

## Работа 122

## Резонанс напряжений в последовательном контуре

**Цель работы:** исследование резонанса напряжений в последовательном колебательном контуре с изменяемой ёмкостью, включающее получение АЧХ и ФЧХ, а также определение основных параметров контура.

**Оборудование:** генератор сигналов, источник напряжения, нагруженный на последовательный колебательный контур с переменной ёмкостью, двухлучевой осциллограф, цифровые вольтметры.

## 1. Теоретическая справка

**Общие уравнения.** Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из последовательно соединенных конденсатора с емкостью  $C$  и активным сопротивлением  $R_S$ , катушки с индуктивностью  $L$  и активным сопротивлением  $R_L$  и резистора с сопротивлением  $R$ , которая подключена к источнику переменного тока с амплитудой напряжения  $E$  и частотой  $f$ . Тогда общее активное сопротивление цепи  $R_\Sigma$  выражается формулой

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

а циклическая частота  $\omega$  формулой

$$\omega = 2\pi f. \quad (2)$$

Отсюда импеданс цепи определяется выражением

$$Z = R_\Sigma + i \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right), \quad (3)$$

из которого можно легко найти формулу для комплексной амплитуды тока  $\hat{I}$ :

$$\hat{I} = \frac{\hat{E}}{Z} = \frac{E}{R_\Sigma + i \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}. \quad (4)$$

Из предыдущего выражения несложно получить формулы для комплексной амплитуды напряжения на конденсаторе  $\hat{U}_C$ , а также для его амплитуды  $U_C$  и сдвига фаз  $\varphi_C$ :

$$\hat{U}_C = E \frac{R_S - \frac{i}{\omega C}}{R_\Sigma + i \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}; \quad (5)$$

$$U_C = E \sqrt{\frac{R_S^2 \omega^2 C^2 + 1}{\frac{1}{Q^2} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \left( \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right)^2}}; \quad (6)$$

$$\varphi_C = -\arccos \left( \frac{\frac{1}{Q} R_S \omega C - \left( \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right)^2}{\sqrt{R_S^2 \omega^2 + 1} \sqrt{\frac{1}{Q^2} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \left( \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right)^2}} \right). \quad (7)$$

Здесь были использованы следующие обозначения:

$$\begin{cases} \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} - \text{собственная циклическая частота контура;} \\ Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} - \text{добротность контура.} \end{cases} \quad (8)$$

**Приближение вблизи резонанса.** Видно, что выражения (6) - (7) являются достаточно громоздкими. Для их упрощения примем, что добротность контура велика ( $Q \geq 10$ ) и  $R_S \ll R$ , и будем рассматривать поведение цепи вблизи резонанса. Тогда можно считать  $\omega_0$  резонансной циклической частотой контура, а эти выражения примут вид:

$$U_C = EQ \frac{\omega}{\omega_0} \frac{1}{\sqrt{1 + (\tau \Delta \omega)^2}}; \quad (9)$$

$$\varphi_c = -\frac{\pi}{2} + \delta - \arctg(\tau\Delta\omega). \quad (10)$$

Новые использованные обозначения:

$$\begin{cases} \tau = \frac{2Q}{\omega_0} - \text{постоянная времени контура;} \\ \delta = \arctg(RC\omega) - \text{параметр конденсатора (см. рис. 1).} \\ \Delta\omega = \omega - \omega_0 \end{cases} \quad (11)$$

Из выражений (9) и (10) можно выразить добротность контура через параметры АЧХ и ФЧХ: пусть  $\Delta\omega$  - ширина резонансного пика при напряжении, в  $\sqrt{2}$  раз меньшем резонансного. Эту же величину можно получить как разность циклических частот между точками ФЧХ, где  $\varphi$  принимает значения  $-\frac{\pi}{4}$  и  $-\frac{3\pi}{4}$ . Примем также за  $k$  коэффициент наклона графика ФЧХ в точке резонанса, тогда

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = -\frac{k\omega_0}{2}. \quad (12)$$

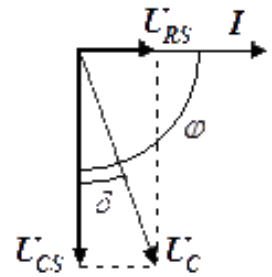


Рис. 1: Векторная диаграмма

**Поправка к резонансной частоте.** Истинное значение циклической частоты, при которой  $U_C$  максимально, отлично от  $\omega_0$ . Получим для нее более точное выражение, учитывая ранее принятые предположения. Пренебрежем  $R_S$  в формуле (6), тогда производная  $\frac{dU_C^2}{df}$  примет вид

$$\frac{dU_C^2}{df} = \frac{\frac{4\omega}{\omega_0^2} - \frac{2\omega}{Q^2\omega_0^2} - \frac{4\omega^3}{\omega_0^4}}{\frac{1}{Q^2} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + \left(\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 - 1\right)^2}. \quad (13)$$

При максимальном напряжении значение этого выражения должно быть равно нулю, исходя из этого несложно получить выражение для  $\omega$ :

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} \approx \omega_0 \left(1 - \frac{1}{4Q^2}\right). \quad (14)$$

**Зависимость  $R_L$  от частоты.** При достаточно больших частотах активное сопротивление катушки индуктивности может довольно сильно отличаться от значения при постоянном токе. У этого явления есть несколько причин, как то потери энергии за счет наведенных токов в сердечнике, а также потери при перемагничивании, и скин-эффект. Потери энергии за счет перемагничивания дают сопротивление, пропорциональное  $\omega$ , а за счет наведенных токов -  $\omega^2$ . Толщина скин-слоя зависит от частоты как  $\frac{1}{\sqrt{\omega}}$ , а значит сопротивление пропорционально  $\sqrt{\omega}$ . Таким образом, можно ожидать, что

$$R_L = a + b\sqrt{\omega} + c\omega + d\omega^2. \quad (15)$$

## 2. Измерение резонансных частот для разных емкостей

**Экспериментальная установка.** Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. С помощью вольтметров мы можем измерять действующие значения напряжения на источнике и конденсаторе, частота  $f$  определяется источником. Осциллограф позволяет получить более детальную картину колебаний. Емкость можно изменять с помощью магазина емкостей.

Заметим, что если в предыдущих формулах заменить все амплитуды на действующие значения (далее будем использовать прежние обозначения для действующих значений), величины  $\frac{\omega}{\omega_0}$  на  $\frac{f}{f_0}$  ( $f_0$  - резонансная частота), а величины  $\omega$  на  $2\pi f$ , то они останутся верными. Поэтому из (8), (9) и (11) индуктивность выражается по формуле

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C}, \quad (16)$$

где  $f_0$  - резонансная частота, добротность по формуле

$$Q = \frac{U_{C0}}{E}, \quad (17)$$

где  $U_{C0}$  - действующее значение напряжение в резонансе, сопротивление по формуле

$$R_{\Sigma} = \frac{E}{U_{C0}} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (18)$$

действующее значение тока в цепи по формуле

$$I = \frac{E}{R_{\Sigma}}. \quad (19)$$

Кроме этого, введем дополнительно следующие параметры:

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{\frac{L}{C}} - \text{реактивное (или волновое) сопротивление контура;} \\ R_{S\max} = 10^{-3}\rho - \text{максимальное активное сопротивление конденсатора.} \end{cases} \quad (20)$$

В выражении для  $R_{S\max}$  множитель  $10^{-3}$  был выбран, т.к. для используемых конденсаторов  $\text{tg } \delta \leq 10^{-3}$ , и в силу выражения

$$R_S = \rho \text{tg } \delta \quad (21)$$

Также, если дополнительно предположить, что  $R$  мало меняется с частотой, то, в силу малости  $R_S$ , из (1) получим

$$R_L = R_{\Sigma} - R. \quad (22)$$

В этой части мы будем снимать зависимость  $f_0$  и  $U_{C0}$  от  $C$  при неизменном действующем значении напряжения на источнике:

$$E = (0,100 \pm 0,001) \text{ В}. \quad (23)$$

Значение сопротивления резистора:

$$R = 3,45 \text{ Ом}. \quad (24)$$

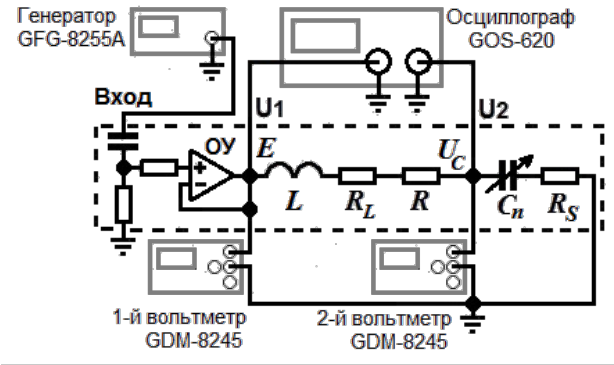


Рис. 2: Схема установки

$C$ , нФ	25,0	33,2	47,5	57,0	67,4	82,1	99,6
$f_0$ , кГц	31,5	27,3	23	21,1	19,4	17,6	16
$U_{C0}$ , В	2,60	2,33	2,02	1,87	1,75	1,60	1,48
$E$ , В	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
$L$ , мГн	1,02	1,02	1,01	1,00	1,00	1,00	0,99
$\Delta L$ , мГн	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$R_{\Sigma}$ , Ом	7,69	7,45	7,18	7,08	6,96	6,90	6,77
$R_L$ , Ом	4,24	4,00	3,73	3,63	3,51	3,45	3,32
$\Delta R_L$ , Ом	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06
$Q$	26,0	23,3	20,2	18,7	17,5	16,0	14,8
$\rho$ , Ом	200	174	145	132	122	110	100
$R_{S\max}$ , Ом	0,200	0,174	0,145	0,132	0,122	0,110	0,100
$I$ , мА	13,0	13,4	13,9	14,1	14,4	14,5	14,8

Таблица 1: Зависимость  $U_{C0}$  и  $f_0$  от  $C$

**Обработка результатов.** Экспериментальные данные представлены в таблице 1. Погрешность  $f_0$  в силу неточности определения резонансной частоты была принята

$$\Delta f_0 = 0,1 \text{ кГц}, \quad (25)$$

погрешность  $U_{C0}$

$$\Delta U_{C0} = 0,01 \text{ В}. \quad (26)$$

Погрешность  $L$ , исходя из (16), вычислялась по формуле

$$\Delta L = 2 \frac{\Delta f_0}{f_0}, \quad (27)$$

т.к мы считаем значение емкости точным. Из данных таблицы можно получить среднее значение  $L$  (в дальнейшем будем обозначать  $L$  именно его), и случайную погрешность  $\sigma_L$ :

$$L \approx 1,00 \text{ мГн}; \quad (28)$$

$$\sigma_L \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ мГн}. \quad (29)$$

Как мы видим, систематическая погрешность больше случайной, поэтому для дальнейших вычислений принималось:

$$\Delta L = 0,01 \text{ мГн}. \quad (30)$$

Погрешность  $R_L$  вычислялась по формуле

$$\Delta R_L = R_L \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{C0}}{U_{C0}}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2}, \quad (31)$$

это выражение было получено из (18), т.к. из (22)

$$\Delta R_L = \Delta R_{\Sigma}, \quad (32)$$

при этом мы считали, что значение  $R$  известно с достаточной точностью.

График зависимости  $R_L(f)$  представлен на рис. 3. На нем представлены фитирования экспериментальных данных двумя зависимостями: вида (15) и вида

$$R_L = a + b\sqrt{f}, \quad (33)$$

т.е. модели, когда отсутствует сердечник и скин-эффект влияет на всю цепь, в том числе и на  $R$ . Первая модель обозначена mod1, вторая - mod2.

Из графика видно, что точки лежат почти на одной прямой, поэтому для точного определения характера зависимости необходимы измерения в более широком диапазоне. Рассмотрим значения  $\chi^2$  для 1 и 2 моделей:

$$\chi_1^2 \approx 0,38; \quad (34)$$

$$\chi_2^2 \approx 1,06, \quad (35)$$

отсюда модель 2 более вероятна, т.к.  $\chi^2$  ближе к 1. Поэтому катушка скорее всего не имеет сердечника, и все обусловлено скин-эффектом. Толщина скин-слоя на частоте 10кГц равна

$$\Delta \approx 0,66 \text{ мм}, \quad (36)$$

что довольно мало, поэтому скин-эффект в данном случае существенный.

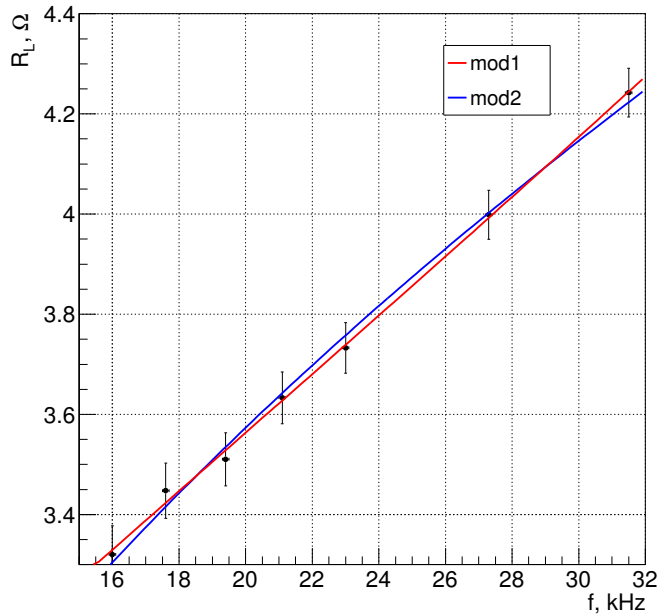


Рис. 3: График зависимости  $R_L(f)$

### 3. Измерение АЧХ и ФЧХ

**Экспериментальная установка.** В этой части экспериментальная установка такая же, как и в предыдущей. Вместо настоящего значения фазы  $\varphi_C$  будем использовать  $|\varphi_C|$ , т.к. из формулы (7) следует, что  $\varphi_C < 0$ , и подобная замена просто изменит знак. Для измерения  $|\varphi_C|$  синхронизация первого осциллографа была настроена на первый канал (источник), тогда осциллограмма выглядит примерно как на рис. 4. При использовании параметров, указанных на рисунке (они измеряются в делениях шкалы, т.к. нам нужно только отношение), формула для  $|\varphi_C|$  примет вид

$$|\varphi_C| = \pi \frac{x}{x_0}. \quad (37)$$

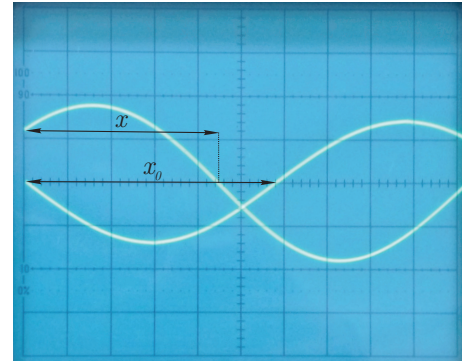


Рис. 4: Возможный вид осциллограммы

Измерения проводились при двух разных значениях емкости: 25,0 нФ и 47,5 нФ.

**Обработка результатов.** Экспериментальные данные представлены в таблицах 2 и 3 - для 25,0 нФ и 47,5 нФ соответственно. Измерения  $f$  считались точными (погрешность прибора с учетом случайных отклонений 10 Гц, что очень мало). Погрешность  $U_C$  принималась равной

$$\Delta U_C = 0,01 \text{ В}, \quad (38)$$

погрешности  $x$  и  $x_0$

$$\Delta x = \Delta x_0 = 0,1 \text{ дел.} \quad (39)$$

Погрешность  $\Delta\varphi$ , исходя из (37), оценивалась по формуле

$$\Delta|\varphi_C| = |\varphi_C| \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_0}{x_0}\right)^2}, \quad (40)$$

$U_C, \text{В}$	0.62	1.14	1.19	1.43	1.85	2.10	2.19	2.42
$f, \text{кГц}$	28.91	30.28	30.31	30.57	30.87	31.02	31.06	31.20
$x, \text{дел}$	0.9	1.0	1.1	1.4	1.9	2.2	2.4	2.9
$x_0, \text{дел}$	8.4	8.2	8.2	8.2	8.1	8.0	8.0	8.0
$\varphi$	0.34	0.38	0.42	0.54	0.74	0.86	0.94	1.14
$\Delta\varphi$	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
$\frac{f}{f_0}$	0.918	0.962	0.963	0.971	0.981	0.985	0.987	0.991
$\Delta\frac{f}{f_0}$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
$\frac{U_C}{U_0}$	0.238	0.438	0.458	0.550	0.712	0.808	0.842	0.931
$\Delta\frac{U_C}{U_0}$	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005
$U_C, \text{В}$	2.51	2.60	2.57	2.32	1.94	1.52	1.14	0.63
$f, \text{кГц}$	31.30	31.44	31.53	31.75	32.01	32.32	32.73	33.86
$x, \text{дел}$	3.3	3.8	4.1	5.0	5.5	6.0	6.3	6.5
$x_0, \text{дел}$	7.9	7.9	7.9	7.8	7.8	7.7	7.6	7.5
$\varphi$	1.31	1.51	1.63	2.01	2.22	2.45	2.60	2.72
$\Delta\varphi$	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
$\frac{f}{f_0}$	0.994	0.999	1.002	1.009	1.017	1.027	1.040	1.076
$\Delta\frac{f}{f_0}$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
$\frac{U_C}{U_0}$	0.965	1.000	0.988	0.892	0.746	0.585	0.438	0.242
$\Delta\frac{U_C}{U_0}$	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004

Таблица 2: Данные для получения АЧХ и ФЧХ при  $C = 25,0 \text{ нФ}$

$U_C, \text{В}$	0.59	0.93	1.19	1.43	1.62	1.77	1.93	1.99
$f, \text{кГц}$	21.16	21.98	22.31	22.52	22.65	22.76	22.89	22.97
$x, \text{дел}$	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9
$x_0, \text{дел}$	4.7	4.6	4.5	4.5	4.4	4.4	4.4	4.4
$ \varphi_C $	0.33	0.48	0.63	0.77	0.93	1.07	1.21	1.36
$\frac{f}{f_0}$	0.92	0.95	0.97	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99
$\Delta \varphi_C $	0.067	0.069	0.071	0.072	0.074	0.075	0.077	0.078
$\Delta\frac{f}{f_0}$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
$\frac{U_C}{U_0}$	0.292	0.460	0.589	0.708	0.802	0.876	0.955	0.985
$\Delta\frac{U_C}{U_0}$	0.005	0.005	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007	0.007
$U_C, \text{В}$	2.01	1.98	1.84	1.60	1.27	0.95	0.74	0.46
$f, \text{кГц}$	23.06	23.16	23.34	23.53	23.80	24.16	24.56	25.47
$x, \text{дел}$	2.1	2.3	2.7	3.0	3.3	3.5	3.5	3.6
$x_0, \text{дел}$	4.3	4.3	4.3	4.3	4.2	4.2	4.1	3.9
$ \varphi_C $	1.53	1.68	1.97	2.19	2.47	2.62	2.68	2.90
$\frac{f}{f_0}$	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.05	1.06	1.10
$\Delta \varphi_C $	0.081	0.083	0.086	0.089	0.095	0.097	0.101	0.110
$\Delta\frac{f}{f_0}$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
$\frac{U_C}{U_0}$	0.995	0.980	0.911	0.792	0.629	0.470	0.366	0.228
$\Delta\frac{U_C}{U_0}$	0.007	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005

Таблица 3: Данные для получения АЧХ и ФЧХ при  $C = 47,5 \text{ нФ}$

погрешность  $\frac{f}{f_0}$  - по формуле

$$\Delta\frac{f}{f_0} = \frac{f}{f_0} \frac{\Delta f_0}{f_0}, \quad (41)$$

здесь значение  $\frac{\Delta f_0}{f_0}$  можно получить из 14:

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} \approx \frac{1}{4Q^2} \approx 0,001, \quad (42)$$

как будет показано в дальнейшем. Погрешность  $\Delta \frac{U_C}{U_{C0}}$  определялась по формуле

$$\Delta \frac{U_C}{U_{C0}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_C}{U_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_{C0}}{U_{C0}}\right)^2}. \quad (43)$$

Графики зависимости  $U_C(f)$  представлены на рис. 5. Данные были профитированы зависимостью (6) с учетом того, что

$$\omega = 2\pi f. \quad (44)$$

Как мы видим, экспериментальные данные хорошо легли на эту зависимость, хотя коэффициенты  $\chi^2$  получились довольно большие (122 для 25,0 нФ и 36 для 47,5 нФ), что, скорее всего, вызвано недооценкой ошибки. Параметры зависимости для 25,0 нФ:

$$f_0 = (31,480 \pm 0,002) \text{ кГц}; \quad (45)$$

$$Q = 26,02 \pm 0,05. \quad (46)$$

Как мы видим, значение  $Q$  совпадает со значением из предыдущей части. Значение  $R_S$  получилось равным

$$R_S = (0 \pm 12) \text{ Ом}, \quad (47)$$

таким образом, определить  $R_S$  в данном эксперименте невозможно (но это сопротивление мало), поэтому в дальнейшем это сопротивление не указывается. Для 47,5 нФ получились следующие параметры:

$$f_0 = (23,100 \pm 0,002) \text{ кГц}; \quad (48)$$

$$Q = 20,02 \pm 0,13, \quad (49)$$

что также совпадает с данными предыдущих пунктов. Для построения последующих графиков были использованы полученные значения  $f_0$ , в качестве погрешности была взята величина

$$\frac{1}{4Q^2} \sim \frac{1}{4 \cdot 20^2} \approx 0,01, \quad (50)$$

как и было в (42).

График зависимости  $|\varphi_C| \left(\frac{f}{f_0}\right)$  представлен на рис. 6. Функция для фитирования была получена из (7) с учетом (44) и преобразования

$$f = \frac{f}{f_0} f_0. \quad (51)$$

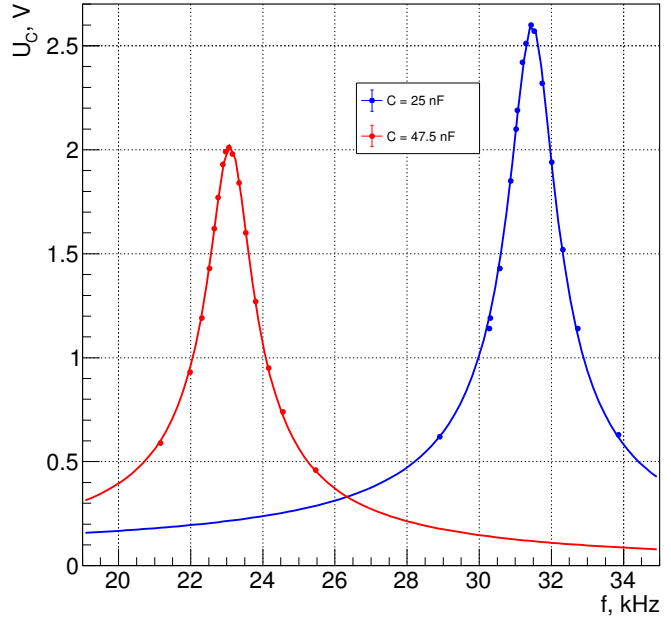


Рис. 5: График зависимости  $U_C(f)$

Эти данные хуже совпадают с полученными зависимостями, чем данные  $U_C(f)$ , но относительные погрешности в данном случае также больше. Тем не менее, коэффициенты  $\chi^2$  здесь ближе к 1 (1,2 для 47,5 нФ и 18 для 25,0 нФ). Такой большой коэффициент для 25,0 нФ связан, скорее всего, с плохими измерениями. Для 25,0 нФ добротность (теперь в фитировании только 2 параметра -  $Q$  и  $R_S$ ) равна

$$Q = 30 \pm 2, \quad (52)$$

что близко к полученным ранее значениям, но не совпадает с ними, что еще раз подтверждает предположение о плохих измерениях. Для 47,5 нФ добротность равна

$$Q = 20 \pm 2, \quad (53)$$

что совпадает с предыдущими значениями.

График зависимости  $\frac{U_C}{U_{C0}} \left( \frac{f}{f_0} \right)$  представлен на рис. 7. Для пересчета были использованы значения  $U_{C0}$ , полученные из фитирования зависимости  $U_C(f)$ :

$$\begin{cases} U_{C0} = (2,61 \pm 0,01) \text{ В} - \text{ для } 25,0 \text{ нФ}; \\ U_{C0} = (2,02 \pm 0,01) \text{ В} - \text{ для } 47,5 \text{ нФ}. \end{cases} \quad (54)$$

Здесь экспериментальные данные хорошо совпадают с зависимостью, но и коэффициенты  $\chi^2$  большие (13 для 25,0 нФ и 11 для 47,5 нФ). Параметрами также были только  $R_S$  и  $Q$ , значение добротности для 25,0 нФ:

$$Q = 26,1 \pm 0,2, \quad (55)$$

что хорошо совпадает с предыдущими данными. Добротность для 47,5 нФ:

$$Q = 20,1 \pm 0,1, \quad (56)$$

что также хорошо согласуется с ранее полученными данными.

## 4. Векторная диаграмма

Построим векторную диаграмму напряжений и токов в резонансном состоянии при минимальной добротности (т.е. при  $C = 99,6$  нФ). Сдвиг фаз между напряжениями на источнике и конденсаторе равен  $-\frac{\pi}{2}$ , между напряжением на источнике и на катушке  $\frac{\pi}{2}$ . Соответствующие действующие значения

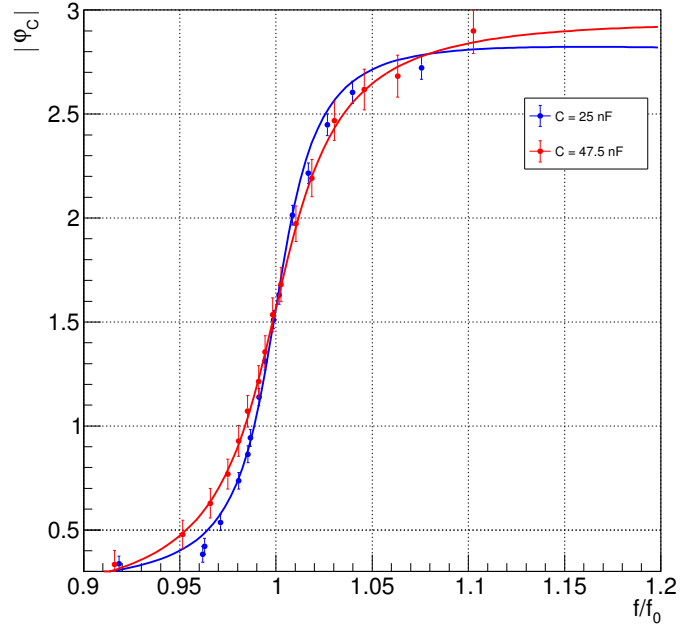


Рис. 6: График зависимости  $|\varphi| \left( \frac{f}{f_0} \right)$

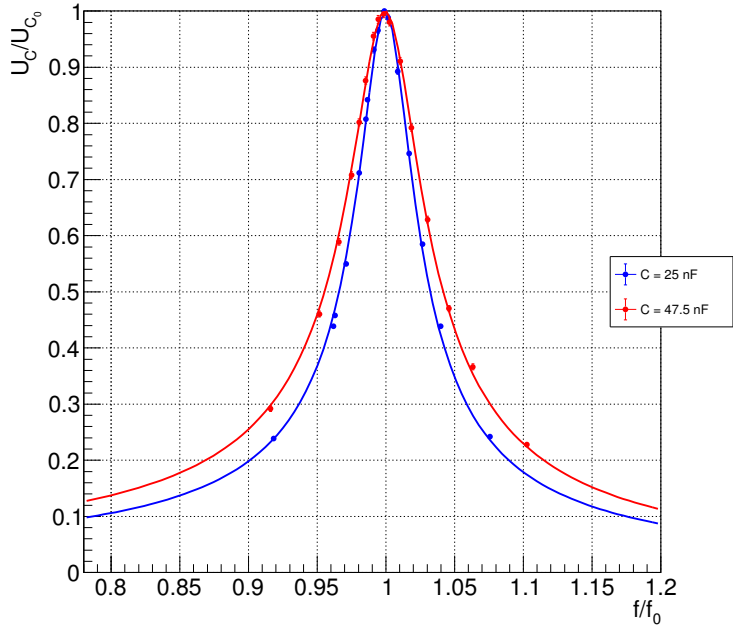


Рис. 7: График зависимости  $\frac{U_C}{U_{C0}} \left( \frac{f}{f_0} \right)$



напряжений (в резонансе амплитуда напряжения на катушке равна амплитуде напряжения на конденсаторе) и тока можно найти в таблице 1. С учетом того, что амплитуды в  $\sqrt{2}$  больше действующих значений, на рис. 8 была построена соответствующая векторная диаграмма. Подписи осей указаны в вольтах, т.к. вектор тока только один, то нет смысла вводить масштаб для силы тока.

## 5. Заключение

Цели работы были достигнуты, определена индуктивность контура и получена зависимость его сопротивления от частоты, хотя и в узком диапазоне. Кроме этого, значение добротность для двух емкостей получено несколькими разными способами, а именно по формуле и через графики АЧХ и ФЧХ, и получившиеся значения совпали. Также была построена векторная диаграмма для контура с самой низкой добротностью в резонансном состоянии.

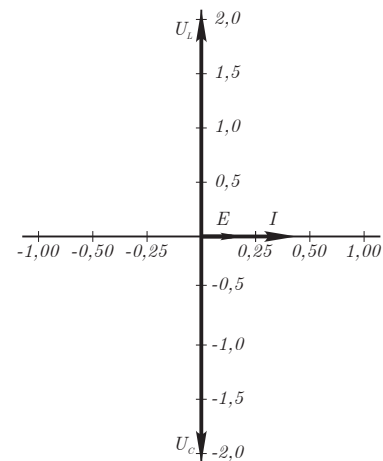


Рис. 8: Векторная диаграмма для  $C = 99,6$  нФ