

Резонанс токов в параллельном контуре

_____, ____ группа

"__" _____ 20__ г.

1 Аннотация

В работе проводится исследование несколько параллельных колебательных контуров с различными ёмкостями конденсаторов при питании от источника переменного тока. Для каждого из них определяются резонансные частота и напряжение, из них рассчитываются основные характеристики контура. Для двух конденсаторов снимаются амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики, из которых рассчитываются добротности контуров. В качестве дополнительного задания установка используется для изучения спектров треугольного и прямоугольного сигналов.

2 Теоретические сведения

2.1 Параллельный колебательный контур

В работе исследуется колебательный контур, изображенный на рис. 1. Контур состоит из параллельно соединенных катушки индуктивности L и магазина ёмкостей C_n . Последовательно с катушкой соединен резистор R . R_L - активное сопротивление катушки, R_S - эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора.

Обозначим полный ток в цепочке за \vec{I} , напряжение на цепочке за \vec{U} . В используемой установке в качестве источника используется генератор тока. Поэтому будем считать фазу \vec{I} равной 0.

Найдем импеданс цепи. Импеданс последовательно соединенных катушки L и резистора R равен

$$Z_L = i\omega L + R_L + R \quad (1)$$

Импеданс конденсатора равен

$$Z_C = -\frac{i}{\omega C} + R_S = \frac{1}{\omega C}(-i + \tan \delta) \quad (2)$$

Здесь используется обозначение $\tan \delta = \omega C R_S$. В проводимых экспериментах $\tan \delta < 10^{-3}$.

Обозначим суммарное активное сопротивление за $R_\Sigma = R_L + R_S + R$.

Импеданс цепи равен

$$Z = \frac{Z_L Z_C}{Z_L + Z_C} = Q\rho \frac{\left(1 - i\frac{\omega_0}{\omega} \frac{R+R_L}{\rho}\right) (1 + i \tan \delta)}{1 + iQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} \quad (3)$$

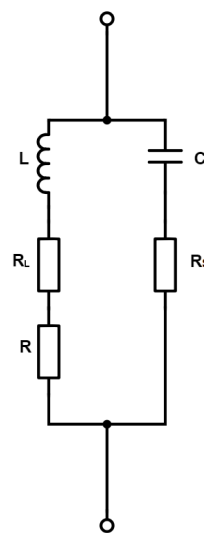


Рис. 1: Параллельный колебательный контур

Здесь были использованы обозначения: $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ - собственная частота, при котором импеданс контура чисто действителен при его последовательном обходе, $\rho = \sqrt{L/C}$ - реактивное сопротивление, Q - добротность контура, равная

$$Q = \frac{1}{R_\Sigma} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\rho}{R_\Sigma} \quad (4)$$

В используемой установке $Q \gg 1$, из чего следует, что импеданс по модулю минимален на собственной частоте контура ω_0 . Поэтому собственную частоту для цепей с высокой добротностью также называют резонансной частотой.

Рассчитаем векторы тока в катушке и конденсаторе, а также вектор напряжения на контуре.

$$\vec{I}_C = iQI_0 \frac{\omega}{\omega_0} \frac{1 - i\frac{\omega_0}{\omega} \frac{R+R_L}{\rho}}{1 + iQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \quad (5)$$

$$\vec{I}_L = -iQI_0 \frac{\omega_0}{\omega} \frac{1 + i \tan \delta}{1 + iQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \quad (6)$$

$$\vec{U} = I_0 Z = Q\rho I_0 \frac{\left(1 - i\frac{\omega_0}{\omega} \frac{R+R_L}{\rho}\right) (1 + i \tan \delta)}{1 + iQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \quad (7)$$

Для исследуемых контуров и исследуемый диапазонов частот верны неравенства

$$|\omega - \omega_0| = |\Delta\omega| \ll \omega_0 \quad (8)$$

$$R_L + R \ll \rho \quad (9)$$

$$\tan \delta \ll 1 \quad (10)$$

Используя малость этих параметров, можно выражения 5-7 упростить до следующего вида:

$$\vec{I}_C = QI_0 \frac{\omega}{\omega_0} \frac{e^{i\varphi_C}}{\sqrt{1 + (\tau\Delta\omega)^2}} \quad (11)$$

$$\varphi_C = \frac{\pi}{2} - \frac{R + R_L}{\rho} - \arctan(\tau\Delta\omega) \quad (12)$$

$$\vec{I}_L = QI_0 \frac{\omega_0}{\omega} \frac{e^{i\varphi_L}}{\sqrt{1 + (\tau\Delta\omega)^2}} \quad (13)$$

$$\varphi_L = -\frac{\pi}{2} + \delta - \arctan(\tau\Delta\omega) \quad (14)$$

$$\vec{U} = Q\rho I_0 \frac{e^{i\varphi_U}}{\sqrt{1 + (\tau\Delta\omega)^2}} \quad (15)$$

$$\varphi_U = -\frac{\omega_0}{\omega} \frac{R + R_L}{\rho} + \delta - \arctan(\tau\Delta\omega) \quad (16)$$

Здесь $\tau = 2L/R_\Sigma = 2Q/\omega_0$ - время затухания контура.

Из этой формулы видно, что при постоянном токе модуль напряжения обратно пропорционален $\sqrt{1 + (\tau\Delta\omega)^2}$. Поэтому ширина АЧХ на высоте $U_{max}/\sqrt{2}$ равна

$$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q}$$

Этой же формулой задается расстояние по оси частот между точками пересечения ФЧХ $\varphi_U(\omega)$ с прямыми $\omega = \pm\pi/4$.

Найдем вектора токов на катушке и конденсаторе и напряжения на всей исследуемой цепочке при резонансе.

$$\vec{I}_{C0} = QI_0 e^{i\varphi_{C0}} \quad (17)$$

$$\varphi_{C0} = \frac{\pi}{2} - \frac{R + R_L}{\rho} \quad (18)$$

$$\vec{I}_{L0} = QI_0 e^{i\varphi_{L0}} \quad (19)$$

$$\varphi_{L0} = -\frac{\pi}{2} + \delta \quad (20)$$

$$\vec{U}_0 = Q\rho I_0 e^{i\varphi_{U0}} \quad (21)$$

$$\varphi_{U0} = -\frac{R + R_L}{\rho} + \delta \quad (22)$$

2.2

3 Экспериментальная установка

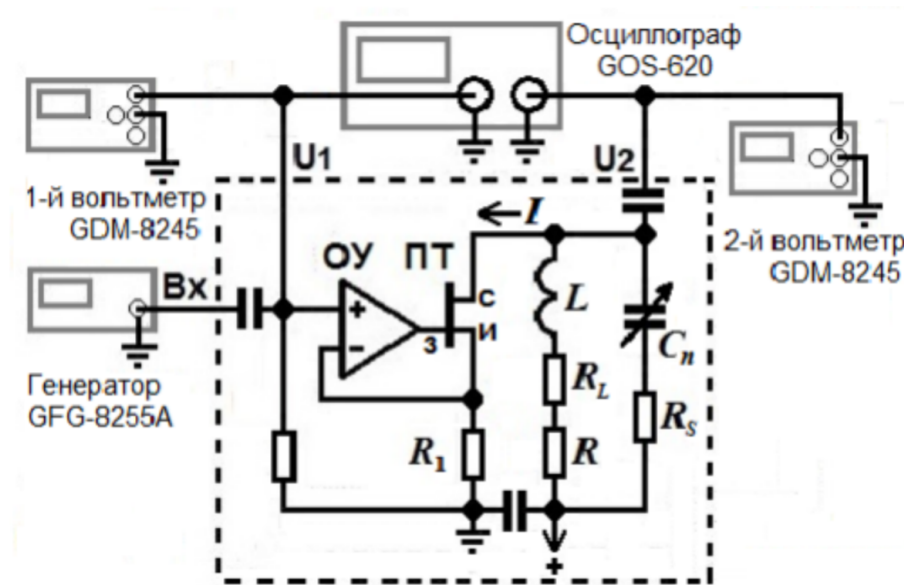


Рис. 2: Схема установки

В работе используется экспериментальная установка, схематически изображенная на рисунке 2. В установке используется источник тока, состоящий из операционного усилителя, полупроводникового транзистора и RC-цепочки. Напряжение U_1 равно напряжению на резисторе R_1 и служит для измерения амплитуды тока. Напряжение U_2 является напряжением на колебательном контуре. Оба выхода подсоединены к осциллографу для измерения сдвига фаз между напряжением и током в колебательном контуре.

Параметры установки:

$$R_1 = 1008 \text{ Ом}$$

$$R = 3,5 \text{ Ом}$$

4 Методика и результаты измерений

1. Измерим для семи различных емкостей C_n резонансные частоты f_{0n} и напряжения в резонансе $U(f_{0n})$ при двух значениях напряжения E : $E = 150$ мВ и $E = 300$ мВ. Результаты соответствующих измерений приведены в таблицах 1 и 2.

n	C_n , нФ	f_{0n} , кГц	U , В	E , В
1	25.1	32.13	0.898	0.15
2	33.2	27.80	0.699	0.15
3	47.3	23.21	0.506	0.15
4	57.4	21.24	0.431	0.15
5	67.5	19.48	0.358	0.15
6	82.7	17.70	0.305	0.15
7	101.6	16.08	0.255	0.15

Таблица 1: Резонансные частоты и напряжения для $E = 150$ мВ

n	C_n , нФ	f_{0n} , кГц	U , В	E , В
1	25.1	32.1	1.798	0.30
2	33.2	27.81	1.397	0.30
3	47.3	23.2	1.007	0.30
4	57.4	21.26	0.860	0.30
5	67.5	19.48	0.728	0.30
6	82.7	17.68	0.611	0.30
7	101.6	16.05	0.510	0.30

Таблица 2: Резонансные частоты и напряжения для $E = 300$ мВ

2. Снимем АЧХ для двух контуров с ёмкостями конденсатора, равными $C_3 = 47.3$ нФ и $C_6 = 82.7$ нФ. Напряжение E будем поддерживать равным 150 мВ. Результаты измерений приведены в таблицах 3 и 4.

3. Для тех же цепей с ёмкостями конденсатора, равными $C_3 = 47.3$ нФ и $C_6 = 82.7$ нФ, снимем фазово-частотную характеристику $\varphi(f)$, где φ - разность фаз между током и напряжением в цепи. Для этого на осциллограмме будем измерять период колебаний $2x_0$ в условных единицах и расстояние от обращения в ноль сигнала U_1 на участке спада до обращения в ноль сигнала U_2 на участке спада. Результаты измерений приведены в таблицах 5 и 6.

f , кГц	U_0 , В	f/f_0	$U/U(f_0)$
22.54	0.295	0.9711	0.583
22.65	0.328	0.9759	0.648
22.72	0.356	0.9789	0.704
22.85	0.408	0.9845	0.806
22.95	0.449	0.9888	0.887
23.00	0.466	0.9910	0.921
23.05	0.484	0.9931	0.957
23.10	0.494	0.9953	0.976
23.16	0.504	0.9978	0.996
23.20	0.506	0.9996	1.000
23.25	0.504	1.0017	0.996
23.30	0.496	1.0039	0.980
23.35	0.485	1.0060	0.958
23.45	0.453	1.0103	0.895
23.55	0.416	1.0146	0.822
23.67	0.370	1.0198	0.731
23.74	0.344	1.0228	0.680

Таблица 3: АЧХ для цепи с $C_3 = 47.3$ нФ

f , кГц	U_0 , В	f/f_0	$U/U(f_0)$
17.07	0.176	0.7355	0.577
17.14	0.190	0.7385	0.623
17.24	0.212	0.7428	0.695
17.35	0.238	0.7475	0.780
17.45	0.265	0.7518	0.869
17.55	0.288	0.7561	0.944
17.60	0.297	0.7583	0.974
17.65	0.303	0.7604	0.993
17.70	0.305	0.7626	1.000
17.76	0.304	0.7652	0.997
17.80	0.301	0.7669	0.987
17.85	0.294	0.7691	0.964
17.95	0.275	0.7734	0.902
18.08	0.244	0.7790	0.800
18.17	0.221	0.7829	0.725
18.25	0.203	0.7863	0.666

Таблица 4: АЧХ для цепи с $C_6 = 82.7$ нФ

5 Обработка результатов

1. Для каждой ёмкости конденсатора C_n последовательно рассчитаем следующие величины: L , ρ_n , $Z_{резn}$, Q_n , R_Σ , $R_{S,max,n}$, R_L . Для этого будем использовать следующие формулы:

$$L = \frac{1}{C_n(2\pi f_{0n})^2}$$

f , кГц	f/f_0	x , дел	$2x_0$, дел	φ/π
21.65	0.9328	-2.0	9.2	-0.435
21.80	0.9393	-1.9	9.2	-0.413
22.05	0.9500	-1.8	9.1	-0.385
22.23	0.9578	-1.6	9.1	-0.352
22.41	0.9655	-1.5	9.0	-0.333
22.60	0.9737	-1.4	8.8	-0.307
22.80	0.9823	-1.1	8.8	-0.250
23.00	0.9910	-0.6	8.7	-0.138
23.10	0.9953	-0.4	8.6	-0.093
23.16	0.9978	-0.2	8.6	-0.047
23.22	1.0004	0.0	8.6	0.000
23.27	1.0026	0.2	8.6	0.047
23.36	1.0065	0.4	8.6	0.093
23.43	1.0095	0.6	8.6	0.140
23.65	1.0190	1.0	8.5	0.235
23.81	1.0259	1.2	8.4	0.286
24.01	1.0345	1.3	8.4	0.310
24.21	1.0431	1.4	8.3	0.337
24.50	1.0556	1.6	8.2	0.390
24.82	1.0694	1.6	8.1	0.395

Таблица 5: ФЧХ для цепи с $C_3 = 47.3$ нФ

f , кГц	f/f_0	x , дел	x_0 , дел	φ/π
16.27	0.9192	-2.5	6.2	-0.403
16.57	0.9362	-2.3	6.1	-0.377
16.80	0.9492	-2.1	6.1	-0.344
17.03	0.9621	-1.8	6.0	-0.300
17.19	0.9712	-1.6	5.9	-0.271
17.40	0.9831	-1.1	5.9	-0.186
17.56	0.9921	-0.6	5.8	-0.103
17.68	0.9989	-0.2	5.8	-0.034
17.71	1.0006	0.0	5.7	0.000
17.85	1.0085	0.5	5.6	0.089
18.11	1.0232	1.2	5.6	0.214
18.26	1.0316	1.5	5.6	0.268
18.53	1.0469	1.8	5.5	0.327
18.74	1.0588	1.9	5.4	0.352
18.94	1.0701	2.0	5.3	0.377
19.13	1.0808	2.2	5.3	0.415

Таблица 6: ФЧХ для цепи с $C_6 = 82.7$ нФ

$$\rho_n = \sqrt{\frac{L}{C_n}}$$

$$Z_{резn} = \frac{UR_1}{E}$$

$$Q_n = \frac{Z_{резn}}{\rho_n}$$

$$R_{\Sigma} = \frac{\rho_n}{Q_n}$$

$$R_{Smax} = 10^{-3} \cdot \frac{1}{2\pi f_{0n}C}$$

$$R_L = R_{\Sigma} - R$$

Рассчитаем среднее значение L и R_L вместе с их случайными погрешностями. Результаты всех расчетов для напряжений $E = 150$ мВ и $E = 300$ мВ приведены в таблицах 7 и 8.

n	C_n , нФ	f_{0n} , кГц	U , В	E , В	L , мкГн	ρ , Ом	$Z_{рез}$, кОм	Q	R_{Σ} , Ом	R_{smax} , Ом	R_L , Ом
1	25.1	32.13	0.898	0.150	978	197	6.03	30.6	6.45	0.20	3.0
2	33.2	27.80	0.699	0.150	987	172	4.70	27.2	6.33	0.17	2.8
3	47.3	23.21	0.506	0.150	994	145	3.40	23.5	6.18	0.14	2.7
4	57.4	21.24	0.431	0.150	978	131	2.90	22.2	5.88	0.13	2.4
5	67.5	19.48	0.358	0.150	989	121	2.41	19.9	6.09	0.12	2.6
6	82.7	17.70	0.305	0.150	978	109	2.05	18.9	5.77	0.11	2.3
7	101.6	16.08	0.255	0.150	964	97	1.71	17.6	5.54	0.10	2.0
Среднее					981						2.54
Среднеквадратичная погр.					3.7						0.12
Коэфф. Стьюдента для $n = 7$, $\alpha = 0.95$					2.45						2.45
Случайная погр.					9.1						0.3

Таблица 7: Расчеты параметров цепи для $E = 150$ мВ

n	C_n , нФ	f_{0n} , кГц	U , В	E , В	L , мкГн	ρ , Ом	$Z_{рез}$, кОм	Q	R_{Σ} , Ом	R_{smax} , Ом	R_L , Ом
1	25.1	32.10	1.798	0.300	979	198	6.04	30.6	6.46	0.20	3.0
2	33.2	27.81	1.397	0.300	987	172	4.69	27.2	6.33	0.17	2.8
3	47.3	23.20	1.007	0.300	995	145	3.38	23.3	6.22	0.15	2.7
4	57.4	21.26	0.860	0.300	976	130	2.89	22.2	5.89	0.13	2.4
5	67.5	19.48	0.728	0.300	989	121	2.45	20.2	5.99	0.12	2.5
6	82.7	17.68	0.611	0.300	980	109	2.05	18.9	5.77	0.11	2.3
7	101.6	16.05	0.510	0.300	968	98	1.71	17.6	5.56	0.10	2.1
Среднее					982						2.53
Среднеквадратичная погр.					3.4						0.12
Коэфф. Стьюдента для $n = 7$, $\alpha = 0.95$					2.45						2.45
Случайная погр.					8.3						0.3

Таблица 8: Расчеты параметров цепи для $E = 300$ мВ

Результаты расчета L и R_L для двух серий измерений совпадают.

$$L = 981 \text{ мкГн}$$

$$R_L = 2.53 \text{ Ом}$$

$$\varepsilon_{L,случ.} = 0.009$$

$$\varepsilon_{R_L,случ.} = 0.12$$

Погрешность измерения частоты резонанса приблизительно равна 0.03 кГц(0.1%). Погрешность измерения напряжения равна 1%. Погрешность известных C_n оценим в 0.3%. Отсюда получаем следующие погрешности рассчитанных величин:

$$\varepsilon_{L, \text{приб.}} = 0.005$$

$$\varepsilon_{\rho, \text{приб.}} = 0.008$$

$$\varepsilon_{Z_{\text{рез,приб.}}} = 0.02$$

$$\varepsilon_{Q, \text{приб.}} = 0.03$$

$$\varepsilon_{R_{\Sigma}, \text{приб.}} = 0.04$$

$$\Delta_{R_L, \text{приб.}} = 0.04 \cdot 6 = 0.24 \text{ Ом}$$

Окончательно получим:

$$L = (981 \pm 11) \text{ мкГн}$$

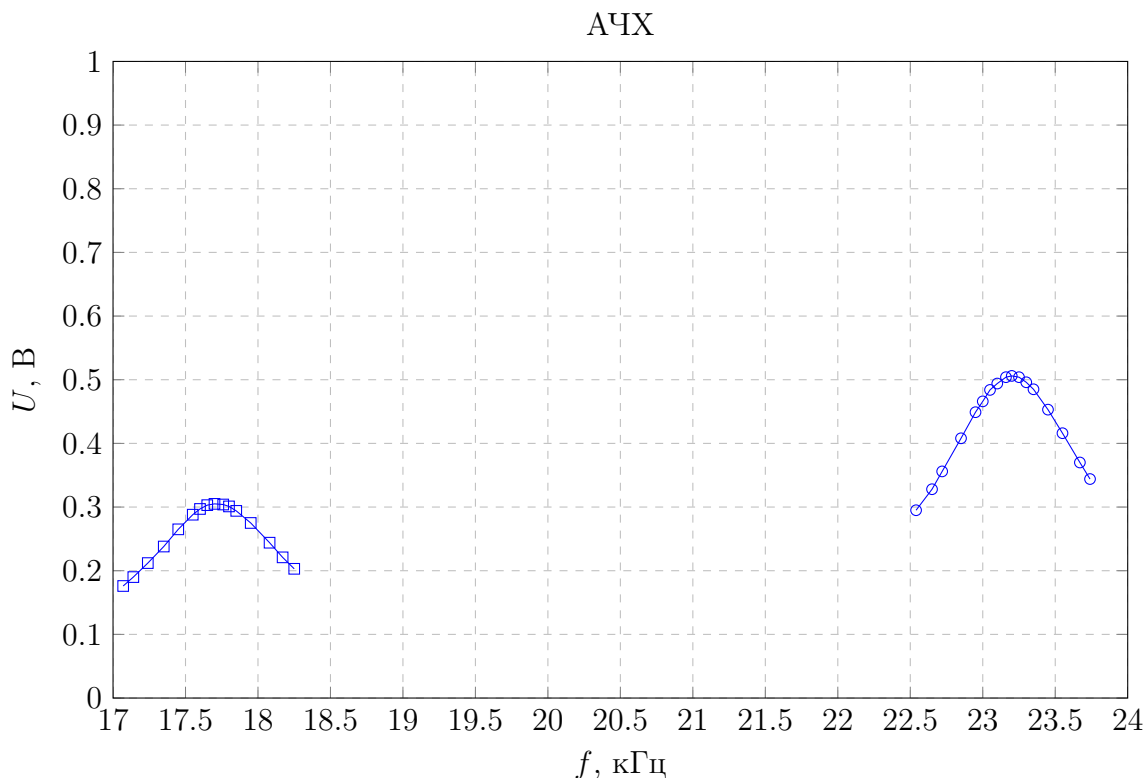
$$R_L = (2.5 \pm 0.4) \text{ Ом}$$

Видно, что

$$R_{Smax}/R_{\Sigma} \leq 0.03$$

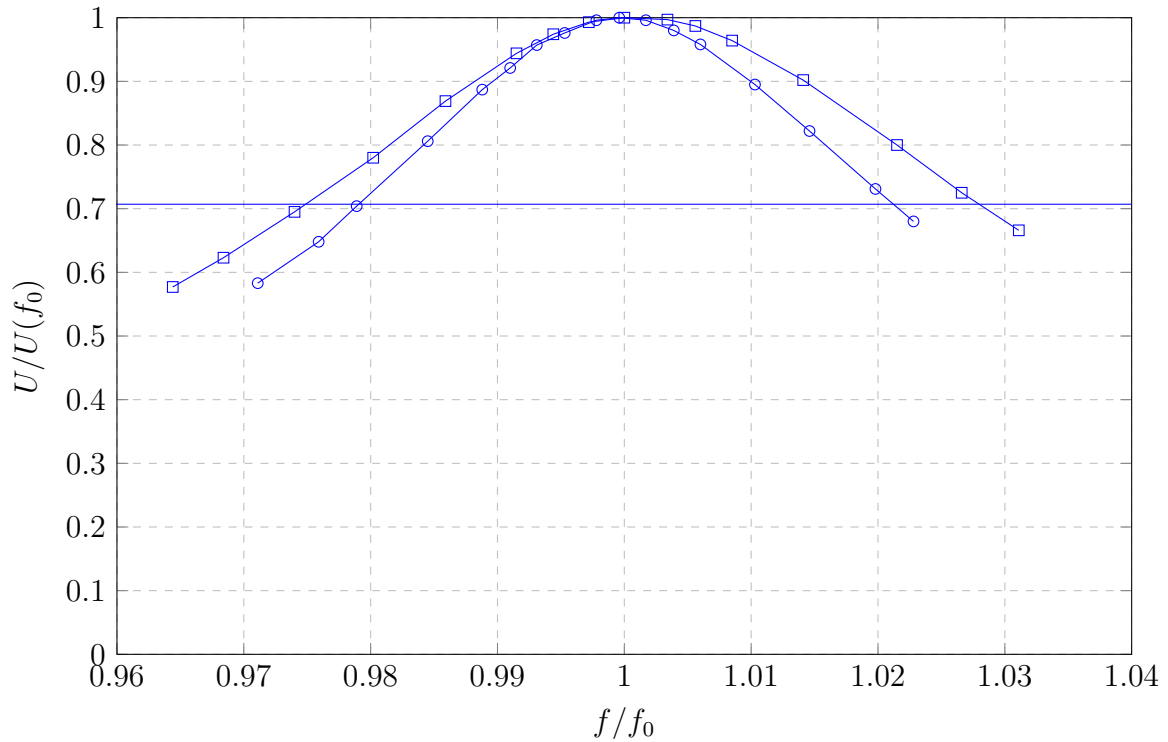
Погрешность, вносимая потерями в конденсаторе, меньше погрешности измерения R_L , следовательно, потерями в конденсаторе можно пренебречь.

2. Построим на одном графике АЧХ для двух цепей с $C_3 = 47.3 \text{ нФ}$ и $C_6 = 82.7 \text{ нФ}$.



3. Построим на одном графике АЧХ для двух цепей в безразмерных координатах $(f/f_0, U/U(f_0))$.

АЧХ в безразмерных координатах



Из графика найдем добротности для двух цепей и сравним их с рассчитанными в предыдущем пункте значениями.

Для $C = 47.3$ нФ:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = 1.022 - 0.979 = 0.043 \pm 0.002$$

$$Q_{3, \text{АЧХ}} = 23.2 \pm 1.1$$

$$Q_{3, \text{расч.}} = 23.3 \pm 0.7$$

Для $C = 82.7$ нФ:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = 1.027 - 0.975 = 0.052 \pm 0.002$$

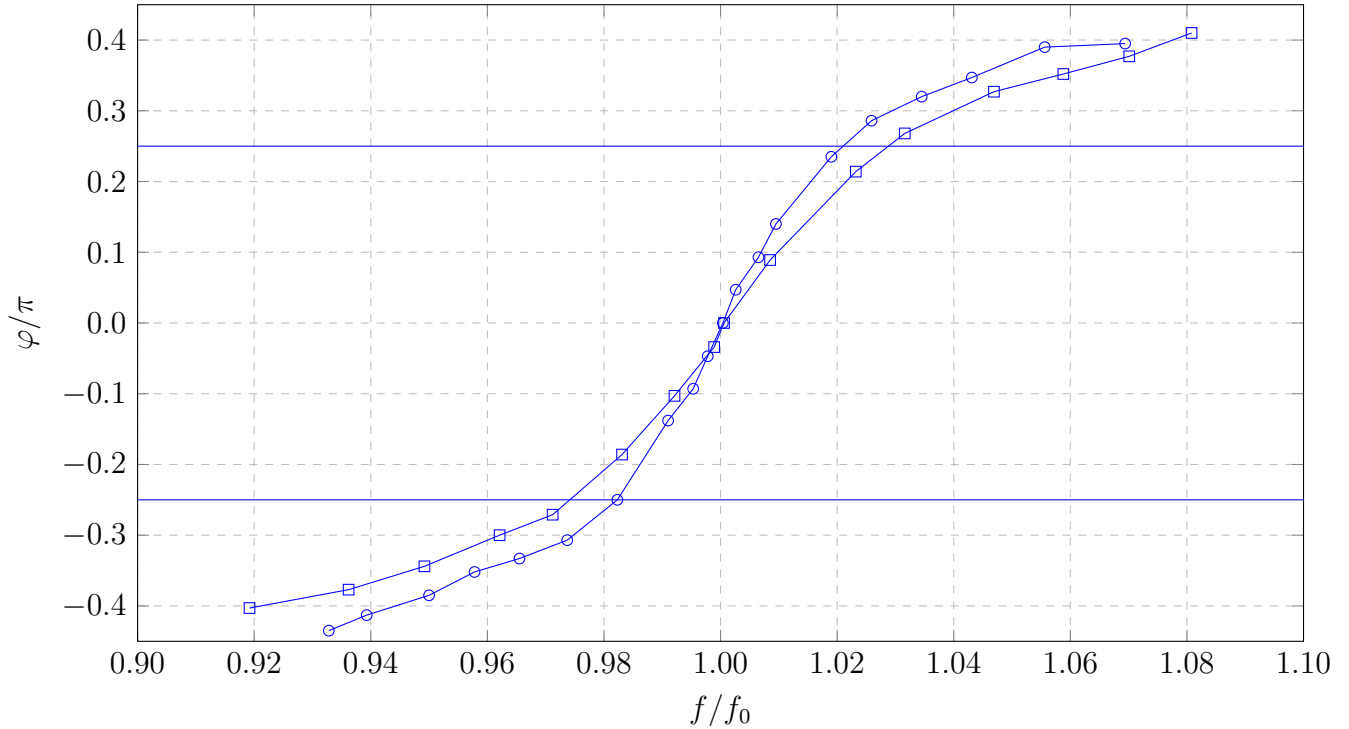
$$Q_{6, \text{АЧХ}} = 19.2 \pm 0.7$$

$$Q_{6, \text{расч.}} = 18.9 \pm 0.6$$

Видно, что измеренные по форме кривой АЧХ добротности совпадают в пределах погрешностей.

4. Построим на одном графике ФЧХ для двух цепей с ёмкостями $C_3 = 47.3$ нФ и $C_6 = 82.7$ нФ в безразмерных координатах $(f/f_0, \varphi/\pi)$.

ФЧХ в безразмерных координатах



Найдем расстояние $\Delta f/f_0$ между точками пересечения графика с прямыми $\varphi = -0.25\pi$ и $\varphi = 0.25\pi$. Оно равно $1/Q$.

Для цепи с $C = 47.3$ нФ:

$$\Delta f/f_0 = 1.021 - 0.980 = 0.041 \pm 0.003$$

$$Q_{3,\text{ФЧХ}} = 24.4 \pm 1.7$$

$$Q_{3,\text{расч.}} = 23.3 \pm 0.7$$

Для цепи с $C = 82.7$ нФ:

$$\Delta f/f_0 = 1.029 - 0.973 = 0.056 \pm 0.03$$

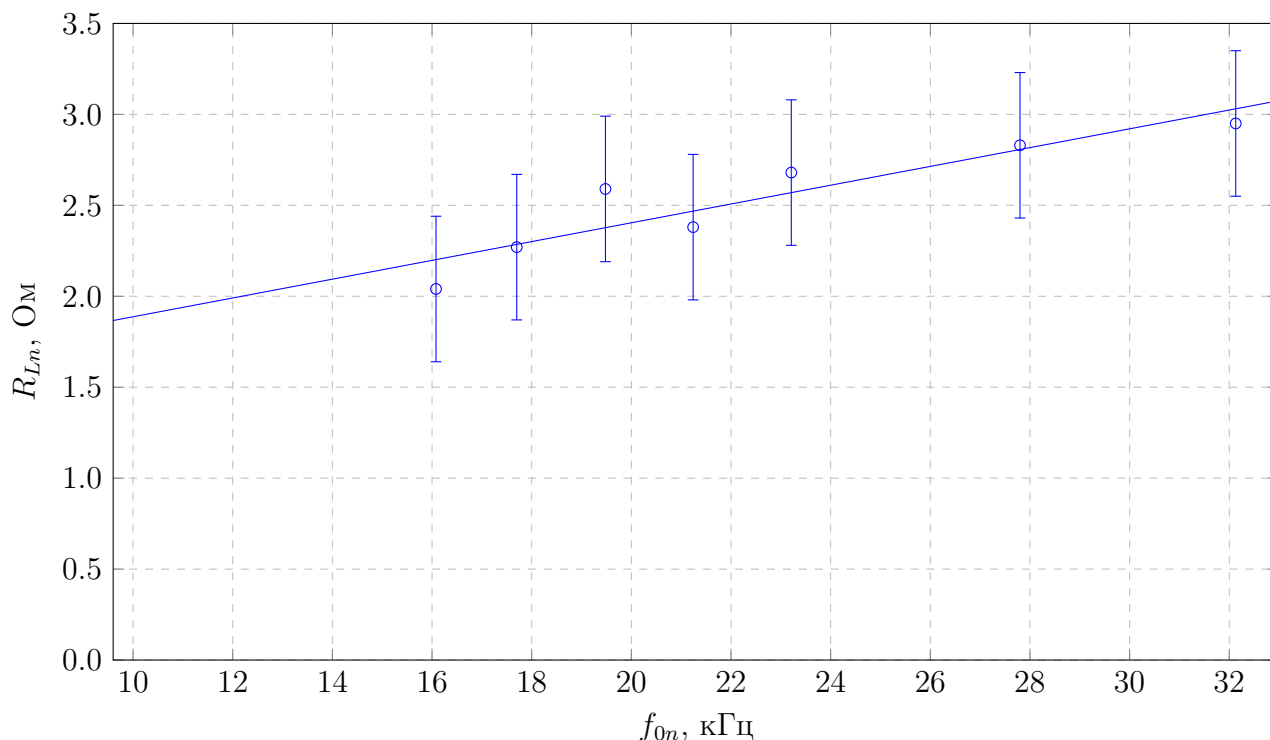
$$Q_{3,\text{ФЧХ}} = 17.8 \pm 1.0$$

$$Q_{3,\text{расч.}} = 18.9 \pm 0.6$$

Найденные из ФЧХ добротности тоже в пределах погрешности совпадают с рассчитанными из параметров схемы значениями. Тем не менее, метод нахождения добротности по ширине АЧХ дает большую точность.

5. Построим зависимость $R_{Ln}(f_{0n})$ найденного сопротивления катушки индуктивности от частоты.

Зависимость $R_{Ln}(f_{0n})$



Видно, что активное сопротивление катушки возрастает с частотой. Можно предложить несколько объяснений этому явлению.

Во-первых, за цикл колебаний поля B и H в ферромагнитном сердечнике проходят полную петлю гистерезиса. При этом выделяется теплота, пропорциональная площади этой петли. С повышением частоты выделяемая в единицу времени теплота повышается пропорционально. Из-за этого повышается эквивалентное активное сопротивление катушки, так как только на нем может выделяться тепло.

Во-вторых, это можно объяснить скин-эффектом. Толщина скин-слоя Δ пропорциональна $f_{0n}^{-0.5}$. Если на рабочих частотах скин-слой тоньше радиуса проводника, то с возрастанием частоты сопротивление увеличивается из-за уменьшения толщины скин-слоя.

6. Построим векторную диаграмму напряжений и токов при резонансе для контура с $C_7 = 101.6$ нФ при $E = 150$ мВ. Будем считать $\delta = 0$. Вектор тока будем считать направленным по оси абсцисс. Масштаб по оси абсцисс в два раза больше масштаба по оси ординат.

$$I = \frac{E}{R_1} = 0.149 \text{ мА}$$

$$\varphi_I = 0$$

$$I_{C0} = QI_0 = Q \frac{E}{R_1} = 2.6 \text{ мА}$$

$$\varphi_{I_{C0}} = \frac{\pi}{2} - \frac{R_{\Sigma}}{\rho} = \frac{\pi}{2} - 0.057$$

$$U_0 = \frac{I_{C0}}{\omega C} = 0.255 \text{ В}$$

$$\varphi_{U_0} = -0.057$$

$$I_{L0} = QI_0 = Q \frac{E}{R_1} = 2.6 \text{ мА}$$

$$\varphi_{I_{L0}} = -\frac{\pi}{2}$$

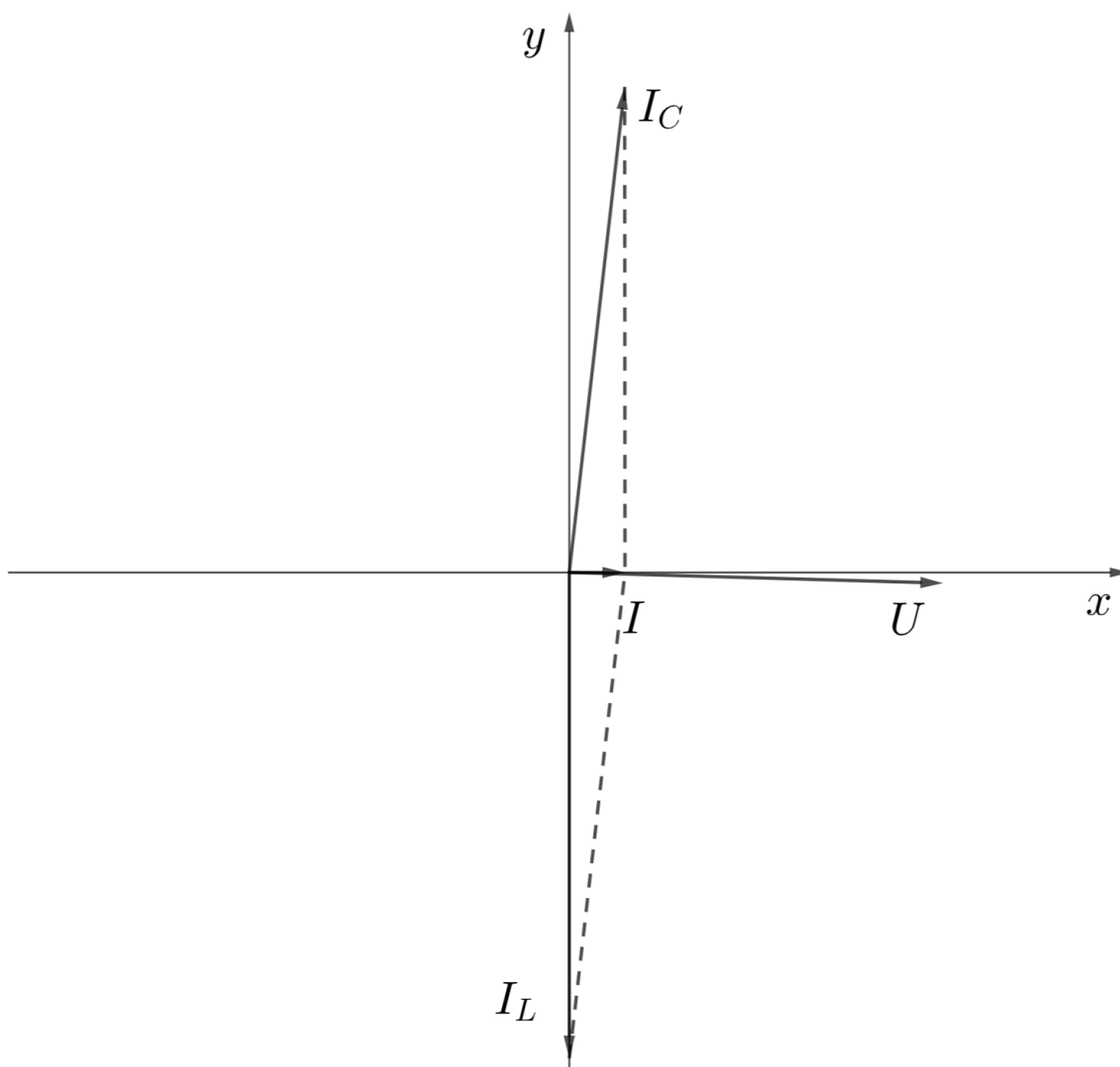


Рис. 3: Фазовая диаграмма цепи

6 Исследование спектра последовательностей треугольных и прямоугольных импульсов

Резонансный контур можно использовать для изучения спектров различных периодических сигналов. Для этого подадим в качестве входного сигнала исследуемый сигнал и будем менять его частоту. Максимумы U будут в те моменты, когда резонансная частота контура совпадает с одной из гармоник входного сигнала. Для повышения точности будем использовать цепь с максимальной добротностью. Собственная частота цепи $f_0 = 32.10$ кГц.

Для треугольного и прямоугольного сигналов измерим частоты f , при которых U максимально. Измерим также максимальное значение U . Номер гармоники k тогда можно будет вычислить по формуле

$$k = \frac{f_0}{f}$$

Значение напряжения U будет пропорционально амплитуде этой гармоники, так как при высокой добротности контура можно пренебречь вкладами остальных гармоник. Измеренные частоты и амплитуды гармоник приведены в таблицах 9 и 10.

Для обоих сигналов видно, что последовательность номеров гармоник является последовательностью нечетных чисел. Это так из-за того, что оба сигнала - четные функции.

f , кГц	f_0/f	U , В	U/U_{max} , В
32.15	1.00	0.760	1.000
10.70	3.00	0.081	0.107
6.45	4.98	0.031	0.041
4.55	7.05	0.012	0.016
3.54	9.07	0.007	0.009
2.88	11.15	0.003	0.004

Таблица 9: Частоты, номера и амплитуды гармоник для треугольного сигнала

f , кГц	$n = f_0/f$	U , В	U/U_{max} , В
32.07	1.00	1.270	1.000
10.69	3.00	0.433	0.341
6.40	5.02	0.263	0.207
4.57	7.02	0.189	0.149
3.55	9.04	0.138	0.109
2.91	11.03	0.118	0.093
2.47	13.00	0.103	0.081
2.15	14.93	0.075	0.059

Таблица 10: Частоты, номера и амплитуды гармоник для прямоугольного сигнала

Можно показать, что амплитуда n -й гармоники треугольного сигнала обратно пропорциональна квадрату n :

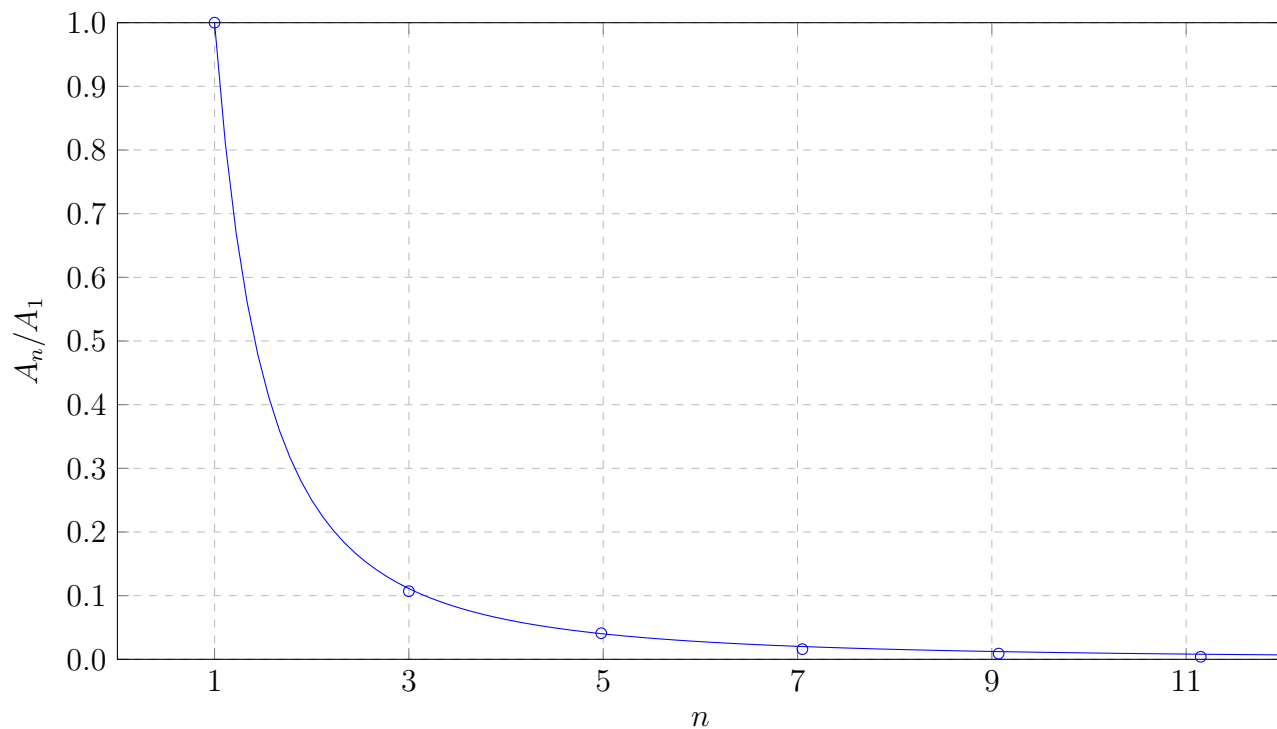
$$A_{n,\text{треуг.}} \propto \frac{1}{n^2}$$

Для прямоугольного сигнала амплитуда n -й гармоники обратно пропорциональна n :

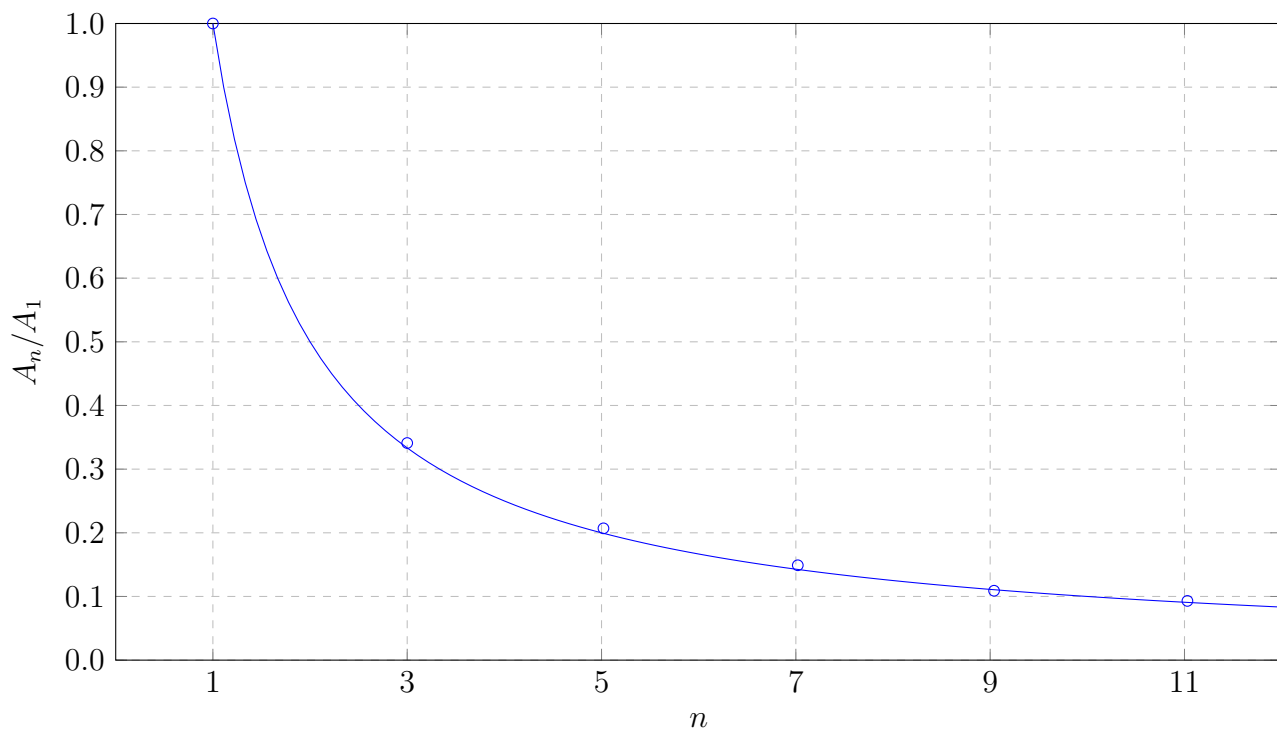
$$A_{n,\text{прямоуг.}} \propto \frac{1}{n}$$

Для проверки этих зависимостей построим на одном экспериментально измеренные A_n/A_1 в зависимости от n и теоретическую линию для треугольного и прямоугольного сигналов.

Амплитуды гармоник и их теоретическая огибающая для треугольного сигнала



Амплитуды гармоник и их теоретическая огибающая для прямоугольного сигнала



Видим, что оба спектра хорошо ложатся на теоретическую огибающую. Значит, источник выдает треугольные и прямоугольные сигналы с высокой точностью.

7 Вывод

Таким образом, на собственной частоте в параллельном колебательном контуре происходит резонанс токов. Если на контур подается сигнал с источника переменного тока, то резонанс виден как максимум амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Ширина АЧХ обратно пропорциональна добротности контура. Ширина фазово-частотной характеристики также обратно пропорциональна добротности контура.

В работе были исследованы резонансы нескольких контуров с различными ёмкостями. Добротности контуров, найденные из ширины АЧХ и ФЧХ, совпали с добротностями, рассчитанными из их характеристик. Было обнаружено, что сопротивление катушки индуктивности увеличивается с повышением частоты.

С помощью параллельного колебательного контура были измерены спектры треугольной и прямоугольной волн. Измеренные спектры совпали с теоретическими.