

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет

Кафедра общей физики

Шпомер Никита Андреевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Сравнение различных методов измерения добротности параллельного
RLC-контура**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19311

Научный руководитель:

к.т.н. Астрелин В. Т.

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Руменских М. С.

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В. Т.

Итоговая оценка

« _____ » _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью данной работы было изучение методов определения добротности RLC контура. В данной работе была исследована добротность параллельного колебательного контура. Необходимость рассмотрения методов возникает в связи с тем, что добротность характеризует полосу пропускания сигнала и коэффициент затухания, который качественно определяет поведение простых затухающих колебаний в зависимости от его значения. Колебания могут быть незатухающими ($\zeta = 0$), слабо затухающими ($\zeta \ll 0$), критически затухающие ($\zeta = 1$) сверх затухающими ($\zeta \gg 1$). Это налагает некоторые требования к контуру, в зависимости от целей его использования. Измерено значение резонансной частоты контура. Были измерены значение добротности с помощью различных методов. Рассчитаны погрешности. Выявлены факторы, влияющие на результат измерений.

Оглавление

1. Введение

4

2

2. Теоретическая часть	6
2.1.1 Добротность	6
2.1.2 Свободные затухающие колебания	7
2.1.3 Вынужденные колебания в параллельном контуре, резонанс токов	10
2.2 Экспериментальная часть	12
3. Заключение	13
4. Литература	14

1. Введение

Колебательный контур является представителем резонансных колебательных систем, играющих важную роль в большинстве разделов физики – в механике это различного типа маятники и звуковые резонаторы, в электродинамике –

колебательные контуры, закрытые и открытые резонаторы с распределенными параметрами, в оптике – лазерные резонаторы, эталоны Фабри-Перо и т.д. Принципы описания всех колебательных систем носят общий характер, так что теория колебаний стала самостоятельным разделом физики. В теории колебаний выделяются два класса явлений – явления в линейных и нелинейных колебательных системах. Линейными называются такие системы, параметры которых не зависят от амплитуды колебаний. Для электрических колебательных контуров независимыми от амплитуды токов и напряжений должны оставаться такие величины, как индуктивность L , емкость C и сопротивление R .

Резонансные системы имеют два важных свойства:

1. Свойство избирательно реагировать на внешние источники сигналов, выделяя только те из них, частоты которых совпадают с собственной частотой колебательной системы;
2. Свойство запасать энергию колебаний, возбужденных внешним источником, поддерживая колебания в течение определенного времени после выключения внешнего источника.

Колебательный контур характеризуется двумя основными параметрами: частотой собственных (резонансных) колебаний ω_0 и добротностью Q , которые можно выразить через параметры системы.

Имея дело с колебательными контурами, существует множество причин, по которым важна добротность. Обычно высокий уровень Q является полезным, но в некоторых устройствах может потребоваться определенный уровень Q .

- **Полоса пропускания:** с увеличением добротности уменьшается полоса пропускания настроенного фильтра цепи. Видно, что с увеличением добротности полоса пропускания уменьшается, а общий отклик

настроенной схемы увеличивается. Во многих случаях требуется высокая добротность, чтобы гарантировать достижение требуемой степени селективности.

- **Широкая полоса пропускания:** во многом радиочастотном оборудовании требуется широкая полоса пропускания. Для некоторых форм модуляции требуется широкая полоса пропускания, а для других требуются фиксированные фильтры. Хотя может потребоваться сильное подавление нежелательных сигналов, существует конкурирующее требование для широкой полосы пропускания. Соответственно, во многих устройствах требуется определенный уровень Q для удовлетворения требований к широкой полосе пропускания и адекватному подавлению нежелательных сигналов.
- **Фазовый шум генератора:** любой генератор генерирует так называемый фазовый шум. Это случайные сдвиги фазы сигнала. Это проявляется в виде шума. Как и следовало ожидать, этот шум нежелателен, поэтому его необходимо минимизировать. Конструкция генератора может быть адаптирована для уменьшения этого несколькими способами, главным из которых является повышение добротности схемы настроенного генератора.
- **Общие паразитные сигналы:**
Настроенные схемы и фильтры часто используются для удаления паразитных сигналов. Чем избирательнее фильтр и чем выше уровень Q , тем лучше схема сможет удалить паразитные сигналы.
- **Сигнал:** по мере увеличения добротности резонансного контура потери уменьшаются. Это означает, что любое колебание, возникающее в цепи, просуществует больше времени, прежде чем исчезнуть. На самом деле это идеально для использования в схеме генератора, потому что его становится легче настраивать и поддерживать колебание, поскольку в схеме теряется меньше энергии.

В связи с этим важно уметь точно оценить параметр Q колебательной системы чтобы в полной мере охарактеризовать ее и возможности ее применения. Этому и посвящена данная работа.

Цель работы:

- 1) Изучить методы определения Q в RLC цепи
- 2) Определить добротность параллельного колебательного контура.

1. $Q = \frac{L/C}{R}$
2.1 По затуханию в e-раз
2.2 По числу осцилляций на экране при затухании
3. $Q = \frac{U_{рез}}{U_{ген}}$
4. По ширине АЧХ
5. По сдвигу фаз напряжений

2. Теоретическая часть

2.1.1 Добротность

Концепция Q, фактора качества, была впервые предложена инженером по имени К.С. Джонсон из инженерного отдела Western Electric Company в США. Он оценивал качество работы различных катушек. В ходе своих исследований он разработал концепцию Q. Выбор буквы Q был связан с тем, что все остальные буквы алфавита были взяты, а не из-за фактора добротности термина.

Добротность - это понятие, применимое во многих областях физики и техники. Он обозначается буквой Q и может называться Q-фактором.

Фактор добротности - это безразмерный параметр, который указывает потери энергии в резонансном элементе, который может быть любым, от механического маятника, элемента в механической конструкции или внутри электронной цепи, такой как резонансная цепь.

Хотя добротность элемента связана с потерями, она напрямую связана с полосой пропускания резонатора по отношению к его центральной частоте.

Q указывает потери энергии относительно количества энергии, хранящейся в системе. Таким образом, чем выше Q, тем ниже скорость потери энергии, и, следовательно, колебания будут затухать медленнее.

2.1.2 Свободные затухающие колебания

Свободные колебания происходят в замкнутой цепи без вынуждающей силы (рис. 1).

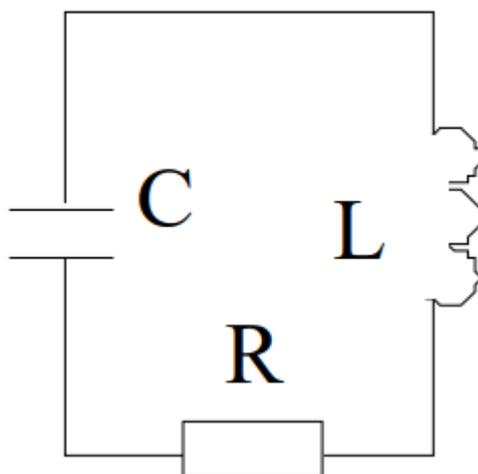


Рис. 1. Колебательный контур (свободные колебания)

Согласно второму закону Кирхгофа для такой цепи можно написать:

$$RI + U_C = -Ldi/dt$$

Выражая U_C через заряд q , получим уравнение

$$RI + \frac{q}{C} + L \frac{dI}{dt} = 0$$

Дифференцируя по времени и учитывая равенство $I = \frac{dq}{dt}$, получаем:

$$L \frac{d^2I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = 0$$

Разделив на L и вводя обозначения

$$\delta = \frac{R}{2L} \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

получим общее уравнение для свободных колебаний линейной резонансной системы:

$$I'' + 2\delta I' + \omega_0^2 I = 0$$

где параметр δ называется затухание, а параметр ω_0 - собственная частота.

Оно решается подстановкой $I = Ae^{i\omega t}$, которая приводит к характеристическому уравнению

$$\omega^2 + 2i\omega\delta + \omega_0^2 = 0$$

с решением $\lambda_{1,2} = i\omega \pm \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$

Общее решение имеет две составляющие

$$I = Ae^{i\omega_1 t} + Be^{i\omega_2 t}$$

Константы A и B определяются начальными данными задачи. Характер начальных данных определяется конкретной физической системой.

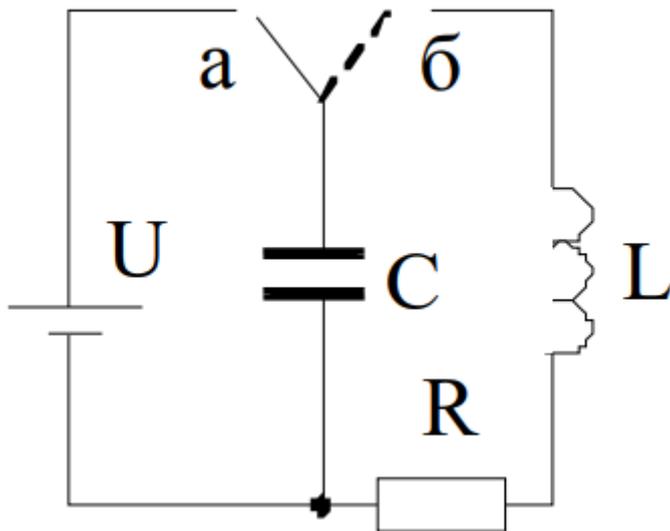


Рис 2. Схема возбуждения свободных колебаний в колебательном контуре

Частный пример схемы для возбуждения свободных колебаний в колебательном контуре приведен на рис.2

$$I = i \frac{U_0}{L\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} e^{-\delta t} \frac{e^{i\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t} - e^{-i\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t}}{2} \quad (1)$$

Если бы колебательный контур состоял только из идеальных (без потерь) реактивных элементов (индуктивности L и емкости C), то переход энергии из электрической в магнитную и обратно совершался бы без потерь, а в контуре существовали бы незатухающие свободные колебания с собственной частотой:

$$\omega_0 = 2\pi f = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Наличие в схеме активного элемента R приводит к тому, что часть энергии за каждый период переходит в тепло и колебания затухают с некоторой постоянной времени τ . Роль частоты в уравнении (1) теперь играет величина

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}.$$

Если затухание мало, т.е. $\delta < \omega_0$ то мы получаем уравнение слабо затухающих колебаний в виде

$$I = -\frac{U_0}{L\omega_p} e^{-\delta t} \sin(\omega_p t) = -I_0 e^{-\delta t} \sin(\omega_p t) \quad (2)$$

При этом резонансная частота приближается к частоте собственных колебаний:

$$\omega_p = \omega_0 \left(1 - \frac{\delta^2}{2\omega_0^2} \right)$$

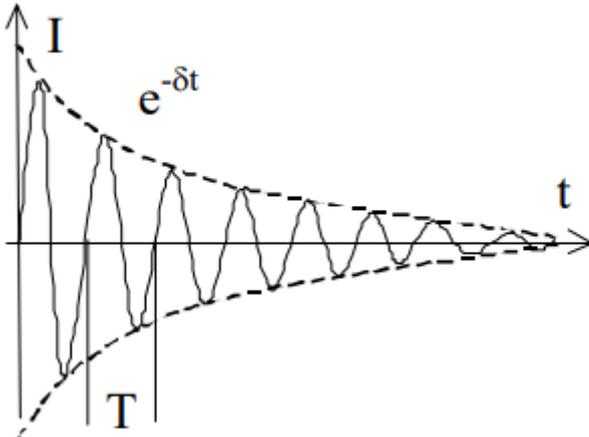


Рис. 3. Свободные затухающие колебания

Введем понятия добротности Q и логарифмического декремента затухания γ контура.

$$\gamma = \delta T = \frac{1}{k} \ln \frac{I_n}{I_{n+1}} \quad (3)$$

Из (2) видно, что величина δ обратно пропорциональна времени, за которое амплитуда колебаний уменьшается в e раз. Из (3) следует, что декремент затухания γ показывает уменьшение амплитуды за период колебания:

$$\gamma = \delta T = \frac{2\pi\sigma}{\omega}$$

С логарифмическим коэффициентом затухания однозначно связан другой – более распространенный параметр, характеризующий колебательную систему, – ее добротность Q . Добротность контура Q определяется соотношением

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{p}{R}, \text{ где } p = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Физический смысл добротности заключается в отношении запасенной в контуре энергии к энергии потерь за период колебания $Q = \omega \frac{W_0}{\Delta W}$, откуда можно найти связь добротности с другими параметрами контура

$$Q = \frac{\pi}{\gamma} = \frac{\pi}{\delta T} = \frac{\omega}{2\sigma} = \omega \frac{L}{R}$$

Экспериментально добротность определяется по резонансной кривой как отношение резонансной частоты ω_p к полосе частот $2\Delta\omega$, определяемой на уровне $U_{1,2} = \pm U_p/\sqrt{2}$:

$$Q = \frac{\omega_3}{2\Delta\omega} = \frac{f_3}{2\Delta f}$$

2.1.3 Вынужденные колебания в параллельном контуре, резонанс токов

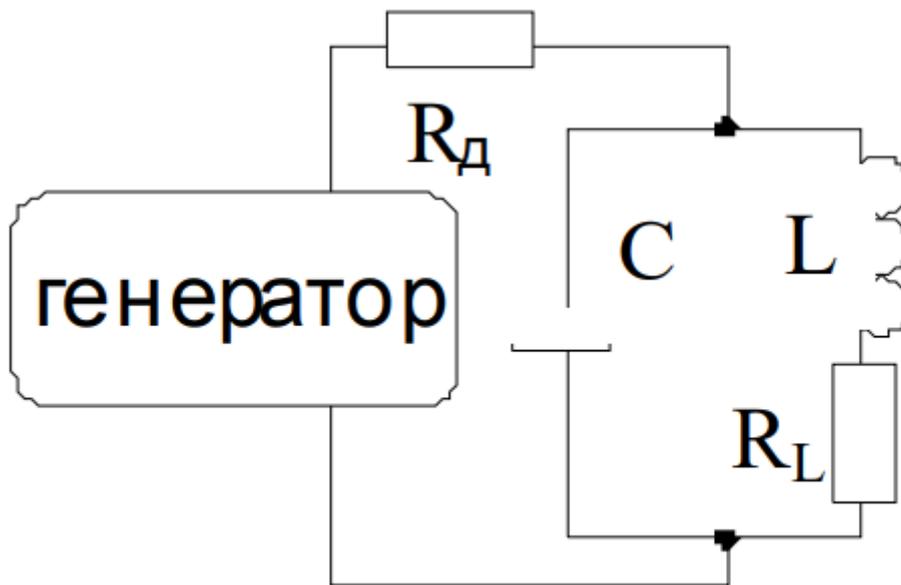


Рис 4. параллельный колебательные контура

Схема подключения параллельного представлена на рис.4. Из-за комплексного характера нагрузки ток генератора является комплексной величиной. Поэтому, модуль тока I может оказаться меньше не только суммы

модулей токов индуктивной и емкостной ветвей контура, но и каждого из них в отдельности. Именно это и происходит при резонансе в параллельном контуре: токи в индуктивной и емкостной ветвях контура в Q раз больше, чем ток, потребляемый от генератора тока. Поэтому резонанс в параллельном контуре называется резонансом токов. Комплексное сопротивление параллельного контура равно

$$Z = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(R_L + i\omega L)1/i\omega C}{R_L + i(\omega L - \frac{1}{i\omega C})} \approx \frac{L/C}{R_L + i(\omega L - \frac{1}{i\omega C})}$$

Мы пренебрегли величиной R_L в числителе, поскольку она в Q раз меньше индуктивного сопротивления, но этого нельзя делать в знаменателе, поскольку при резонансе величина в скобках стремится к нулю.

Условие резонанса для параллельного контура то же, что и для последовательного – равенство реактивных сопротивлений ветвей с L и C :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$$

Таким образом, при резонансе сопротивление контура становится чисто активным и равным

$$R_3 = \frac{L/C}{R_L} = \frac{p^2}{R_L}$$

Сопротивление R_L отдельного физического эквивалента в контуре не имеет, а является комбинацией волнового сопротивления ρ и сопротивления потерь R_L . Поэтому оно не составляет отдельной ветви параллельного контура и не отвечает в себя ток.

Добротность параллельного контура

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R_L} = \frac{1}{R_L \omega_0 C} = \frac{R_3}{p} = R_3 \sqrt{\frac{C}{L}}$$

2.2 Экспериментальная часть

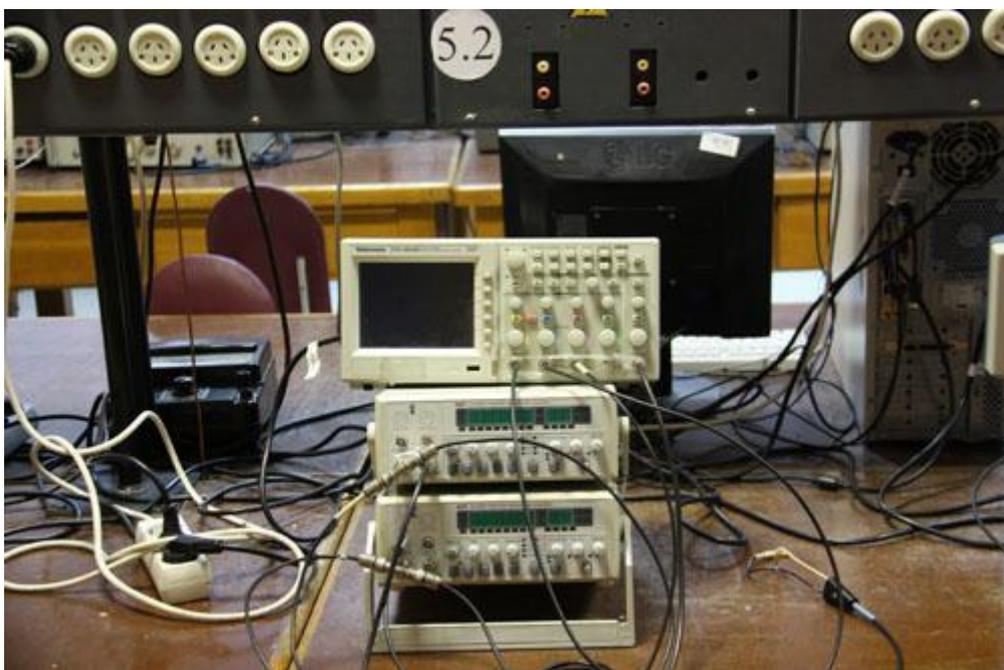


Рис 5. Оборудование параллельного колебательного контура

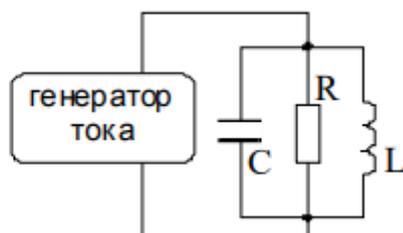


Рис 6. Параллельный колебательный контур

Было установлена резонирующие U

Для перехода в режим затухающих колебаний на генераторе была установлена прямоугольная форма сигнала и было выставлено большое значение частоты. Были зафиксирована первая осцилляция с максимальной амплитудой и осцилляция с амплитудой в e раз меньше. Так же было подсчитано количество осцилляций.

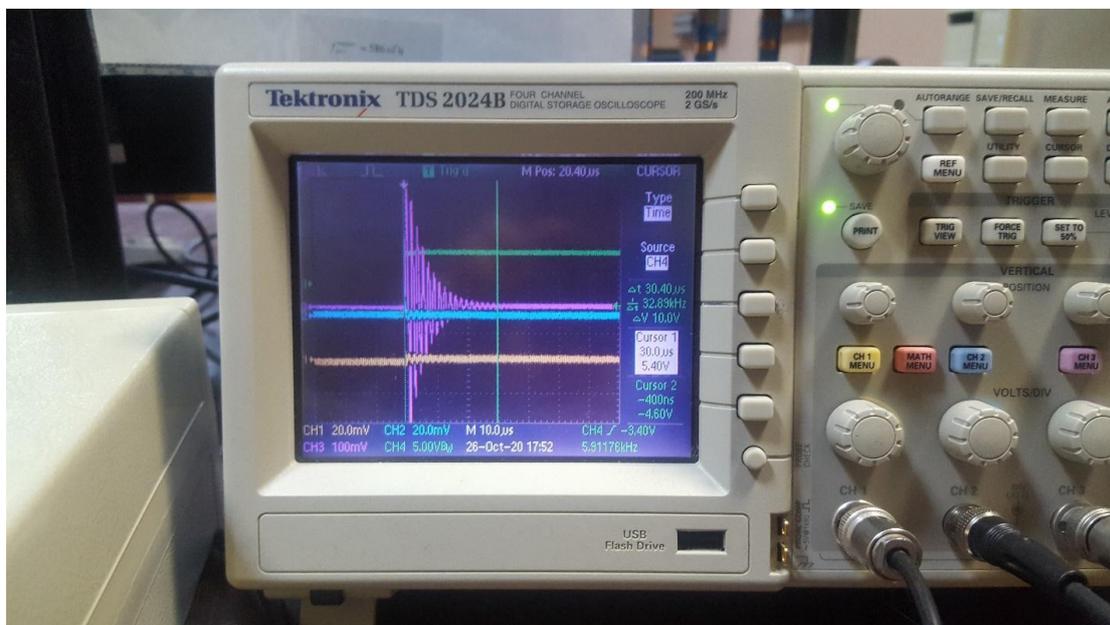


Рис 7. Затухающие колебания

За счёт курсоров был определены сдвиги фаз и сами фазы. А также была посчитана ширина спектра

3. Заключение

- 1) Были изучены методы расчета добротности в RLC контуре.
- 2) Была определена добротность контора различными методами.
- 3) Было определено что 3 метод вычисления добротности по отношению резонансного напряжение и напряжение генератора обладает наибольшей точностью.

$1. Q = \frac{L/C}{R}$	≈ 18
2.1 По затуханию в e -раз	$\approx 17,6 \pm 30\%$ $\equiv N \pm 2 - 5\%$

2.2 По числу осцилляций на экране при затухании	
3. $Q = \frac{U_{рез}}{U_{ген}}$	= 18,4 ± 1%
4. По ширине АЧХ	= 16
5. По сдвигу фаз напряжений	= 20

4. Литература

1. Л. Н. Вячеславов, В. Л. Курочкин, В.Б.Рева, Л. Н. Смирных Электрические цепи: Новосиб.гос.ун-т, 2008, ___ с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. т.2