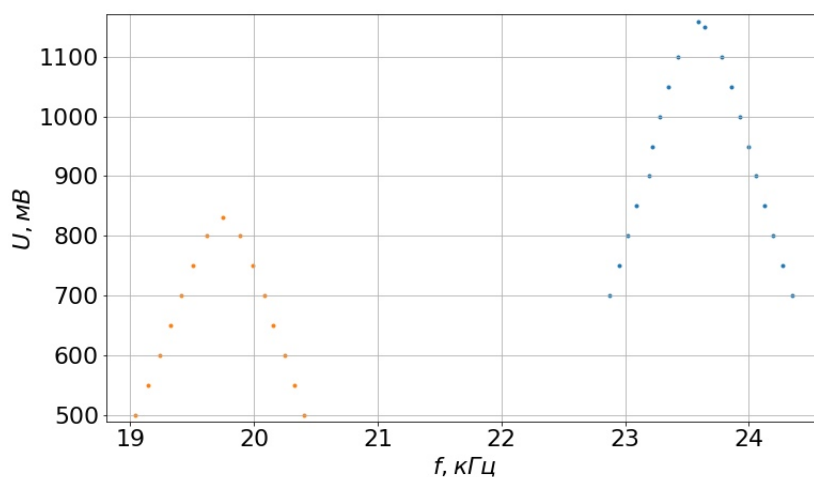
Таблица 1: Данные при  $C_3$ 

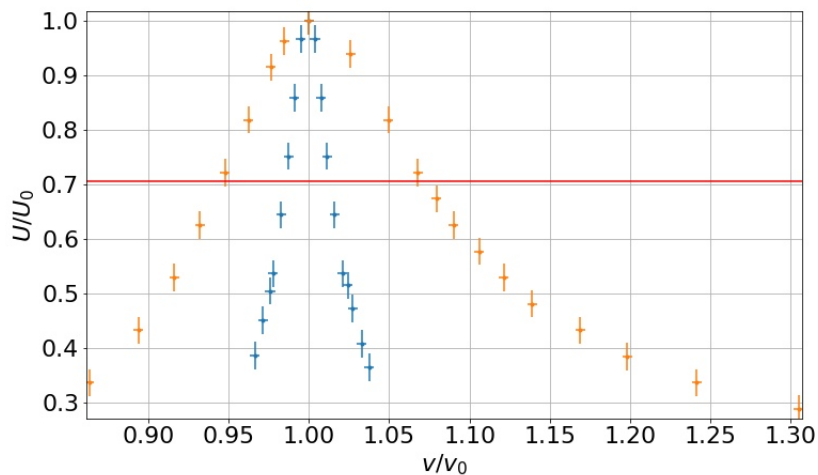
$U$ , мВ	$f$ , кГц
700	22.876
750	22.953
800	23.025
850	23.092
900	23.194
950	23.220
1000	23.278
1050	23.350
1100	23.426
1150	23.642
1159	23.590
1100	23.782
1050	23.855
1000	23.927
950	23.996
900	24.058
850	24.126
800	24.196
750	24.273
700	24.353

Таблица 2: Данные при  $C_5$ 

$U$ , мВ	$f$ , кГц
500	19.044
550	19.148
600	19.240
650	19.329
700	19.414
750	19.504
800	19.616
831	19.751
800	19.890
750	19.993
700	20.086
650	20.157
600	20.249
550	20.324
500	20.403

Построим АЧХ для двух ёмкостей  $C_3$  и  $C_5$ :

Рис. 2: График в координатах  $f, U(f)$

Рис. 3: График в координатах  $f/f_{\text{рез}}, U(f)/U(\text{рез})$ 

По ширине резонансной кривой определим добротность:

$$Q_1 = 9; \quad Q_2 = 34;$$

$C_n$ , нФ	$f$ , кГц	$U$ , В	$E$ , В	$L$ , мкГн	$Q$	$\rho$ , Ом	$R_{\Sigma}$ , Ом	$R_{Smax}$ , Ом	$R_L$ , Ом	$Z_{res}$ , Ом
25,1	32,25	1,03	0,2	970,3	26,4	196,61	7,44	0,197	3,75	5191,2
33,2	28,08	0,80	0,2	967,6	23,6	170,72	7,22	0,171	3,55	4032,0
47,3	23,56	0,59	0,2	964,8	20,8	142,81	6,85	0,143	3,21	2973,6
57,4	21,40	0,49	0,2	963,6	19,1	129,56	6,79	0,130	3,17	2469,6
67,2	19,72	0,42	0,2	965,0	17,6	120,10	6,81	0,120	3,19	2116,8
82,7	17,82	0,35	0,2	964,5	16,3	107,99	6,61	0,108	3,00	1764,0
101,6	16,03	0,29	0,2	970,2	15,00	97,72	6,53	0,098	2,93	1461,6
Среднее значение				966,6	-	-	-	-	3,26	-
Среднеквадратичная погрешность среднего значения:				1,5	-	-	-	-	0,27	-
Коэффициент Стьюдента				2,7	-	-	-	-	1,3	-
Случайная погрешность				4,1	-	-	-	-	0,35	-

Формулы, необходимые для вычислений:

$$1) L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C} \quad 2) \rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad 3) I = E/R_1 \quad 4) Z_{res} = UR_1/E$$

$$5) Z_{res} = Q\rho = Q^2 R_{\Sigma} \quad 6) R_{Smax} = \rho/1000 \quad 7) R_{\Sigma} = R_L + R + R_S$$

Рис. 4: Результирующая таблица

## Вывод

В этой лабораторной работе мы исследовали резонанс колебательного контура, возникающий при совпадении собственной частоты колебаний и внешней частоты. В идеальном контуре при резонансе колебания бы продолжались бесконечно, но в реальности из-за неидеальности элементов

колебательного контура колебания угасают, что и характеризует такой параметр контура, как добротность.