

3.2.5 (4.6). Свободные и вынужденные колебания в электрическом контуре

23 августа 2023 г.

Составители: Мальцев М.А., Копнин С.И.

Цель работы: исследование свободных и вынужденных колебаний в колебательном контуре.

В работе используются: осциллограф АКТАКОМ ADS-6142Н, генератор сигналов специальной формы АКИП-3409/4, магазин сопротивления MCP-60, магазин емкости Р5025, магазин индуктивности Р567 типа МИСП, соединительная коробка с шунтирующей емкостью, соединительные одножильные и коаксиальные провода.

1 Экспериментальная установка

Схема установки для исследования колебаний приведена на рисунке 1.

Колебательный контур состоит из постоянной индуктивности L с активным сопротивлением R_L , переменной емкости C и сопротивления R . Картина колебаний напряжения на емкости наблюдается на экране двухканального осциллографа. Для

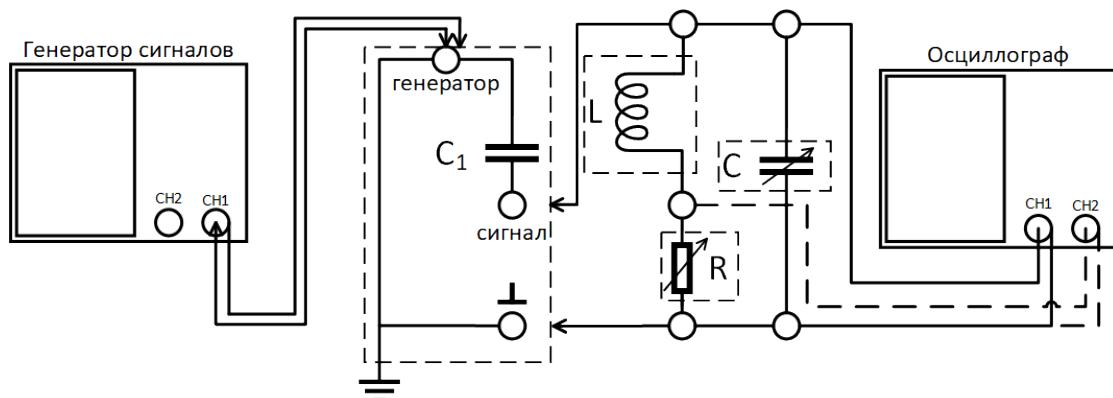


Рис. 1: Схема установки для исследования вынужденных колебаний

возбуждения затухающих колебаний используется генератор сигналов специальной формы. Сигнал с генератора поступает через конденсатор C_1 на вход колебательного контура. Данная емкость необходима чтобы выходной импеданс генератора был много меньше импеданса колебательного контура и не влиял на процессы, проходящие в контуре.

Установка предназначена для исследования не только возбужденных, но и свободных колебаний в электрической цепи. При изучении свободно затухающих колебаний генератор специальных сигналов на вход колебательного контура подает периодические короткие импульсы, которые заряжают конденсатор C . За время между последовательными импульсами происходит разрядка конденсатора через резистор и катушку индуктивности. Напряжение на конденсаторе U_C поступает на вход канала 1(Х) электронного осциллографа. Для наблюдения фазовой картины затухающих колебаний на канал 2(Y) подается напряжение с резистора R (пунктирная линия на схеме установки), которое пропорционально току I ($I \propto dU_C/dt$).

При изучении возбужденных колебаний на вход колебательного контура подается синусоидальный сигнал. С помощью осциллографа возможно измерить зависимость амплитуды возбужденных колебаний в зависимости от частоты внешнего сигнала, из которого возможно определить добротность колебательного контура. Альтернативным способом расчета добротности контура является определение декремента затухания по картине установления возбужденных колебаний. В этом случае генератор сигналов используется для подачи пугов синусоидальной формы.

2 ЗАДАНИЕ

В работе предлагается исследовать параллельный колебательный контур несколькими способами.

1. Изучение свободных колебаний в электрическом контуре
 - a) Определение зависимости периода свободных колебаний контура от емкости
 - b) Определение зависимости логарифмического декремента затухания от сопротивления
 - c) Определение критического сопротивления контура
2. Изучение вынужденных колебаний в электрическом контуре
 - a) Построение резонансных кривых колебательного контура: АЧХ и ФЧХ
 - b) Изучение процесса установления и затуханий колебаний
 - c) Определение декремента затухания колебательного контура по нарастанию колебаний и по их затуханию
3. Определение добротности контура различными способами

2.1 Подготовка приборов к работе

1. Подключите генератор специальных сигналов к входу 1(X) осциллографа.
2. Установите на генераторе специальных сигналов последовательность импульсов. Нажмите кнопку “Pulse”. С помощью интерфейса генератора установите длительность (PullWidth) импульсов 10 мкс, частоту повторения импульсов $\nu = 100$ Гц, а амплитуду сигнала 20 В. Подайте сигнал, нажав на клавишу “Output”
3. Убедитесь, что на осциллографе отображаются периодические импульсы. Для получения статичного изображения нажмите кнопку “Menu” в области “Trigger”, с помощью интерфейса осциллографа выберете Источник синхронизации Кан.1 и вращая ручку плавной настройки синхронизации добейтесь статичной картинки сигнала. (Альтернативно можно воспользоваться кнопкой “Autoset” на осциллографе).
4. Как только удалось получить неподвижную картинку сигнала можно приступить к сборке схемы согласно рис. 1.

2.2 Измерение периодов свободных колебаний

1. Установите на магазине сопротивлений величину $R = 0$ Ом, на магазине индуктивностей $L = 100$ мГн (во время проведения работы это значение должно оставаться постоянным), на магазине емкостей величину $C = 0$ мкФ. Не смотря на то, что на курбелях магазина емкостей стоит нулевое значение, контур сам по себе обладает некоторым минимальным значением емкости C_0 , благодаря которому в контуре реализуются свободные колебания. При этом затухание обеспечивается наличием активного сопротивления в магазине индуктивностей R_L . Получите на экране картину свободных затухающих колебаний с помощью настроек осциллографа или кнопки “Autoset”. При этом на экране осциллографа должен появиться сигнал, который соответствует свободным колебаниям с затуханием.
2. Подберите частоту развертки осциллографа при котором расстояние между импульсами генератора занимает почти весь экран.
3. Измерьте с помощью осциллографа период затухающих колебаний. Это можно провести следующим образом:
 - а) Нажать на кнопку “Cursor”. Убедиться, что выбран тип “Время”, а источник “Кан.1”.
 - б) На экране осциллографа появятся две вертикальные синие линии.
 - в) Управление курсорными линиями осуществляется с помощью сенсорного экрана осциллографа. Для перемещения линии нужно движением пальца ее передвинуть в нужное положение. Также линии можно перемещать с помощью ручки “Multipurpose”.

- d) Установить одну линию на максимуме сигнала, а вторую на соседнем максимуме. Для увеличения точности можно увеличить масштаб горизонтальной развертки.
 - e) В нижнем левом углу экрана осциллографа будут указаны значения соответствующие координатам линий, а так же их разница.
4. По периоду колебаний определите нулевую емкость (C_0) колебательного контура. Это значение является минимальным для магазина емкостей и его необходимо учитывать (прибавлять) при дальнейших расчетах.
5. Изменяя емкость (по курбелям) от 0 мкФ до 0.009 мкФ проведите измерения периодов (5–10 значений).

2.3 Критическое сопротивление и декремент затухания

1. Приняв $L = 100$ мГн, рассчитайте емкость C^* , при которой собственная частота колебаний $\nu_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ составляет 6.5 кГц. Для выбранных L и C^* рассчитайте критическое сопротивление контура R_{cr} по формуле $R_{\text{cr}} = 2\sqrt{L/C^*}$.
2. Установите на магазине емкость, близкую к рассчитанной критической и запишите ее значение. Увеличивая сопротивление R от нуля до R_{cr} , наблюдайте картину затухающих колебаний на экране осциллографа. Определите сопротивление магазина, при котором колебательный режим переходит в апериодический.
3. Установите сопротивление $R \approx 0.05 R_{\text{cr}}$. Получите на экране картину затухающих колебаний. Для расчета логарифмического декремента затухания Θ по формуле

$$\Theta = \frac{1}{n} \ln \frac{U_m}{U_{m+n}} \quad (1)$$

измерьте амплитуды, разделенные целым числом периодов n .

Измерение амплитуды на экране осциллографа проводится следующим образом:

- a) Убедитесь, что осциллограмма отцентрирована по вертикали на нулевое значение.
- b) Нажать на кнопку “Cursor”. Убедиться, что выбран тип “Напряж.”, а источник “Кан. 1”.
- c) На экране осциллографа появятся две горизонтальные синие линии.
- d) Линию (a) установите на нулевой уровень. Перемещая линию (b) определите значения локальных максимумов разделенных целым числом периодов n .
- e) В нижнем левом углу экрана осциллографа будут указаны значения соответствующие координатам линий, а так же их разница.

4. Повторите измерения для 6–8 значений R в интервале $(0.05–0.25) \cdot R_{\text{cr}}$.
5. После проведения измерения зафиксируйте два достаточно различных значения сопротивления R в выбранном диапазоне (например $R_1 = 0.05 \cdot R_{\text{cr}}$ и $R_2 = 0.25 \cdot R_{\text{cr}}$). Эти значения понадобятся для наблюдения вынужденных колебаний.

2.4 Свободные колебания на фазовой плоскости

1. Введите сопротивление $R \approx 0.05 \cdot R_{\text{cr}}$ на магазине. Подайте на канал 2(Y) осциллографа падение напряжения с резистора (на рис. 1 подключение изображено штрихованной линией).
2. Для одновременного наблюдения осцилограмм тока и напряжения свободных затухающих колебаний переведите осциллограф в двухканальный режим. Подберите масштабы по вертикали и частоту развертки по горизонтали так, чтобы оба сигнала были представлены на временном интервале, слегка превышающем период повторения импульсов с генератора.
3. Подберите частоту повторения импульсов на генераторе так, чтобы расстояние между импульсами было порядка характерного времени затухания свободных колебаний (эта частота составляет 400-500 Гц).
4. Для наблюдения затухающих колебаний на фазовой плоскости отключите развертку по времени: для этого нажмите кнопку “Display”, выберите “Режим XY”, после чего нажмите кнопку “Вкл. Тест”. Меняя чувствительность каналов, подберите масштаб спирали, удобный для измерений. Зарегистрируйте спираль. При том же значении C , что и в секции 2.3 п. 2, наблюдайте за изменением спирали при увеличении сопротивления от 0.05 до $0.25 \cdot R_{\text{cr}}$.

Для определения декремента затухания Θ измерьте координаты пересечения витков спирали с одной из осью координат, разделенные целым числом периодов n , для значений сопротивлений, выбранных в секции 2.3 в п. 5.

2.5 Исследование резонансных кривых

1. Для наблюдения вынужденных колебаний переведите осциллограф в одноканальный режим просмотра (выключить режим XY).
2. Переведите генератор специальных сигналов в режим подачи синусоидального сигнала.
3. Выставьте значение емкости $C*$ из секции 2.3 п.2, а сопротивление R_1 из значений зафиксированных в секции 2.3 п. 5.
4. С помощью переходника и коаксиальных кабелей подайте сигнал с генератора одновременно на колебательный контур и на канал 2 осциллографа (см.

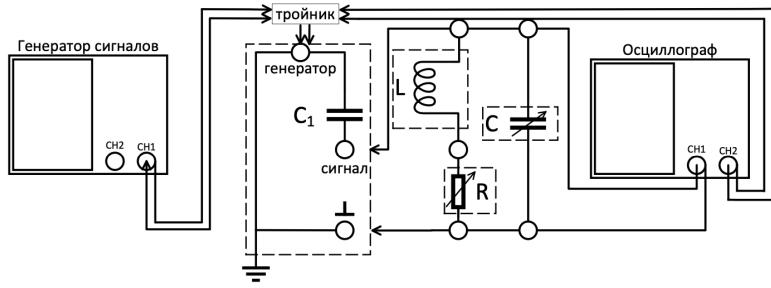


Рис. 2: Схема установки для исследования АЧХ и ФЧХ

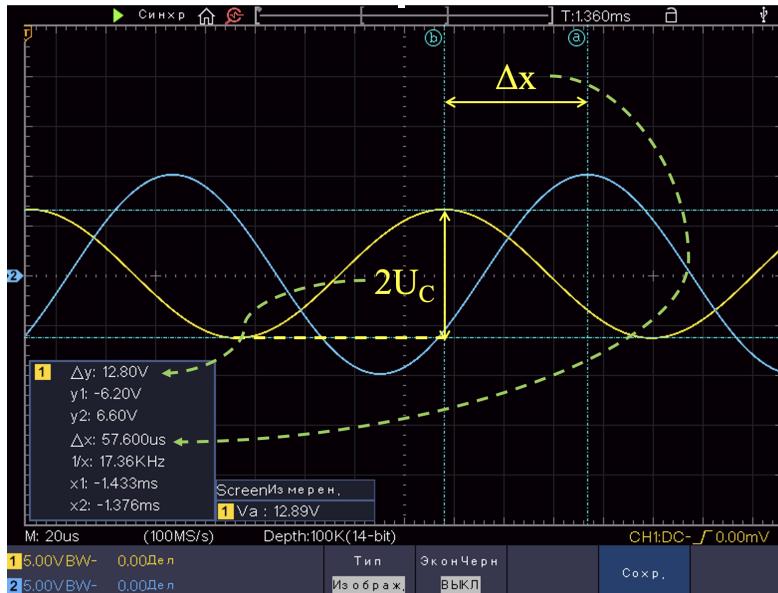


Рис. 3: Осциллограмма вынужденных колебаний. Желтая кривая — зависимость напряжения на конденсаторе. Синяя кривая — выходящий сигнал генератора

(рисунок 2). Добейтесь того чтобы на экране осциллографа можно было наблюдать одновременно два сигнала: сигнал, взятый с колебательного контура, на первом канале и первоначальный сигнал на втором канале.

5. Убедитесь, что на экране осциллографа при частотах близких к резонансным наблюдается устойчивый синусоидальный сигнал.
6. Изменяя частоту генератора вблизи резонансной частоты и наблюдая синусоиду на первом канале на экране осциллографа, убедитесь, что амплитуда колебаний максимальна при достижении резонансной частоты. Определите ее значение.
7. Снимите АЧХ и ФЧХ колебательного контура вблизи резонанса. Измерения

следует проводить следующим образом:

- a) настроить генератор на резонансную частоту;
- b) определить амплитуду резонансной частоты $U_{C,res}$
- c) определить диапазон частот $\Delta\nu$, в пределах которых амплитуда вынужденных колебаний уменьшается до уровня $0.4 \cdot U_{C,res}$;
- d) разбить этот интервал $\Delta\nu$ на такие шаги $\delta\nu$, чтобы при отклонении от резонанса в каждую сторону удалось провести не менее 10 измерений.

Рекомендация. На рис. 3 приведена характерная осциллограмма для наблюдения вынужденных колебаний в колебательном контуре. Жёлтая синусоида соответствует вынужденным колебаниям в контуре. Синяя синусоида — колебаниям на выходе генератора. **Важно(!):** убедитесь, что по вертикале оба синусоидальных сигнала отцентрированы на нулевом уровне. Изменяя частоту сигнала генератора снимите зависимость напряжения U_C на конденсаторе и сдвиг фазы $\Delta\varphi$ от этой частоты. Учитывайте, что $\Delta\varphi = 2\pi\nu \cdot \Delta x$. Обратите внимание, что временной сдвиг на экране осциллографа обозначается символом Δx . Этот сдвиг можно достаточно точно измерить с помощью "курсорных линий" осциллографа для оси X. Так, например, на рис. 3 на экране осциллографа в левом нижнем углу $\Delta x = 57.6\text{мкс}$. При определении U_C для повышения точности следует измерять удвоенную амплитуду U_C , для этого также можно использовать "курсорные линии" для вертикальной развертки или измерять по делениям экрана осциллографа.

8. Установите на магазине сопротивлений значение соответствующее второму сопротивлению R_2 из секции 2.3 п. 5 и повторите измерения.

2.6 Процессы установления и затухания

1. Верните на магазине сопротивлений первое значение R_1 из п. 5.
2. Установите резонансную частоту на генераторе.
3. Нажмите кнопку "Burst" на панели генератора.
4. Установите период повторения сигнала 20 мс, а количеством периодов "Period" 15. Для этого в правом вертикальном меню нажмите кнопку с индикацией "1/2" и ручкой плавной регулировки установите 15 циклов. Для возврата в исходное вертикальное меню можно нажать кнопку с индикацией "2/2".
5. С помощью ручки регулировки развертки получите характерную картинку установления и затухания колебаний для одного цуга. Убедитесь, что огибающая затухающих колебаний это перевернутая огибающая нарастающего участка.
6. Для расчета добротности по скорости нарастания амплитуды измерьте амплитуды двух колебаний U_k и U_{k+n} , разделенных целым числом периодов n , и

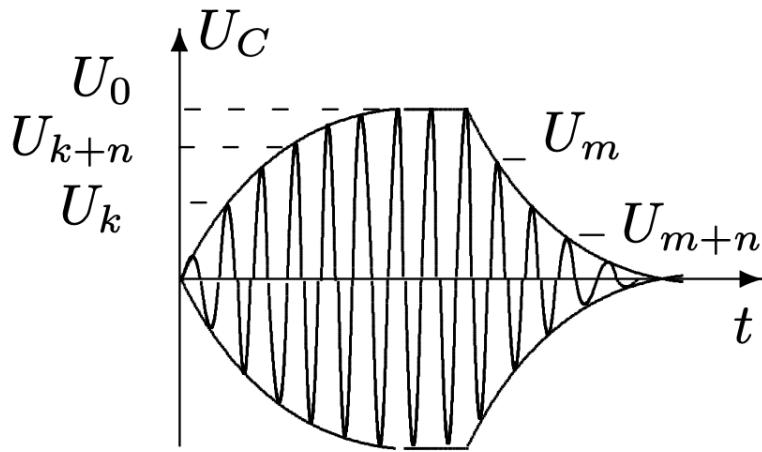


Рис. 4: Нарастание и затухание вынужденных колебаний

амплитуду установившихся колебаний U_0 (см. рис. 4). Расчет будет тем точнее, чем больше отличаются друг от друга все три амплитуды.

7. Рассчитайте логарифмический декремент затухания по полученным данным с помощью формулы

$$\Theta = \frac{1}{n} \ln \frac{U_0 - U_k}{U_0 - U_{k+n}}. \quad (2)$$

Проведите измерения для 3–4-х пар амплитуд, если это возможно.

8. Для определения добротности по скорости затухания измерьте две амплитуды, разделенные целым числом периодов (для 3–4-х пар).
9. Рассчитайте логарифмический декремент затухания для затухающего участка колебаний по формуле (1).
10. Проведите измерения пп. 6–9 для сопротивления R_2 .
11. Верните сопротивление R_1 . Сместите частоту генератора с резонансного значения и получите на экране картину биений. Зафиксируйте в отчете и объясните данную картину.
12. Отключите приборы от сети и разберите схему.
13. Измерьте активное сопротивление R_L и индуктивность L магазина индуктивностей с помощью измерителя LCR на частотах 50 Гц, 500 Гц и 1500 Гц.

2.7 Обработка результатов

1. Рассчитайте экспериментальное значение периодов по результатам измерений из секции 2.2 п. 5 и теоретические по формуле $T = 2\pi\sqrt{LC}$. Постройте график $T_{\text{exp}} = f(T_{\text{theor}})$. Оцените погрешности и сравните результаты.
2. По результатам измерений из секции 2.3 п. 5 рассчитайте значения логарифмического декремента затухания Θ и сопротивление контура $R_{\Sigma} = R + R_L$.
Постройте график в координатах $1/\Theta^2 = f[1/(R_{\Sigma}^2)]$. Приняв обозначения $1/\Theta^2 = Y, 1/(R_{\Sigma}^2) = X$, можно показать, что $R_{\text{cr}} = 2\pi\sqrt{\Delta Y/\Delta X}$
Определите критическое сопротивление R_{cr} по наклону графика вблизи начала координат и оцените погрешность.
3. Рассчитайте теоретическое значение $R_{\text{cr}} = 2\sqrt{L/C}$ и сравните с измеренным.
4. Рассчитайте добротность контура $Q = \pi/\Theta$ для максимального и минимального значений Θ по картине затухающих колебаний.
5. Рассчитайте добротность $Q = \pi/\Theta$ по спирали на фазовой плоскости.
6. Рассчитайте теоретическое значение добротности через параметры контура L , C и R .
7. Постройте на одном графике резонансные кривые в координатах $U/U_0 = f(\nu/\nu_0)$, где U_0 – напряжение при резонансной частоте ν_0 .

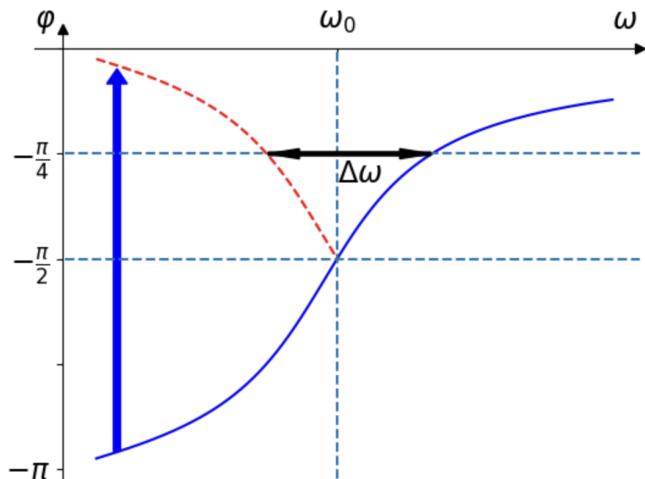


Рис. 5: Схема расчета добротности контура из ФЧХ

8. Определите добротность контура по формуле $Q = \omega_0 / (2\Delta\Omega)$, где $2\Delta\Omega$ – ширина резонансной кривой, измеренная на уровне $f(1)/\sqrt{2}$.
9. Для того чтобы определить добротность контура по ФЧХ, нужно провести следующие действия (смотри рис. 5). Постройте зависимость разности фаз от циклической частоты сигнала. Отметьте горизонтальной линией уровень, соответствующий разности фаз $-\pi/2$. Зеркально отразите нижнюю часть зависимости относительно проведенной горизонтальной линии (на рисунке отмечено красной пунктирной линией). Измерьте $\Delta\omega$ на уровне $-\pi/4$, как изображено на рисунке 5. Добротность контура вычисляется по формуле

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}. \quad (3)$$

10. Постройте на одном графике ФЧХ при различных значениях сопротивления. По полученным изображениям рассчитайте добротность контура.
11. Рассчитайте добротность контура по скорости нарастания и затухания колебаний.
12. Оцените все погрешности для определения добротности различными способами.
13. Сведите все результаты расчетов добротности в таблицу:

R	Свободные колебания			Вынужденные колебания			
	$f(L, C, R)$	$f(\Theta)$	Сpirаль	АЧХ	ФЧХ	Нарастание	Затухание
$R_1 =$							
$R_2 =$							