

### 3.2.2. Резонанс напряжений.

Гусаров Н.

гр. Б02-005

13 октября 2021 г.

**Цель работы:** исследование резонанса напряжений в последовательном колебательном контуре с изменяемой ёмкостью, включающее получение амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик, а также определение основных параметров контура.

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

## Описание работы

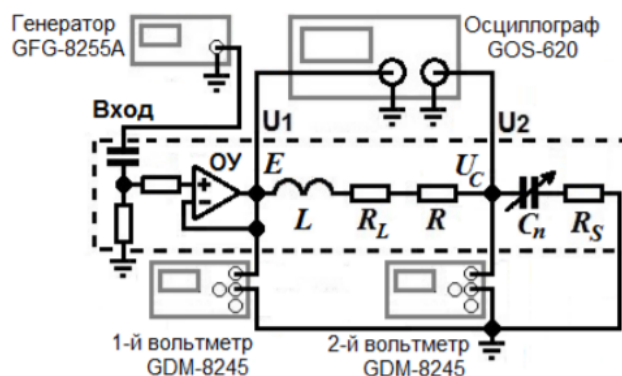


Схема экспериментального стенда для изучения резонанса напряжений в последовательном колебательном контуре показана на рисунке. Синусоидальный сигнал от генератора GFG8255A поступает через согласующую RC-цепочку на вход источника напряжения, собранного на операционном усилителе ОУ. Питание операционного усилителя осуществляется встроенным блоком-выпрямителем от сети переменного тока 220 Вольт (цепь питания на схеме не показана). Источник напряжения, обладающий по определению нулевым внутренним сопротивлением, фактически обеспечивает с высокой точностью постоянство амплитуды сигнала  $E = E_0 \cos \omega t + \phi_0$  на меняющейся по величине нагрузке – последовательном колебательном контуре, изображенном на рисунке в виде эквивалентной схемы.

На корпусе имеются коаксиальные разъёмы «Вход», «U1» и «U2», а также переключатель магазина ёмкостей  $C_n$  с указателем номера  $n = 1, 2, \dots, 7$ . Величины ёмкостей указаны в табличке на крышке корпуса. Напряжение на контуре через разъём «U1» попадает одновременно на канал 1 осциллографа GOS-620 и вход 1-го цифрового вольтметра GDM-8245. Напряжение на конденсаторе  $U_C$  подаётся через разъём «U2» одновременно на канал 2 осциллографа и вход 2-го цифрового вольтметра GDM-8245.

Колебательный контур нашей установки собран из стандартных элементов, используемых в современных радиоэлектронных цепях. Известно, что в реальных конденсаторах и, особенно, в катушках индуктивности происходят необратимые потери энергии, обусловленные различными причинами. К ним относятся: утечки и диэлектрические потери в конденсаторах, вихревые токи и потери на перемагничивание в сердечниках катушек индуктивности, омические потери в проводниках, растущие с частотой за счёт скин-эффекта, и некоторые другие. Рост потерь приводит к увеличению действительных частей комплексных сопротивлений элементов контура, и, значит, к изменению его резонансных свойств, в частности, к уменьшению добротности.

В нашем контуре катушка индуктивности  $L$  на ферритовом каркасе обладает малым сопротивлением по постоянному току и высокой собственной резонансной частотой  $f_r \geq 1,3$  МГц. В общем случае каждая катушка, помимо индуктивности  $L$ , характеризуется

также собственной (межвитковой) ёмкостью  $C_L$  и активным сопротивлением потерь  $R_L$ , распределёнными по её длине. Принимается, что эти величины сосредоточены в отдельных элементах схемы, образующих с индуктивностью  $L$  замкнутую колебательную цепь с собственной резонансной частотой  $f_r = 1/2\pi\sqrt{LC_L}$ . Вследствие влияния ёмкости  $C_L$  при измерении на частоте  $f$  определяется не истинная индуктивность  $L$ , а эффективное значение индуктивности  $L_{eff} = L/(1 - f^2/f_r^2)$ , которое может заметно отличаться от истинной величины  $L$ . В рабочем диапазоне частот нашего контура выполняется неравенство  $f \ll f_r$ , так что в эквивалентной схеме контура на рисунке индуктивность представлена своим истинным значением  $L$  и активным сопротивлением  $R_L$ .

Полипропиленовые конденсаторы, входящие в комплект магазина ёмкостей ( $n = 1, 2, \dots, 7$ ), в рабочем диапазоне частот имеют пренебрежимо малые собственные индуктивности (менее  $10^{-5}$  мГн на 1 см общей длины обкладок и выводов) и относительно малые активные потери. Для оценки возможного вклада активных потерь в конденсаторах в общий импеданс контура воспользуемся представлением конденсатора с ёмкостью последовательной эквивалентной схемой, где  $R_S$  – так называемое эквивалентное последовательное сопротивление (ЭПС), обусловленное, главным образом, электрическим сопротивлением материала обкладок и выводов конденсатора и контактов между ними, а также потерями в диэлектрике. Из эквивалентной схемы и векторной диаграммы к ней видно, что активные потери в конденсаторе, пропорциональные, как известно, косинусу угла  $\phi$  сдвига фаз между током и напряжением на ёмкости, убывают с ростом  $\phi$  и, соответственно, с уменьшением угла  $\delta = 90^\circ - \phi$ . Потери в конденсаторе принято характеризовать величиной  $tg\delta$ , обычно приводимой в документации к изделию. Из схемы и закона Ома при этом получаем выражение для ЭПС на циклической частоте  $\omega = 2\pi f$  в виде

$$R_S = \frac{U_{RS}}{I} = \frac{U_{RS}}{\omega C U_{CS}} = \frac{1}{\omega C} tg\delta \quad (1)$$

Конденсаторы магазина ёмкостей в интересующем нас диапазоне частот имеют  $tg\delta \approx 10^{-3}$ , что является очень хорошим (низким!) показателем для конденсаторов с твёрдым диэлектриком.

Суммарное активное сопротивление

$$R_\Sigma = R + R_L + R_S \quad (2)$$

Введем  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  – резонансная частота,  $\rho = \sqrt{L/C}$ .  $Q = \rho/R_\Sigma = U_C/E$ .

Пренебрегая потерями в конденсаторах, представленными  $tg\delta$ . Вклад конденсаторов в суммарное  $R_\Sigma$  вблизи резонанса  $tg\delta$  оценим по результатам эксперимента.

Далее рассматриваем  $\delta\omega = \omega - \omega_0 \ll \omega_0$ . Тогда

$$I = \frac{E}{R_\Sigma} \frac{e^{i\phi_I}}{\sqrt{1 + (\tau\Delta\omega)^2}}, \phi_I = -arctg(\tau\Delta\omega) \quad (3)$$

$$U_L = EQ \frac{\omega}{\omega_0} \frac{e^{i\phi_L}}{\sqrt{1 + (\tau\Delta\omega)^2}}, \phi_L = \pi/2 - R_L/\rho - arctg(\tau\Delta\omega) \quad (4)$$

$$U_C = EQ \frac{\omega_0}{\omega} \frac{e^{i\phi_C}}{\sqrt{1 + (\tau\Delta\omega)^2}}, \phi_C = -\pi/2 + \delta - arctg(\tau\Delta\omega) \quad (5)$$

$\tau = 2L/R_\Sigma = 2Q/\omega_0$  – время релаксации.

При резонансе  $\omega = \omega_0$ :

$$I = \frac{E}{R_{\Sigma}}, \phi_I = 0 \quad (6)$$

$$U_L = EQ, \phi_L = \pi/2 - R_L/\rho \quad (7)$$

$$U_C = EQ, \phi_C = -\pi/2 + \delta \quad (8)$$

$I = I_{max} = E/R_{\Sigma}$ . Отметим, однако, что максимальные (резонансные) значения напряжений на индуктивности и ёмкости не строго равны  $EQ$  и достигаются не строго на частоте  $\omega_0$ .

При отклонении  $\Delta\omega$ :

$$\tau\Delta\omega = \pm 1 \quad (9)$$

амплитуда тока уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз, а фаза изменяется на  $\phi/4$ . Аналогично с напряжениями. Введем  $\delta\omega = 2|\Delta\omega| = 2/\tau$  – ширина рез. кривой на уровне 0,707 от резонансного напряжения.  $Q = \omega_0/\delta\omega$ .

## Ход работы

- 1) Включаем генератор. Учитываем, что в нашем режиме  $\Delta f = 10$  Гц.
- 2) Включаем вольтметры.  $\sigma_U = 3\%$
- 3) Выставляем на входе контура напряжение  $E$ , в течении всей работы с одним напряжением  $E$  поддерживаем его постоянным.
- 4) Добиваемся получения двух отцентрированных синусоид на осциллографе. Убеждаемся, что одна из синусоид при изменении частоты  $f$  генератора меняет амплитуду относительно начала координат, в то время как амплитуда другой не меняется с погрешностью не более 1%.
- 5) Для контуров с семью различными ёмкостями, меняя их с помощью переключателя на блоке, измеряем резонансные частоты  $f_{0n}$  и напряжения  $U_C(f_{0n})$ . Регистрируем также напряжения  $E(f_{0n})$ , игнорируя отклонения в пределах относительной погрешности 1%.

- 6) Для контуров ёмкостями  $C_2 = 33,2$  нФ и  $C_5 = 68,0$  нФ снимаем амплитудно-частотные характеристики  $U_C(f)$  (>16-17 точек в сумме по обе стороны от резонанса) при напряжении  $E = 150,6$  мВ.

n	$C_2 = 33,2$ , нФ				$C_5 = 68,0$ , нФ			
	f, кГц	$\Delta f$ , кГц	$U_C$ , В	$\Delta U_C$ , В	f, кГц	$\Delta f$ , кГц	$U_C$ , В	$\Delta U_C$ , В
1	27,89	0,01	3,39	0,10	19,47	0,01	2,49	0,07
2	27,23	0,01	2,25	0,07	17,60	0,01	0,74	0,02
3	27,27	0,01	2,32	0,07	18,08	0,01	0,94	0,03
4	27,51	0,01	2,87	0,09	18,26	0,01	1,05	0,03
5	26,15	0,01	1,09	0,03	18,45	0,01	1,19	0,04
6	26,42	0,01	1,25	0,04	18,62	0,01	1,32	0,04
7	26,55	0,01	1,35	0,04	18,72	0,01	1,47	0,04
8	26,92	0,01	1,73	0,05	18,94	0,01	1,79	0,05
9	27,39	0,01	2,59	0,08	19,04	0,01	1,97	0,06
10	27,64	0,01	3,15	0,09	19,14	0,01	2,14	0,06
11	27,80	0,01	3,36	0,10	19,26	0,01	2,33	0,07
12	29,79	0,01	1,09	0,03	19,35	0,01	2,43	0,07
13	29,48	0,01	1,28	0,04	21,37	0,01	0,75	0,02
14	29,37	0,01	1,37	0,04	21,04	0,01	0,90	0,03
15	29,18	0,01	1,54	0,05	20,74	0,01	1,09	0,03
16	28,99	0,01	1,74	0,05	20,59	0,01	1,20	0,04
17	28,70	0,01	2,14	0,06	20,46	0,01	1,32	0,04
18	28,56	0,01	2,36	0,07	20,28	0,01	1,51	0,05
19	28,44	0,01	2,58	0,08	20,07	0,01	1,79	0,05
20	28,24	0,01	2,94	0,09	19,93	0,01	2,00	0,06
21	28,16	0,01	3,09	0,09	19,85	0,01	2,12	0,06
22	28,10	0,01	3,18	0,10	19,72	0,01	2,31	0,07
23	27,98	0,01	3,33	0,10	19,59	0,01	2,44	0,07

- 7) Для тех же двух контуров снимем фазово-частотные характеристики  $\varphi_C(f)$  (16-17 точек в сумме по обе стороны от резонанса) при том же напряжении  $E = 150,6$  мВ.

$$\phi/\pi = \frac{x}{x_0} \quad \sigma_{\phi/\pi} = \frac{0,1 \text{ см}}{x} + \frac{0,1 \text{ см}}{x_0}$$

n	$C_2 = 33,2, \text{ нФ}$						$C_5 = 68,0, \text{ нФ}$					
	f, кГц	$\Delta f$ , кГц	$x_0$ , см	x, см	$-\phi/\pi$	$\Delta\phi/\pi$	f, кГц	$\Delta f$ , кГц	$x_0$ , см	x, см	$-\phi/\pi$	$\Delta\phi/\pi$
1	19,48	0,01	5,2	2,5	0,48	0,03	27,89	0,01	3,6	1,8	0,50	0,04
2	17,55	0,01	5,7	0,4	0,07	0,02	26,14	0,01	3,8	0,4	0,11	0,03
3	18,08	0,01	5,6	0,6	0,11	0,02	26,57	0,01	3,8	0,5	0,13	0,03
4	18,46	0,01	5,5	0,7	0,13	0,02	26,89	0,01	3,8	0,6	0,16	0,03
5	18,71	0,01	5,4	1,0	0,19	0,02	27,09	0,01	3,8	0,7	0,19	0,03
6	18,96	0,01	5,3	1,3	0,25	0,02	27,31	0,01	3,7	0,9	0,23	0,03
7	19,25	0,01	5,2	1,9	0,37	0,03	27,40	0,01	3,7	1,0	0,27	0,03
8	19,32	0,01	5,2	2,1	0,40	0,03	27,70	0,01	3,7	1,5	0,40	0,04
9	19,42	0,01	5,2	2,1	0,40	0,03	27,80	0,01	3,7	1,6	0,44	0,04
10	21,37	0,01	4,7	4,1	0,87	0,04	29,55	0,01	3,5	2,9	0,84	0,05
11	20,92	0,01	4,8	4,1	0,85	0,04	29,03	0,01	3,5	2,8	0,80	0,05
12	20,52	0,01	4,9	4,0	0,82	0,04	28,57	0,01	3,6	2,6	0,73	0,05
13	20,19	0,01	5,0	3,7	0,74	0,03	28,33	0,01	3,6	2,4	0,68	0,05
14	20,00	0,01	5,0	3,6	0,71	0,03	28,17	0,01	3,6	2,2	0,61	0,04
15	19,80	0,01	5,1	3,2	0,63	0,03	28,07	0,01	3,6	2,1	0,57	0,04
16	19,66	0,01	5,1	3,0	0,59	0,03	27,94	0,01	3,6	1,9	0,53	0,04
17	19,57	0,01	5,2	2,8	0,53	0,03						

## Обработка данных

- 1) Прямыми измерениями получим:  $f_{0n}$  ( $\Delta f_{0n} = 10$  Гц),  $U_C$  ( $\sigma_{U_C} = 0,03$ ),  $E$  ( $\sigma_E = 0,03$ ).  
Также запишем данные  $C_n$  (примем  $\sigma_{C_n} = 0,01$ ) и  $R = 3,5$  (примем  $\sigma_R = 0,01$ )
- 2) Будем вести расчеты по формулам:

$$L = \frac{1}{(2\pi f_{0n})^2 C}, \quad \sigma_L = \sqrt{\left(2 \frac{\Delta f_{0n}}{f_{0n}}\right)^2 + (\sigma_{C_n})^2} \quad (10)$$

$$Q = \frac{U_C}{E}, \quad \sigma_Q = \sqrt{(\sigma_{U_C})^2 + (\sigma_E)^2} \quad (11)$$

$$\rho = \sqrt{L/C_n}, \quad \sigma_\rho = \sqrt{(1/2\sigma_L)^2 + (1/2\sigma_{C_n})^2} \quad (12)$$

$$R_\Sigma = \frac{\rho}{Q}, \quad \sigma_{R_\Sigma} = \sqrt{(\sigma_\rho)^2 + (\sigma_Q)^2} \quad (13)$$

$$R_{Smax} = (tg\delta)_{max} \rho = 10^{-3} \rho, \quad \sigma_{R_{Smax}} = \sigma_\rho \quad (14)$$

$$R_L = R_\Sigma - R_{Smax} - R, \quad \Delta R_L = \Delta R_\Sigma + \Delta R_{Smax} + \Delta R \quad (15)$$

$$I = \frac{E}{R_\Sigma}, \quad \sigma_I = \sqrt{(\sigma_E)^2 + (\sigma_{R_\Sigma})^2} \quad (16)$$

Результаты измерений представим в таблицах.

- 3)  $E = 50,0 \pm 1,5$  мВ,  $R = 3,50 \pm 0,03$  Ом.

n	$C_n$ , нФ	$f_{0n}$ , кГц	$U_C$ , В	E, В	L, мкГн	Q	$\rho$ , Ом	$R_\Sigma$ , Ом	$R_{Smax}$ , Ом	$R_L$ , Ом	I, мА
1	24,8	32,46	1,26	0,050	970,4	25,2	197,8	7,8	0,198	4,15	6,4
2	33,2	28,07	1,11	0,050	969,3	22,2	170,9	7,7	0,171	4,03	6,5
3	47,6	23,43	0,96	0,049	970,4	19,6	142,8	7,3	0,143	3,64	6,7
4	57,5	21,32	0,88	0,049	970,1	18,0	129,9	7,2	0,130	3,60	6,8
5	68,0	19,62	0,82	0,049	968,7	16,7	119,4	7,1	0,119	3,51	6,9
6 (выб.)	81,6	19,80	0,83	0,049	792,6	16,9	98,6	5,8	0,099	2,22	8,4
7	102,8	15,95	0,69	0,049	969,5	14,1	97,1	6,9	0,097	3,30	7,1
Среднее:					969,7					3,71	
Ср.кв. погр. ср.					0,2					0,11	
$t_{n,\alpha}$ , n = 6, $\alpha = 0,95$					2,6					2,60	
Случайная погр.					0,6					0,29	

Таблица 1:

$C_6$  явно выпадает из общих расчетов. Исключим данные для этой ёмкости из расчетов средних. Из вычислений становится ясно, что чтобы получить схожее с остальными конденсаторами значение  $L$ , нужно заменить ёмкость  $C_6$  ёмкостью близкой к

$C_5$ . Таким образом, можно выдвинуть гипотезу, что при включении  $C_6$  в действительности в схеме участвует  $C_5$ .

$$\sigma_Q = 0,06, \Delta Q = 0,8...1,5$$

$$\sigma_\rho = 0.01, \Delta\rho = 1,0...1,9 \text{ Ом}$$

$$\sigma_{R_\Sigma} = 0.07, \Delta R_\Sigma = 0,5 \text{ Ом}$$

$$\sigma_{R_{Smax}} = 0.01, \Delta R_\Sigma = 0,002 \text{ Ом}$$

$$\sigma_I = 0.1, \Delta I = 0,6 \text{ Ом}$$



4)  $E = 150,6 \pm 4,5$  мВ,  $R = 3,50 \pm 0,03$  Ом.

n	$C_n$ , нФ	$f_{0n}$ , кГц	$U_C$ , В	E, В	$L$ , мкГн	Q	$\rho$ , Ом	$R_{\Sigma}$ , Ом	$R_{Smax}$ , Ом	$R_L$ , Ом	I, мА
1	24,8	32,28	3,82	0,151	981,2	25,3	198,9	7,9	0,199	4,16	19,2
2	33,2	27,89	3,39	0,151	981,9	22,5	172,0	7,7	0,172	3,99	19,7
3	47,6	23,29	2,93	0,151	982,1	19,4	143,6	7,4	0,144	3,76	20,4
4	57,5	21,21	2,70	0,151	980,2	17,9	130,6	7,3	0,131	3,67	20,7
5	68,0	19,50	2,50	0,151	980,6	16,6	120,1	7,3	0,120	3,63	20,8
6 (выб.)	81,6	19,65	2,52	0,151	804,8	16,7	99,3	6,0	0,099	2,35	25,4
7	102,8	15,87	2,10	0,151	979,3	13,9	97,6	7,0	0,098	3,42	21,5
Среднее:					980,9					3,77	
Ср.кв. погр. ср.					0,4					0,09	
$t_{n,\alpha}$ , n = 6, $\alpha = 0,95$					2,6					2,60	
Случайная погр.					0,9					0,24	

Таблица 2:

Гипотеза, что при включении  $C_6$  в действительности в схеме участвует похожая на  $C_5$  ёмкость, подтверждается.

Видно расхождение с предыдущим пунктом в 1 % для значения  $L$  (остальные данные, кроме  $I$ , практически совпадают). Это можно связать с тем, что при увеличении напряжения  $E$ , в контуре растёт ток. Потому за счёт скин-эффекта (вытеснением тока из сечения на поверхность круглого проводника) одновременно увеличивается резонансная частота контура  $f_{0n}$  и индуктивность катушки  $L$  (последнее – за счет роста напряжения на элементе). С другой стороны рост  $L$  с напряжением можно объяснить увеличением магнитного поля в сердечнике из-за увеличения напряжения – предполагается, что как результат растёт внутренняя энергия катушки.

Относительные погр-ти сохраняются:

$$\sigma_Q = 0,06, \Delta Q = 0,8...1,5$$

$$\sigma_\rho = 0.01, \Delta\rho = 1,0...1,9 \text{ Ом}$$

$$\sigma_{R_\Sigma} = 0.07, \Delta R_\Sigma = 0,5 \text{ Ом}$$

$$\sigma_{R_{Smax}} = 0.01, \Delta R_\Sigma = 0,002 \text{ Ом}$$

$$\sigma_I = 0.1, \Delta I = 2,2 \text{ Ом}$$

5)  $E = 300,2 \pm 9,0$  мВ,  $R = 3,50 \pm 0,03$  Ом.

n	$C_n$ , нФ	$f_{0n}$ , кГц	$U_C$ , В	E, В	$L$ , мкГн	Q	$\rho$ , Ом	$R_{\Sigma}$ , Ом	$R_{Smax}$ , Ом	$R_L$ , Ом	I, мА
1	24,8	32,11	7,43	0,300	991,6	24,8	200,0	8,1	0,200	4,37	37,2
2	33,2	27,76	6,62	0,300	991,1	22,1	172,8	7,8	0,173	4,16	38,3
3	47,6	23,17	5,73	0,300	992,3	19,1	144,4	7,6	0,144	3,91	39,7
4	57,5	21,06	5,30	0,300	994,3	17,7	131,5	7,4	0,131	3,81	40,3
5	68,0	19,40	4,86	0,300	990,8	16,2	120,7	7,5	0,121	3,83	40,3
6 (выб.)	81,6	19,55	4,91	0,300	813,0	16,4	99,8	6,1	0,100	2,50	49,2
7	102,8	15,76	4,09	0,300	993,1	13,6	98,3	7,2	0,098	3,61	41,6
Среднее:					992,2					3,95	
Ср.кв. погр. ср.					0,5					0,09	
$t_{n,\alpha}$ , n = 6, $\alpha = 0,95$					2,6					2,60	
Случайная погр.					1,2					0,24	

Таблица 3:

Гипотеза, что при включении  $C_6$  в действительности в схеме участвует похожая на  $C_5$  ёмкость, подтверждается.

Видно расхождение с предыдущим пунктом в еще 1 % для значения  $L$  (остальные данные, кроме  $I$ , практически совпадают). Опять одновременно увеличивается резонансная частота контура  $f_{0n}$  и индуктивность катушки  $L$ . Как и в предыдущем пункте, мы связываем это со скин-эффектом (вытеснением тока из сечения на поверхность круглого проводника) и с ростом магнитного поля в сердечнике.

Относительные погр-ти сохраняются:

$$\sigma_Q = 0,06, \Delta Q = 0,8...1,5$$

$$\sigma_\rho = 0.01, \Delta\rho = 1,0...1,9 \text{ Ом}$$

$$\sigma_{R_\Sigma} = 0.07, \Delta R_\Sigma = 0,5 \text{ Ом}$$

$$\sigma_{R_{Smax}} = 0.01, \Delta R_\Sigma = 0,002 \text{ Ом}$$

$$\sigma_I = 0.1, \Delta I = 4,2 \text{ Ом}$$

- 6) Построим на одном графике амплитудно-частотные характеристики в координатах  $f, U_C(f)$ .

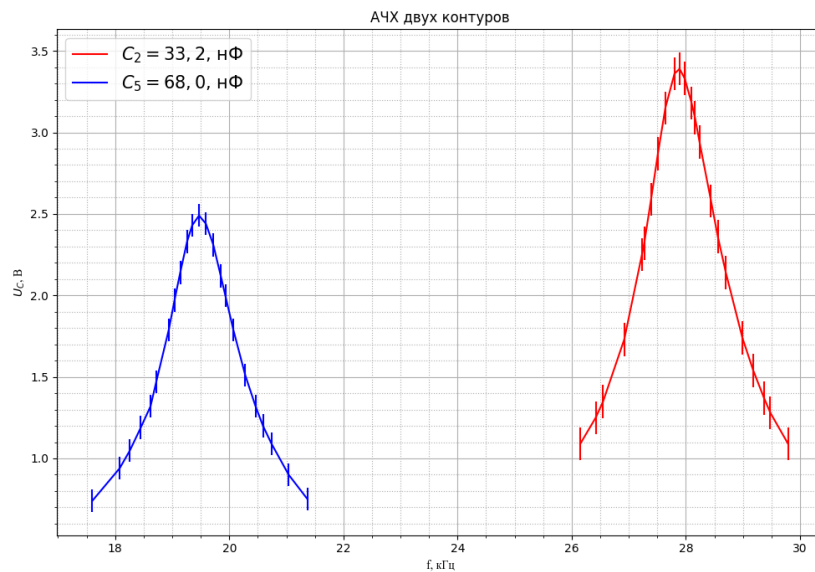


Рис. 1: АЧХ двух, отличающихся  $\sim$  в 2 раза ёмкостей.

Резонансные частоты отстоят друг от друга в соответствии с формулой периода колебаний в LC-контуре. Резонансное  $U_C$  выше у меньшей ёмкости. Добротность ожидается также выше у  $C_2$ .

- 7) По тем же данным построим на одном графике амплитудно-частотные характеристики в безразмерных координатах  $x = f/f_{0n}, y = U_C(x)/U_C(1)$ . Погрешность  $f/f_{0n}$  не видна в масштабах графика. Погрешность  $\sigma_{U_C(x)/U_C(1)} = 0,06$ .

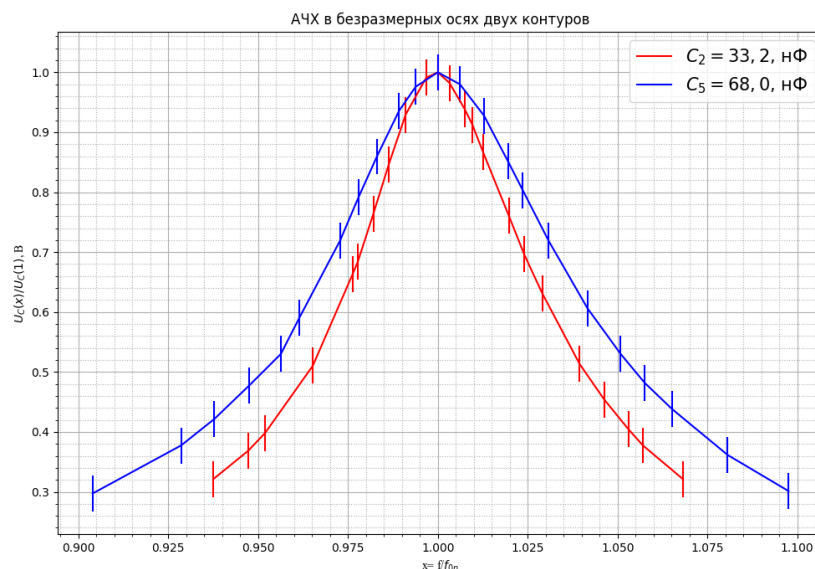


Рис. 2: По АЧХ в безразмерных осях определим добротности двух контуров.

По ширине резонансных кривых на уровне 0.707 определим добротности. Погреш-

ность  $Q$  определяем из крестов погрешностей (здесь значения только по о.у.):

$$Q_n = \frac{f_{0n}}{2 \cdot \delta f}, \Delta_{Q_n}$$

соответствующих контуров:  $Q_2 = 22,7 \pm 2,3$  и  $Q_5 = 16,8 \pm 1,7$ . Данные добротности совпадают с расчетными.

- 8) По данным пункта 6 построим на одном графике фазово-частотные характеристики в координатах  $x = f/f_{0n}$ ,  $y = \varphi/\pi$  для выбранных контуров.

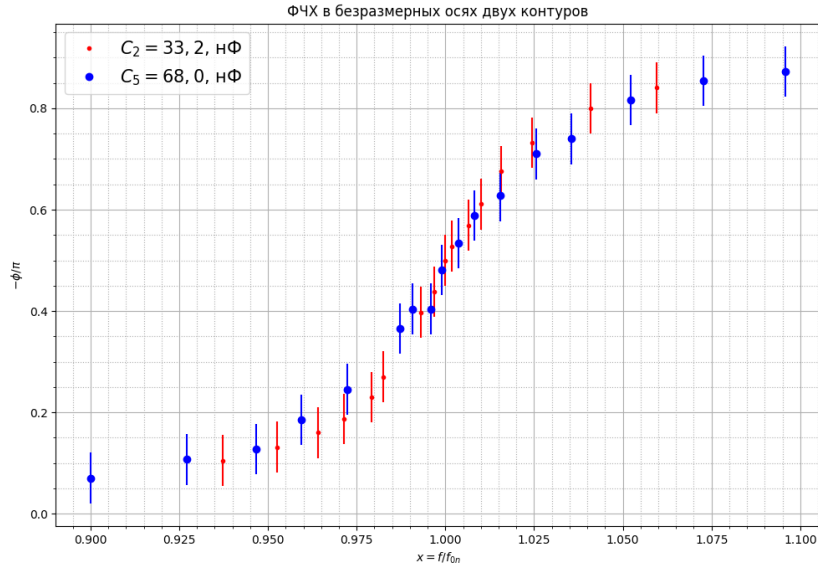


Рис. 3: По ФЧХ произведём расчет добротностей двумя способами.

Определим добротности по расстоянию между точками по оси  $x$ , в которых  $y$  меняется от  $-0.25$  до  $-0.75$ , равному  $1/Q$ . Погрешность  $Q$  определим из крестов погрешностей.  $Q_2 = 23,6 \pm 2,3$  и  $Q_5 = 17,8 \pm 1,8$ , что опять таки совпадает с расчетными, но с меньшей точностью.

- 9) По данным таблицы построим зависимость  $R_L(f_{0n})$ , на график нанесём прямую  $\langle R_L \rangle$ .  $\Delta R_L$  – из таблицы.  $\Delta f_{0n}$  на графике не видна. Рост  $R_L$  с частотой  $f_{0n}$  связан со скин-эффектом (вытеснением тока из сечения на поверхность круглого проводника).

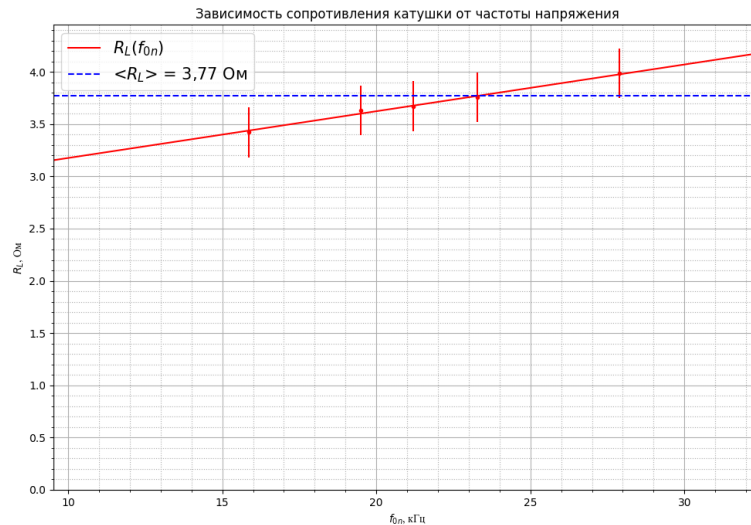


Рис. 4: Сопротивление катушки изменяется в зависимости от частоты напряжения в контуре. Однако оно не отходит дальше, чем на 10 %, от истинного значения.

- 10) По данным построим векторную диаграмму тока и напряжений для контура с наименьшей добротностью в резонансном состоянии. Ось абсцисс направим по вектору  $\vec{E}$ .

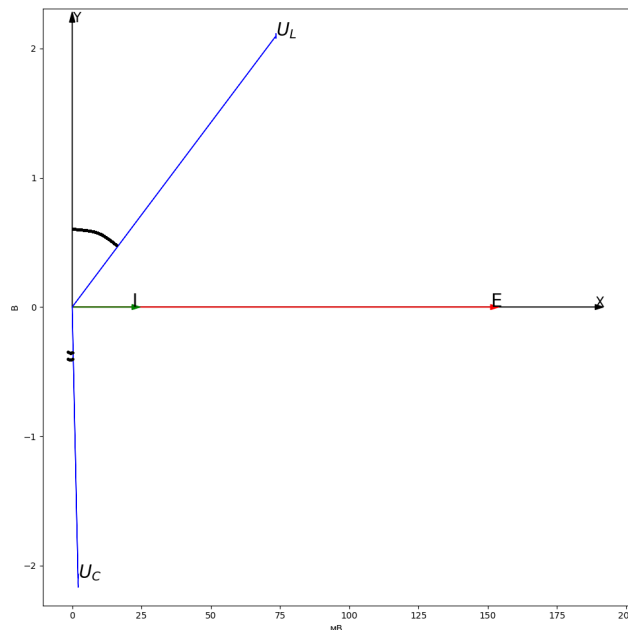


Рис. 5: В соответствии с формулами тока и напряжений для резонанса из Описания работы составим векторную диаграмму для контура с  $C_7 = 102,8$  нФ при  $E = 151$  мВ (см табл. 2).

Из диаграммы видно, что в нашем резонансе  $U_L$  "обгоняет"  $E$  на угол сильно отличающийся от  $\frac{\pi}{2}$ . А  $U$  отстаёт на близкий к  $\frac{\pi}{2}$  угол, что и подтвердилось ФЧХ.

## Вывод

В ходе работы было изученно 7 контуров с различными предложенными ёмкостями и с единой индуктивностью  $L \approx 0,98 \pm 0,01$  мГн для наших значений  $E = 50..300$  мВ. При изменении  $E$  в наших пределах  $L$  изменялась в пределах 2%. Это было связано со скин-эффектом и с изменением энергии магнитного поля катушки.

Стоит также отметить, что нами была обнаружена "выпадающая" из общих данных индуктивность  $C_6$ , при включении которой в действительности в цепи участвует  $C_5$ .

Для двух выбранных  $C_2$  и  $C_5$  с помощью АЧХ и ФЧХ были дополнительно изучены добротности контуров с ними. Метод с АЧХ дал более приближенную к формульному расчету величину:  $Q_2 = 22,7 \pm 2,3$  и  $Q_5 = 16,8 \pm 1,7$ .

Также была изучена  $R_L \approx 3,8 \pm 0,2$  Ом (опять таки при разных напряжениях), меньше зависящая от  $E$ , но имеющая явную линейную з-ть от частоты напряжения  $f$  (в частности  $f_{0n}$ ). Это было связано со скин-эффектом.

Была получена векторная диаграмма тока и напряжений, позволяющая судить о фазах соответствующих величин в резонансе.