

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №29

ИМПЕДАНС

Поляков Даниил, 19.Б23-фз

Цель работы: изучить частотные зависимости импеданса, сдвига фаз для цепей, содержащих активное и реактивное сопротивления при их последовательном подключении, экспериментально определить значения ёмкости конденсатора и индуктивности катушки и сравнить их с номиналом.

Оборудование

- панель для сбора электрических цепей;
- осциллограф;
- источник переменного тока;
- резисторы 1 Ом и 100 Ом;
- конденсатор ёмкостью 4.7 мкФ;
- катушка индуктивности 4.4 мГн.

Схемы цепей

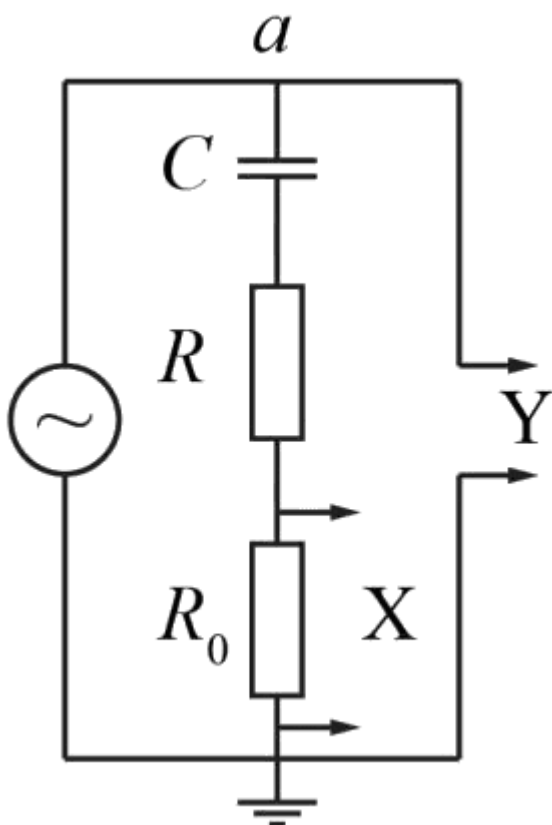


Рисунок 1.

Последовательно подключенные резистор и конденсатор

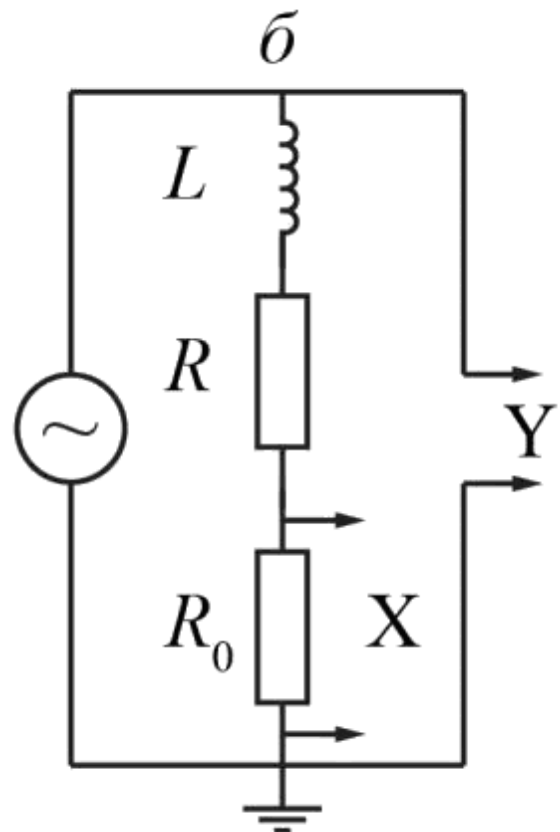


Рисунок 2.

Последовательно подключенные резистор и катушка

Здесь X — 1-ый канал осциллографа, Y — 2-ой канал осциллографа.

Расчётные формулы

- Экспериментальное определение сдвига фазы между током и напряжением:

$$\varphi(f, \Delta t) = \frac{\Delta t}{T} \cdot 2\pi = f \Delta t \cdot 2\pi$$

$$\varphi(U_0, I_0) = \pm \arccos \frac{I_0 r}{U_0}$$

Δt — разница во времени между одинаковыми фазами (вершинами) тока и напряжения;

T — период колебаний тока и напряжения;

f — частота колебаний тока и напряжения;

r — суммарное сопротивление резисторов;

U_0 — амплитуда колебаний напряжения;

I_0 — амплитуда колебаний силы тока.

- Полное сопротивление цепи из последовательно подключенных резистора и конденсатора:

$$|Z|(\varphi) = \frac{r}{\cos \varphi} \text{ (эксп.)}$$

$$|Z|(U_0, I_0) = \frac{U_0}{I_0} \text{ (эксп.)}$$

$$|Z|(f, C) = \sqrt{r^2 + r_c^2} = \sqrt{r^2 + \frac{1}{(2\pi f C)^2}} \text{ (теор.)}$$

φ — сдвиг фазы между током и напряжением;

U_0 — амплитуда напряжения;

I_0 — амплитуда силы тока;

r — суммарное сопротивление резисторов;

r_c — реактивное сопротивление конденсатора;

f — частота колебаний тока и напряжения;

C — ёмкость конденсатора.

- Реактивное сопротивление конденсатора:

$$r_c(\varphi) = -r \tan \varphi \text{ (эксп.)}$$

$$r_c(U_0, I_0) = \sqrt{|Z|^2 - r^2} = \sqrt{\left(\frac{U_0}{I_0}\right)^2 - r^2} \text{ (эксп.)}$$

$$r_c(f, C) = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \text{ (теор.)}$$

φ — сдвиг фазы между током и напряжением;

$|Z|$ — полное сопротивление цепи;

r — суммарное сопротивление резисторов;

U_0 — амплитуда напряжения;

I_0 — амплитуда силы тока;

ω — циклическая частота колебаний тока и напряжения;

f — частота колебаний тока и напряжения;

C — ёмкость конденсатора.

- Теоретический сдвиг фазы между током и напряжением в цепи из последовательно подключенных резистора и конденсатора:

$$\varphi(f, C) = -\arctan \frac{r_C}{r} =$$

$$= -\arctan \frac{1}{2\pi f C r}$$

r — суммарное сопротивление резисторов;
 r_C — реактивное сопротивление конденсатора;
 f — частота колебаний тока и напряжения;
 C — ёмкость конденсатора.

- Полное сопротивление цепи из последовательно подключенных резистора и катушки:

$$|Z|(\varphi) = \frac{r}{\cos \varphi} \text{ (эксп.)}$$

$$|Z|(U_0, I_0) = \frac{U_0}{I_0} \text{ (эксп.)}$$

$$|Z|(f, L) = \sqrt{r^2 + r_L^2} = \sqrt{r^2 + (2\pi f L)^2} \text{ (теор.)}$$

φ — сдвиг фазы между током и напряжением;
 U_0 — амплитуда напряжения;
 I_0 — амплитуда силы тока;
 r — суммарное сопротивление резисторов;
 r_L — реактивное сопротивление катушки;
 f — частота колебаний тока и напряжения;
 L — индуктивность катушки.

- Реактивное сопротивление катушки:

$$r_L(\varphi) = r \tan \varphi \text{ (эксп.)}$$

$$r_L(U_0, I_0) = \sqrt{|Z|^2 - r^2} = \sqrt{\left(\frac{U_0}{I_0}\right)^2 - r^2} \text{ (эксп.)}$$

$$r_L(f, L) = \omega L = 2\pi f L \text{ (теор.)}$$

φ — сдвиг фазы между током и напряжением;
 $|Z|$ — полное сопротивление цепи;
 r — суммарное сопротивление резисторов;
 U_0 — амплитуда напряжения;
 I_0 — амплитуда силы тока;
 ω — циклическая частота колебаний тока и напряжения;
 f — частота колебаний тока и напряжения;
 L — ёмкость конденсатора.

- Теоретический сдвиг фазы между током и напряжением в цепи из последовательно подключенных резистора и катушки:

$$\varphi(f, L) = \arctan \frac{r_L}{r} =$$

$$= \arctan \frac{2\pi f L}{r}$$

r — суммарное сопротивление резисторов;
 r_L — реактивное сопротивление катушки;
 f — частота колебаний тока и напряжения;
 L — индуктивность катушки.

- Формулы для вычисления погрешностей:

- Абсолютная погрешность косвенных измерений:

$$\Delta_{f(x_1, x_2, \dots)} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \Delta_{x_2}\right)^2 + \dots}$$

- $\Delta_{\varphi(f, \Delta t)} = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial f} \cdot \Delta_f\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \Delta t} \cdot \Delta_{\Delta t}\right)^2} = |\varphi| \sqrt{\left(\frac{\Delta_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2}$

- $\Delta_{\varphi(U_0, I_0)} = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial U_0} \cdot \Delta_{U_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial I_0} \cdot \Delta_{I_0}\right)^2} = \frac{r}{\sqrt{U_0^2 - (I_0 r)^2}} \sqrt{\left(\frac{I_0}{U_0} \cdot \Delta_{U_0}\right)^2 + (\Delta_{I_0})^2}$

- $\Delta_{|Z|(U_0, I_0)} = \sqrt{\left(\frac{\partial |Z|}{\partial U_0} \cdot \Delta_{U_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial |Z|}{\partial I_0} \cdot \Delta_{I_0}\right)^2} = |Z| \sqrt{\left(\frac{\Delta_{U_0}}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{I_0}}{I_0}\right)^2}$

- $\Delta_{|Z|(\varphi)} = \left| \frac{\partial |Z|}{\partial \varphi} \cdot \Delta_{\varphi} \right| = \left| \frac{r \sin \varphi}{\cos^2 \varphi} \cdot \Delta_{\varphi} \right|$

- $\Delta_{r_{C/L}(U_0, I_0)} = \sqrt{\left(\frac{\partial r_{C/L}}{\partial U_0} \cdot \Delta_{U_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial r_{C/L}}{\partial I_0} \cdot \Delta_{I_0}\right)^2} = \frac{1}{I_0 \sqrt{1 - \left(\frac{I_0 r}{U_0}\right)^2}} \sqrt{(\Delta_{U_0})^2 + \left(\frac{U_0}{I_0} \cdot \Delta_{I_0}\right)^2}$

- $\Delta_{r_{C/L}(\varphi)} = \left| \frac{\partial r_{C/L}}{\partial \varphi} \cdot \Delta_{\varphi} \right| = \left| \frac{r}{\cos^2 \varphi} \cdot \Delta_{\varphi} \right|$

Порядок измерений

1. Собираем первую схему (с конденсатором). Включаем осциллограф в режим двух сигналов и подбираем такой диапазон частот источника тока, чтобы сдвиг фазы φ изменялся в достаточно большом промежутке. Таким образом был подобран диапазон частот 100–1000 Гц с шагом 100 Гц.
2. Для измерения амплитуды колебаний напряжения U_0 и тока I_0 в цепи выводим соответствующий канал осциллографа и подбираем масштаб вертикальной оси так, чтобы сигнал максимально заполнял экран осциллографа по вертикали, но при этом не выходил за его границы — таким образом мы обеспечим лучшую точность измерений. Измеряем вертикальное расстояние от впадины до вершины сигнала (с учётом выбранного масштаба), делим его на 2 и получаем амплитудное значение сигнала. Сила тока численно равна напряжению, отображаемому на первом канале осциллографа, т. к. это напряжение измеряется на резисторе сопротивлением 1 Ом.
3. Для измерения сдвига фазы φ устанавливаем режим одновременного вывода двух сигналов. Максимально увеличиваем масштаб по оси времени, чтобы две вершины, соответствующие току и напряжению, находились на максимальном расстоянии друг от друга (для обеспечения большей точности измерений). Если становится сложно определить положение вершин сигналов, увеличиваем масштаб и по вертикальной оси для обоих сигналов, чтобы вершины получились более заострёнными. Измеряем горизонтальное расстояние между вершинами тока и напряжения (с учётом выбранного масштаба). Таким образом получаем сдвиг сигналов по времени Δt . Если напряжение находится слева от силы тока, сдвиг имеет знак «+», если справа, то «-». Выполняем перечисленные измерения для 10 значений частоты генератора тока.
4. Заменяем конденсатор в собранной схеме на катушку и повторяем все перечисленные измерения.

Результаты

Примечание: построение графиков и аппроксимация зависимостей выполнены с помощью ПО MATLAB. Погрешности коэффициентов аппроксимации рассчитаны с доверительной вероятностью $P = 95\%$.

Два используемых резистора имеют суммарное сопротивление $r = 100 + 1 = 101$ Ом; номинальная ёмкость исследуемого конденсатора $C = 4.7$ мкФ; номинальная индуктивность катушки $L = 4.4$ мГн.

Погрешность частоты принимаем равной шагу её изменения источником тока:

$$\Delta f = 1 \text{ Гц}$$

Погрешность определения амплитуды напряжения U_0 и тока I_0 равна выбранной цене деления вертикальной оси осциллографа, делённой на два (так как амплитуда была получена делением снятого значения на два). Погрешность Δt равна выбранной цене деления горизонтальной оси осциллографа.

При вычислении сдвига фазы $\varphi(f, \Delta t)$ использовалась частота, указанная на источнике тока, т. к. она имеет более высокую относительную точность по сравнению с осциллографом. Так, по горизонтальной оси осциллографа отложено всего 50 делений, из-за чего погрешность определения периода составляет не менее 2%, в то время как источник тока позволяет задавать частоту с шагом в 1 Гц, и его погрешность колеблется от 1 до 0.1 %. Для проверки проводились измерения периода колебаний с помощью осциллографа, которые здесь не изложены, — во всех случаях период колебаний, полученный с источника тока, совпадал в пределах погрешности осциллографа с периодом колебаний, снятым с осциллографа. Поэтому погрешность источника тока не больше погрешности осциллографа.

1. Последовательно подключенные резистор и конденсатор

При вычислении $|Z|(\varphi)$ и $r_C(\varphi)$ использовались значения $\varphi(f, \Delta t)$.

Таблица 1. Зависимость характеристик последовательной RC-цепи от частоты источника тока

f , Гц	U_0 , В	I_0 , мА	Δt , мс	φ ($f, \Delta t$), °	φ (U_0, I_0), °	φ (f, C), °	$ Z $ (φ), Ом	$ Z $ (U_0, I_0), Ом	$ Z $ (f, C), Ом	r_C (φ), Ом	r_C (U_0, I_0), Ом	r_C (f, C), Ом
100	9.0 ± 0.5	28 ± 2	-2.0 ± 0.1	-72 ± 4	-72 ± 2	-73.4	330 ± 60	320 ± 30	353	310 ± 70	310 ± 30	339
200	8.0 ± 0.5	44 ± 2	-0.8 ± 0.1	-58 ± 7	-56 ± 3	-59.2	190 ± 40	182 ± 14	197	160 ± 40	150 ± 20	169
300	7.8 ± 0.2	52 ± 2	-0.44 ± 0.01	-47.5 ± 1.1	-48 ± 2	-48.2	150 ± 3	150 ± 7	151	110 ± 4	111 ± 9	113
400	7.4 ± 0.2	58 ± 2	-0.23 ± 0.01	-33.1 ± 1.4	-38 ± 3	-40.0	121 ± 2	128 ± 6	132	66 ± 4	78 ± 9	84.7
500	7.0 ± 0.2	60 ± 2	0.17 ± 0.01	-31 ± 2	-30 ± 4	-33.8	117 ± 2	117 ± 5	122	60 ± 4	58 ± 10	67.7
600	6.8 ± 0.2	62 ± 2	0.12 ± 0.01	-26 ± 2	-23 ± 6	-29.2	112 ± 2	110 ± 5	116	49 ± 5	43 ± 12	56.4
700	6.6 ± 0.2	62 ± 2	0.09 ± 0.01	-23 ± 3	-18 ± 8	-25.6	109 ± 2	106 ± 5	112	42 ± 5	34 ± 15	48.4
800	6.6 ± 0.2	64 ± 2	0.072 ± 0.004	-20.7 ± 1.2	-12 ± 12	-22.7	108.0 ± 0.8	103 ± 4	110	38 ± 2	20 ± 20	42.3
900	6.6 ± 0.2	64 ± 2	0.060 ± 0.004	-19.4 ± 1.3	-12 ± 12	-20.4	107.1 ± 0.9	103 ± 4	108	36 ± 3	20 ± 20	37.6
1000	6.6 ± 0.2	64 ± 2	0.048 ± 0.004	-17.3 ± 1.4	-12 ± 12	-18.5	105.8 ± 0.8	103 ± 4	107	31 ± 3	20 ± 20	33.9

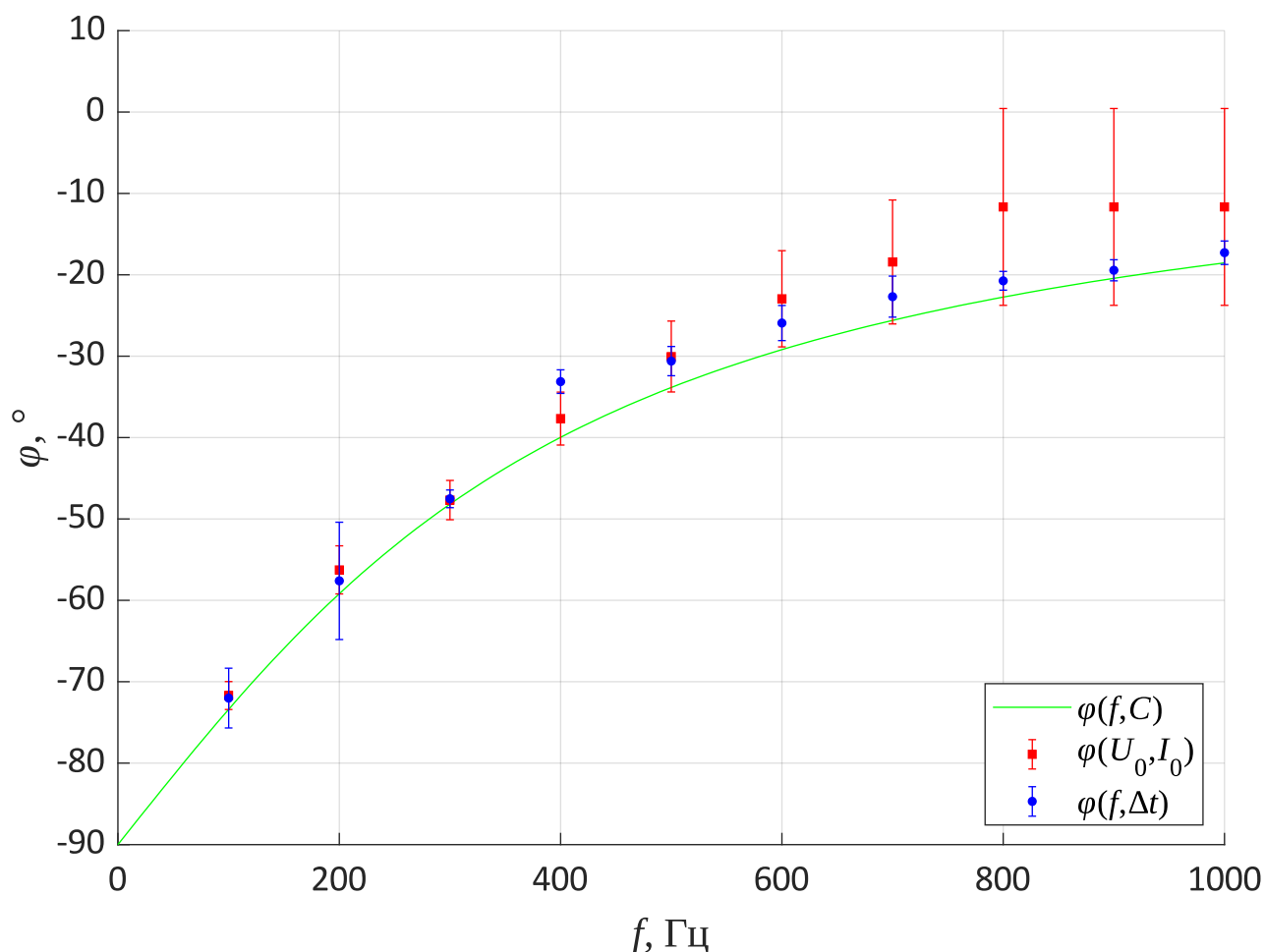


График 1. Зависимость сдвига фазы от частоты в последовательной RC-цепи, полученная экспериментально ($\varphi(f, \Delta t)$ и $\varphi(U_0, I_0)$) и теоретически ($\varphi(f, C)$)

Экспериментально полученные зависимости совпадают друг с другом и с теоретической зависимостью в пределах погрешностей. При увеличении частоты сдвиг фазы асимптотически приближается к 0. Совпадение $\varphi(f, \Delta t)$ и $\varphi(U_0, I_0)$ экспериментально подтверждает, что напряжение на конденсаторе отстаёт по фазе от силы тока на 90° . Точность у φ , рассчитанного через напрямую измеренный сдвиг Δt , выше, чем у φ , рассчитанного через амплитудные значения напряжения и тока, и его значения лучше соответствуют теоретическим. При этом погрешность $\varphi(U_0, I_0)$ возрастает с увеличением частоты.

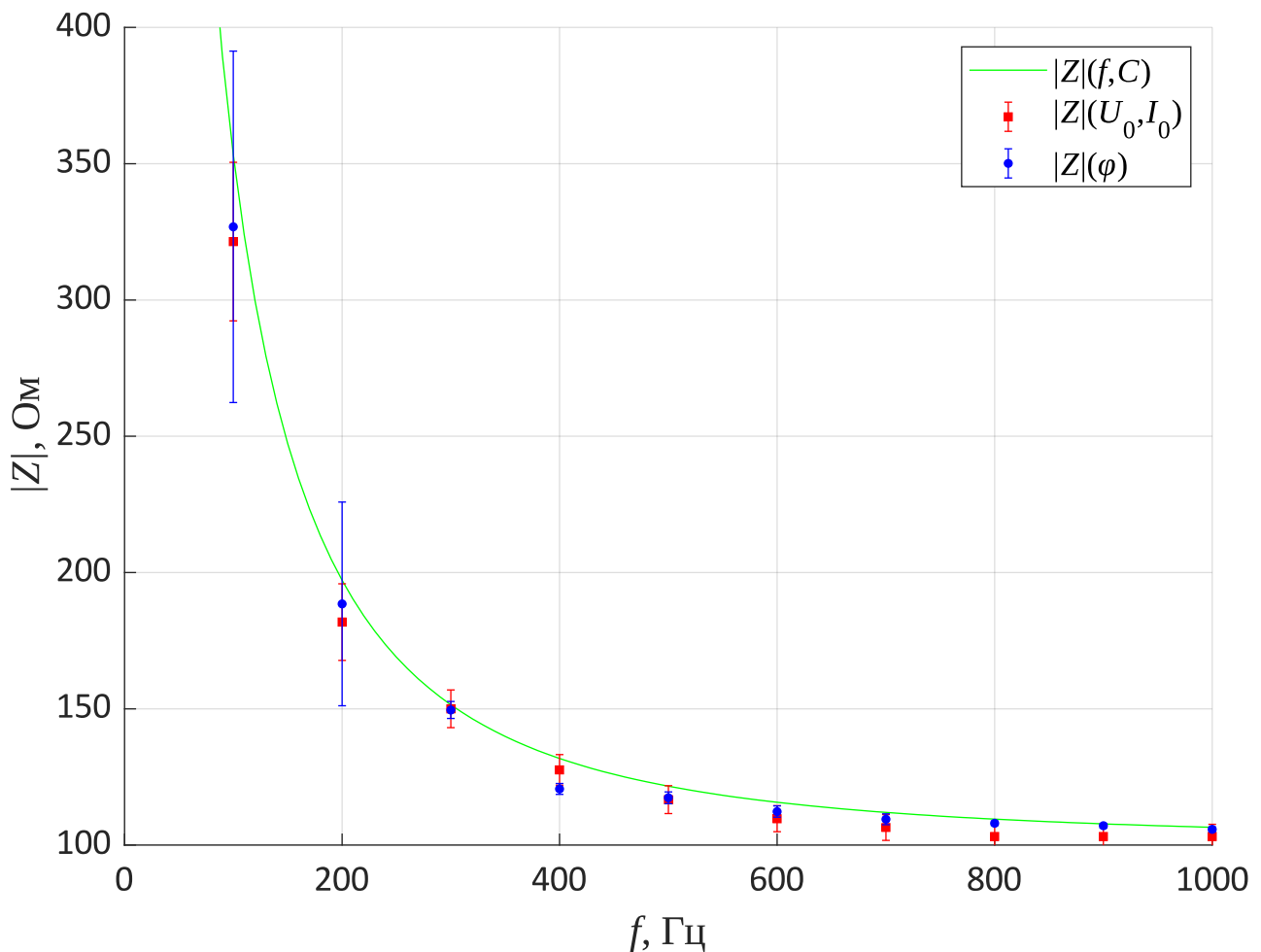


График 2. Зависимость полного сопротивления от частоты в последовательной RC-цепи, полученная экспериментально ($|Z|(\varphi)$ и $|Z|(U_0, I_0)$) и теоретически ($|Z|(f, C)$)

Экспериментально полученные зависимости совпадают друг с другом и с теоретической зависимостью в пределах погрешностей. При увеличении частоты полное сопротивление асимптотически приближается к сопротивлению резисторов, т. е. при очень больших значениях частоты конденсатор практически не оказывает влияние на цепь. Точность у $|Z|$, рассчитанного через сдвиг фазы φ , выше, чем у $|Z|$, рассчитанного через амплитудные значения напряжения и тока. Это связано с тем, что осциллограф позволяет определить Δt с большей точностью, чем U_0 и I_0 .

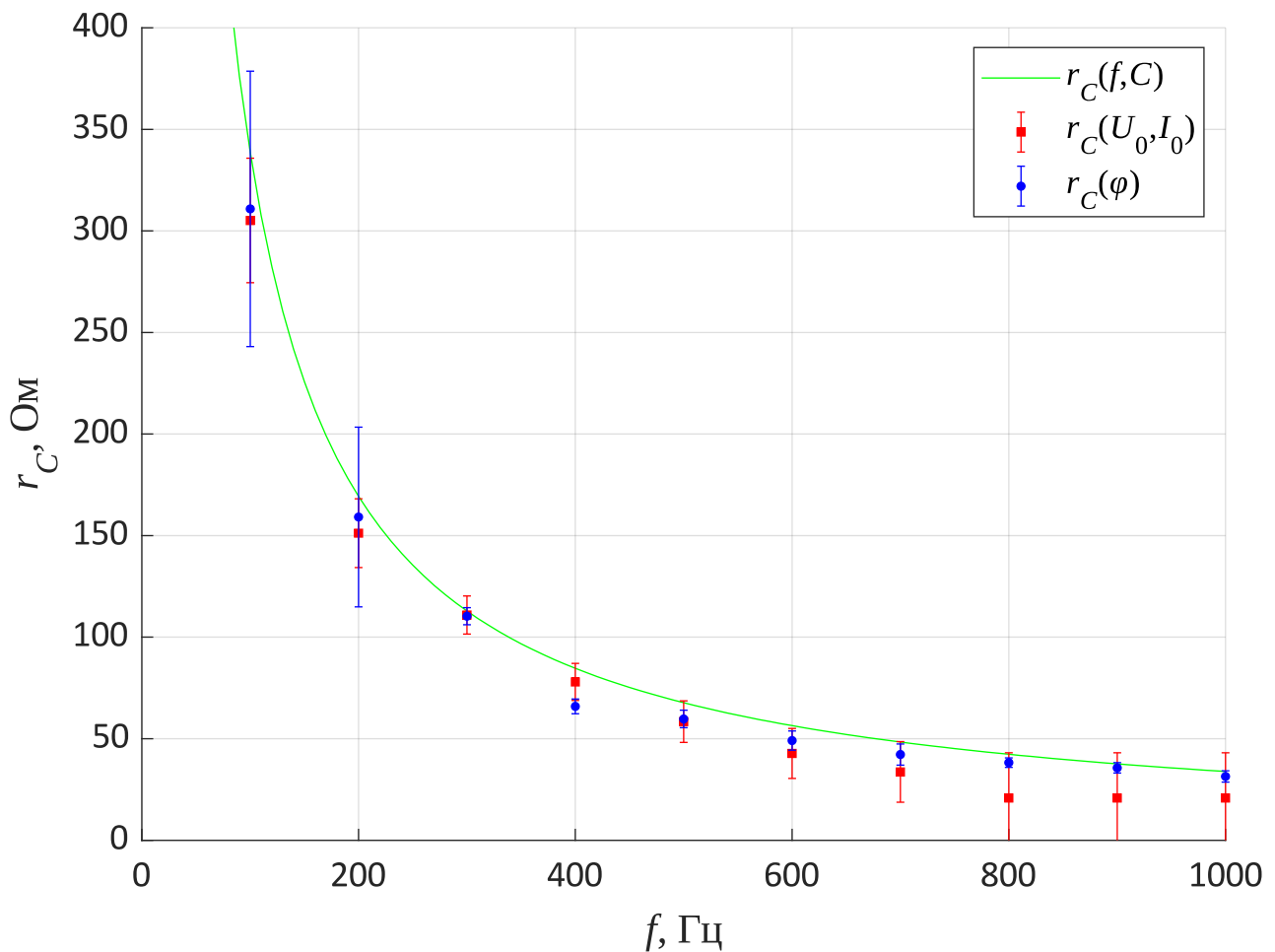


График 3. Зависимость реактивного сопротивления конденсатора от частоты в последовательной RC-цепи, полученная экспериментально ($r_C(\varphi)$ и $r_C(U_0, I_0)$) и теоретически ($r_C(f, C)$)

Экспериментально полученные зависимости совпадают друг с другом и с теоретической зависимостью в пределах погрешностей. Реактивное сопротивление конденсатора обратно пропорционально частоте колебаний тока в цепи. Точность у r_C , рассчитанного через сдвиг фазы φ , как и в случае с $|Z|$, выше, чем у r_C , рассчитанного через амплитудные значения напряжения и тока. $r_C(U_0, I_0)$ очень неточно при больших значениях частоты.

Чтобы экспериментально определить ёмкость исследуемого конденсатора, линеаризуем зависимость $\varphi(f, C)$:

$$\varphi(f, C) = -\arctan \frac{1}{2\pi f C r} \Leftrightarrow \frac{1}{2\pi f r} = C \tan(-\varphi)$$

$$\Updownarrow$$

$$y = Cx, \quad x \equiv \tan(-\varphi), \quad y \equiv \frac{1}{2\pi f r}$$

Аппроксимируем зависимость $y(x)$ и найдём C как коэффициент пропорциональности. При вычислении x будем использовать значения $\varphi(f, \Delta t)$, так как они точнее, чем $\varphi(U_0, I_0)$.

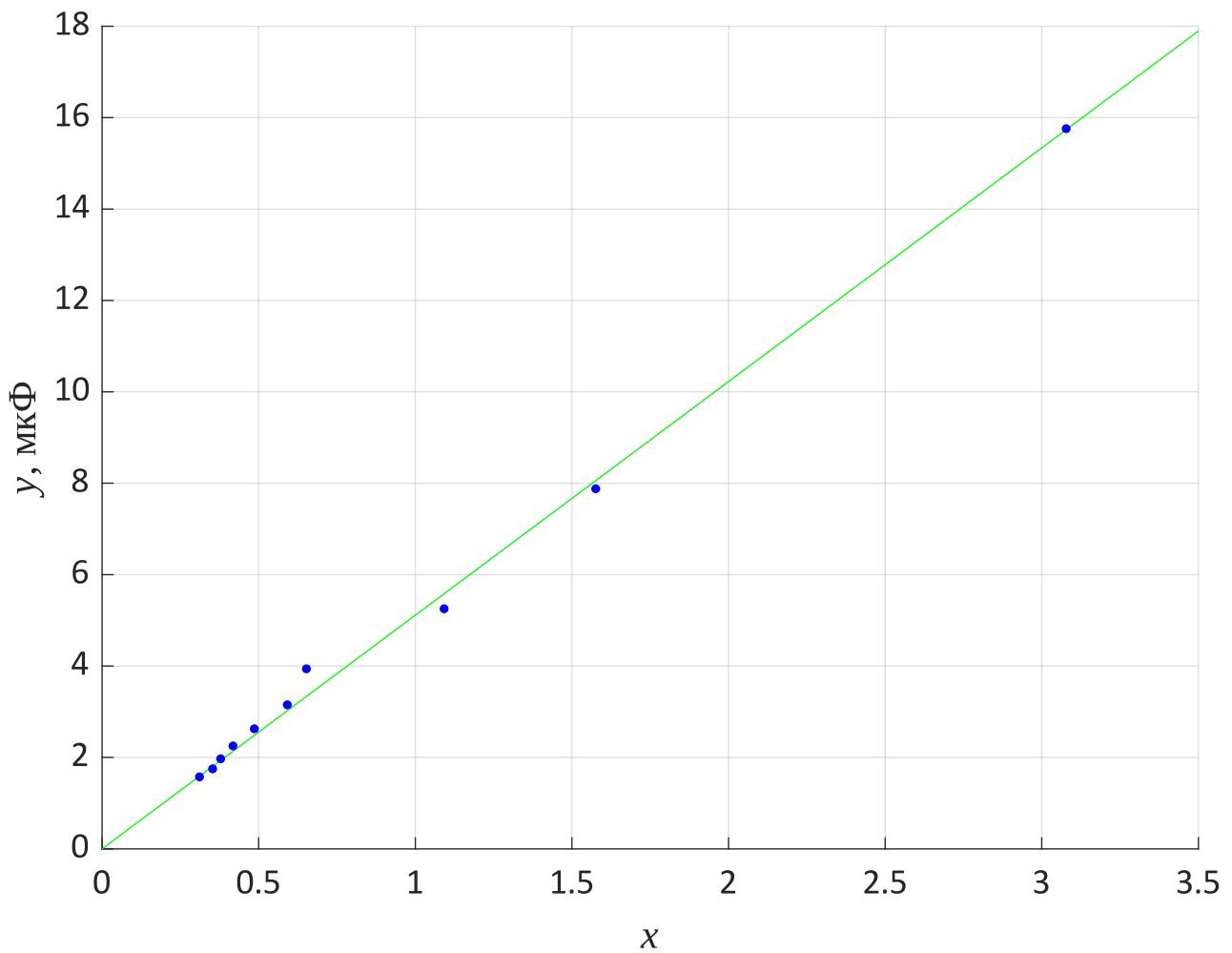


График 4. Линеаризованная зависимость $\varphi(f, C)$

Получаем ёмкость конденсатора:

$$C = 5.11 \pm 0.15 \text{ мкФ}$$

Экспериментально полученная ёмкость конденсатора близка к номинальной. Источниками погрешности могут являться:

- недостаточная точность определения величин с помощью осциллографа, ошибочные показания осциллографа;
- изменение параметров цепи вследствие нагревания её элементов под действием электрического тока;
- номинальная ёмкость конденсатора может изменяться с течением времени его эксплуатации.

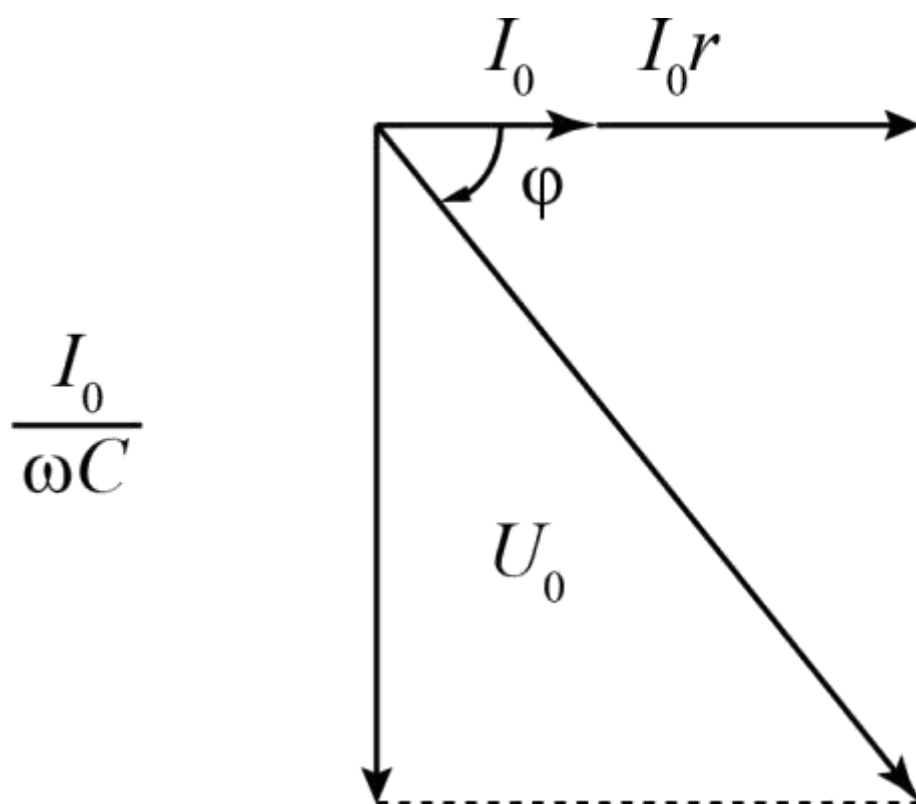


Рисунок 3. Векторная диаграмма цепи с последовательно подключенными резистором и конденсатором

2. Последовательно подключенные резистор и катушка

При вычислении $|Z|(\varphi)$ и $r_L(\varphi)$ использовались значения $\varphi(f, \Delta t)$.

Таблица 2. Зависимость характеристик последовательной RL -цепи от частоты источника тока

f , Гц	U_0 , В	I_0 , мА	Δt , мс	φ ($f, \Delta t$), °	φ (U_0, I_0), °	φ (f, L), °	$ Z $ (φ), Ом	$ Z $ (U_0, I_0), Ом	$ Z $ (f, L), Ом	r_L (φ), Ом	r_L (U_0, I_0), Ом	r_L (f, L), Ом
1000	6.6 ± 0.2	64 ± 2	0.048 ± 0.002	17.3 ± 0.7	12 ± 12	15.3	105.8 ± 0.4	103 ± 4	105	31.4 ± 1.4	20 ± 20	27.6
2000	6.8 ± 0.2	60 ± 2	0.040 ± 0.002	28.8 ± 1.4	27 ± 5	28.7	115 ± 2	113 ± 5	115	56 ± 3	51 ± 11	55.3
3000	7.2 ± 0.2	56 ± 2	0.036 ± 0.002	39 ± 2	38 ± 3	39.4	130 ± 4	129 ± 6	131	81 ± 6	80 ± 9	82.9
4000	7.6 ± 0.2	50 ± 2	0.032 ± 0.002	46 ± 3	48 ± 2	47.6	146 ± 8	152 ± 7	150	105 ± 11	114 ± 10	111
5000	8.0 ± 0.2	46 ± 2	0.030 ± 0.002	54 ± 4	54 ± 2	53.8	172 ± 15	174 ± 9	171	140 ± 20	142 ± 11	138
6000	8.5 ± 0.5	42 ± 2	0.026 ± 0.002	56 ± 4	60 ± 2	58.7	180 ± 20	200 ± 20	194	150 ± 20	180 ± 20	166
7000	8.5 ± 0.5	40 ± 2	0.025 ± 0.001	63 ± 3	62 ± 2	62.4	220 ± 20	210 ± 20	218	200 ± 20	190 ± 20	194
8000	8.5 ± 0.5	36 ± 2	0.023 ± 0.001	66 ± 3	65 ± 2	65.5	250 ± 30	240 ± 20	243	230 ± 30	210 ± 20	221
9000	9.0 ± 0.5	34 ± 2	0.021 ± 0.001	68 ± 3	68 ± 2	67.9	270 ± 40	260 ± 20	269	250 ± 40	240 ± 20	249
10000	9.0 ± 0.5	30 ± 2	0.019 ± 0.001	68 ± 4	70 ± 2	69.9	270 ± 40	300 ± 30	294	260 ± 50	280 ± 30	276

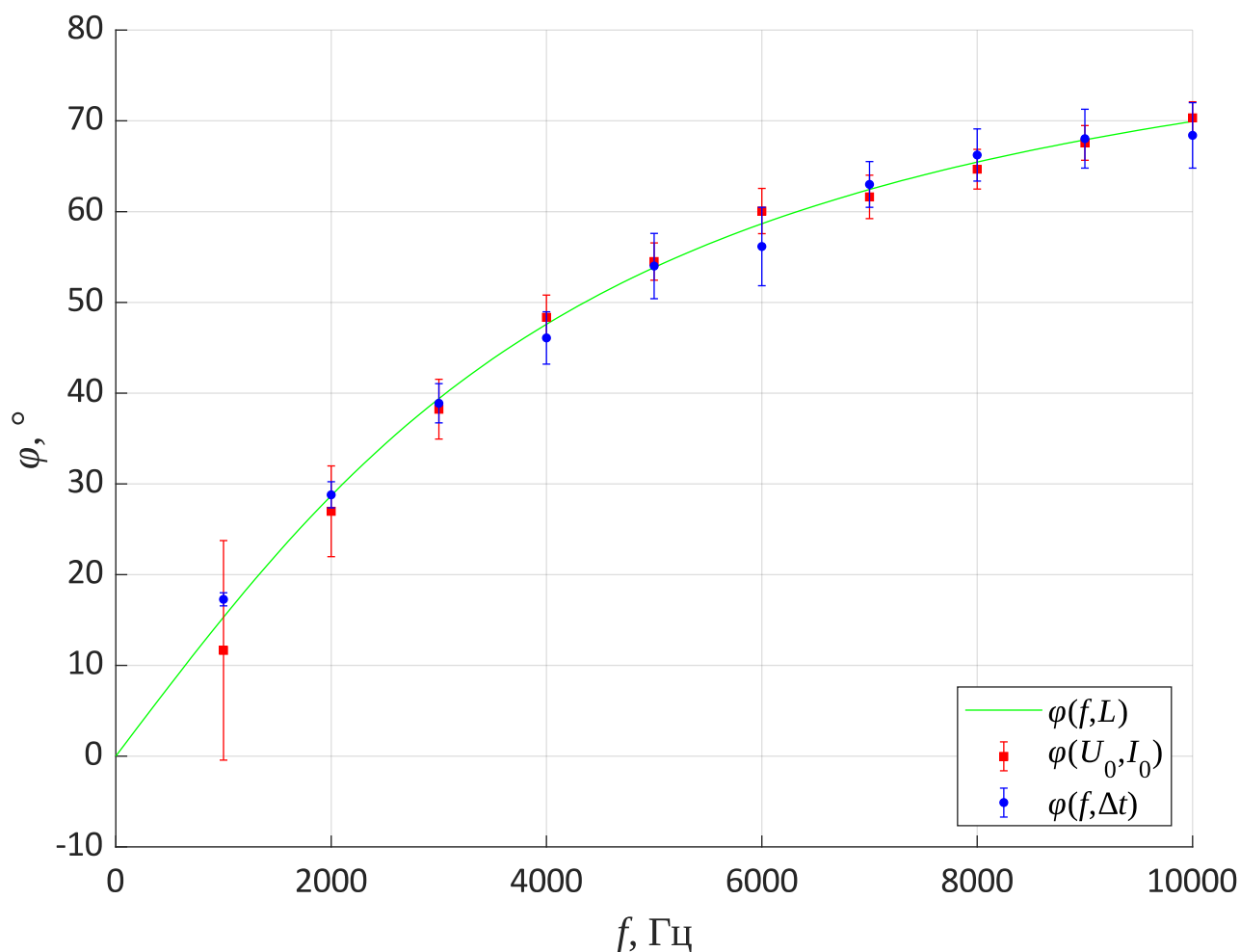


График 5. Зависимость сдвига фазы от частоты в последовательной RL -цепи, полученная экспериментально ($\varphi(f, \Delta t)$ и $\varphi(U_0, I_0)$) и теоретически ($\varphi(f, L)$)

Экспериментально полученные зависимости совпадают друг с другом и с теоретической зависимостью в пределах погрешностей. При увеличении частоты сдвиг фазы асимптотически стремится к 90° . Совпадение $\varphi(f, \Delta t)$ и $\varphi(U_0, I_0)$ экспериментально подтверждает, что напряжение на катушке опережает по фазе силу тока на 90° . Точность у φ , рассчитанного через напрямую измеренный сдвиг Δt , практически такая же, как у φ , рассчитанного через амплитудные значения напряжения и тока. Оба варианта экспериментального нахождения сдвига фазы хорошо совпали с теоретическими значениями. Можно заметить, что погрешность $\varphi(U_0, I_0)$ уменьшается с увеличением частоты.

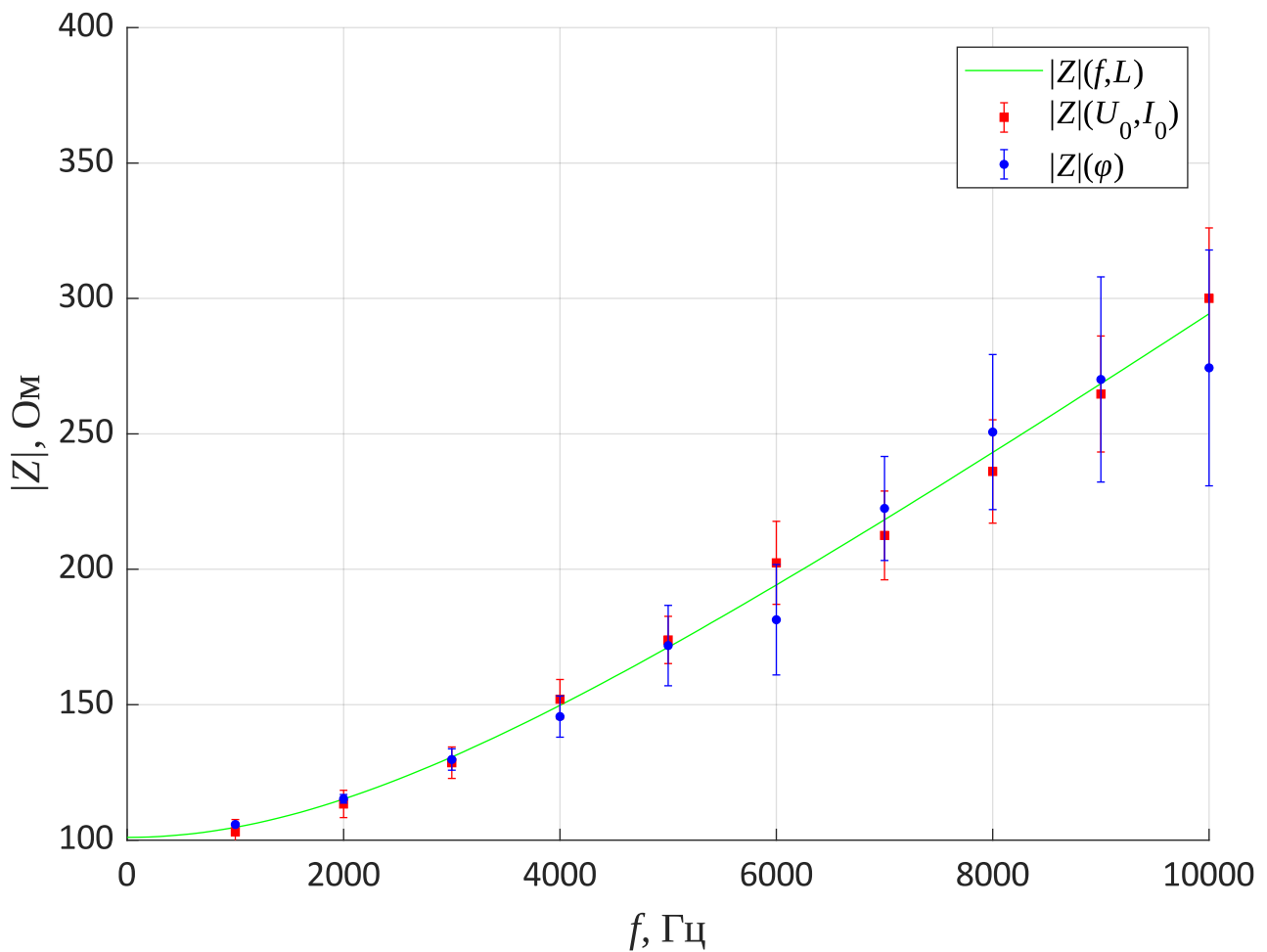


График 6. Зависимость полного сопротивления от частоты в последовательной RL -цепи, полученная экспериментально ($|Z|(\varphi)$ и $|Z|(U_0, I_0)$) и теоретически ($|Z|(f, L)$)

Экспериментально полученные зависимости совпадают друг с другом и с теоретической зависимостью в пределах погрешностей. При отсутствии колебаний тока в цепи полное сопротивление цепи равно сопротивлению резисторов, т. е. при постоянном токе катушка не оказывает влияние на цепь. Точность у $|Z|$, рассчитанного через сдвиг фазы φ , практически совпадает с сопротивлением $|Z|$, рассчитанным через амплитудные значения напряжения и тока. Погрешность обоих методов измерения $|Z|$ увеличивается с ростом частоты колебаний тока в цепи.

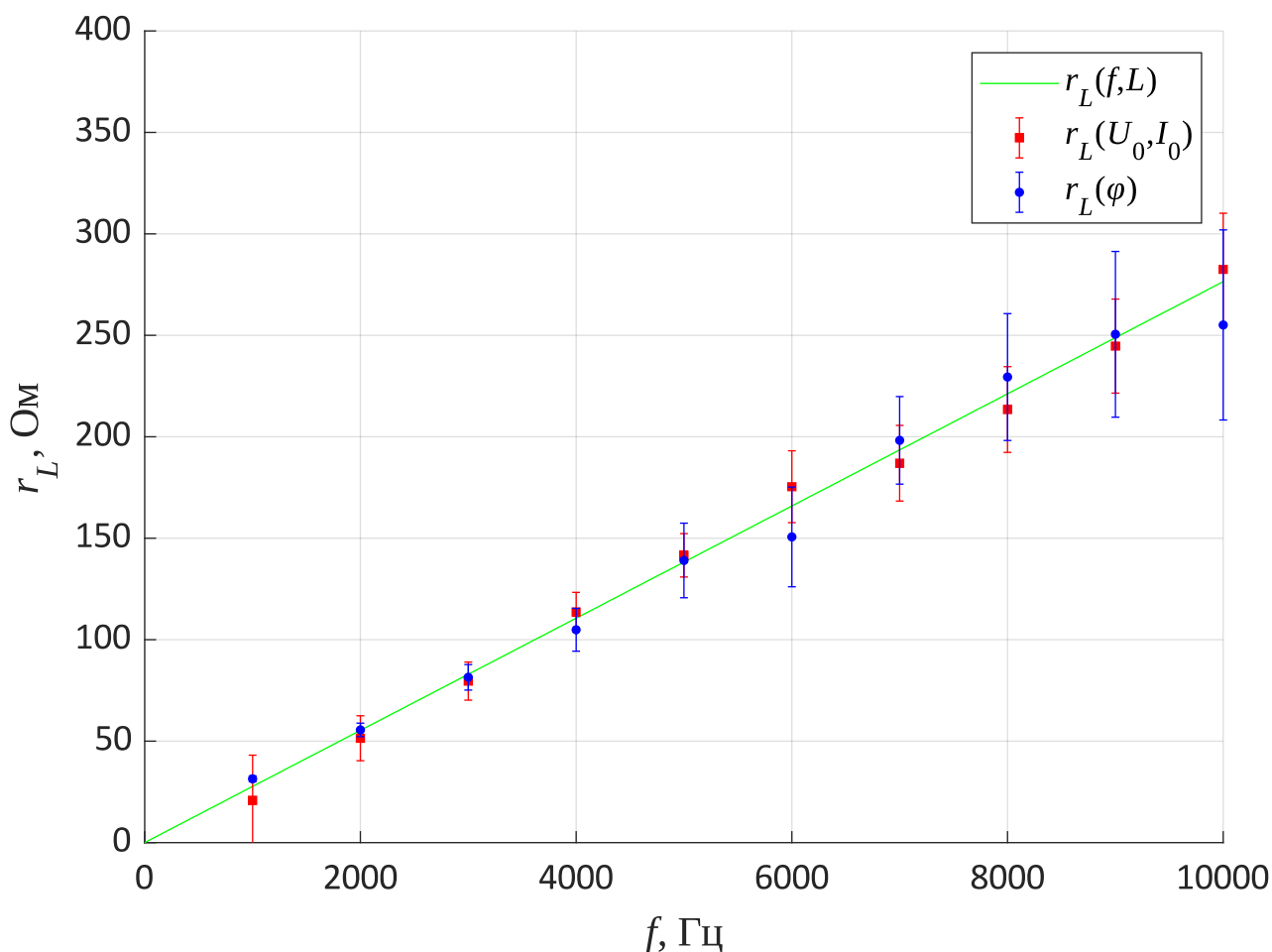


График 7. Зависимость реактивного сопротивления конденсатора от частоты в последовательной RL -цепи, полученная экспериментально ($r_L(\varphi)$ и $r_L(U_0, I_0)$) и теоретически ($r_L(f, L)$)

Экспериментально полученные зависимости совпадают друг с другом и с теоретической зависимостью в пределах погрешностей. Реактивное сопротивление катушки прямо пропорционально частоте колебаний тока в цепи. Погрешность r_L , рассчитанного через сдвиг фазы φ , увеличивается с ростом частоты тока.

Чтобы экспериментально определить индуктивность исследуемой катушки, линеаризуем зависимость $\varphi(f, L)$:

$$\varphi(f, L) = \arctan \frac{2\pi f L}{r} \Leftrightarrow \tan \varphi = L \frac{2\pi f}{r}$$

\Updownarrow

$$y = Lx, \quad x \equiv \frac{2\pi f}{r}, \quad y \equiv \tan \varphi$$

Аппроксимируем зависимость $y(x)$ и найдём L как коэффициент пропорциональности. При вычислении y будем использовать значения $\varphi(f, \Delta t)$, хотя здесь можно использовать и результаты измерения $\varphi(U_0, I_0)$.

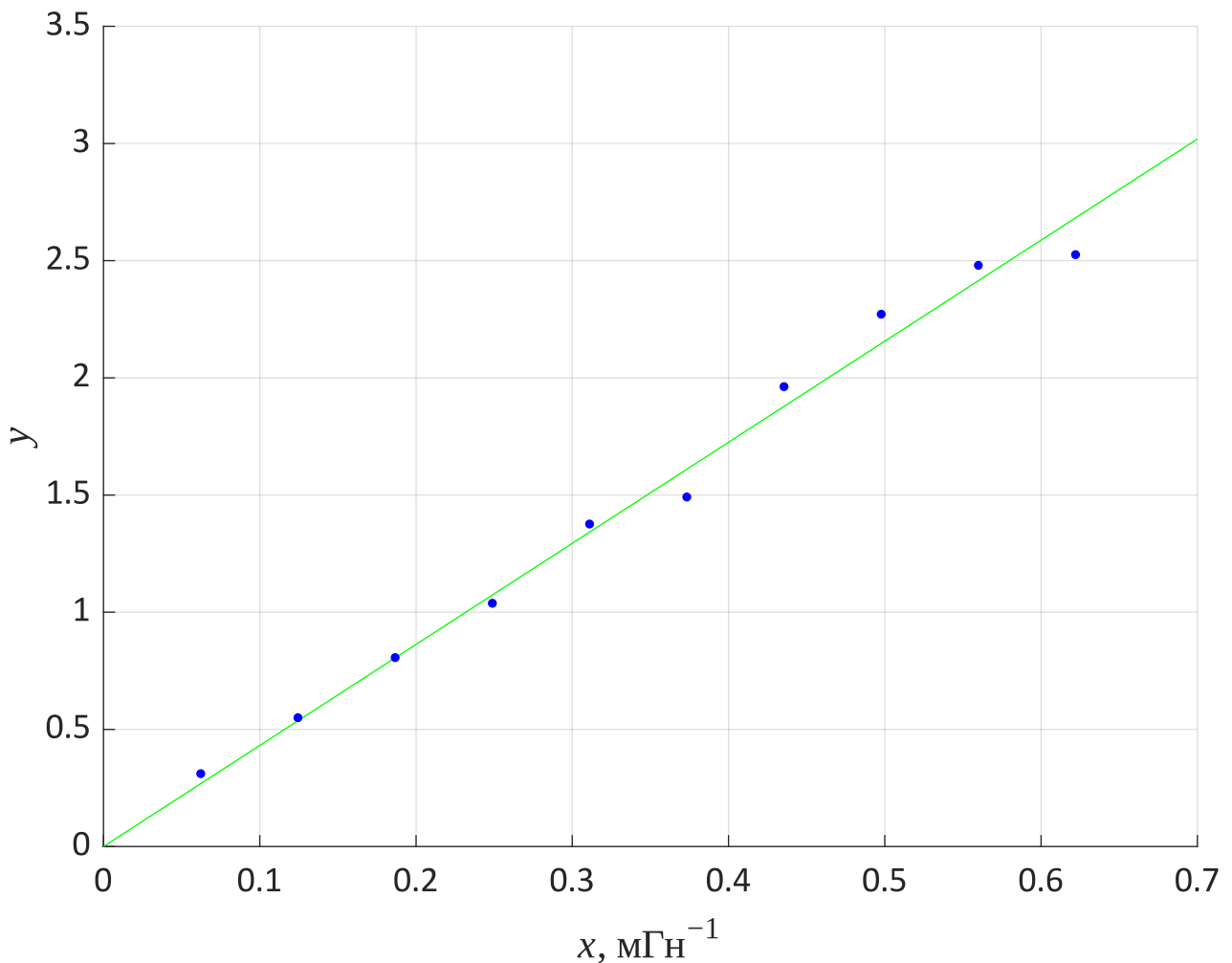


График 8. Линеаризованная зависимость $\varphi(f, L)$

Получаем индуктивность катушки:

$$L = 4.3 \pm 0.2 \text{ мГн}$$

Экспериментально полученная индуктивность катушки совпадает с номинальной в пределах погрешности. Источниками погрешности могут являться:

- недостаточная точность определения величин с помощью осциллографа, ошибочные показания осциллографа;
- изменение параметров цепи вследствие нагревания её элементов под действием электрического тока.

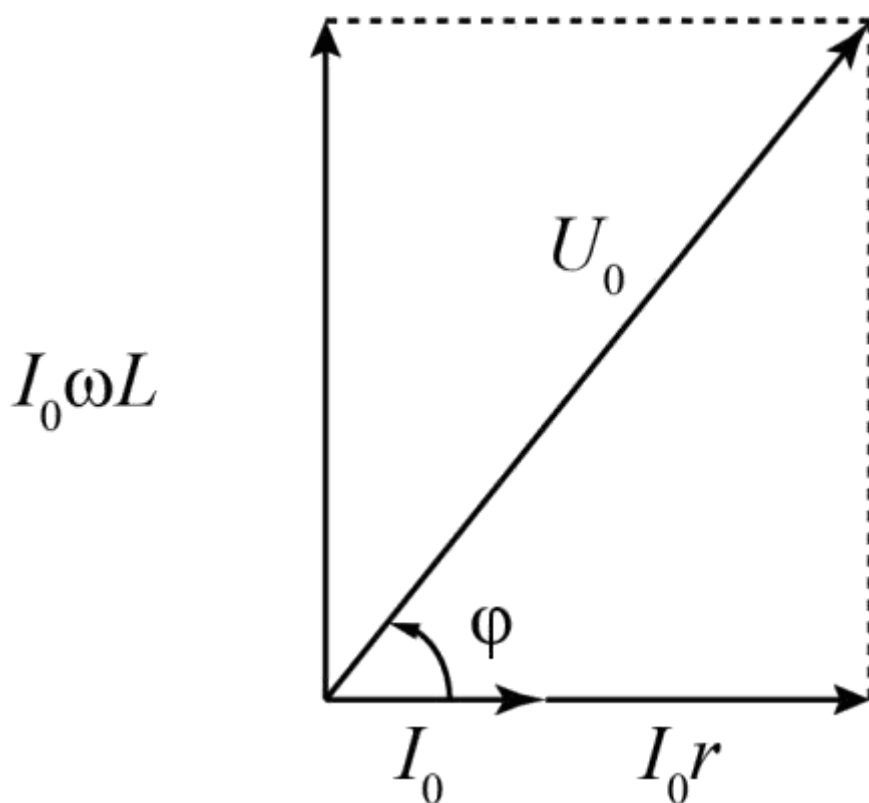


Рисунок 4. Векторная диаграмма цепи с последовательно подключенными резистором и катушкой

Выводы

1. Последовательно подключенные резистор и конденсатор

- При пропускании переменного тока через цепь с конденсатором в ней возникает реактивное сопротивление, а ток сдвигается по фазе относительно напряжения.
- В работе экспериментально доказано, что напряжение на конденсаторе отстаёт по фазе от силы тока на 90° .
- При увеличении частоты сдвиг фазы тока относительно напряжения на всей цепи асимптотически приближается к 0, а при уменьшении — к -90° .
- В предельном случае, когда частота колебаний очень велика, влиянием конденсатора на цепь можно пренебречь.
- Экспериментально получено значение ёмкости конденсатора:

$$C = 5.11 \pm 0.15 \text{ мкФ}$$

Оно близко к номинальному значению 4.7 мкФ.

2. Последовательно подключенные резистор и катушка

- При пропускании переменного тока через цепь с катушкой в ней возникает реактивное сопротивление, а ток сдвигается по фазе относительно напряжения.
- В работе экспериментально доказано, что напряжение на катушке опережает по фазе силу тока на 90° .
- При увеличении частоты сдвиг фазы тока относительно напряжения на всей цепи асимптотически приближается к 90° , а при уменьшении — к 0.
- В предельном случае, когда частота колебаний очень мала, влиянием катушки на цепь можно пренебречь.
- Экспериментально получено значение индуктивности катушки:

$$L = 4.3 \pm 0.2 \text{ мГн}$$

- Оно совпадает с номинальным значением 4.4 мГн в пределах погрешности.